



Karelia-ammattikorkeakoulu  
Rakennusinsinööri (AMK)

# FEM-analyysi TB-kerrostalon jäykistyslaskennassa

Antti Hult

Opinnäytetyö, Joulukuu 2021

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)

**OPINNÄYTETYÖ****Joulukuu 2021****Rakennustekniikan koulutus**

Tikkarinne 9

80200 JOENSUU

+358 13 260 600

Tekijä(t)

Antti Hult

Nimeke

FEM-analyysi TB-kerrostalon jäykistyslaskennassa

Toimeksiantaja

Karelia-AMK, Laaturakenne Oy

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan TB-kerrostalon jäykistystä FEM-laskennassa ja käsinlaskennassa. Tarkasteltavat FEM-laskentaohjelmat ovat FEM-Design 3D-structure- ja Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022 -ohjelmat. Opinnäytetyö esittelee ohjelmien ja käsin laskennan prosessit ja vertaa niitä toisiinsa. Opinnäytetyön ohessa tehdään myös yritykselle käyttöohjeet FEM-Design 3D-Structure ohjelmaa varten. Tarkastelu tehdään teräsbetoni rakenteille, tarkastelussa on BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 ja elementtisuunnittelu.fi:n asuinkeuhkoston mallilaskelmat. Käsin laskennassa käytetään BY202:n käsinlaskentaa, jonka lisäksi tarkastellaan Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2:n yhtälöiden tuloksia samoille rakenteille

Opinnäytetyössä keskitytään rakennemallin luomiseen, kuormien jakautumiseen seinille, levynä toimivan ontelolaataston saumavoimiin sekä seinien liitosvoimiin ja liukumisvarmuuteen. Kirjallisen opinnäytetyön osalta käydään läpi eri menetöt ja verrataan niitä ja niiden tuloksia toisiinsa.

Kieli

suomi

Sivuja 27

Liitteet 8

Liitesivumäärä 41

Asiasanat

FEM-Design 3D-Structure, Rakennusten jäykistäminen seinillä, rakennemallin luominen, kuormien jakautuminen seinille, levynä toimivan ontelolaataston saumavoimat, seinien liitosvoimat, seinien liukumisvarmuus



**THESIS**

**December 2021**

Degree Programme in Construction Engineering

Tikkarinne 9

80200 JOENSUU

FINLAND

+ 358 13 260 600

Author (s)

Antti Hult

Title

Usage of FEM-Analysis for Stiffening of RC Buildings

Commissioned by

Karelia UAS, Laaturakenne Oy

Abstract

In this thesis, a RC-building was examined with FEM-calculation programs and with hand calculations. The examined programs were FEM-Design 3D-structure and Autodesk Robot Structural Analysis 2022. The thesis presents the processes of programs and hand calculations and compares them with each other. The goal was also to make a manual for a company about the FEM-Design 3D-Structure program. The review was done for reinforced concrete structures, the thesis reviews BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja part 3, 1992 and elementtisuunnittelu.fi:s asuinkerrostalon example calculations. BY 202 calculation was used for manual calculations, in addition calculations from Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 equations were made for the same structures.

The focus of the thesis was on creating the model of a structure, division of loads to walls, seam forces of hollow core slabs acting as single slab and bonding joint forces and sliding reliability of the walls. The written part of the thesis is about the methods and their comparison.

Language

Finnish

Pages 27

Appendices 8

Pages of Appendices 41

Keywords

FEM-Design 3D-Structure, Stiffening, structure model, division of loads to walls, seam forces, joint forces, sliding reliability

# Sisältö

1	Johdanto .....	1
2	Jäykistysjärjestelmät .....	1
2.1	Kuormien jakautuminen jäykistäville pystyrakenteille .....	1
2.2	Mastojäykistys .....	2
2.3	Kehäjäykistys .....	2
2.4	Levyjäykistys .....	2
3	Mallinnusohjelmat.....	2
3.1	FEM-mallinnus.....	2
3.2	BIM-mallinnus .....	3
3.3	Mallinnusohjelmat.....	3
4	Autodesk Robot Structural Analysis 2020 .....	4
4.1	Rakennemallin luominen.....	4
4.2	Kuormien jakautuminen seinille.....	4
4.3	Sauma- ja liitosvoimat .....	4
5	FEM-Design 3D-Structure .....	4
5.1	Rakennemallin luominen.....	4
5.2	Kuormien jakautuminen seinille.....	5
5.3	Seinien liitosvoimat .....	5
5.4	Levynä toimivan ontelolaataston saumavoimat .....	5
6	Käsinlaskenta .....	6
6.1	Mallilaskelmat .....	7
6.2	Rakennuksen jäykistys.....	7
6.3	Kuormat .....	8
6.4	Siirtymä ja kiertymä.....	9
6.5	Vaakavoimien jakautuminen jäykistäville rakenneosille.....	10
6.6	Kiertyvät rakenteet.....	11
6.7	Sisäisten leikkausvoimien huomioiminen .....	13
6.8	Ontelolaataston saumavoimat .....	17
6.9	Seinien liitosvoimat käsinlaskennassa.....	19
7	Tulokset.....	21
7.1	BY202 mallin tulosvertailu.....	22

7.2	Levynätoimivan ontelolaataston saumavoimat käsin laskennassa.....	23
7.3	Seinäelementtien saumavoimat BY202 -kirjan esimerkkilaskelmassa.....	24
8	Pohdinta.....	25
9	Lähteet.....	27

## Liitteet

Liite 1 BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992  
esimerkkilaskelman tulostarkastelu

Liite 2 Elementtisuunnittelu.fi. 2010. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelman  
tulostarkastelu

Liite 3 BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu  
kiertymättömälle rakenteelle

Liite 4 BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu  
kiertyvälle rakenteelle

Liite 5 BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu  
kiertyvälle rakenteelle Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 mukaiset  
leikkausvoimat huomioiden

Liite 6 Elementtisuunnittelu.fi. 2010. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelman  
tarkastelu kiertyvälle rakenteelle Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2  
mukaiset leikkausvoimat huomioiden

Liite 7 Elementtisuunnittelu.fi asuinkerrostalon mallilaskelmalla seinien väliset  
saumavoimat kerroksittain BY202 mallissa

Liite 8 Opinnäytetyön ohessa tehty ohje FEM-Design 3D-Structureen

## 1 Johdanto

Tavoitteena työllä on vertailla kahta eri tietokonemallinnusohjelmaa sekä kahta eri kasinlaskenta mallia betonielementtirunkoisen kerrostalon jäykistyslaskennassa. Ensimmäinen kasinlaskenta malli on BY202-kirjan esim. 2.1 malli, jossa ei oteta huomioon muuta kuin seinien pituus jäykkyyden määrittämisessä. Toinen on Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 Jäykistysmastojen kuormitusten laskenta -teoksen malli, joka käsittelee teräsbetoniseiniä, vaikka onkin teräsrakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen tarkoitettua materiaalia. Liitteen L5.2 laskelmat ottavat huomioon betonin lujuusluokan, maston korkeuden ja seinien paksuudet.

Opinnäytetyössä pyritään valitsemaan suhteellisen yksinkertaisia rakenteita, joista tehdään laskelmat käsin ja verrataan niitä ensin Autodesk Robot Structural Analysis 2022- ohjelman tuloksiin minkä jälkeen näitä kahta verrataan FEM-Design 3D-Structuren prosessiin ja tuloksiin. Lisäksi opinnäytetyössä pyritään vertailemaan Autodesk Robot Structural Analysis 2022 ja FEM-Design 3D-Structure -ohjelmia. FEM-mallinnuksen ja käsin laskennan muuttujien määrä pyritään minimoimaan yksinkertaistamalla malleja tai monimutkaistamalla kasinlaskentaa. Esimerkiksi muuttamalla mallista välipohjalaatta äärettömän jäykäksi, jos kasinlaskenta ei huomioi välipohjalaattaa mitenkään. Tällä keinolla pyritään todentamaan FEM-mallinnusta. Työssä myös pyritään todentamaan FEM-mallinnusta, monimutkaistamalla kasinlaskentaa huomioimalla laskelmissa seinien sisäiset leikkausvoimat.

Opinnäytetyön yhteydessä tehtiin liitteeksi ohje FEM-Design 3D-Structure ohjelmaan. Raportti osiossa käydään suurpiirteisesti läpi FEM-Designin toimintaa. Laskelmien ja ohjelmien tulokset ovat sijoitettu raporttiosion loppuun. Liitteenä olevasta ohjeesta käydään läpi työkalut, joilla saavutettiin opinnäytetyön tulokset, joita vertaillaan Autodesk Robotin tuloksiin ja kasinlaskentaan. Liitteenä myös tulokset laskelmista ja ohjelmista (Liitteet 1 ja 2).

## 2 Jäykistysjärjestelmät

### 2.1 Kuormien jakautuminen jäykistäville pystyrakenteille

Jäykistysjärjestelmä siirtää rakennukseen kohdistuvat tuulikuormat sekä rakenteiden vinouden, epäkeskisyyden ja maanpaineen aiheuttamat vaakakuormat perustuksille ja maaperälle. Tapauskohtaisia vaakakuormia on pitkäaikaismuodonmuutosten, kutistuman ja viruman aiheuttamat kuormitukset. Vaakakuormia ovat myös jännevoimien, lämpötilan, nosturi ja lippurakenteiden aiheuttamat kuormat. Lisäksi vaakakuormia aiheuttaa törmäys ja jarrukuormat ja toisen kertaluvun vaakakuormat. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

Jäykistysjärjestelmiä suunniteltaessa on huomioitava jäykistysjärjestelmien kapasiteetti, rakennuksen ja sen osien muodonmuutokset ja rakenteen staattinen tasapaino. Lisäksi jatkuva sortuma estetään. Asennusvaiheen jäykistyksen on oltava toimiva ja rakennuksen stabiiliteetti tutkittava erikseen. Asennusvaiheen jäykistys tekee elementtirakennuksen jäykistyksestä vaativaa, koska jäykistysjärjestelmä kykenee ottamaan kuormia vasta kun eri osien liitokset ovat valmiita. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

Jäykistysjärjestelmän suunnittelu aloitetaan rakennuksen kohdistuvien kuormien laskennalla. Kuormia ovat pysyvien kuormien lisäksi lumi-, hyöty- ja tuulikuormat ja lisäksi voi tulla maanpaine kuormia maanalaisissa rakenteissa. Kuormien määrityksen jälkeen selvitetään kuormien jakautuminen kantaville ja jäykistävillä rakenteille. Rakennuksen kantavat ja jäykistävät rakenteet mitoitetaan siten, että yksittäiset osat ja kokonaisuus täyttää vaatimukset. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

Vaakarakenteet mitoitetaan vastaanottamaan vaakakuormitukset ja liitokset jäykistävillä rakenteille mitoitetaan niiden tukireaktioille. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

## **2.2 Mastojäykistys**

Mastojäykistyksessä rakennus jäykistetään vaakavoimia vastaan mastoseinien ja jäykistystornin avulla. Mastoseinät ja jäykistystorni toimivat ulokepalkkeina. Mastoseinä voi olla tehtävään soveltuva seinä ja jäykistystorni voi olla esimerkiksi hissikuilu. Mastoseinät ja jäykistystornit kiinnitetään jäykästi alapäästä perustuksiin ja vaakarakenteet kuten ontelolaatasto siirtää vaakakuormat jäykistävillä pystyrakenteille. Mastoseinät ja jäykistystornit rakennetaan usein elementeistä, joten niiden liitokset mitoitetaan niihin kohdistuvia leikkausvoimia ja momentteja vastaan. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

## **2.3 Kehäjäykistys**

Kehäjäykistyksessä jäykistävän rakenneosan muodostaa pilareista ja palkeista koostuva jäykkänurkkainen kehä. Tällöin perustuksien koko pienenee, koska perustuksille ei tule momenttia. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

## **2.4 Levyjäykistys**

Levyjäykistyksessä pystyrungon väliin sijoitetaan levymäinen rakenne, joka jäykistää rakenteen. Levyjen sijoitus on vapaa, mutta jäykistäviä levyrakenteita täytyy sijoittaa molemmissa suunnissa ja jos levyjäykiste ei sijaitse joka kerroksessa päällekkäin, pitää tason siirtää vaakasuuntaisia leikkausvoimia. Jäykistys voi suorittaa myös yhdistelemällä jäykistysmenetelmiä riippuen kohteesta. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

# **3 Mallinnusohjelmat**

## **3.1 FEM-mallinnus**

FEM = Finite Element Method

Lujuusopin perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisissa tapauksissa (Lähteenmäki, Matti 2007. s2).

FEM-mallinnuksessa on syytä muistaa, että se on työkalu, jolla pyritään varmistamaan rakenteen riittävät vaatimukset oikeassa elämässä. Tarkoitus on simuloida oikean maailman olosuhteita tietokoneella ja pyrkiä suunnittelemaan vaatimukset täyttäviä rakenteita.

FEM-mallinnuksessa luodaan 3D-malli, joka on asetelma yksinkertaisia osia, särmiöelementtejä. Nämä osat muodostuvat sauvoista, joita yhdistää toisiinsa nurkkapisteet. Kokonaisuutena nurkkapisteistä ja niitä yhdistävistä sauvoista muodostuu elementtiverkko 3D-mallin sisälle. (Morris. 2008. s3)

Elementtiverkon eri osiin kohdistuvat voimat vaikuttavat toisiinsa minkä ansiosta monimutkaiset rakennelmat on mahdollista mitoitaa tarkemmin. Elementtiverkon voi ajatella olevan kuin jousi, mikä joutaessaan vaikuttaa sauvojen ja solmupisteiden kuormiin. Monimutkaisuus vaatii kuitenkin mallintajalta ymmärryksen mallintamiensa rakenteiden toiminnasta. (Morris. 2008. s3)

Rakenteet, joita mallinnetaan toimivat vain, jos ne toimivat oikeassa elämässä kuten FEM-mallissa (Morris. 2008. s 2). Esimerkiksi nivelenä laskettu liitos, joka toimii momenttijäykkänä oikeassa elämässä siirtää momentin seuraavalle rakenteelle, jolloin rakenne ei toimi kuten on suunniteltu.

Mallinnusohjelmissa laskut hoitaa tietokone, joka pystyy laskemaan kerralla kaikkien solmukohtien ja sauvojen voimat, venymät ja taipumat. Tämä kokonaisuus on sitten tarkasteltavissa ja tulosten perusteella voidaan määrittellä rakenteiden toiminta sekä niiden materiaalit ja materiaalivahvuudet. Ongelmaksi voi muodostua esimerkiksi tilanne, jossa rakenteiden liitokset eivät kohtaa. Tällöin FEM-elementtiverkko voi olla äärimmäisen monimutkainen ja aiheuttaa laskennasta pitkäkestoista.

FEM-mallinnuksessa käyttäjän tulee ymmärtää kuinka voimat tulisi jakautua rakenteille, jotta hän voi tulkita FEM-mallia oikein. FEM-malleissa pieni mallinnusvirhe voi kertaantua korkeissa rakenteissa suuresti, joten tarkkuus käyttäjältä vaaditaan. Kuitenkin FEM-malleissa voidaan löytää rasiuksia, joita ei yksinkertaistetuilla menetelmillä olisi välttämättä huomattu.

Useita FEM-malleja on monesti syytä tarkastella, jotta saadaan uskottavia tuloksia. Esimerkiksi uutta rakennetta tarkastellessa on järkevää tehdä yksinkertaisempi malli, joka näyttää kuinka rasiukset jakautuvat rakenteille. Tämä antaa ensinäkymän, jonka jälkeen voidaan tarkastella rakenteen osia tarkemmin (Morris. 2008.s8)

### **3.2 BIM-mallinnus**

Building Information Model on rakennuksen tietomalli. Rakennuksen tietomalli on todellisuutta vastaava malli kohteesta, joka sisältää kohteen täsmälliset geometriset tiedot ja joka tukee kohteiden suunnittelua esimerkiksi materiaalivahvuuksien, määrien ja laatuojen muodossa. Toteutusta tietomalli voi tukea esimerkiksi aikataulutuksien ja materiaalimäärien muodossa. (Tekla.com. 2021. Mitä on BIM?)

### **3.3 Mallinnusohjelmat**

Autodesk Robot Structural Analysis 2021 on rakenteiden mitoitusohjelma kuten betonilaattojen raudoitusten ja erilaisten liitosten mitoitusohjelma, johon kohteesta voidaan luoda BIM-malli esimerkiksi Autodesk Revit-ohjelmalla ja generoida FEM-malli, jolloin voidaan mitoitaa materiaalilaadut, vahvuudet sekä betonirakenteissa raudoitusten määrät. Robot Structural Analysis 2021-ohjelmalla voidaan myös luoda FEM-malleja.

FEM-Design 3D-Structure on samankaltainen FEM-mallinnusohjelma Robot Structural Analysis 2020 kanssa, johon esimerkiksi voidaan tuoda BIM-mallista tiedot, josta ohjelma luo FEM-mallin. FEM-Design 3D-Structure on myös hieman yksinkertaisempi sen suhteen, että se generoi ja laskee huonomminkin mallinnetun mallin, mikä tarkoittaa sitä, että se vaatii hieman tarkkaavaisuutta käyttäjältä.

Lisäksi FEM-Design 3D-Structurella voidaan mitoittaa helposti esimerkiksi betonielementtien saumoja, koska FEM-Design 3D-Structurella voidaan tarkastella liitosvoimia. Liitosvoimia tarkastellessa ohjelma näyttää mallin liitoksiin kohdistuvat voimat nuolien avulla.

## **4 Autodesk Robot Structural Analysis 2020**

### **4.1 Rakennemallin luominen**

Robotissa on useita rakennemalleja, joita voi käyttää työkaluna rakenteiden mitoitukseen, FEM-mallien luomiseen ristikoiden mitoitukseen tai profiilien määritykseen. Tässä työssä tarkastellut harjoitukset ovat tehty ”shell design” työkalulla, missä mallinnetaan 3D-malli tarkasteltavasta kohteesta, johon lisätään kuormat. Mallista voi sen jälkeen tarkastella voimia ja muun muassa mitoittaa puu-, teräs- ja teräsbetoni profiileja. Robotilla on mahdollista mallintaa 2D-, ja 3D-malleja. 2D-mallit rajoittuvat XY-koordinaatistoon ja 3D-mallit XYZ-koordinaatistoon.

### **4.2 Kuormien jakautuminen seinille**

Työssä tarkastellaan vaakavoimien jakautumista seinille siten, että tarkastellaan samanlaisia malleja eri metodein ja tarkastellaan tuloksia. Tulokset laitetaan liitteeksi työn loppuun (liite 1 ja liite 2).

Robotin seinien vaakavoimat ovat hankala ottaa ulos ohjelmasta. Tämä johtuu siitä, että Robot ei näytä liitosvoimia tai tuelle jakautuvaa voimaa yhtenä lukuna. Sen sijaan Robot näyttää seinävoimat tuen sauvojen liitospisteille. Nämä liitospisteet yhteenlaskettuna muodostavat seinävoimat joita opinnäytetyössä tarkastellaan, koska seinälle tulee samavoima kuin tuelle.

### **4.3 Sauma- ja liitosvoimat**

Robotilla sauma- ja liitosvoimien tarkastelu jätettiin ulos opinnäytetyöstä, koska Robotilla sauma- ja liitosvoimien tarkastelu ei ole yksinkertaista ja ei ole opinnäytetyön tarkoituksen mukaista tarkastella voimia, jotka ovat hankala saada ulos ohjelmasta.

## **5 FEM-Design 3D-Structure**

### **5.1 Rakennemallin luominen**

Rakennemalli luodaan FEM-Designissa siten, että ensin valitaan tarkasteltavalle rakenteelle sopiva rakennetyyppi. Kuten Autodesk Robot- ohjelmassa eri rakennetyyppejä on useita, mutta ne voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, jotka ovat 2D- ja 3D- rakenne. Tämän työn mallit ovat tehty ”shell design” -rakennetyypillä, mikä on työkalu, jolla mallinnetaan 3D-malli, eli XYZ- koordinaatistoon.

Rakennemallille tehtiin mallilaskelmien mukainen Xref-tiedosto, jota käytettiin pohjana seinien sijainnille, seinien paksuudet ja betonin lujuusluokat pyrittiin pitämään samoina, jotta ylimääräisiä muuttujia ei tulisi.

Seinien liitokset ja seinien alle tulevat tuet mallinnettiin nivelinä.

Rakennemallien laatat tarkasteltiin tavanomaisella betonilaatalla (260 mm), sekä diaphragm-työkalun kanssa.

Diaphragm-työkalu on työkalu, jolla voidaan muuttaa rakenne joko XY-suunnassa äärettömän jäykäksi, tai kaikissa suunnissa äärettömän jäykäksi.

## **5.2 Kuormien jakautuminen seinille**

FEM-Design- ohjelma näyttää koko seinälle tulevan reaktio- tai liitosvoiman ja suunnan nuolella, josta voidaan tarkastella sen arvo. Ohjelma myöskin antaa nuolen lisäksi voiman suunnan siten, että koordinaatistoa vastaan olevat kuormat ovat miinus merkkisiä ja koordinaatiston mukaan olevat kuormat plus- etumerkillä.

Diaphragm-työkalun kanssa ohjelmien tulokset vastasivat lähes kasinlaskentaa, mutta kasinlaskenta ei ota huomioon, T- tai I-profiilin muodostavia seiniä, mikä voi olla syy siihen, että nämä seinät ovat jäykempiä ohjelmissa kuin käsin laskennassa.

## **5.3 Seinien liitosvoimat**

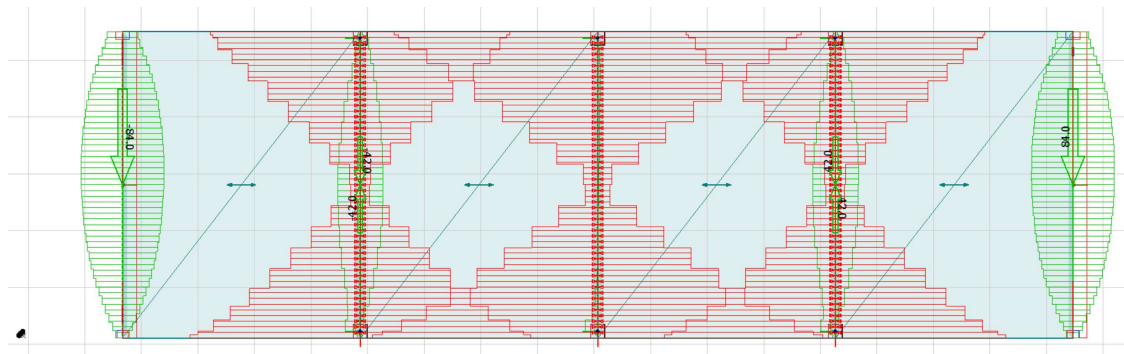
FEM-Design 3D-Structure -ohjelman seinien liitosvoimat voidaan tarkastella Analysis -välilehdellä. Ohjelma ilmoittaa liitosvoimat ja niiden suunnan kuten seinien liitosvoimissa. Robot ei ilmoita liitosvoimia, koska Robot ajattelee liitosten olevan äärettömän jäykkiä. FEM-Design -ohjelmassa kuitenkin liitokset eivät ole äärettömän jäykkiä, ja ne ovat kuin oma elementti, jolle voi tehdä muutokset niiden ominaisuuksiin, kuten jäykkyyteen ja muuhun käyttäytymiseen. Lisäksi liitosten kulmapisteet voidaan irrottaa, jolloin ne eivät enää sotke tuloksia. Kuitenkin on syytä muistaa, että vaikka molemmat tarkastelussa olleet ohjelmat edustavat FEM-laskentaa ja ovat täten vertailtavissa, niiden käyttötarkoitus voi olla eri ja tämän takia ohjelman käyttötarkoitusta ei tule unohtaa.

## **5.4 Levynä toimivan ontelolaataston saumavoimat**

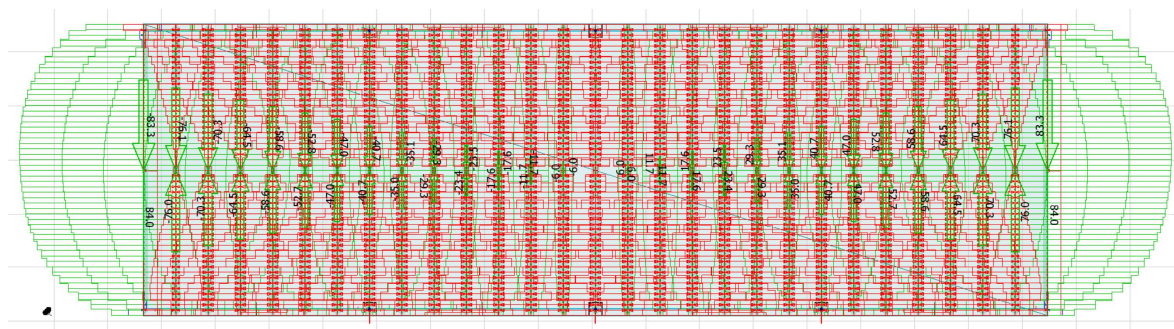
FEM-Design 3D-Structure ohjelmalla ontelolaataston saumavoimat mallinnettiin ohjelmasta löytyvän ontelolaatasto -työkalun avulla. Työkalulla ensin määrätään laataston suunta, tehdään suorakulmion muotoinen alue jolle ontelolaatat sijoittuvat ja sitten jos ja kun ontelolaatassa on kavennus, niin kavennuksen sijainti määritetään.

Ontelolaataston saumavoimat yksinkertaisissa malleissa vastaavat leikkausvoimakuvaajaa, eli seinät toimivat tukina ja laatasto on sauva, jota kuormitetaan tasaisella voimalla. Kuitenkin laataston orientaation kääntäminen aiheuttaa tuloksiin hieman eroavaisuuksia, koska ohjelman tarkastelema laatasto ei ole äärettömän jäykkä. Vaakasuoraan asennetun ontelolaataston FEM-Design tulokset vastaavat leikkausvoimakuvaajaa, mutta pystysuoraan asennetun ontelolaataston tulokset erii hieman leikkausvoimakuvaajasta. Tulokset kuitenkin säilyvät symmetrisenä ja keskimmäiseen saumaan ei tule leikkausvoimaa. Rakennukset pääasiassa ovat kuitenkin monimutkaisempia, jolloin leikkausvoimien laskeminen muuttuu työläämmäksi.

Kuva 1: Mallin tulokset, jossa ontelolaatat asennettuna vaakasuoraan FEM-Design 3D-Structure ohjelmalla. (Antti Hult 2021)



Kuva 2: Mallin tulokset, jossa ontelolaatat asennettuna pystysuoraan FEM-Design 3D-Structure ohjelmalla. (Antti Hult 2021)



## 6 Käsinlaskenta

Käsin laskennassa rakennusta yksinkertaistetaan siten, että se on mahdollista laskea. Esimerkiksi seinä, joka jäykistäisi rakennusta voidaan ottaa pois laskelmista, jos seinään on asennettu suuri määrä ikkunoita. (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2020 Liite L5.2.) Tämä tuo varmuutta laskelmiin, mutta voi vaikuttaa lopputulokseen siten, että seinät, joita ei ole otettu huomioon siirtää kuormituksia sellaisille rakenteille, joita ei ole mitoitettu niille kuormille. Lisäksi kiertoakeskiön sijainti voi olla laskelmissa väärässä sijainnissa, jolloin laatasta kiertävä momentti ei vastaa todellisuutta.

## 6.1 Mallilaskelmat

Kasinlaskenta -osassa tarkastellaan Suomen betoniyhdistys r.y. BY 202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 löytyviä yksinkertaistettuja malleja sekä elementtisuunnittelu.fi -sivustolta löytyvää asuinkerrostalon mallilaskelmaa Helsingissä sisämaassa sijaitsevasta kerrostalosta. By 202 oppikirjan esimerkit ovat yksinkertaisia malleja, joissa tarkastellaan kiertymättömiä ja kiertyviä rakenteita pelkästään seinän pituuden perusteella lasketun suhteellisen jäykkyyden avulla. Työssä on tarkasteltu myös jäykistysmastojen (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2) kuormitusten laskenta kiertyvällä mallilla siten, että leikkausvoimat ovat huomioituna. Elementtisuunnittelu.fi esimerkki kerrostalo on perustettu louhitun kallion päälle tehdyn sorakerroksen varaan, anturaina teräsbetonianturat, seinät ovat tehty teräsbetonielementeistä ja välipohjina toimii ontelolaatat, jotka muodostavat seinien kanssa rakennuksen rungon. Rakennuksen jäykistys on toteutettu seinillä ja porras-hissitorneilla. Kellarin pohjana toimii maanvarainen teräsbetonilattia. Kuitenkin käsin laskennan takia malli on yksinkertaistettu siten, että FEM-mallien tulosten vertaaminen kasinlaskentaan on mahdollista. Malleja on yksinkertaistettu tukien, laatan ja seinien liitosten osalta siten, että kaikki tuet toimivat nivelinä, laatat ovat loputtoman jäykkiä ja seinien liitokset ovat nivelä.

## 6.2 Rakennuksen jäykistys

Rakennuksen jäykistys suunnittelu on tehtävä mahdollisimman aikaisessa suunnitteluvaiheessa, viimeistään luonnosvaiheessa. Alustavassa rakennuksen jäykistys tarkastelussa arvioidaan rakennuksen riittävää jäykkyyttä, pääseekö se kiertymään, tarvitaanko liikuntasauvoja sekä liikuntasauvojen mahdollinen vaikutus rakenteeseen jäykistykseen sekä onko jäykistysjärjestelmä symmetrinen. Lisäksi tarkistetaan, että onko pystykuormat riittävät, että rakenteeseen ei synny vetoa eli ankkuroinnin tarvetta. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

Esimerkiksi rakennuksen jäykkyyttä voidaan arvioida seuraavasti:

$$\sum EI \geq \frac{q * h^3}{8} + \frac{Ph^2}{3}$$

$$q * = B * q$$

h = rakennuksen korkeus (m)

P = pistekuorma rakennuksen yläreunassa käyttötilassa (kN)

B = rakennuksen leveys laskentasuuntaa vasten kohtisuorassa (m)

q = rakennukseen vaakakuorma käyttötilassa, sisältäen tuulen ja lisävaakavoiman (kN/m<sup>2</sup>)

$\sum EI$  tarkasteltavassa suunnassa toimivien jäykistysrakenteiden taivutusjäykkyyksien summa (MN/m<sup>2</sup>) (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät)

Kaava siis vertaa rakennuksen jäykkyyttä momenttiin, jonka tasainen vaakakuorma ja pistekuorma tuottaa yhdistettynä.

### 6.3 Kuormat

Kuormituksia määriteltäessä on tunnettava kaikki siihen kohdistuvat kuormat. Pystysuuntaisia kuormia ovat rakenteiden omat painot, sekä lumi-, henkilö-, tavara- ja liikennekuormat. Teollisuus rakennuksissa nosturit ja työkoneet tuottavat kuormia. Pakkovoimia ovat rakenteiden painumista, jännevoimista kutistumisesta ja virumisesta johtuvat voimat. (BY202. 1992)

#### Pysyvät kuormat

Pysyvät kuormat ovat rakennusosien ja maan massa, joiden ominaisarvo lasketaan kertomalla nimellismitoista laskettu tilavuus materiaalin tilavuuspainolla. (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelmat)

#### Luonnon kuormat

Luonnonkuormat muodostuvat tuulesta ja lumesta. Tuuli- ja lumikuormien ominaisarvot vaihtelevat rakennuspaikan mukaan. Lumikuormille on kartta, josta voidaan paikkakunnan perusteella löytää minimiarvot lumikuormille, jota kerrotaan katon muotokertoimen mukaan. Tuulikuormille ominaisarvo saadaan kaaviosta, josta maastoluokan ja rakennuksen korkeuden mukaan määritellään tuulikuorman nopeuspaine. (Elementtisuunnittelu.fi. 2010. kuormat.)

#### Hyötykuormat

Rakennuksien hyötykuormien määrittelyssä vaikuttaa kuormitettujen tilojen luokat. Luokat ovat A-D2 pienimmästä vähimmäishyötykuormasta suurimpaan. Hyötykuormien kuormituspinta-alan ollessa suuri, voidaan hyötykuormasta tehdä vähennys kertomalla hyötykuormaa kertoimella  $\alpha_A$ . (Elementtisuunnittelu.fi. 2010. kuormat.)

$$\alpha_A = \frac{5}{7}\psi_0 + \frac{A_0}{A} \leq 1$$

missä

$\psi_0$  on standardin EN 1990 kansallisen liitteen taulukon A1.1 (FI) mukainen kerroin,

$A_0$  on 10,0 m<sup>2</sup> ja

A on kuormitusalue

Muissa luokissa pienennystekijä  $\alpha_A = 1,0$ .

Tämä kerroin on kuitenkin oltava vähintään 0,8.

Pienennystekijää  $\alpha_A$  voidaan soveltaa vain palkki- ja laattarakenteille. Jatkuvat vaakarakenteet lasketaan kenttäkohtaisesti. Pystyrakenteiden liitos sekä palkki ja vaakarakenteet, jotka tukeutuvat pystyrakenteeseen momenttijäykästi mitoitetaan ilman pienennystekijää. (Elementtisuunnittelu.fi. 2010. kuormat.)

Pystyrakenteiden pienennystekijä  $\alpha_n$  lasketaan seuraavasti:

$$\alpha_n = \frac{2+(n-2)\psi_0}{n}$$

missä

$n$  on kuormitettujen kantavien osien yläpuolella olevien samaan luokkaan kuuluvien kerrosten lukumäärä ( $> 2$ ).

$\psi_0$  on standardin EN 1990 kansallisen liitteen mukainen hyötykuorman yhdistelykerroin. (Elementtisuunnittelu.fi. 2010. kuormat.)

Pystyrakenteiden pienennystekijää  $\alpha_n$  ei sovelleta yhdistelykerroimen  $\psi$  tai pienennys tekijä  $\alpha_A$  kanssa sekä sitä käytetään vain pilari- sekä seinärakenteille ja niiden perustuksille. (Elementtisuunnittelu.fi. 2010. kuormat.)

#### 6.4 Siirtymä ja kiertymä

Silloin kun seinät ovat vaikuttavan voiman suunnassa sijoitettu siten, että niihin vaikuttavat voimat vaikuttavat niihin symmetrisesti, seinään ei tule kiertymää. Tällöin seinälle tuleva osuus kokonaiskuormasta voidaan laskea kaavalla: (BY202. 1992)

$$Q_y = \frac{k_y}{\sum k_y} F_y$$

$Q_y$  on kyseisen seinän y-akselin suunnassa ottama osuus kokonaisvaakavoimasta  $F_y$

$k_y$  on seinän jäykkyyttä kuvaava termi, voima, jolla seinä saa yksikön suuruisen siirtymän

$\sum k_y$  on jäykistävien seinien jäykkyyksien summa

Kun pystyrakenteiden sijainti ei ole symmetrinen kuormaresultantin suhteen, saa rakenne kiertymän, joka voidaan laskea kaavalla: (BY202. 1992)

$$M = F_y * x_1 - F_x * y_1$$

missä

$F_x$  on vaakavoimien resultantti x-akselin suuntaan

$F_y$  on vaakavoimien resultantti y-akselin suuntaan

$x_1$  on voimaresultantin etäisyys kiertoakeskiöstä x-suunnassa

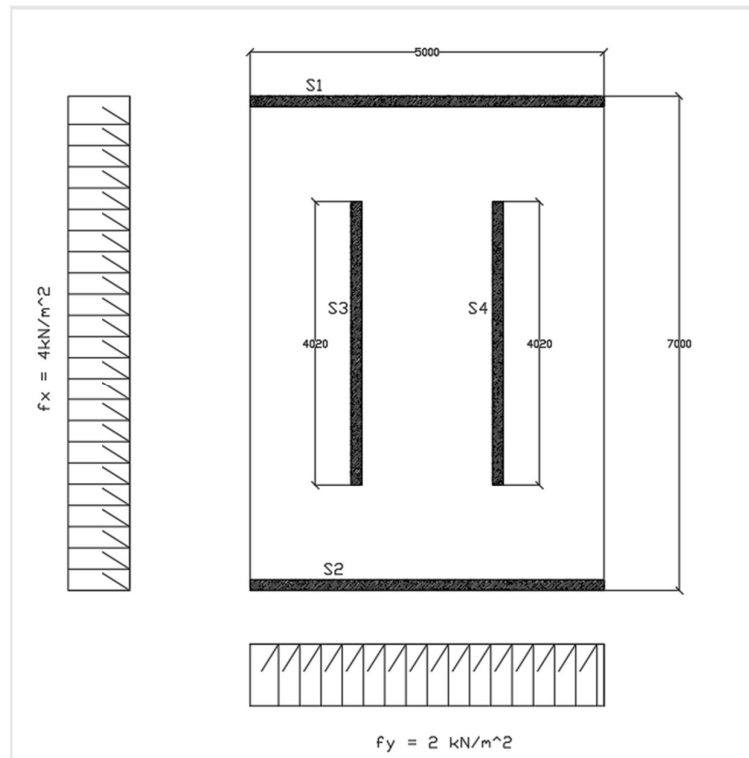
$y_1$  on voimaresultantin etäisyys kiertoakeskiöstä y-suunnassa

Lisäksi kiertymän laskentaan voi vaikuttaa jäykistysseinien kiertokeskiöiden sijainti painopisteissä, eli jäykistävän rakenteen kiertokeskiö onkin eri kohdassa kuin keskellä rakennetta esimerkiksi ikkunoiden, ovien tai muiden rakenteen muodosta johtuvien seikkojen takia.

### 6.5 Vaakavoimien jakautuminen jäykistäville rakenneosille

Vaakavoimat voidaan jakaa kahden pääkselin suuntaisiin komponentteihin. Jäykkä välipohjarakenne mahdollistaa komponenttien jakamisen pääkselien suuntaisille jäykistäville rakenteille, joiden saamat rasitukset riippuvat rakenteiden muodosta ja sijainnista. (BY202. 1992)

Kuva 3: Vaakavoimat jaettuna pääkselin suuntaisiin komponentteihin (Antti Hult 2021)



Kuvassa 3 on esitetty voimat jaettuna pääkselien suuntaisiin komponentteihin ja yksinkertainen rakenne, joka ottaa nämä vaakavoimat vastaan. Tässä mallissa yhteen suuntaan jäykistäviä rakenteita on vain kaksi, joten rakenne on staattisesti määrätty. Määrättyssä rakenteessa välipohja siirtyy, mutta ei kierry. Tässä tapauksessa voidaan käyttää kaavaa: (BY202. 1992)

$$Q_y = \frac{k_y}{\sum k_y} * F_y$$

Tämä kaava jakaa yhden seinän jäykkyyden kaikkien seinien jäykkyyksien summalla. Tällä saadaan kerroin, jolla kerrotaan kerroskuorma suuntaan, johon seinä on jäykempi. Esimerkiksi kun S1 on jäykempi suuntaan Fx, mutta Fy suuntaan se toimii lähes nivelen kaltaisesti, niin Fy suunnassa se jätetään huomioimatta. Liitteessä 3 on tarkasteltu seinille 3 ja 4 tulevat kuormat.

Tässä laskelmassa ei oteta seinien jäykkyydessä huomioon muuta kuin seinän pituus. Seinän jäykkyyteen vaikuttaa myös niiden paksuus, betonin lujuusluokka sekä seinän korkeus, joten jos rakennuksessa on esimerkiksi eri paksuisia seiniä, tätä kaavaa ei voi soveltaa siihen. Lisäksi tämä laskelma toimii vain kiertymättömillä rakenteilla.

Kiertyvissä rakenteissa muodostuu laatastoa kiertävä momentti, jolloin osa kuormasta menee myös toiseen suuntaan jäykistäville rakenteille. (BY202. 1992)

## 6.6 Kiertyvät rakenteet

Seinien ollessa siten, että kuorman resultantti ei kulje pystyrakenteiden kiertokeskiöiden kautta, saa välipohja siirtymän lisäksi kiertymän, joten kuormitukset muodostavat rakenteeseen kiertävän momentin. Laatastoa kiertävä momentti jakaa kuormitusta myös toiseen suuntaan jäykistäville rakenteille. Tämän takia täytyy seinien jäykkyyksien lisäksi ratkaista siirtymä, kiertymä ja kiertokeskiö. (BY202. 1992)

Kiertyvien rakenteiden kaavat ovat BY202 -kirjasta.

### Kiertokeskiö

Kiertokeskiö lasketaan kaavalla:

$$\bar{X} = \frac{\sum k_y \cdot x'}{\sum k_y} \quad \text{tai} \quad \bar{Y} = \frac{\sum k_x \cdot y'}{\sum k_x}$$

Missä yhteenlasketun suhteellisen jäykkyyksiluvun lisäksi tarvitaan  $x'$  - arvoa.

$x'$  on seinän etäisyys nolapisteestä X – tai Y – akselilla.

Yhteen laskettu kiertokeskiö lasketaan siis kaavalla:

$$\bar{X} = \frac{(k_{y1} \cdot x'1) + \dots + (k_{yn} \cdot x'n)}{\sum k_y}$$

Eli seinien jäykkyyksiluvut kerrottuna etäisyydellä nolapisteestä, yhteen laskettuna ja jaettuna seinien yhteenlasketulla jäykkyyksiluvulla.

Jos seinät ovat symmetriset rakenteen keskiakseliin nähden, kiertokeskiö on silloin keskiakselilla.

Esim:

kuva 2: S5 ja S6 ovat 6m päässä Y-akselilla 0 -kohdasta, joten lasku olisi:

$$\bar{Y} = \frac{(\sum kx5 * y') + (\sum kx6 * y')}{\sum k}$$

$$\bar{Y} = \frac{3456}{576} = 6\text{m}$$

Mikä on sama kuin rakenteen keskiakseli.

### Siirtymät

Siirtymät lasketaan kaavalla:

$$V_x = \frac{F_x}{\sum k_x} \quad \text{ja} \quad V_y = \frac{F_y}{\sum k}$$

Kaava laskee tietyn suunnan siirtymän kertoimen jakamalla yhden suunnan voimat siihen suuntaan vastustavien seinien yhteisjäykkyydellä. Seinäkohtaisia kuormia laskiessa tämä luku kerrotaan yksittäisen seinän jäykkyydellä. Tämä on voima, jonka tietty seinä ottaa vastaan siirtymästä.

### Kiertymä

Kiertymässä lasketaan kerroin, jolla kerrotaan yksittäisen seinän jäykkyys. Kiertymän laskentaan tarvitaan laatastoa kiertävä momentti, mikä on yhden suunnan voimat kerrottuna momenttivarrella minkä kiertymä aiheuttaa (Kuva 2 on esitetty x1 mitta) ja tästä erotettuna toisen suunnan voimat kerrottuna momenttivarrellaan (Kuva 2 y1 on 0 joten sen suunnan momentti on 0).

Kiertymä lasketaan kaavalla:

$$\frac{M}{\sum k_y * y_2 + \sum k_y * x_2}$$

Missä

M = Laatastoa kiertävä momentti

$$M = F_y * x_1 - F_x * y_1$$

Missä

x1 = y-akselin kiertoakeskiö - Fy keskikohta

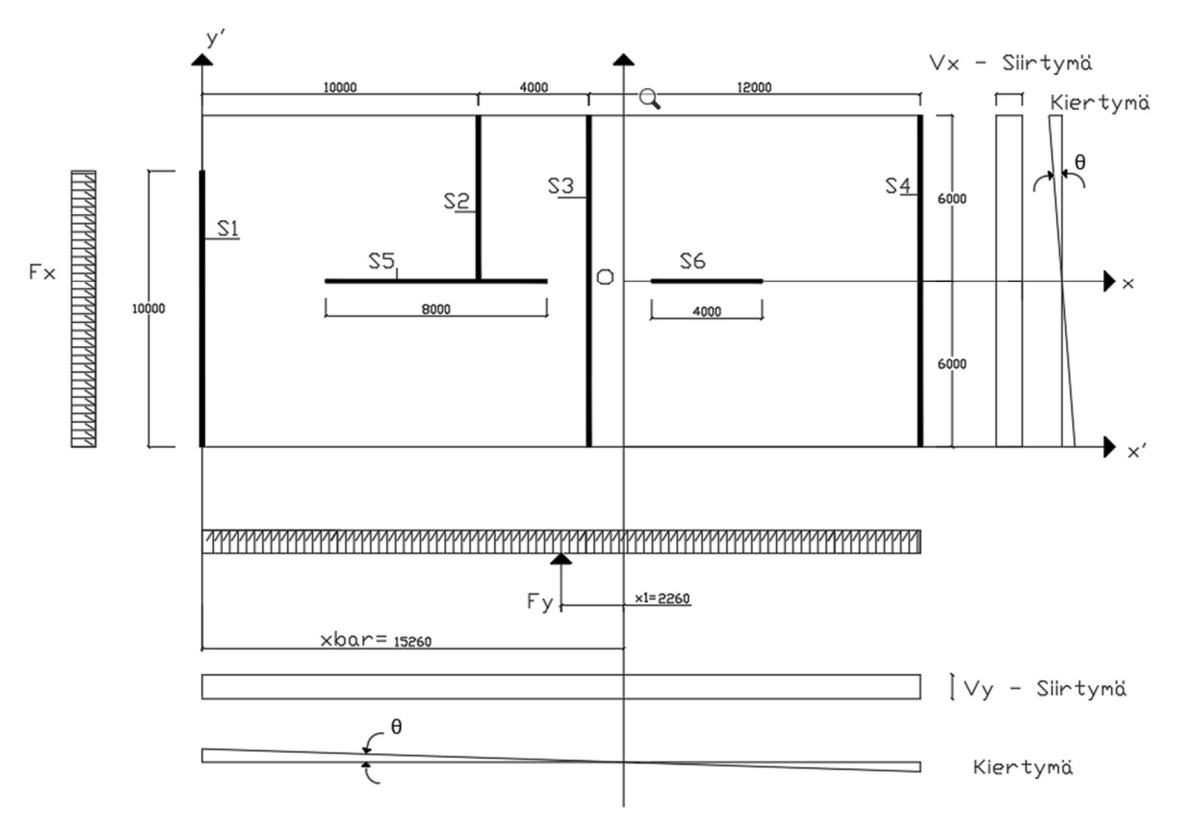
Ja

y1 = x-akselin kiertoakeskiö - Fx keskikohta

### Seinille jakautuvat kuormat

Seinille jakautuvat kuormat lasketaan laskemalla siirtymän ja kiertymän tietylle seinälle aiheuttavat voimat yhteen. Siirtymässä kerrotaan siirtymän kerroin ( $V_x$  tai  $V_y$ ) seinän jäykkyydellä. Kiertymässä kerrotaan kiertymän kerroin, tarkasteltavan seinän momenttivarsi kiertokeskiöltä ja seinän jäykkysluku. Nämä laskettuna yhteen antaa tulokseksi yksittäisen seinän ottaman voiman.

Kuva 4: Laskuharjoitus Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992(Antti Hult 2021)



BY202 kirjan esimerkin 2.1 laskuharjoituksessa lasketaan seinien ottamat kuormat, seinien jäykkyyden, kiertokeskiön, laatasta kiertävän momentin ja siirtymien avulla.

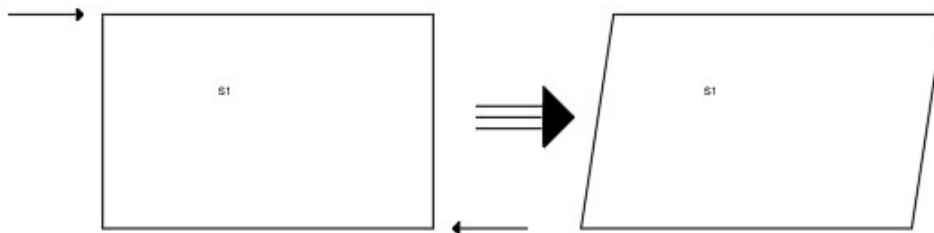
Harjoituksessa seinien jäykkyys laskettiin  $L^3$ , mikä pätee ainoastaan silloin kun seinien ainoa muuttuja on seinän pituus. Lisäksi tämä kaava ei ota huomioon seinien sisäistä leikkausvoimaan, mikä vaikuttaa tuloksiin. Kohdassa 6.7 käydään läpi Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 Jäykistymastojen kuormitusten laskenta – ohjeen laskelma, joka käyttää samaa periaatetta seinille jakautuvien voimien laskennassa, mutta ottaa huomioon seinien sisäiset leikkausvoimat.

### 6.7 Sisäisten leikkausvoimien huomioiminen

Sisäiset leikkausvoimat otetaan huomioon seinän jäykkyyden laskennan aikana, aiemmassa laskelmassa seinän jäykkyys on laskettu  $L^3$ , mikä jaetaan kaikilla samaan suuntaan jäykistävillä seinillä. Tämä tuo suhdeluvun mikä ottaa ainoastaan seinän pituuden huomioon. Sisäiset

leikkausvoimat muodostuvat, kun kuormitetaan siten, että kuormitus on rakenteen yläreunassa ja vastustava voima on rakenteen alareunassa.

Kuva 5. Seinien sisäinen leikkausvoima (Antti Hult 2021)



#### Leikkausvoimien huomioiminen:

$$\frac{E_i}{\frac{L^3}{3 * I_y} + \frac{2 * (1 + \nu) * k_y * L}{A_i}}$$

Missä

$A_i$  = Maston  $i$  poikkipinta-ala.

$L$  = tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyys maston kiinnityskohdasta.

$I_{iy}$  = Maston  $i$  poikkileikkauksen jäyhyysmomentti  $y$ -akselin suhteen.

$E_i$  = Maston  $i$  kimmokerroin.

$\nu$  = Poissonin luku (betonilla 0.1–0.2)

(Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 2010)

#### betonin kimmokerroin (E) Kimmoinen muodonmuutos

Betonin kimmoiset muodonmuutokset riippuvat koostumuksesta, erityisesti kiviaineksesta. Taulukon 1 arvot ovat standardista (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29) ja ne ovat yleiskäyttöön sopivia ohjearvoja. Ohjearvot ovat kuitenkin syytä määrittää muulla tavoin, jos poikkeamat ovat merkittäviä rakenteen toimintaa kohtaan. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

Betonin kimmokerroin muodostuu sen aineosien kimmokertoimista. Taulukossa 1 on kravtsiittipitoisesta kiviaineksesta valmistetun betonin likimääräinen arvo  $E_{cm}$ .  $E_{cm}$  on sekanttiarvo jännitystasojen  $\sigma_c = 0$  ja 0,4 f<sub>cm</sub> välissä. Kalkki- ja hiekkapitoisia kiviaineita käytettäessä, arvoa pitää pienentää 10% tai 30% ja basalttipitoisia kiviaineita käytettäessä 20%. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

Taulukko 1: Betonin lujuus ja muodonmuutosominaisuudet (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

Betonin lujuusluokka														Analyttinen yhteys/viittaus	
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk, 0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5 % fraktiili
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,8	$f_{ctk, 0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95 % fraktiili
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)^{0,3}]$ ( $f_{cm}$ MPa)
$\epsilon_{c1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 $\epsilon_{c1}(\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
$\epsilon_{c01}$ (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c01}(\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
$\epsilon_{c02}$ (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c02}(\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
$\epsilon_{c02}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c02}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$	2,0									1,75	1,8	1,45	1,4	1,4	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
$\epsilon_{c03}$ (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c03}(\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
$\epsilon_{c03}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c03}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

(3) Kimmokertoimen muutos ajan suhteen voidaan arvioida kaavalla

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t) / f_{cm})0,3E_{cm} \quad (3.5)$$

missä  $E_{cm}(t)$  ja  $f_{cm}(t)$  ovat t vuorokauden ikää vastaavat arvot ja  $E_{cm}$  ja  $f_{cm}$  ovat 28 vuorokauden ikää vastaavat arvot. Betonin puristuslujuuden kehitystä kuvaava yhteys suureiden  $f_{cm}(t)$  ja  $f_{cm}$  välillä esitetään kaavassa (3.1). (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

(4) Suppeusluvun arvona voidaan käyttää arvoa 0,2 halkeilemattomalle betonille ja 0 halkeillelälle betonille. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

(5) Ellei tarkempaa tietoa ole käytettävissä, käytetään pituuden lämpötilakertoimen arvoa  $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC s.29)

### Tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyys kiinnityskohdasta (L)

Tarkasteltavan seinän yläreunan etäisyys alimman seinän alareunasta.

Esim. Jos 3 kerrosta ja 3 m kerrosväli niin ylimmän kerroksen  $L = 9$  m

$$3 * 3 \text{ m} = 9 \text{ m}$$

### Poikkileikkauksen jähyysmomentti y-akselin suhteen(I)

Yläpuolisen poikkileikkauksen jähyysmomentti lasketaan kaavasta:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

b= seinän paksuus

h = seinän pituus

### Poikkileikkauksen ala(A)

Yläpuolisen poikkileikkauksen ala lasketaan kaavalla:

$$A = b * h$$

b = seinän paksuus

h = seinän pituus

### Poisson'in luku(v)

Poissonin luku on suhdeluku, joka lasketaan, kun esimerkiksi puristetun kappaleen pituuden muutos jaetaan koko pituudella ja halkaisijan muutos jaetaan kokohalkaisijalla. Halkaisijan suhdeluku sen jälkeen jaetaan pituuden suhdeluvulla.

$$v = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$\Delta d$  = Sauvan halkaisijan muutos

d = Sauvan halkaisija

$\Delta L$  = Sauvan pituuden muutos

L = Sauvan pituus

(tekniikan taulukkokirja 2016)

Betonin Poisson'in luku voidaan valita väliltä  $v = 0...0,2$  ( $G_c = 0,5...0,42 E_c$ ) (2.9)

Pitkäaikaiskuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia laskettaessa on otettava huomioon betonin virumisen vaikutus

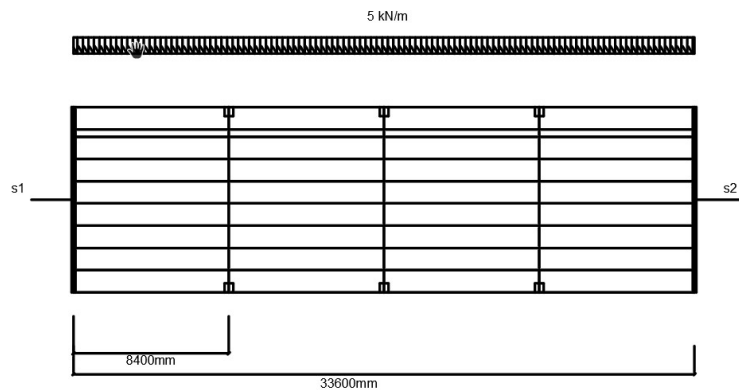
(B4. 2010.)

Suorakaidepoikkileikkauksen kerroin (K)

on maakohtainen rakennetyypistä johtuva kerroin, katsotaan taulukosta 13. (Eurokoodi 2. 2007)

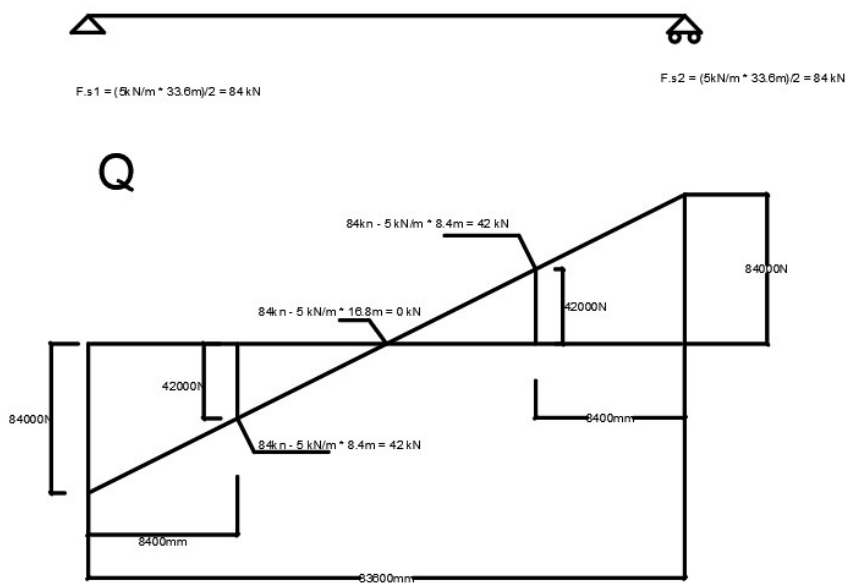
## 6.8 Ontelolaataston saumavoimat

Kuva 6. kuvan 1 mukainen esimerkkirakenne, jossa ontelolaatat asennettuina horisontaalisesti (Antti Hult 2021)



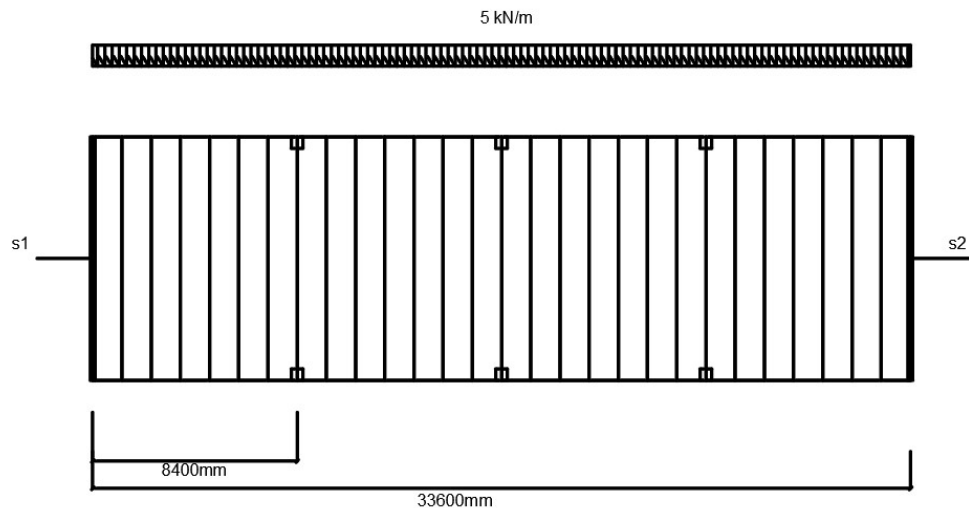
Kuvassa 6. ontelolaatasto siirtää vaakakuorman seinille, jotka vakauttavat rakennuksen. Kaikki liitokset ajateltu nivelinä. Tässä tapauksessa saumojen lukumäärä on 3, rakenne on symmetrinen ja voimia tulee vain yhdestä suunnasta. Saumojen leikkausvoimien laskennan tulokset vastaa kaksitukisen sauvan leikkausvoima kuvaajaa.

Kuva 7. Horisontaalisesti asennetun ontelolaataston saumavoimat. (Antti Hult 2021)

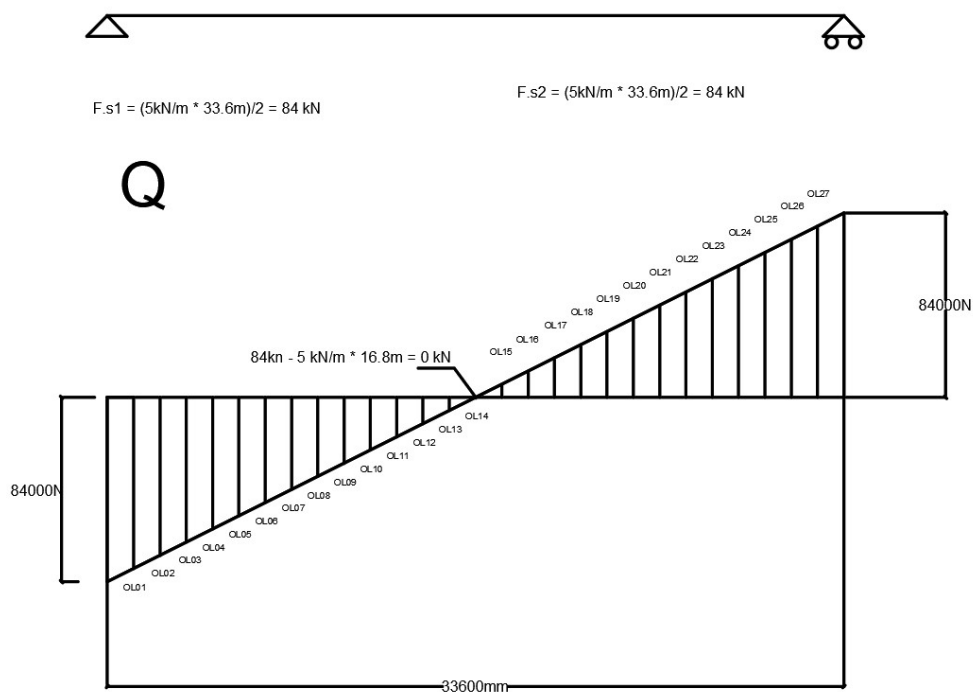


Leikkausvoimat jakautuvat yksinkertaisissa rakenteissa kuten kaksitukisessa sauvasa, jossa seinät toimivat tukina ja ontelolaatasto sauvana. Seinät siis ottavat molemmat puolet voimista.

Kuva 8: kuvan 2 mukainen esimerkkirakenne, jossa ontelolaatat asennettuina vertikaalisesti (Antti Hult 2021)



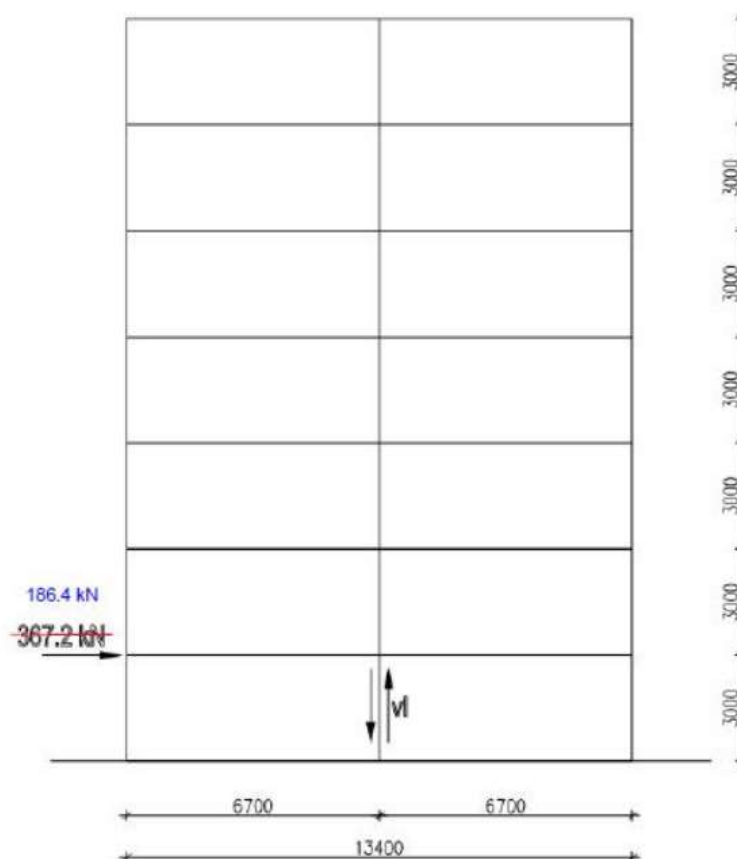
Kuva 9. Vertikaalisesti asennetun ontelolaatatason saumavoimat käsin laskennassa. (Antti Hult 2021)



Kuvassa 7. Vertikaalisesti asennetun ontelolaatatason saumavoimat käsin laskennassa, havaitaan, että ontelolaatatason saumavoimat jakautuvat leikkausvoimakuvajaan mukaan. Käsin laskennan tulokset näkyvät taulukossa 4.

## 6.9 Seinien liitosvoimat käsinlaskennassa

Kuva 10. Seinän S1 toiminta levynä. (ASUINKERROSTALON ESIMERKKILASKELMAT BES 2010)



Vaakakuormat aiheuttavat eri elementtien välisen liitosvoiman. Yhdistämällä elementtejä toisiinsa saadaan pidempiä seiniä tai eri suuntiin jäykistävästä seinistä profiilinkaltaisia rakenteita. Käytännössä pidempi ja profiilinkaltaisesti toimivat seinät ovat jäykempiä kuin yksittäisinä toimivat seinät. Jäykemmät seinät kantavat enemmän kuormaa, joten yhdistelemällä seiniä toisiinsa voidaan saavuttaa kestävämpiä rakenteita.

Kahden samaan suuntaan vaikuttavan seinän saumassa vaikuttava leikkausvoima saadaan kaavalla:

$$V_i = \frac{H_d * S}{I}$$

Missä

$H_d$  = Vaakavoima (kN)

$S$  = Tarkasteltavan elementin staattinen momentti sauman suhteen ( $m^3$ )

$I$  = koko seinän hitausmomentti ( $m^4$ )

Esim. (ASUINKERROSTALON ESIMERKKILASKELMAT BES 2010)

$H_d=186.4$  kN

$$S = 0.15 \cdot 6.7^2 / 2 = 3.367 \text{ m}^3$$

$$I = 0.15 \cdot 13.4^3 / 12 = 30.076 \text{ m}^4$$

$$v_l = 186.4 \cdot 3.367 / 30.076 = 20.9 \text{ kN/m}$$

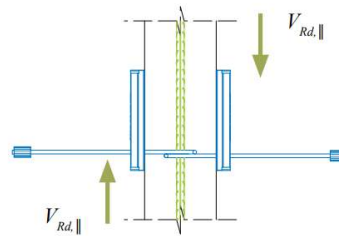
(Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelmat)

Eli seinälle tulevat vaakavoimat kerrottuna tarkasteltavan elementin staattisella momentilla sauman suhteen jaettuna liitetyn seinän hitausmomentilla. Lopputuloksena on kN/m.

### Vaijerilenkit

Betonielementit liitetään toisiinsa vaijerilenkeillä, valusauman ja betonivaarnan avulla. Liitos ottaa pituussuuntaisia ja kohtisuoraisia leikkausvoimia vastaan. Valusauman pituussuuntainen leikkausvoima jakaantuu kuormitusilanteessa vinoon puristuskomponenttiin ja vaakasuoraan vetokomponenttiin. Vaijerilenkkien mitoitus tapahtuu taulukkomitoituksella. Taulukoissa on ilmoitettu tietyille vaijerityypille eri jaoilla niiden leikkauskestävyydet (taulukko 2).

Taulukko 2 (Peikko, PVL®-vaijerilenkki, Vaijerilenkit seinäelementtien kiinnitykseen, tekninen käyttöohje 12/2021)



Betonin lujuusluokka	Pystysuuntainen leikkauskestävyys $V_{Rd,  }$ [kN/kotelopari]					
	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
PVL® 60-120	13,0	15,2	17,4	19,8	22,0	24,2
PVL® 140	28,0	32,8	37,7	43,0	45,1	46,0
PVL® SOLO	24,6	29,1	33,6	38,4	40,1	40,6

Kuva 11. Suunnitteluesimerkki vaijerilenkki liitoksen mitoituksesta pystysuuntaista leikkausvoimaa vastaan (Peikko, PVL®-vaijerilenkki, Vaijerilenkit seinäelementtien kiinnitykseen, tekninen käyttöohje 12/2021)



### Suunnitteluesimerkki 1:

Seinän betonin lujuusluokka: C30/37  
 Saumavalun lujuusluokka: C30/37  
 Seinän paksuus: 120 mm  
 Pystysuuntainen leikkausvoima:  $V_{Ed, \parallel} = 28,5 \text{ kN/m}$

Suunnitelma:  
 PVL®100  
 Jako 400mm

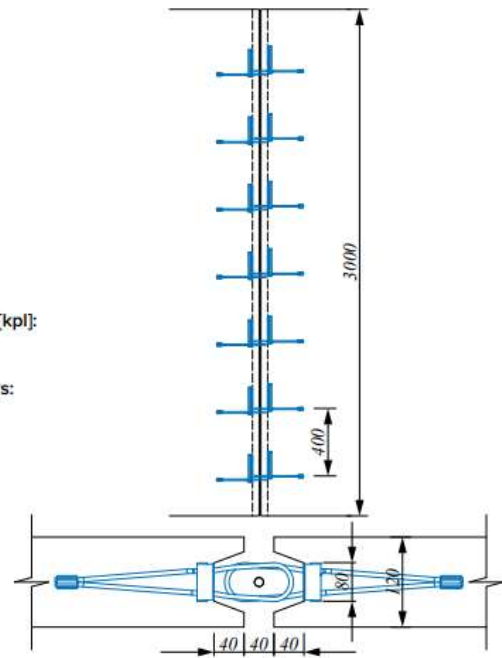
PVL®-vaijerilenkkiparien määrä saumassa metriä kohti [kpl]:  
 $\eta_{PVL} = 1,000/400 = 2,5 \text{ kpl}$

PVL®-vaijerilenkkien pystysuuntainen leikkauskestävyys:

$$V_{RD, \parallel} = \eta_{PVL} \times V_{RD, \perp} = 2,5 \times 15,2 = 38 \text{ kN/m}$$

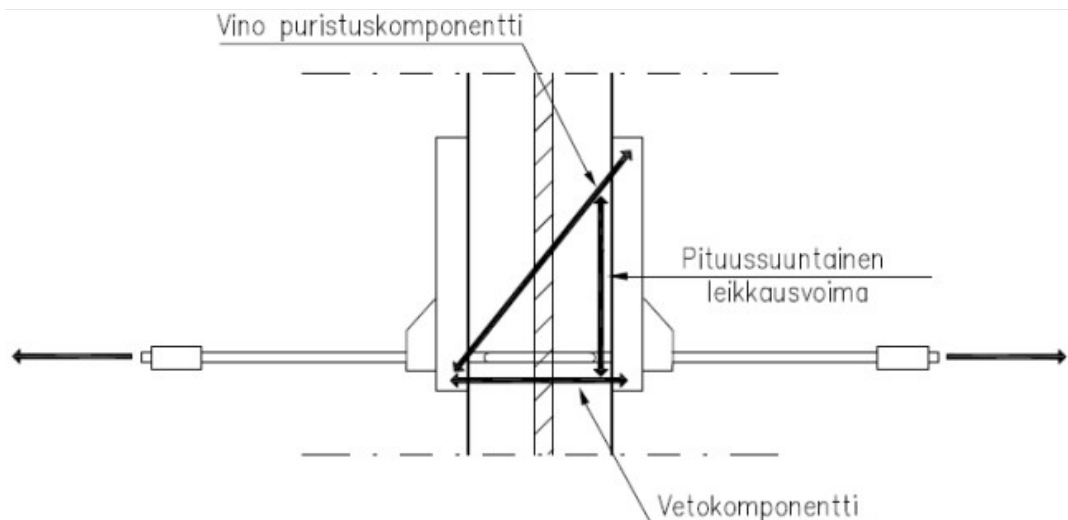
Tarkistus:

$$\frac{V_{Ed, \parallel}}{\sum V_{RD}} = \frac{28,5}{38} = 0,75 < 1,0$$



Peikon vaijerilenkkiohjeessa (12/2021) esitetystä esimerkistä (kuva 11.) on esitetty periaate, kuinka mitoitetaan vaijerilenkkiliitos pystysuuntaista leikkausta vastaan. Tavoitteena on asentaa vaijerilenkkejä siten, että seinien välisellä pystysaumalla yhden metrin matkalla on tarpeeksi lenkkejä vastustamaan kuormaa, joka rasittaa saumaa yhdenmetrin matkalla.

Kuva 12: Pituussuuntainen leikkausvoima ja puristus ja veto komponentti esitettynä piirroksessa (Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Vaijerilenkit).



Kuvan 12 mukaista pituussuuntaista leikkausvoimaa vastaan mitoitetaan vaijerilenkit.

## 7 Tulokset

### 7.1 BY202 mallin tulosvertailu

Tuloksia vertailtaessa (taulukko 3), havaitaan, että BY202 kirjan tulokset (liite 4), eivät vastaa FEM-mallinnuksen antamia tuloksia. Tulokset saatiin lähes vastaaviksi silloin kun otettiin käsin laskennassa huomioon seinien sisäiset leikkausvoimat (Liite 5.) ja asetettiin FEM-malleissa laatat äärettömän jäykiksi. (Taulukko 3.)

Lisäksi tarkasteltiin elementtisuunnittelu.fi asuinkerrostalon mallilaskelma käsin laskennassa (Liite 6.) sekä FEM-ohjelmilla. Ohjelmilla saadut tulokset on liitteessä (liite 2.). Tarkasteluissa havaittiin, että myös tässä mallissa, FEM-laskentaohjelmien tulokset lähes vastaavat toisiaan. Käsin laskennan tulokset eroavat joillain seinillä kuitenkin merkittävästi FEM-laskentaohjelmien tuloksista. Elementtisuunnittelu.fi asuinkerrostalo-malli laskelmien tulokset eroavat merkittävästi käsin laskennasta sekä FEM-laskennasta. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin yksinkertaistettiin kyseistä mallia esimerkiksi muuttamalla välipohjalaatta äärettömän jäykäksi, jotta FEM-laskentaohjelman tulokset olisivat verrattavissa kasinlaskentaan. Näistä yksinkertaistuksista johtuen elementtisuunnittelu.fi:n tulokset eivät ole vertailukelpoisia tämän opinnäytetyön käsin laskennan ja FEM-laskennan kanssa.

Taulukko 3: BY202 mallin tulokset käsin laskennassa ja FEM-mallinnuksessa.

BY202 esimerkin vertailu	s1 [kN]	s2 [kN]	s3 [kN]	s4 [kN]	s5 [kN]	s6 [kN]
BY202 tulokset	19	3.4	24.7	17.8	26.7	3.3
käsinlaskenta liite 5.2	18	8.4	20.2	18.4	22.5	7.5
FEM-Design ilman diaphragm työkalua	14.5	9.7	26	14.8	23.4	6.6
Robot ilman diaphragm työkalua	13.9	9.4	26.1	14.4	22.9	7.1
FEM-Design täysin jäykkä diaphragm	18	8.5	20.2	18.4	21.8	8.2
Robot täysin jäykkä diaphragm	17.9	7.7	20.5	18.9	22.7	7.3

Taulukko 4: BY202 mallin erot prosentteina käsin laskennassa ja FEM-mallinnuksessa.

Erot liitteeseen 5.2	s1 [%]	s2 [%]	s3 [%]	s4 [%]	s5 [%]	S6 [%]
FEM-Design ilman diaphragm työkalua	-19%	15%	29%	-20%	4%	-12%
Robot ilman diaphragm työkalua	-23%	12%	29%	-22%	2%	-5%
FEM-Design täysin jäykkä diaphragm	0%	1%	0%	0%	-3%	9%
Robot täysin jäykkä diaphragm	-1%	-8%	1%	3%	1%	-3%

## 7.2 Levynätoimivan ontelolaataston saumavoimat käsin laskennassa

Ontelolaataston levyvaikutuksen avulla siirretään rakennusrunkoon siirtyvät voimat jäykistäville rakenteille kuten jäykistystorneille, ristikoille tai leikkausseinille. Laatasta tarkastellaan vaakasuorassa olevana seinämäisenä kannattajana. (BY210 2008 s.545)

Yksinkertaisissa rakenteissa ontelolaataston saumavoimat voidaan huomioida muuttamalla rakenne sauvaksi, joka menee tuelta tuelle.

Taulukko 5: Horisontaalisesti asennettujen ontelolaattojen saumavoimat FEM-Designissa.

Sauma	voima	
Sauma 1	84	kN
Sauma 2	42	kN
Sauma 3	0	kN
Sauma 4	42	kN
Sauma 5	84	kN

Taulukko 6: Ontelolaataston saumavoimat käsin laskennassa (Antti Hult 2021)

Tukivoima	84	kN	
tasainen kuorma	5	kN/m	
OL leveys	1.2	m	m
OL01	78	76	kN
OL02	72	70.3	kN
OL03	66	64.5	kN
OL04	60	58.6	kN
OL05	54	52.7	kN
OL06	48	47	kN
OL07	42	40.7	kN
OL08	36	35	kN
OL09	30	29.3	kN
OL10	24	23.4	kN
OL11	18	17.6	kN
OL12	12	11.7	kN
OL13	6	6	kN

OL14	0	0	kN
OL15	-6	-6	kN
OL16	-12	-11.7	kN
OL17	-18	-17.6	kN
OL18	-24	-23.4	kN
OL19	-30	-29.3	kN
OL20	-36	-35	kN
OL21	-42	-40.7	kN
OL22	-48	-47	kN
OL23	-54	-52.7	kN
OL24	-60	-58.6	kN
OL25	-66	-64.7	kN
OL26	-72	-70.3	kN
OL27	-78	-76	kN

Taulukossa OL01-OL27 esittävät ontelolaattojen saumoja. Laskelmat eivät kuitenkaan ota huomioon, että kyseessä ei ole äärettömän jäykkä rakenne, joten FEM-mallinnuksen tuottamat tulokset ovat hieman eriävät. FEM-mallinnuksen tulokset kuitenkin vastaavat kasinlaskentaa silloin, kun mallinnetaan laatta äärettömän jäykäksi diaphragm -työkalan avulla.

Taulukon 6 tuloksissa havaitaan pieni eroavaisuus, mutta saumojen tulokset ovat suurelta osin leikkausvoimakuvaaajan mukaisia ja keskiakselin suhteen symmetrisesti.

### 7.3 Seinäelementtien saumavoimat BY202 -kirjan esimerkkilaskelmassa

Sauman leikkausvoimien tarkasteluun opinnäytetyössä valittiin BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 kirjasta esimerkki laskelman seinä numero 3 (s3), joka jaettiin keskeltä kahtia ja tutkittiin leikkausvoimia käsin laskennalla ja FEM-Designilla. Lisäksi muuttujaksi otettiin kerroslukumäärä, joka valittiin 14 kerrokseksi. FEM-Designilla tarkasteltiin kahta erilaista mallia. Ensimmäinen on BY202 malli, joka on kopioitu 14 kertaa ylöspäin. Toinen malli on BY202 mallin seinä numero 3, joka on irrotettu mallista, lisätty pistekuormana seinien reaktiot simuloimaan BY202 mallin tilannetta ja kerrottu 14 kertaa ylöspäin.

Taulukossa 5, yksikerroksisissa malleissa havaitaan, että kasinlaskenta miltei vastaa FEM-Designilla saatuja tuloksia, mutta pelkän seinän omaavassa mallissa tulos eroaa suuresti. Kuitenkin taulukossa 6. BY202 mukainen malli kopioituna päällekkäin tuottaa suuresti eroavia tuloksia kasinlaskentaan ja yksittäiseen seinään ja alimmalla kerroksella on pienempi leikkausvoima saumassa, kuin ylempänä olevilla seinillä. Pelkkä seinä kopioituna päällekkäin FEM-Designissa antaa kuitenkin lähes vastaavia tuloksia kuin kasinlaskenta ja tässäkin mallissa alin seinä saa pienemmän kuorman kuin ylempät. Tulokset vaikuttavat siltä, että mallin alla

oleva tuki vaikuttaa alimpien kerrosten seinien leikkausvoimiin, mutta BY202 yksikerroksinen malli vihjailisi jostain muusta syystä eroaville tuloksille.

Taulukko 7: Tulokset yksikerroksiselle mallille

Malli	Leikkausvoima [kN]
Kasinlaskenta	7.4
FEM-Design BY202 mukainen malli	7.2
FEM-Design Irrotettu seinä	4.0

Taulukko 8: Tulokset 14-kerroksisille malleille

	FEM-Design	FEM-Design	elem.suun.fi
kerros	by202 malli [kN]	pelkkäseinä[kN]	Kasinlaskenta [kN]
14	13	7.5	7.4
13	21.4	16.1	14.9
12	30.7	22.6	22.3
11	40.2	29.7	29.7
10	49.8	37.1	37.1
9	59.5	44.5	44.6
8	69.1	52	52
7	78.6	59.4	59.4
6	88	66.8	66.8
5	97	74.3	74.3
4	105.5	81.8	81.7
3	112.2	89.5	89.1
2	114.4	94.9	96.5
1	102.1	78.6	104

Liitteessä 7 esitetty kasinlaskenta -taulukko ja FEM-Design 3D-Structuren tulokset kuvina.

## 8 Pohdinta

FEM-Design 3D-Structuren monipuolisuus ja yksinkertaisuus tekee ohjelmasta loistavan työkalun. Ohjelma kuitenkin antaa suhteellisen vapaasti tuloksia virheellisistä malleista. Tämä tekee huolellisesta mallinnuksesta ja tulosten tulkinnasta tärkeää. Kuitenkin FEM-Designin käyttöliittymän selkeys auttaa huolellisuudessa. Opinnäytetyössä tutkittiin vain FEM-Designin liitosvoimia ja reaktioita, todellisuudessa FEM-Designilla saa mallinnettua monipuolisesti eri rakenteita ja tarkasteltua erilaisia rakenteita. Rakennuksien jäykistykseen ohjelma on toimiva ja sillä saa monimutkaisten rakenteiden jäykistyksen hoidettua tehokkaasti.

Kun tarkastellaan yksinkertaisia rakenteita/rakennuksia, voidaan käsin laskennalla saada tehokkaasti luotettavia tuloksia. Kuitenkin rakennuksia kokonaisuutena tarkastellessa, käsin laskennassa oletetaan asioita kuten välipohjalaatan ääretön jäykkyys tai vierekkäisten seinien itsenäinen toiminta. FEM-ohjelmistojen tulokset osoittivat, että jos laatastoa tarkastellaan siten, että laataston jäykkyys otetaan huomioon. Tulokset muuttuvat verrattuna kasinlaskentaan siten, että seinien saamat kuormat jakautuvat eri lailla kuin käsin laskennassa. Lisäksi vaikka vierekkäiset seinät olisivat erillään, niitä yhdistää yllä oleva laatta. Tällöin kasinlaskenta antaa seinille, jotka muodostavat profiilinkaltaisen rakenteen, pienempiä kuormia mitä FEM-ohjelmat, koska FEM-ohjelma ajattelee, että rakenne on jäykempi.

Laataston muodostuessa erilaisista rakenteista, kuten esimerkiksi elementtisuunnittelu.fi:n asuinkerrostalo laskuesimerkissä on ontelolaatastot ja sen lisäksi porrashuoneen välipohjalaatta paikallavalettuna. Paikallavalun jäykkyys ja muoto muuttaa välipohjan jäykkyydestä monimutkaisen laskea. Tämä luo monimutkaisen mallin mitä on hankala laskea käsin ilman, että yksinkertaistetaan esimerkiksi siten, että laatasto on äärettömän jäykkä kaikkiin suuntiin (opinnäytetyössä käytetty ratkaisu). Lisäksi ontelolaataston pääkantosuunta vaikuttaa siihen, että toiseen suuntaan menee enemmän ja pidempiä saumoja, kun toiseen suuntaan vähemmän ja lyhyempiä. Laataston ollessa siten, että osassa rakennusta on toiseen suuntaan laatasto ja toisessa osassa toiseen, lisää rakennuksien eriskummallisten muotojen kanssa haastetta laskennalle. Edellä mainittujen ongelmien lisäksi käsin laskennassa saatetaan ajatella jotain jäykistävää seinää lyhyempänä kuin se on sen takia, koska siinä on paljon aukkoja kuten ikkunoita tai hormeja.

Jatkotutkimuksissa voisi yrittää ottaa käsin laskennassa huomioon laataston jäykkyyden ja lähekkäisten erisuuntaan jäykistävien seinien profiilin kaltaisesti toimiminen, jolloin käsin laskennalla olisi mahdollista todentaa FEM-mallinnuksen tuottamia tuloksia.

Ohjelmista saadut tulokset ovat olennaisesti linjassa vertailuarvoina käytettyihin (BY202, elementtisuunnittelu.fi ja Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 Jäykistysmastojen kuormitusten laskenta) käsin laskennan tuloksiin, mikä vahvistaa opinnäytetyön lähtötilanteen oletusta, että ohjelma tuottaa tarkoituksenmukaisia ja oikeita tuloksia. Toisaalta arvioitaessa käsin laskennan luotettavuutta on tärkeää huomioida kasinlaskentaan mahdollisesti sisältyneen erilaista mallien yksinkertaistusta, kuten rakenteiden jäykistämistä, seinien epätodellista pituutta tai lähekkäisten seinien esitetyn profiilin epäkäytännöllistä esitystä. Vaikkakin tuloksilla on saavutettu tälle opinnäytetyölle tavoitellut lopputulokset, on edellä mainittujen seikkojen vuoksi tuloksiin suhtauduttava asianmukaisella kriittisyydellä.

## 9 Lähteet

- B4 SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA  
YMPÄRISTÖMINISTERIÖ, Asunto- ja rakennusosasto
- BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992
- BY210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus vm. 2008 Matti V. Leskelä
- Elementtisuunnittelu.fi. 2010. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelmat.  
([https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23641/Asuinkerrostalon%20mallilaskelmat\\_ver\\_5\\_20131115.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23641/Asuinkerrostalon%20mallilaskelmat_ver_5_20131115.pdf))
- Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Jäykistysjärjestelmät.  
(<https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>)
- Elementtisuunnittelu.fi. 2010 kuormat.  
(<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23643/Kuormat.pdf>)
- Elementtisuunnittelu.fi. 2010 Laskentaperiaatteet.  
(<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22083/J%C3%A4ykistysj%C3%A4rjestelm%C3%A4t.pdf>)
- Elementtisuunnittelu.fi. 2012. Vaijerilenkit.  
([https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23853/Vaijerilenkkiohje%20\(1\).pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23853/Vaijerilenkkiohje%20(1).pdf))
- LÄHTEENMÄKI, Matti 2007. Elementtimenetelmän perusteet.  
([https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf))
- Morris, Alan. 2008. A Practical Guide to Reliable Finite Element Modelling. Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.
- Peikko.fi. PVL®-vaijerilenkki, Vaijerilenkit seinäelementtien kiinnitykseen 2019.  
([https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/p\\_Tvlw/vA88xO1mvRVFsBu7RRVo8Q/PVL-vaijerilenkkiFI8-2016.pdf](https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/p_Tvlw/vA88xO1mvRVFsBu7RRVo8Q/PVL-vaijerilenkkiFI8-2016.pdf))
- RunkoBES  
SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC  
Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 2010 Jäykistysmastojen kuormitusten laskenta
- Tekla.com. 2021 Mitä on BIM? (<https://www.tekla.com/fi/tietoa-meist%C3%A4/mit%C3%A4-bim>)
- Vatanen, Esko. 2016. Tekniikan taulukkokirja,

## Liite 1

BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 esimerkkilaskelman tulostarkastelu

BY202 esimerkin vertailu						
Tulosvertailu	s1[kN]	s2[kN]	s3[kN]	s4[kN]	s5[kN]	s6[kN]
BY202 tulokset	19	3.4	24.7	17.8	26.7	3.3
käsinlaskenta liite 5.2	18	8.4	20.2	18.4	22.5	7.5
FEM ilman diaphragm työkalua	14.5	9.7	26	14.8	23.4	6.6
Robot ilman diaphragm työkalua	13.9	9.4	26.1	14.4	22.9	7.1
FEM täysin jäykkä diaphragm	18	8.5	20.2	18.4	21.8	8.2
Robot täysin jäykkä diaphragm	17.9	7.7	20.5	18.9	22.7	7.3
käsinlaskenta liite 5.2 = teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus liite 5.2 Jäykistysmastojen kuormitusten laskenta kaava L5.2.1						
Erot liitteeseen 5.2	s1[%]	s2[%]	s3[%]	s4[%]	s5[%]	s6[%]
FEM ilman diaphragm työkalua	-19%	15%	29%	-20%	4%	-12%
Robot ilman diaphragm työkalua	-23%	12%	29%	-22%	2%	-5%
FEM täysin jäykkä diaphragm	0%	1%	0%	0%	-3%	9%
Robot täysin jäykkä diaphragm	-1%	-8%	1%	3%	1%	-3%



## Liite 3

BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu kiertymättömälle rakenteelle.

y-suunta			
L.rak.x		5	m
h.kerros		3	m
L.S1		4.02	m
L.S2		4.02	m
fy		2	kN/m <sup>2</sup>
fy.kerros	L.rak.x*h.kerros*fy	30	kN
Suhteellinen jäykkyytluku			
ky.s1	L.S1 <sup>3</sup>	65.0	
ky.s2	L.S2 <sup>3</sup>	65.0	
Σky		129.9	
Qy.s1	$Qy = (ky.s2/\Sigma ky.s2) * fy.kerros$	15	kN
Qy.s2	$Qy = (ky.s1/\Sigma ky.s1) * fy.kerros$	15	kN
x-suunta			
$Qx = (kx/\Sigma kx) * Fx$			
L.rak.y		7	m
h.kerros		3	m
L.S3		5.00	m
L.S4		5.00	m
fx		4	kN/m <sup>2</sup>
per kerros	L.rak.y*h.kerros*fx	84	kN
Suhteellinen jäykkyytluku			
kx.s3	L.S3 <sup>3</sup>	125.00	
kx.s4	L.S4 <sup>3</sup>	125.00	
Σkx		250.00	
Qx.s3	$Qx = (ky.s3/\Sigma ky.s3) * fx.kerros$	42.0	kN
Qx.s4	$Qx = (ky.s4/\Sigma ky.s4) * fx.kerros$	42.0	kN

## Liite 4

BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu kiertyvälle rakenteelle.

<b>Määräämätön rakenne</b>							
Suomen betoniyhdistys r.y. by 202							
Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992							
<b>Kuormitus</b>							
Fy.kerros		65	kN	Fx.kerros		30	kN
<b>Suhteelliset jäykkyyksluvut</b>							
<b>y-suunta</b>				<b>x-suunta</b>			
b1		10	m	b5		8	m
b2		6	m	b6		4	m
b3		12	m				
b4		12	m				
ky1	$b1^3$	1000		kx5	$b5^3$	512	
ky2	$b2^3$	216		kx6	$b6^3$	64	
ky3	$b3^3$	1728				0	
ky4	$b4^3$	1728				0	
$\Sigma ky$		4672		$\Sigma kx$		576	
x'.ky1		0	m	y'.kx		6	m
x'.ky2		10	m	y'.kx		6	m
x'.ky3		14	m			0	
x'.ky4		26	m			0	
<b>kiertokeskiö O</b>							
Xbar	$(\Sigma ky * x') / \Sigma ky$	15.3	m	ybar	$(\Sigma kx * y') / \Sigma kx$	6	m
x1	Fy.keski-xbar	-2.3	m	y1	Fx.keski-Ybar	0	m

## Liite 4

<b>Laatastoa kiertävä momentti</b>							
M	$F_y * x_1 - F_x * y_1$	-146.7	kNm				
<b>Siirtymät</b>							
V <sub>y</sub>	$F_y / \sum k_y$	0.014		V <sub>x</sub>	$F_x / \sum k_x$	0.052	
	$(\sum k_x * y^2 + \sum k_y * x^2)$	440908					
θ	$M / (\sum k_x * y^2 + \sum k_y * x^2)$	-0.0003					
<b>Seinien ottamat kuormat</b>							
x.s1	$x' - \bar{x}$	-15.26					
x.s2	$x' - \bar{x}$	-5.26					
x.s3	$x' - \bar{x}$	-1.26					
x.s4	$x' - \bar{x}$	10.74					
<b>S1=Q<sub>y1</sub></b>	$k_y * v_y + k_y * x * \theta$	19.0	kN	<b>S5</b>	$(k_x / \sum k_x) * F_x$	26.7	kN
<b>S2=Q<sub>y2</sub></b>	$k_y * v_y + k_y * x * \theta$	3.4	kN	<b>S6</b>	$(k_x / \sum k_x) * F_x$	3.3	kN
<b>S3=Q<sub>y3</sub></b>	$k_y * v_y + k_y * x * \theta$	24.8	kN	<b>ΣQ<sub>x</sub></b>		30.0	kN
<b>S4=Q<sub>y4</sub></b>	$k_y * v_y + k_y * x * \theta$	17.9	kN				
<b>ΣQ<sub>y</sub></b>		65.0	kN				

## Liite 5

BY202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992 tarkastelu kiertyvälle rakenteelle Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 mukaiset leikkausvoimat huomioiden

Suhteelliset jäykkyyksiluvut leikkausvoimat huomioituna							
Suomen betoniyhdistys r.y. by 202							
Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3 vm. 1992							
h.kerros		3	m				
b.seinä		0.2	m				
E.i		32837	N/mm <sup>2</sup>	maston i kimmokerroin			
kx		1.2		suorakaide poikkileikkaukselle			
v		0.2		betonin poissonin luku			
L		3	m	tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyys(kerroskorkeus)			
<b>y-suunta</b>				<b>x-suunta</b>			
b1		10	m	b5		8	m
b2		6	m	b6		4	m
b3		12	m				
b4		12	m				
<b>y-suunta</b>				<b>x-suunta</b>			
		A.1	l.x			A.1	i.x
s1		2	16.7	s5		1.6	8.5
s2		1.2	3.6	s6		0.8	1.1
s3		2.4	28.8				
s4		2.4	28.8				
s1	$(2(1+v)*k.y*L)/Ay$	4.32		s5		5.4	
s2		7.2		s6		10.8	
s3		3.6					
s4		3.6					



## Liite 5

Seinien ottamat kuormat							
x.s1	$x' - \bar{x}$	-13.72					
x.s2	$x' - \bar{x}$	-3.72					
x.s3	$x' - \bar{x}$	0.28					
x.s4	$x' - \bar{x}$	12.28					
<b>S1=Qy1</b>	$k_y \cdot v_y + k_y \cdot x \cdot \theta$	18.0	kN	<b>S5</b>	$(k_x / \sum k_x) \cdot F_x$	22.5	kN
<b>S2=Qy2</b>	$k_y \cdot v_y + k_y \cdot x \cdot \theta$	8.4	kN	<b>S6</b>	$(k_x / \sum k_x) \cdot F_x$	7.5	kN
<b>S3=Qy3</b>	$k_y \cdot v_y + k_y \cdot x \cdot \theta$	20.2	kN	<b><math>\Sigma Q_x</math></b>		30.0	kN
<b>S4=Qy4</b>	$k_y \cdot v_y + k_y \cdot x \cdot \theta$	18.4	kN				
<b><math>\Sigma Q_y</math></b>		65.0	kN				

## Liite 6

Elementtisuunnittelu.fi. 2010. Asuinkerrostalon esimerkkilaskelman tarkastelu kiertyvälle rakenteelle Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Liite L5.2 mukaiset leikkausvoimat huomioiden

Suhteelliset jäykkyyksluvut leikkausvoimat huomioituna							
h.kerros	3	m			Y-voimien pituus	20.5	m
b.seinä 1	0.2	m			X vomien pituus	13.5	m
b.seinä 2	0.15	m					
b.seinä 3	0.125	m					
E.i	32837	N/mm <sup>2</sup>					
kx	1.2						
v	0.2						
L	2.6	m					
<b>y-suunta</b>				<b>x-suunta</b>			
b1		13.4	m	b8		3.2	m
b2		7.2	m	b9		1.8	m
b3		4.2	m	b10		5.2	m
b4		4.2	m	b11		1.9	m
b5		7.2	m	b12		6.2	m
b6		6.1	m	b13		2.7	m
b7		7	m	b14		2.7	
Fy.kerros		712.3	kN	Fx.kerros		547.7	kN
y-suunta				x-suunta			
		A.1	l.x			A.1	i.x
s1		2.0	30.1	s8		0.6	0.5
s2		1.4	6.2	s9		0.4	0.1



## Liite 6

x'.ky1		0.08	m	y'.kx8		7.81	m
x'.ky2		5.97	m	y'.kx9		9.96	m
x'.ky3		8.21	m	y'.kx10		7.81	m
x'.ky4		10.1	m	y'.kx11		11.7	m
x'.ky5		10.8	m	y'.kx12		7.81	m
x'.ky6		12.8	m	y'.kx13		0.27	m
x'.ky7		20.5	m	y'.kx14		0.27	m
$\Sigma ky * x'.s1$		670.1		$\Sigma ky * y'.s8$		11434.9	
$\Sigma ky * x'.s2$		31918.5		$\Sigma ky * y'.s9$		4034.0	
$\Sigma ky * x'.s3$		19737.4		$\Sigma ky * y'.s10$		26438.9	
$\Sigma ky * x'.s4$		24281.1		$\Sigma ky * y'.s11$		5414.6	
$\Sigma ky * x'.s5$		57742.1		$\Sigma ky * y'.s12$		34132.1	
$\Sigma ky * x'.s6$		54682.9		$\Sigma ky * y'.s13$		174.7	
$\Sigma ky * x'.s7$		79214.9		$\Sigma ky * y'.s14$		174.7	
yht		268247.1		yht		81803.9	
<b>kiertokeskiö O</b>							
Xbar	$(\Sigma ky * x') / \Sigma ky$	8.38	m	ybar	$(\Sigma kx * y') / \Sigma kx$	7	m
x1	Fy.keski-Xbar	1.87	m	y1	Fx.keski-Ybar	-0.4	m
<b>Laatastoa kiertävä momentti</b>							
M	Fy*x1-Fx*y1	1572.3	kNm				
<b>Siirtymät</b>							
Vy	Fy / $\Sigma ky$	0.0222		Vx	Fx / $\Sigma kx$	0.04812	
		576928.3				567.2	
		31030.0				3113.2	
		68.8				1311.5	
		7119.6				9423.3	

## Liite 6

		31334.2				1693.2	
		83495.1				30955.6	
		567703.9				30955.6	
	$(\sum kx \cdot y^2 + \sum ky \cdot x^2)$	1297680.0			$(\sum kx \cdot y^2 + \sum ky \cdot x^2)$	78019.5	
$\theta$	$M/(\sum kx \cdot y^2 + \sum ky \cdot x^2)$	0.0012		$\theta$	$M/(\sum kx \cdot y^2 + \sum ky \cdot x^2)$	0.020	
y.s1	$x' - \bar{x}$	-8.30		x.s8	$y' - \bar{y}$	0.62	
y.s2	$x' - \bar{x}$	-2.41		x.s9	$y' - \bar{y}$	2.77	
y.s3	$x' - \bar{x}$	-0.17		x.s10	$y' - \bar{y}$	0.62	
y.s4	$x' - \bar{x}$	1.72		x.s11	$y' - \bar{y}$	4.51	
y.s5	$x' - \bar{x}$	2.42		x.s12	$y' - \bar{y}$	0.62	
y.s6	$x' - \bar{x}$	4.42		x.s13	$y' - \bar{y}$	-6.92	
y.s7	$x' - \bar{x}$	12.12		x.s14	$y' - \bar{y}$	-6.92	
<b>S1</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	102.1	kN	<b>S8</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	88.8	kN
<b>S2</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	103.4	kN	<b>S9</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	42.1	kN
<b>S3</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	53.0	kN	<b>S10</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	205.4	kN
<b>S4</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	58.5	kN	<b>S11</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	64.4	kN
<b>S5</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	134.6	kN	<b>S12</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	265.1	kN
<b>S6</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	117.9	kN	<b>S13</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	-59.1	kN
<b>S7</b>	$ky \cdot vy + ky \cdot x \cdot \theta$	142.7	kN	<b>S14</b>	$(kx / \sum kx) \cdot Fx$	-59.1	kN
<b><math>\Sigma Qy</math></b>		712.3	kN	<b><math>\Sigma Qx</math></b>		547.7	kN

## Liite 7

Elementtisuunnittelu.fi asuinkerrostalon mallilaskelmalla seinien väliset saumavoimat kerroksittain BY202 mallissa.

Vi = Hd * S / l		Hd.krs	19.8								
krs.	kerroksetpäällä	Hd	b	L.1	L.2	h	L.yht	S [m <sup>3</sup> ]	l [m <sup>4</sup> ]	V [kN/m]	V.sauma [kN]
1	14	277.2	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	34.7	104.0
2	13	257.4	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	32.2	96.5
3	12	237.6	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	29.7	89.1
4	11	217.8	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	27.2	81.7
5	10	198	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	24.8	74.3
6	9	178.2	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	22.3	66.8
7	8	158.4	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	19.8	59.4
8	7	138.6	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	17.3	52.0
9	6	118.8	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	14.9	44.6
10	5	99	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	12.4	37.1
11	4	79.2	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	9.9	29.7
12	3	59.4	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	7.4	22.3
13	2	39.6	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	5.0	14.9
14	1	19.8	0.2	6	6	3	12	3.6	28.8	2.5	7.4

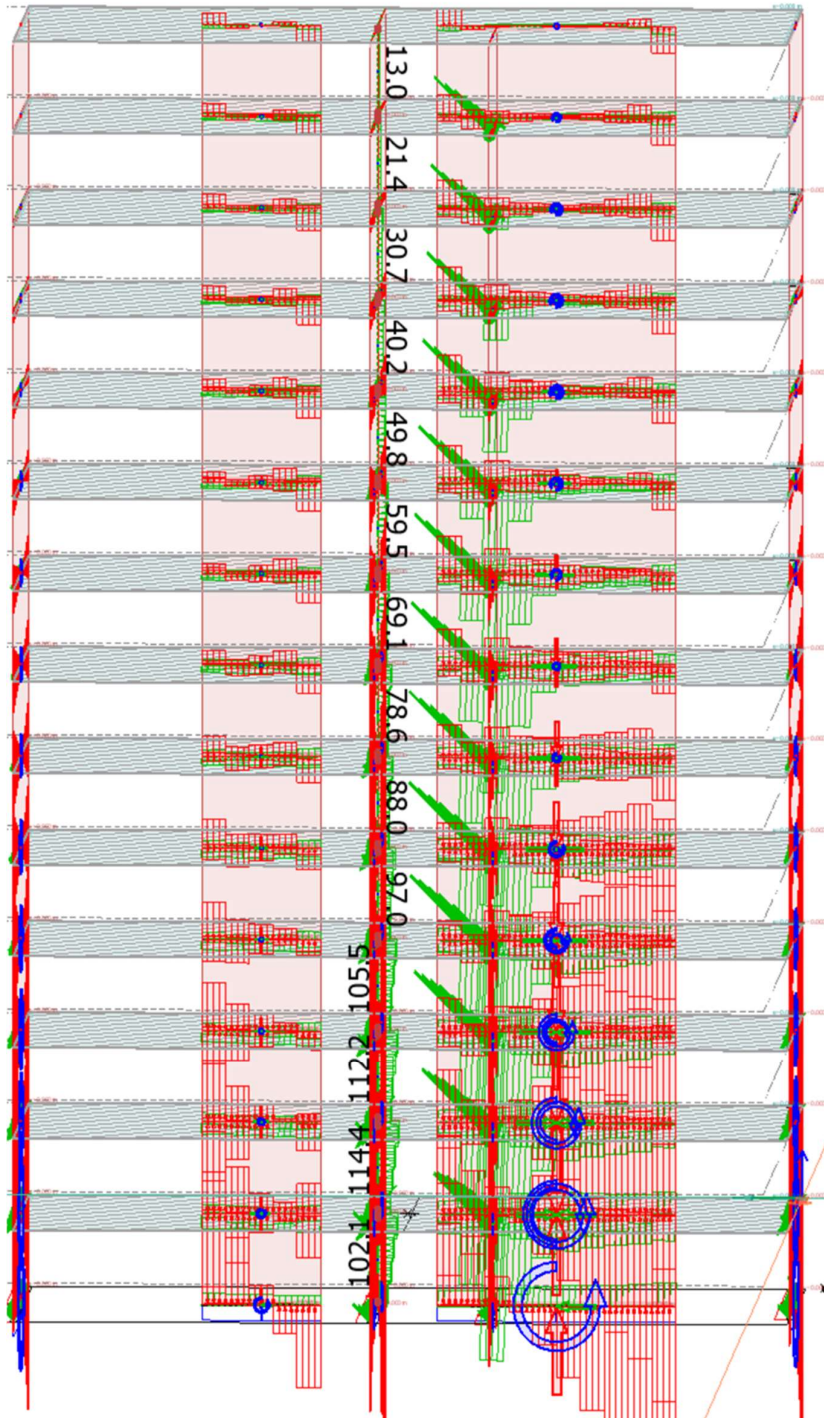
## Tulokset

Tulokset	fem design	fem design	elem.suun.fi
kerros	by202 malli [kN]	pelkkäseinä[kN]	käsinlaskenta [kN]
14	13	7.5	7.4
13	21.4	16.1	14.9
12	30.7	22.6	22.3
11	40.2	29.7	29.7
10	49.8	37.1	37.1
9	59.5	44.5	44.6
8	69.1	52	52
7	78.6	59.4	59.4
6	88	66.8	66.8
5	97	74.3	74.3

## Liite 7

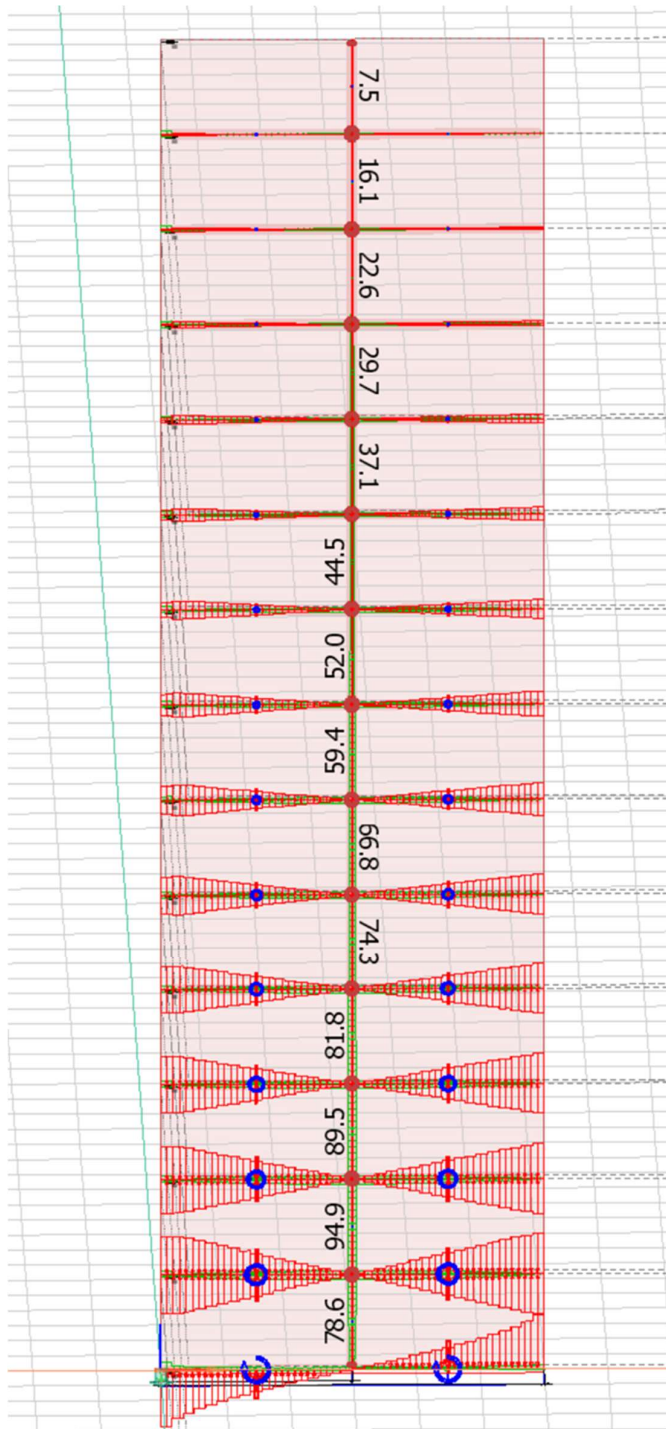
4	105.5	81.8	81.7
3	112.2	89.5	89.1
2	114.4	94.9	96.5
1	102.1	78.6	104

FEM-Design 3D-Structure malli, jossa kerros kopiaituna 14 kertaa.



## Liite 7

Vertailuun otettu pelkkä seinä, jota kopioitu 14 kertaa.





## Liite 8

Opinnäytetyön ohessa tehty ohje FEM-Design 3D-structureen

## 1 Sisällys

Kerrostien luominen .....	3
1. "Structure"-välilehdeltä valitaan "Storey(STD)"-painike .....	3
2. Generoidaan kerrokset .....	3
External reference(Xref)- tiedoston tuominen .....	4
1. Ikkunan vasemmassa yläkulmasta löytyvästä "Edit"-alasetoalokosta valitaan "External reference (XREF)". .....	5
2. Valitaan .Cad tiedosto joka sisältää tasokuvan kohteesta jota mallinnetaan. ....	5
3. Siirretään tasokuva FEM-Designin koordinaatistoon. ....	6
Moduuliverkon luonti .....	8
1. "Structure"-välilehdeltä valitaan "Axis(AX)"-painike .....	8
2. Piirretään moduulilinjat vaakasuoraan .....	9
3. Piirretään moduulilinjat pystysuoraan .....	9
4. Moduulilinjojen muokkaus .....	9
5. Tämän jälkeen vasemman alakulman moduuli siirretään koordinaatiston origoon eli 0, 0, 0 pisteeseen .....	10
Kerroskohtaiset XREF-tasokuvat .....	11
Seinien, tukien ja laattojen luominen .....	12
1. Vaihetaan kerrosnäkyä johon seinät ja laatat mallinnetaan ja muutetaan "Plane view"-näkyä .....	12
2. Mallinnetaan seinät moduuliverkon ja XREF-tiedoston mukaan. ....	13
3. Asetetaan piirrettyjen seinien alle tuet. ....	14
4. Mallinnetaan seinien päälle laatta .....	15
Kuormien luominen ja niiden liittäminen malliin .....	16
1. "loads"-välilehdellä avataan "load cases"-toiminto, avautuu ikkuna johon voi lisätä kuormia .....	16
2. Lisätään load case:ille kuormat malliin .....	16
3. Tehdään kuormayhdistelyt "load combinations"-toiminnolla. ....	17
Kerrostien ja kuormien kopiointi .....	17

## Liite 8

1.	Kopioidaan kerrokset ja kuormat.....	17
2.	Tarkastetaan 3D-näkymässä, että kaikki on kohdallaan.....	18
	Tulokset.....	19
1.	”Analysis”-välilehdellä klikataan ”calculate”-toiminto .....	19
2.	Tämän jälkeen mallin voimia voi tarkastella ”Analysis”- välilehdellä.....	20
	Diaphragm .....	21
1.	Diaphragmin asetus laatalle.....	21
2.	Diaphragmi analyysissä .....	22
	Edge connection .....	23
1.	Edge connection.....	23
2.	End point behaviour.....	24
3.	Käsinlaskennan tulokset vrt. jäykkään saumaan ilman kulmia.....	25

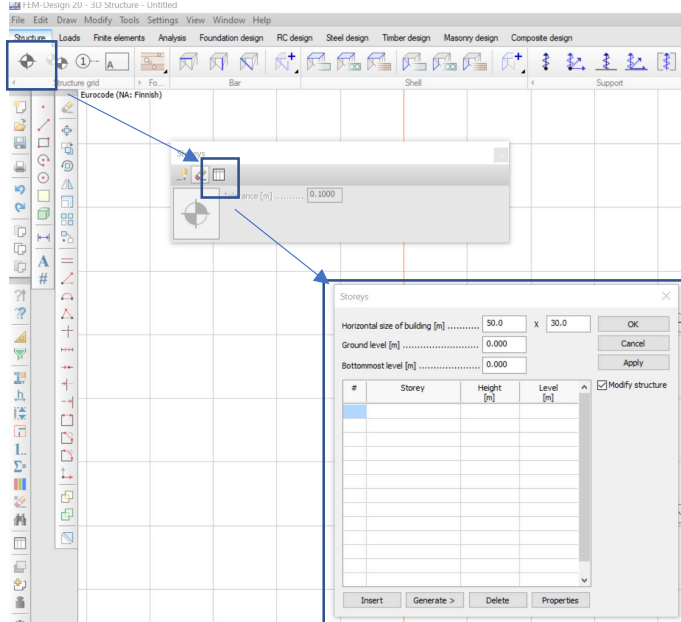
## 1.1

## Liite 8

## 1.2 Kerrosten luominen

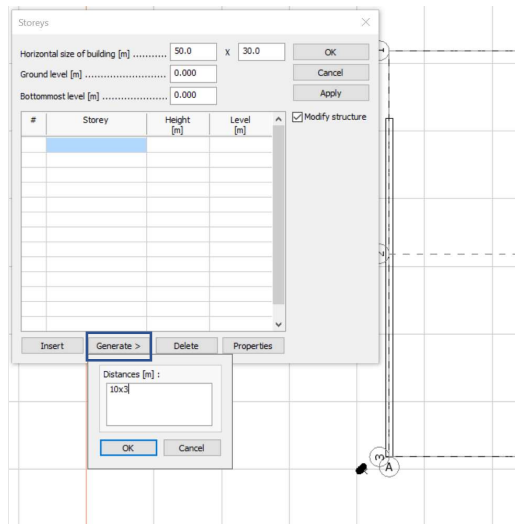
## 1. "Structure"-välilehdeltä valitaan "Storey(STD)"-painike.

- Avautuu "Storeys"-ikkuna, josta valitaan "Edit in table nappula".
- Seuraavaksi aukeavassa ikkunassa valitaan alue, jonka sisälle rakennus mahtuu, maantaso, ja alimman kerroksen taso.
- Lisäksi taulukkoon voi lisätä kerroksia "Insert"-näppäimellä.



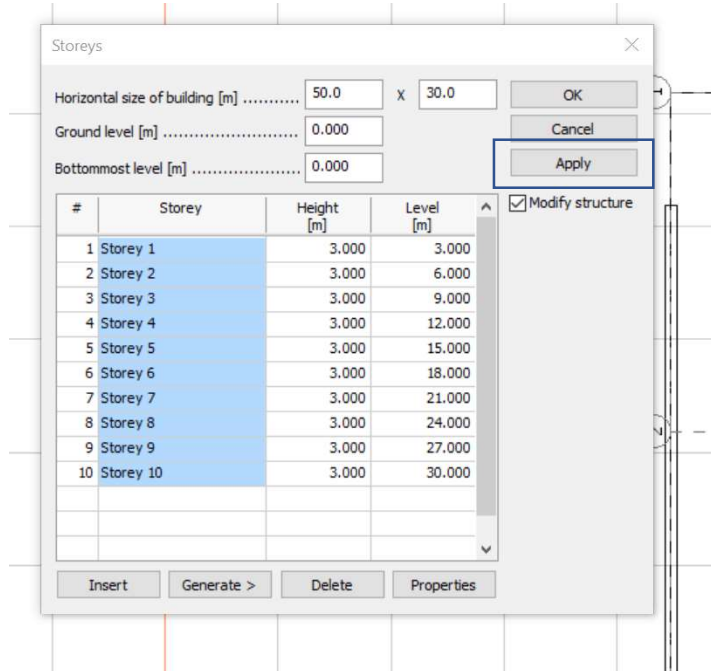
## 2. Generoidaan kerrokset

- "Generate"-nappulaa painamalla avautuu ikkuna, jossa voidaan kerralla laittaa esimerkiksi 10 kappaletta 3m kerrosta.
- Kerroksien nimen voi muuttaa "Storey"-sarakeessa ja korkeuden "Height"-sarakeessa.

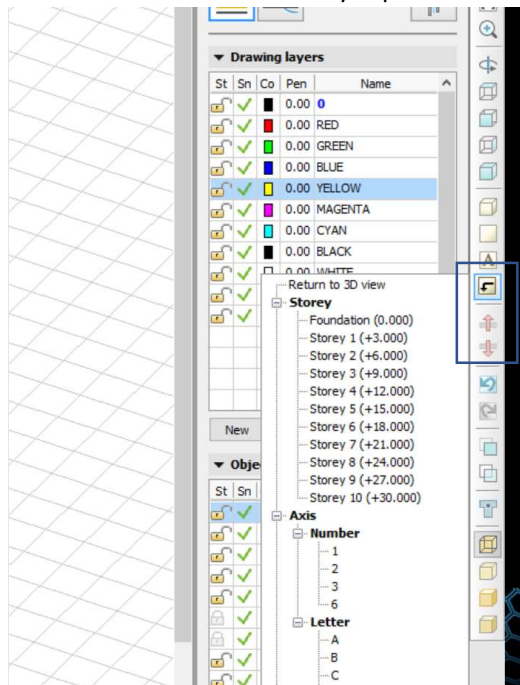


## Liite 8

- Painamalla "ok", ohjelma tekee 10 kappaletta kerroksia, jotka saadaan laitettua projektiin painamalla "Apply" nappulaa.



- Nyt projektissa on 10 kerrosta, joita voi selata oikean reunan nappuloilla. "Select view"-nappula avaa valikon, josta voi valita 3d-näkymän, tietyn kerroksen tai tietyn moduulilinjan mukaisen leikkauksen. Lisäksi alapuolella on nappulat, joista pääsee selaamaan kerroksia alas- tai ylöspäin.



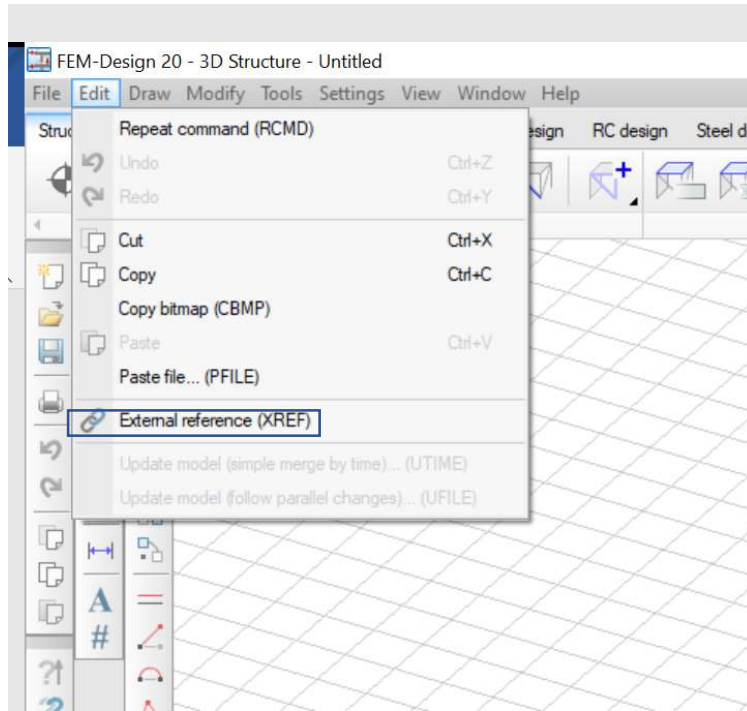
### 1.3 External reference (Xref)- tiedoston tuominen

## Liite 8

- Jokaisella kerroksella voi olla oma tasokuva, mutta ne täytyy linjata moduuliverkon avulla, joka tehdään ensimmäisen kerroksen perusteella.

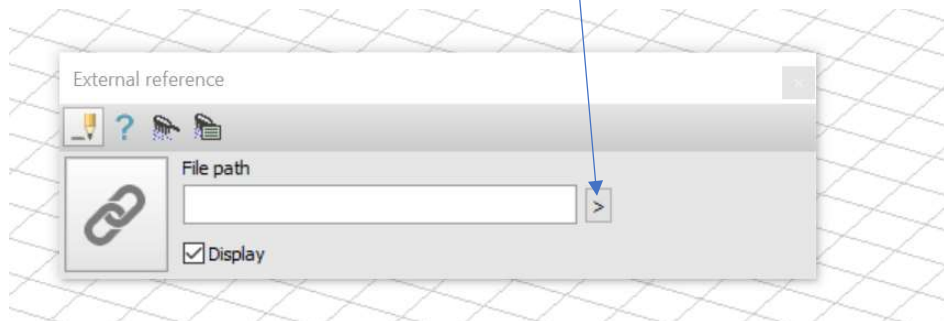
**1. Ikkunan vasemmassa yläkulmasta löytyvästä "Edit"-alasetoalistasta valitaan "External reference (XREF)".**

- Tästä avautuu "External reference" ikkuna.



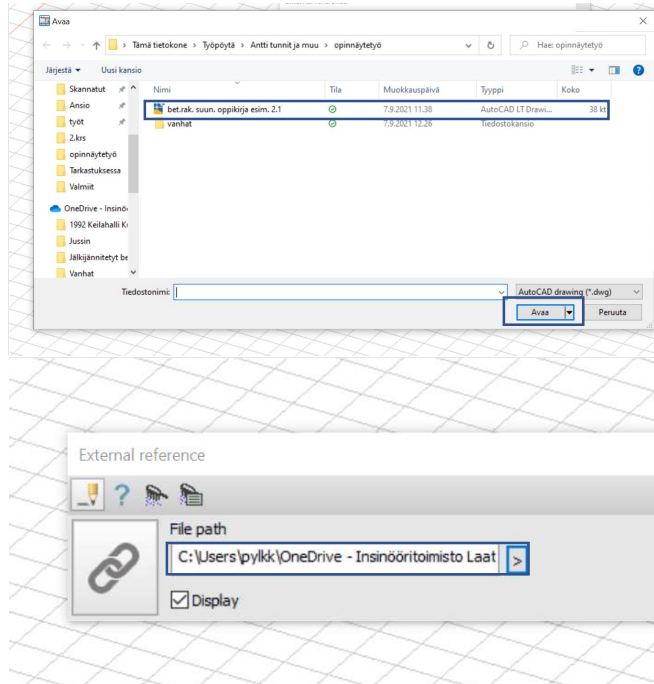
**2. Valitaan .Cad tiedosto joka sisältää tasokuvan kohteesta jota mallinnetaan.**

- External reference -ikkunassa on osoitekenttä ja nuoli, josta klikkaamalla pääsee selaamaan tietokoneen sisältöä



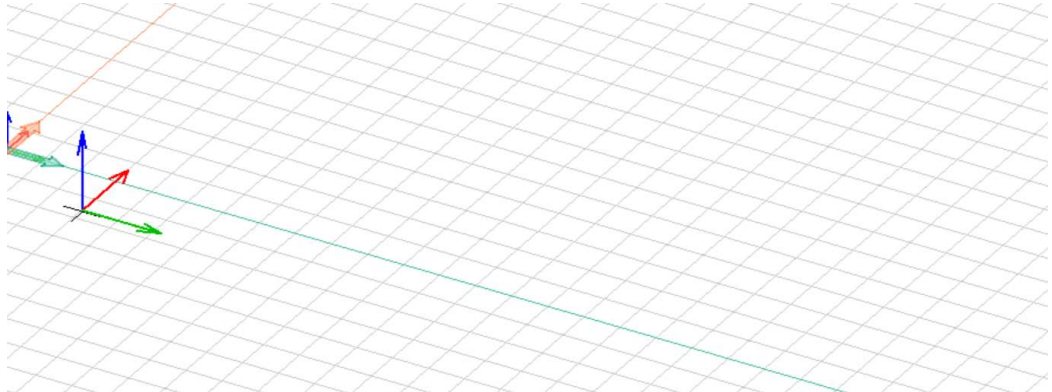
- Tasokuvan löydyttyä sitä tuplaklikkaamalla tai valitsemalla tiedosto ja klikkaamalla "avaa" siirtyy tasokuvan osoite, "external reference" - ikkunan osoitekenttään.

## Liite 8



### 3. Siirretään tasokuva FEM-Designin koordinaatistoon.

- Ensin linjataan kuva X-akselin mukaan klikkaamalla sattumanvaraista kohtaa, siirtämällä kursoria ensin vihreän nuolen mukaan ja klikkaamalla. Tämän jälkeen linjataan kuva Y-akselin mukaan siirtämällä kursori punaisen nuolen suuntaan ja klikkaamalla.
- Tätä toimenpidettä helpottaa apuviivat, jotka ohjelma näyttää.



- Ohjelma näyttää .Cad tiedoston layerit ja valikon josta voi valita yksiköiden muunnon
- Tässä ikkunassa voi valita XREF-tiedoston näkyvät layerit ja käytettävät yksiköt.
- Klikkaamalla "ok", XREF-tiedosto ilmestyy koordinaatistoon.

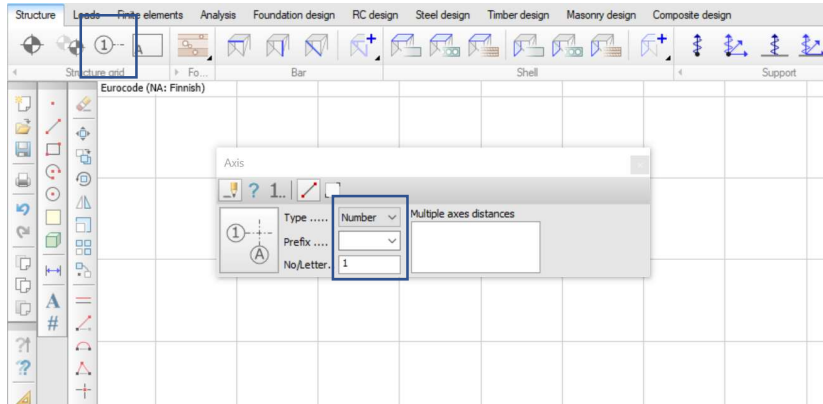


## Liite 8

## 1.4 Moduuliverkon luonti

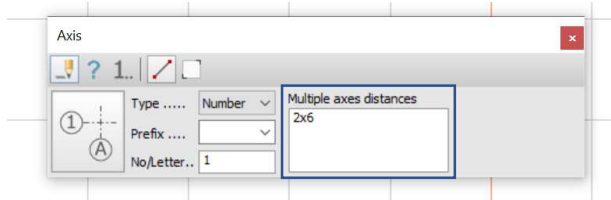
## 1. "Structure"-välilehdeltä valitaan "Axis(AX)"-painike.

- Avautuu "Axis"-ikkuna, josta voi valita moduuliverkon linjojen tyyppin(type) eli onko numero vai kirjain ja seuraavan moduulilinjan numeron.

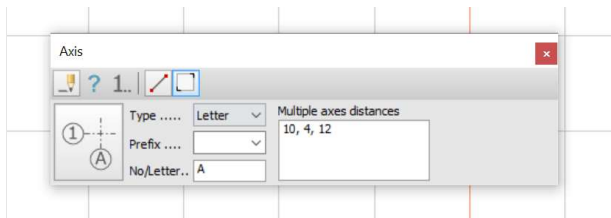


- Lisäksi "multiple axes distances"-laatikkoon voi laittaa toistuvien mittojen välimatkan esimerkiksi 2x6 tai 10, 4, 12.

Laatikossa ollessa 2x6, tekee ohjelma 2 kappaletta viivoja 6 metrin välillä piirrettyyn viivaan. (Näillä asetuksilla vaakasuorat moduulilinjat esimerkki projektiin(0m, 6m, 12m)).



Laatikossa ollessa 10, 4, 12, tekee ohjelma 4 kappaletta viivoja valitun metrimäärän välein. (Näillä asetuksilla pystysuorat moduulilinjat esimerkki projektiin(0m, 10m, 14m, 26m)).

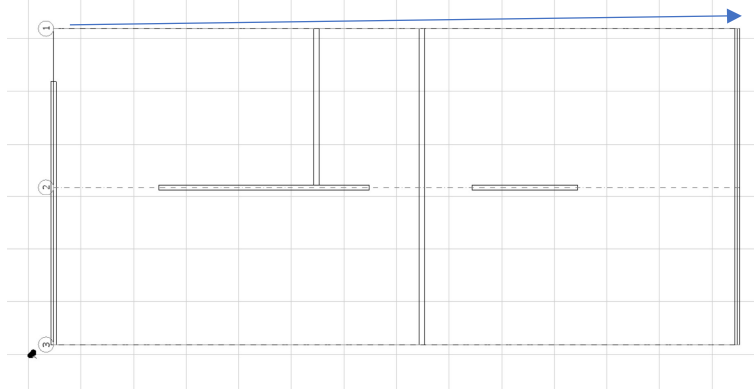


- Jos "multiple axes distances"-laatikon jättää tyhjäksi, ohjelma tekee vain sen viivan mikä piirretään.

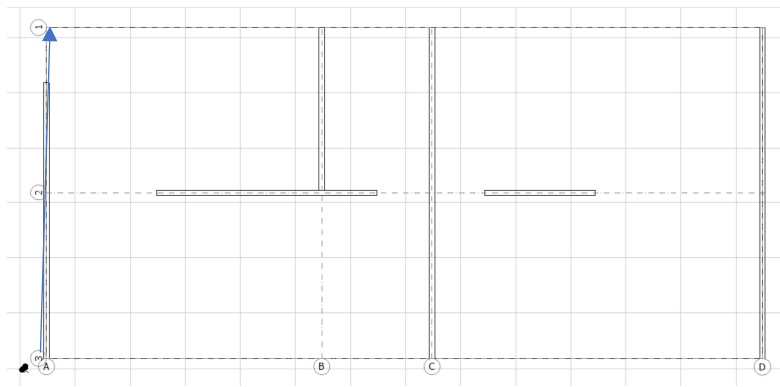
## Liite 8

**2. Piirretään moduulilinjat vaakasuoraan**

- Piirtosuunta on ylhäältä oikealle, joten nyt kun valitaan XREF kuvasta oikea yläkulma ja seuraavaksi vasen yläkulma, tekee ohjelma lisäksi 2 kappaletta moduulilinjooja (123) 6 metrin väleillä.

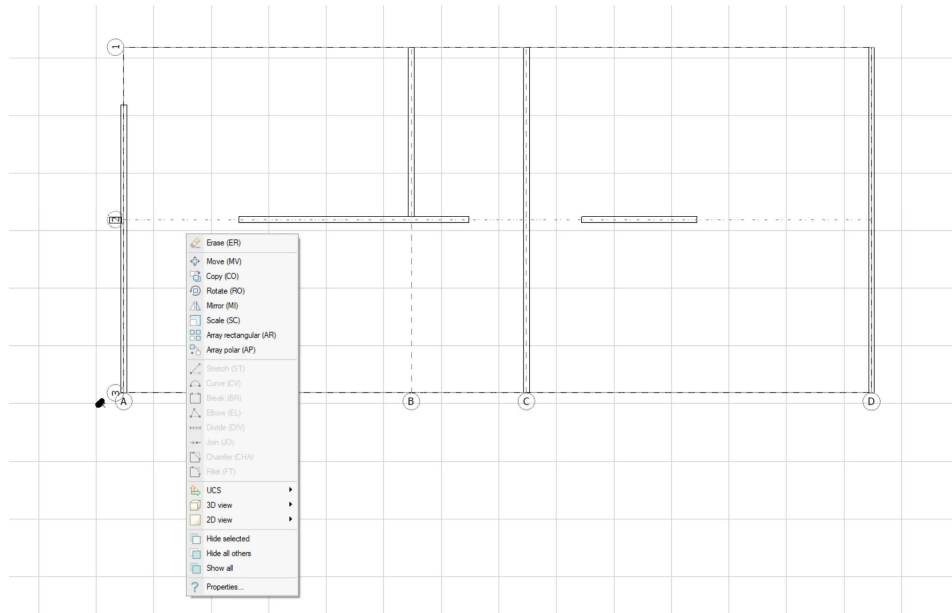
**3. Piirretään moduulilinjat pystysuoraan.**

- Piirtosuunta on vasemmalta ylös eli valitaan vasen alakulma ja vasen yläkulma, jolloin ohjelma tekee lisäksi 3 kappaletta linjoja (ABCD) valituilla välimatkoilla.

**4. Moduulilinjojen muokkaus**

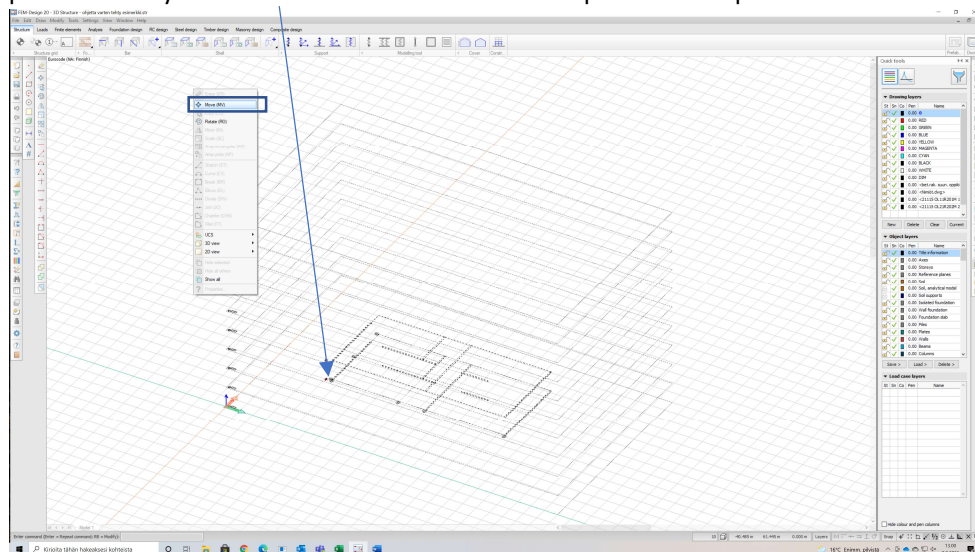
- Moduulilinjooja voi muokata kuten viivoja autocadissa. Tämä tapahtuu maalaamalla yksittäinen moduulilinja, jolloin valikko ilmestyy.

## Liite 8



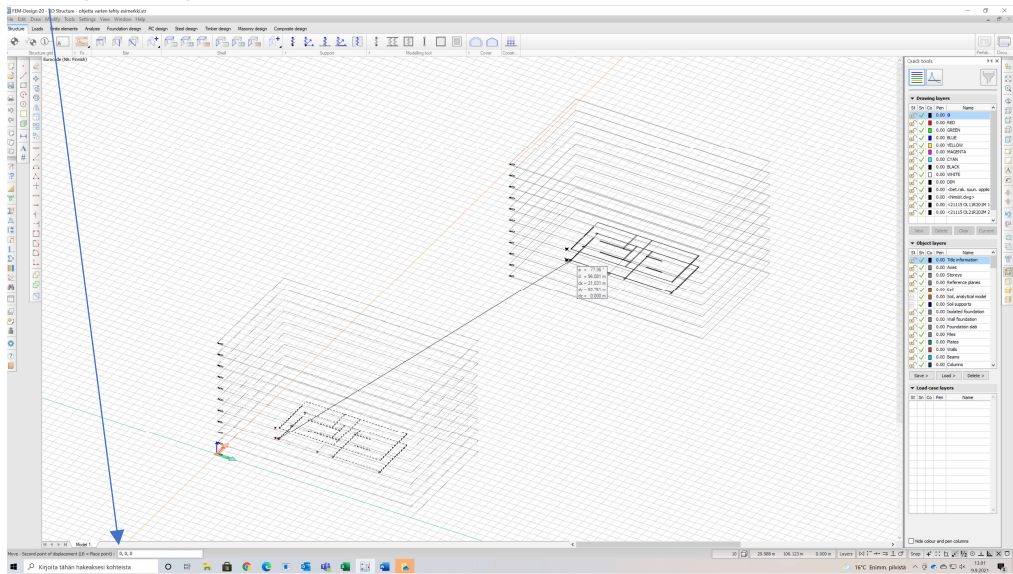
5. Tämän jälkeen vasemman alakulman moduuli siirretään koordinaatiston origoon eli 0, 0, 0 pisteeseen.

- Avataan oikean reunan "Select view"-nappulasta "Return to 3D-view". 3D näkymästä valitaan kaikki mukaan lukien kerrokset ja siirretään ne "move" komennolla 0, 0, 0-pisteeseen käyttäen vasemman alakulman moduulipistettä lähtöpisteenä.



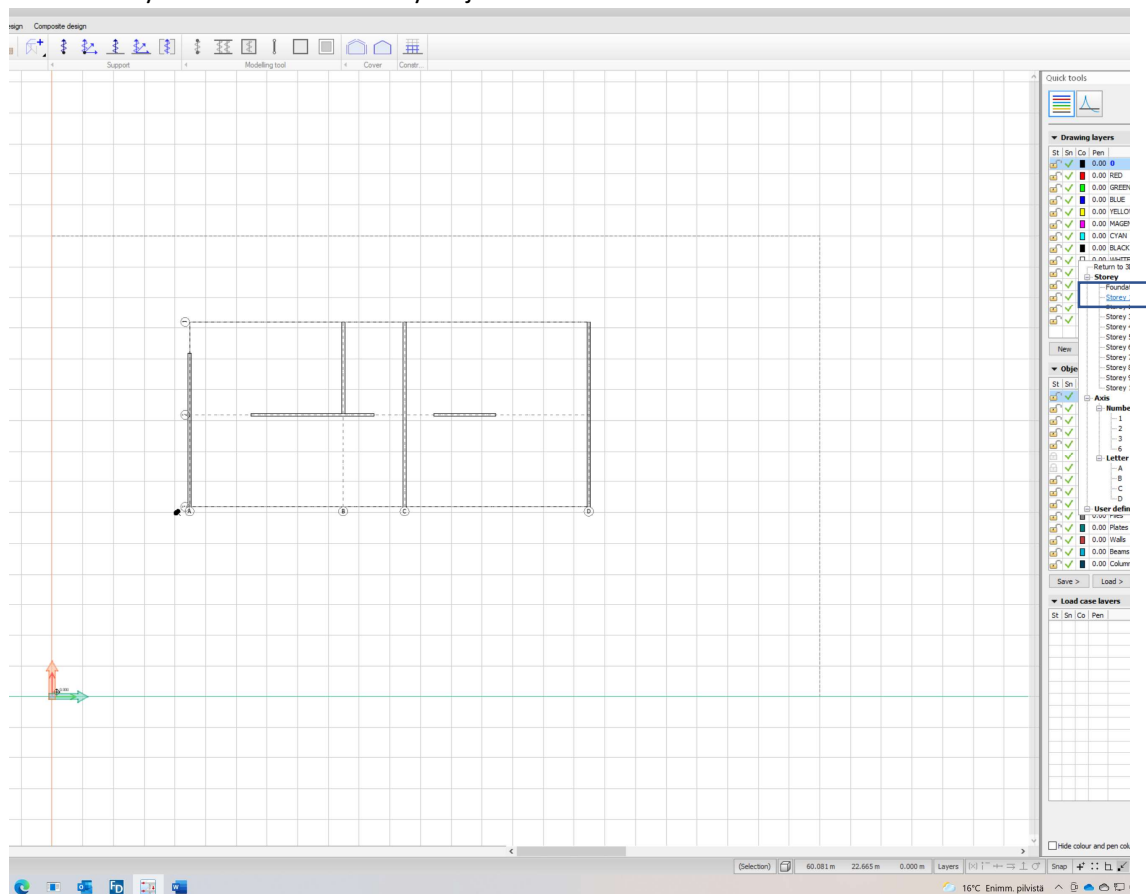
## Liite 8

- 0, 0, 0-pisteen syöttö:



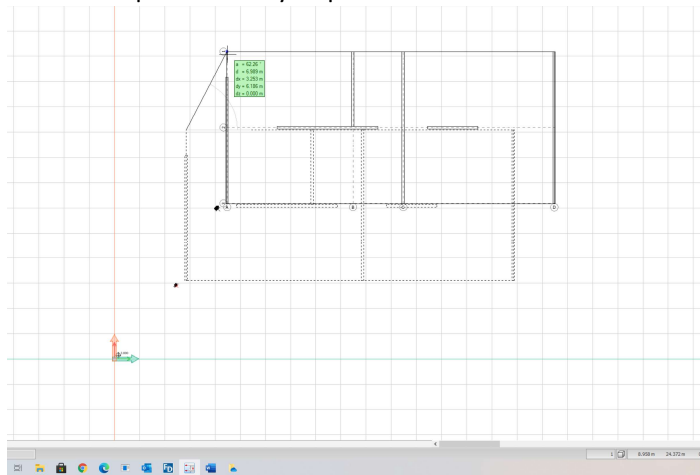
## 1.4.1 Kerroskohtaiset XREF-tasokuvat

- Moduulilinjat näkyvät kaikissa kerroksissa, joten ylempiin kerroksiin on helppo lisätä kerroskohtainen XREF- tiedosto ja linjaamalla tietyn moduulin mukaan sen.
- Vaihdetaan ylempään kerroksen näkymä ja lisätään uusi XREF-tiedosto sille tasolle.



## Liite 8

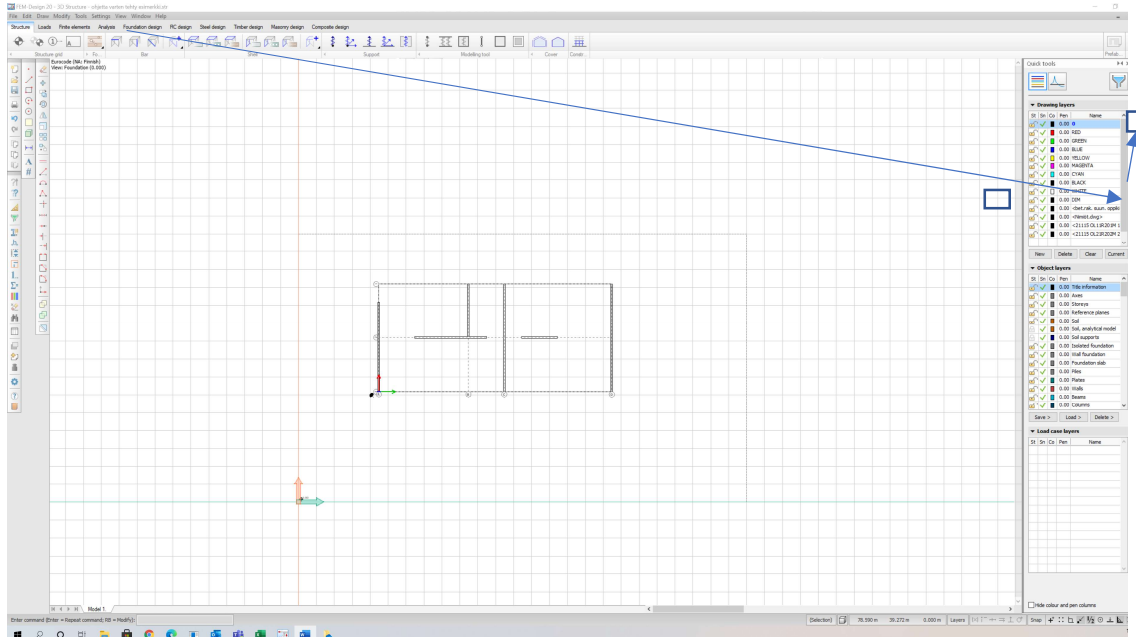
- Uusi XREF-tasokuva sitten linjataan alemmasta tasokuvasta tehdyn moduuliverkon mukaan.
- Tämä käy kätevästi klikkaamalla XREF-kuvaa, XREF-kuva valittuna klikataan kohtaa, jonka haluat siirtää tiettyyn moduulipisteeseen ja sitten klikkaamalla sitä moduulipistettä johon tämä kohta on menossa. Tämän jälkeen voi tarkastaa tasokuvan sijainnin vaihtamalla alemman kerroksen näkymään ja vaihtamalla takaisin ylempään, tasokuvien pitäisi olla täysin päällekkäin.



## 1.5 Seinien, tukien ja laattojen luominen

## 1. Vaihdetaan kerrosnäköjä johon seinät ja laatat mallinnetaan ja muutetaan "Plane view"-näkömä.

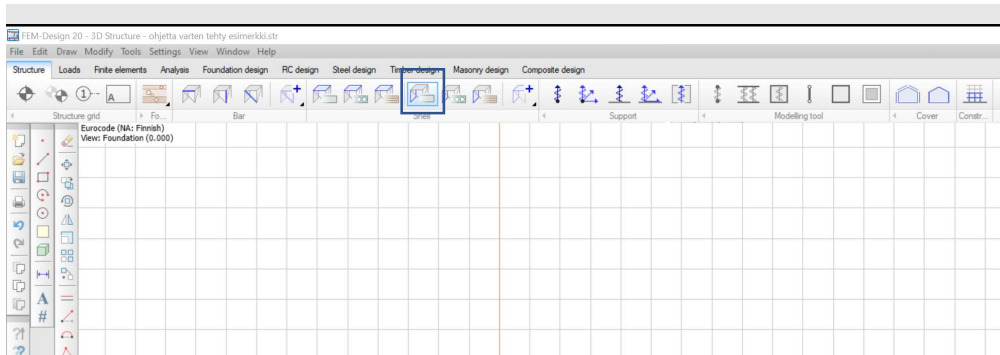
- Tämä auttaa seinien ja laattojen mallintamisessa, koska XREF-tiedosto ja moduuliverkko näkyy "Plane view"-näkömässä suoraan yläpuolelta katsottuna.



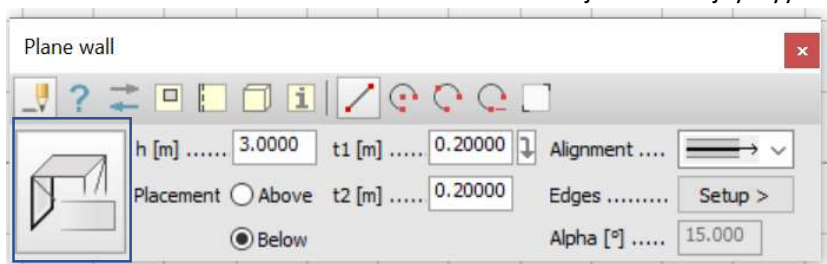
## Liite 8

## 2. Mallinnetaan seinät moduuliverkon ja XREF-tiedoston mukaan.

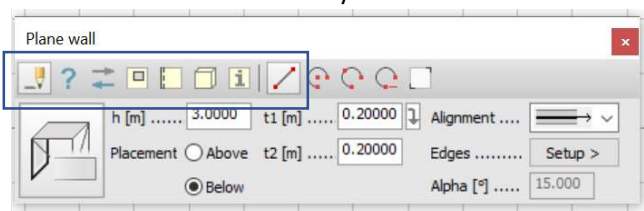
- "Structure"-välilehden "Shell"-osiolta valitaan Plane wall joka avaa ikkunan josta voi valita piirrettävän seinän ominaisuuksia.



- Plane wall ikkunasta voi valita:
  - o seinän korkeuden (h),
  - o Piirtääkö ohjelma sen ylä- vai alapuolelle (Placement),
  - o Seinän alku ja loppupaksuuden (t1 ja t2)
  - o Linjan, jonka mukaan ohjelma piirtää seinän (Alignment)
  - o Seinän reunaliitosten ominaisuudet (Edges)
  - o Lisäksi "Default settings"-nappulasta avautuu valikko, josta voi valita em. asetusten lisäksi materiaalin ominaisuuksia ja muuttaa jäykkyyttä.



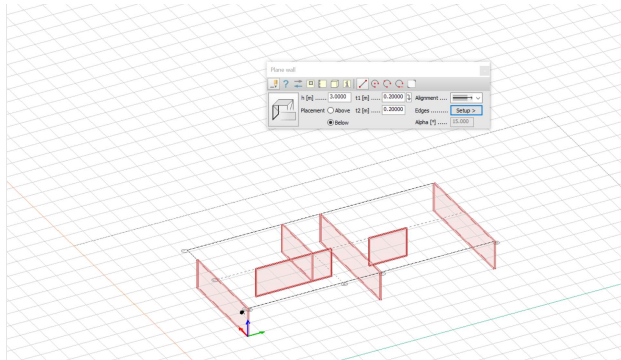
- Plane wall ikkunan yläosan valinnat vaikuttaa toimintoihin, joita tämä ikkuna suorittaa (Vasemmalta oikealle):
  - o Define: Tämä valinta päällä piirretään uudet seinät.
  - o Properties: Tämä valinta avaan niiden seinien ominaisuudet, jotka maalattu.
  - o Convert: Tällä valinnalla voidaan muuttaa tuoduista BIM-malleista esimerkiksi pilari, seinäksi, jos se on toisessa ohjelmassa vahingossa mallinnettu pilariksi.
  - o Hole: Tällä valinnalla voi tehdä piirrettyyn seinään reiän.
  - o Edge connection: Tällä valinnalla vaikutetaan tiettyyn/tiettyihin liitoksiin seinässä. Ensin valitaan seinä ja sitten kyseisestä seinästä tietty liitos. Tämä avaa ikkunan, jossa voi valita toimiiko liitos jäykkänä, nivelenä, onko se irti, sekä voi valita mistä suunnasta liitos ottaa voimia.
  - o Info: Tämä valinta näyttää valitun seinän tilavuuden ja sen painopisteen.



- Seinän piirto tapahtuu valitsemalla ensin oikeat asetukset seinälle/seinille, valitsemalla alkupiste ja sen jälkeen loppupiste. Tämä toiminto on jatkuva, eli edellisen seinän

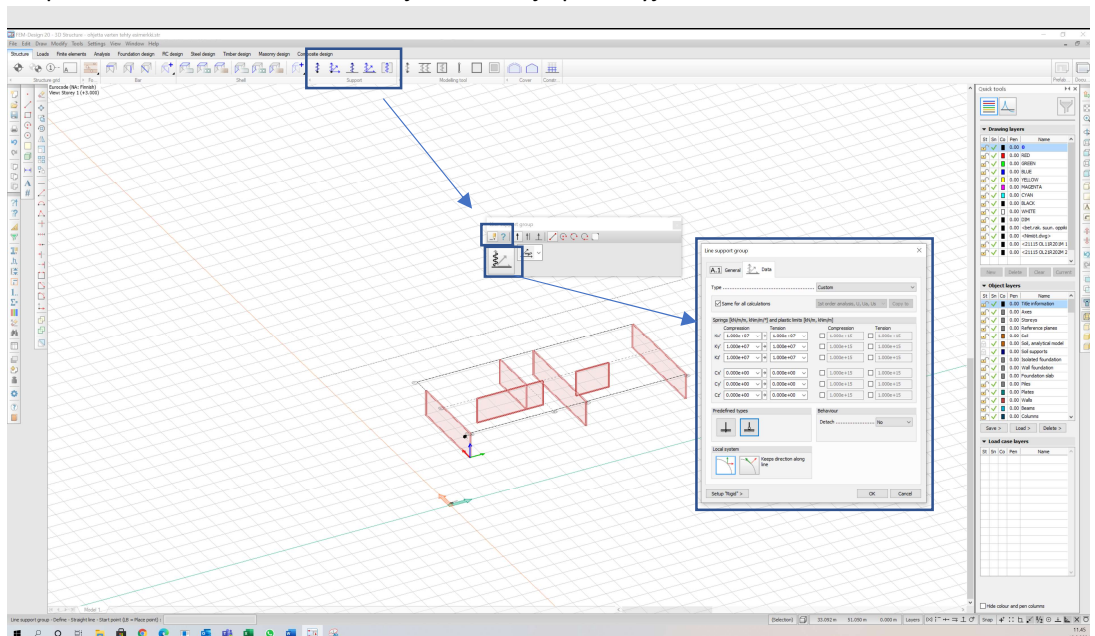
## Liite 8

loppupiste toimii seuraavan seinän alkupisteelle, mutta uuden pisteen saa valittua painamalla "Esc"-nappulaa ja valitsemalla uuden lähtöpisteen. Kuvassa seinät piirrettyinä XREF-tiedoston mukaan.



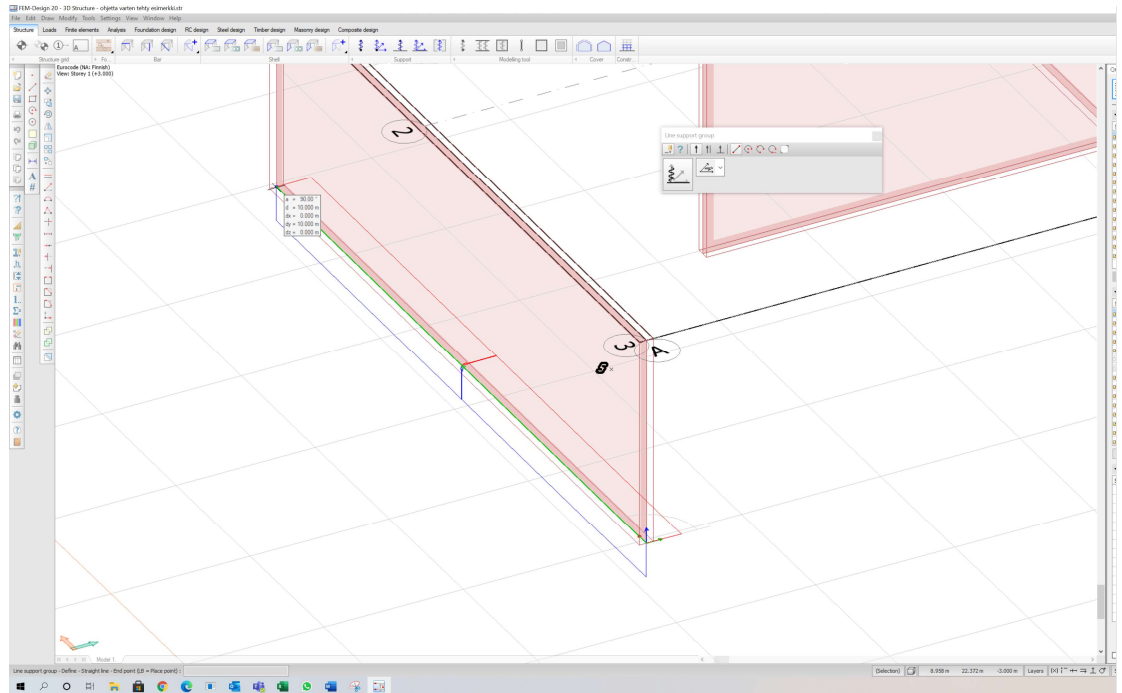
### 3. Asetetaan piirrettyjen seinien alle tuet.

- Structure välilehden "support" osiosta löytyy piste, linja ja aluetuki, joista klikkaamalla aukeaa samantyylinen ikkuna kuin seinille. Pistetuille annetaan tietty piste esimerkiksi pilarin alle. Linjatukien lisääminen tapahtuu samaan tyyliin kuin seinien. Ensinnä valitaan lähtöpiste ja sitten loppupiste. Aluetuen alue piirretään esimerkiksi oikeasta alakulmasta vasempaan yläkulmaan.
- Tukien piirto tapahtuu valitsemalla "support" osiosta oikea tukityyppi ja avautuvasta ikkunasta valitaan "Define"-valinta päälle, "Default settings"-nappulasta painamalla avautuu ikkuna, jossa voi valita tuen asetukset, kuten toimiko se nivelenä tai mistä suunnasta se ottaa tai ei ota voimia.
- Properties valinnalla voi tarkastella ja muuttaa jo piirrettyjen tukien ominaisuuksia.



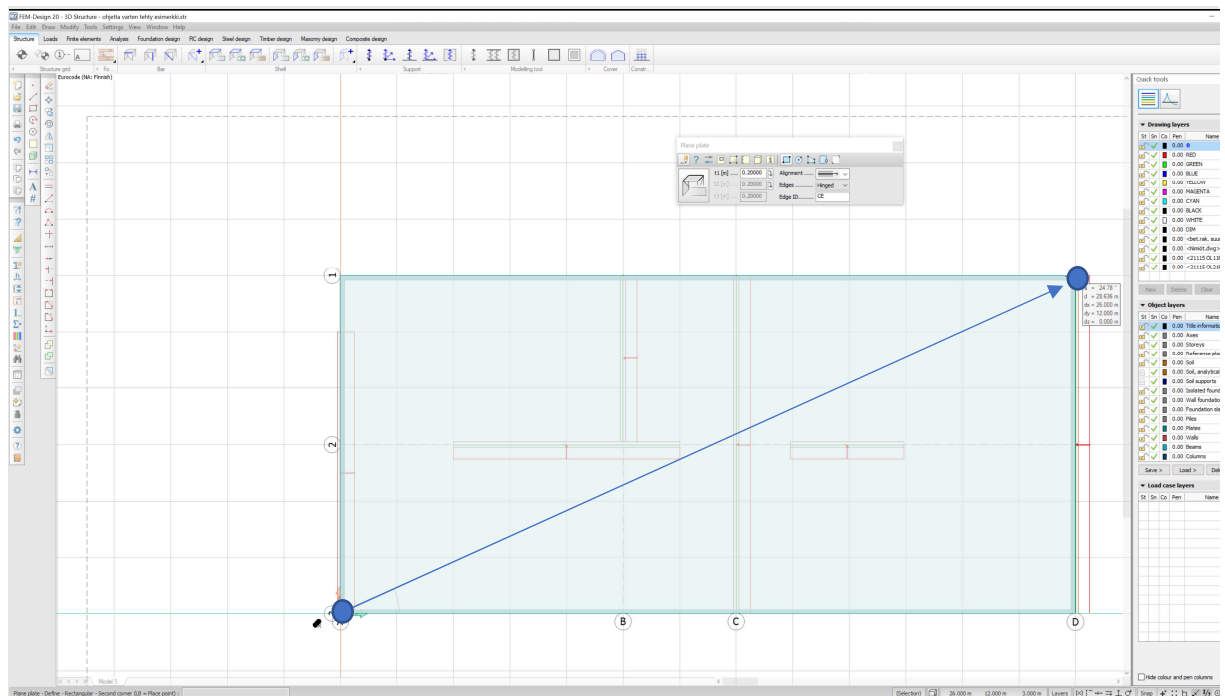
- Viivatukien asennus seinien alle tapahtuu valitsemalla lähtöpiste seinän alakulmasta ja loppupiste seuraavasta alakulmasta.

## Liite 8



#### 4. Mallinnetaan seinien päälle laatta.

- "Shell"-osiossa plane plate, profiled plate ja timber plate toiminnoilla luodaan laattoja.
- Avautuvassa ikkunassa on samankaltaiset asetukset kuin seinille, "define", "properties"...
- "default settings"-nappula avaa samankaltaisen ikkunan kuin seinille mistä voi muuttaa piirrettävän laatan ominaisuuksia.
- Laatta piirretään valitsemalla lähtökulma esimerkiksi alhaalta vasemmalta ja piirtämällä suorakulmio valitsemalla loppukulma ylhäältä oikealta.

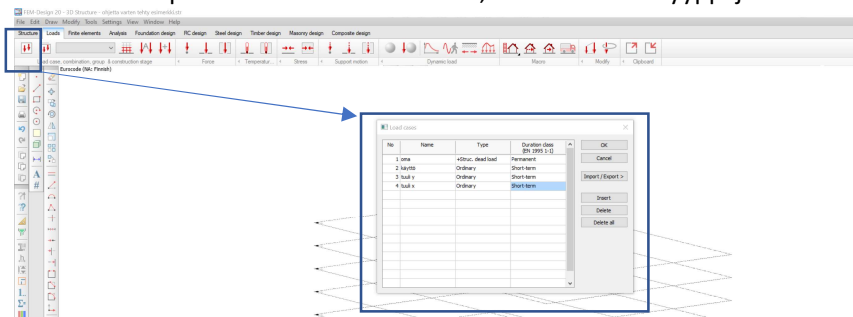


## Liite 8

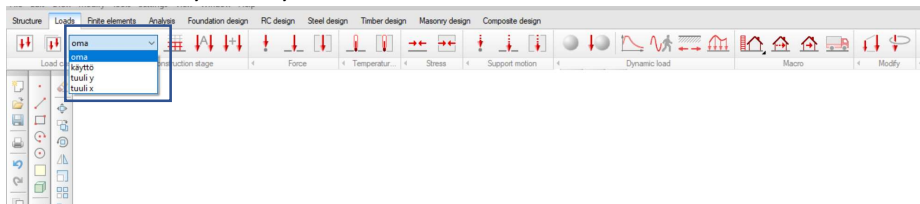
## 1.6 Kuormien luominen ja niiden liittäminen malliin

## 1. "loads"-välilehdellä avataan "load cases"-toiminto, avautuu ikkuna, johon voi lisätä kuormia.

- Lisääminen tapahtuu nimeämällä kuorma, antamalla sille tyyppi ja aikaluokka



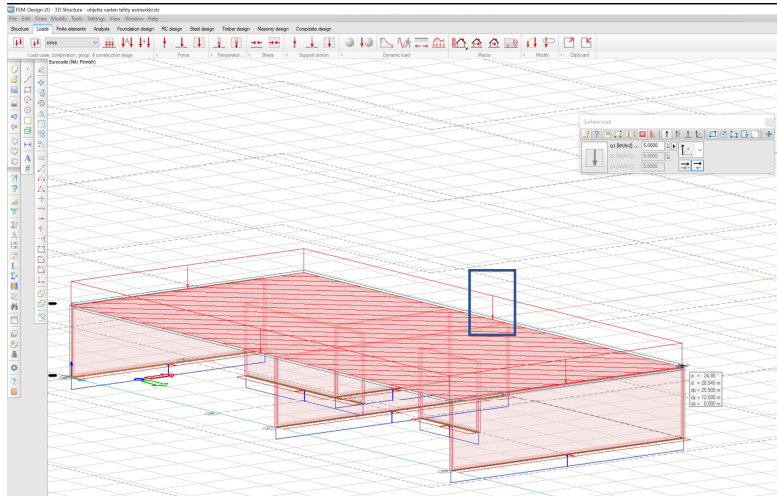
- Luodut kuormat löytyvät "Loads"-välilehdeltä löytyvästä alasettovalikosta.
- Alasettovalikossa näkyvää kuormaa muokataan, eli kun valikosta valitaan esimerkiksi "tuuli y", lisätyt kuormat tulevat "tuuli y":n load caselle. Näillä load caseilla sitten tehdään kuormayhdistelyt.



## 2. Lisätään load case:ille kuormat malliin

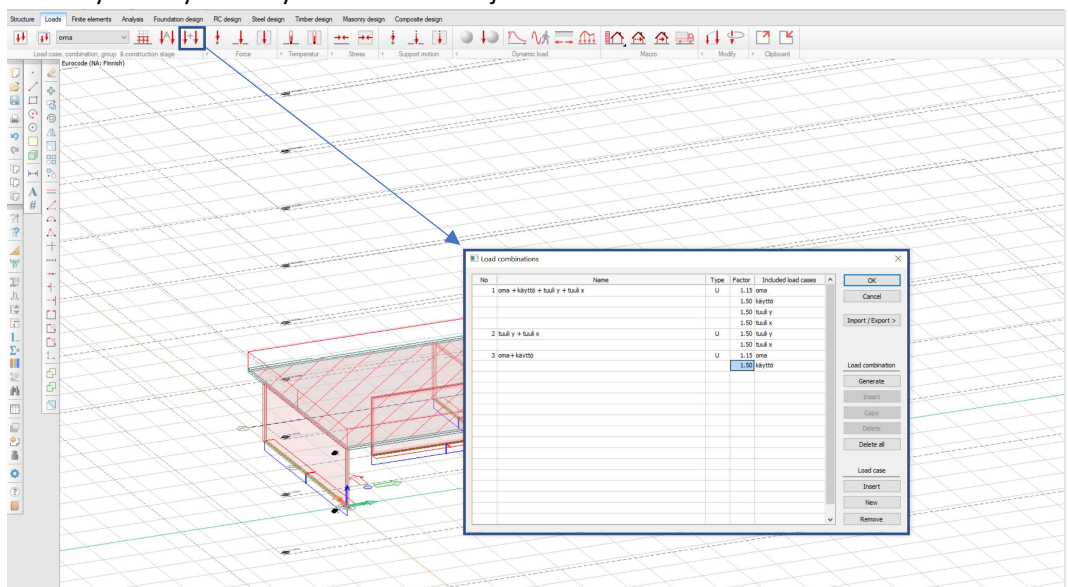
- Valitaan alasettovalikosta kuorma, jota muokataan, "Force"-osiosta valitaan sitten kuormaa vastaava toiminto. Osiossa on piste-, viiva- ja aluekuorma. Tähän esimerkkiin laitetaan "oma"- ja "käyttö"-kuormat laatalle aluekuormina ja tuulikuormat viivakuormina laatan reunaan.
- "Force"-osiosta avatussa ikkunassa on valintoja samalla periaatteella kuin seinissä, tuissa ja laatoissa.
- Lisäksi ikkunassa voi valita kuorman suuruuden, sen suunnan ja mihin suuntaan se on positiivinen
- Kuorman lisääminen tapahtuu samalla periaatteella kuin seinän, tuen tai laatan.
- Kuorman lisäämisen jälkeen on suositeltavaa tarkastaa, että lisätyn kuorma on oikea. Tämän voi tarkastaa kuormassa näkyvästä nuolesta, joka osoittaa kuormitus suunnan.

## Liite 8



### 3. Tehdään kuormayhdistelyt "load combinations"-toiminnolla.

- Avautuvassa ikkunassa nimetään kuormayhdistelyt, valitaan kyseiselle kuormayhdistelylle sisällytettävät kuormat ja annetaan niille osavarmuuskertoimet.

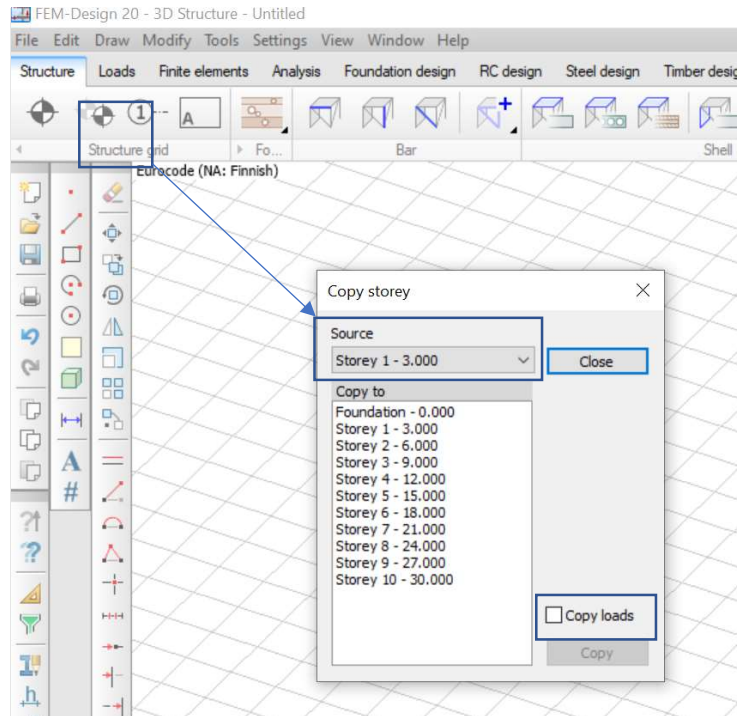


## 1.7 Kerrosten ja kuormien kopiointi

### 1. Kopioidaan kerrokset ja kuormat

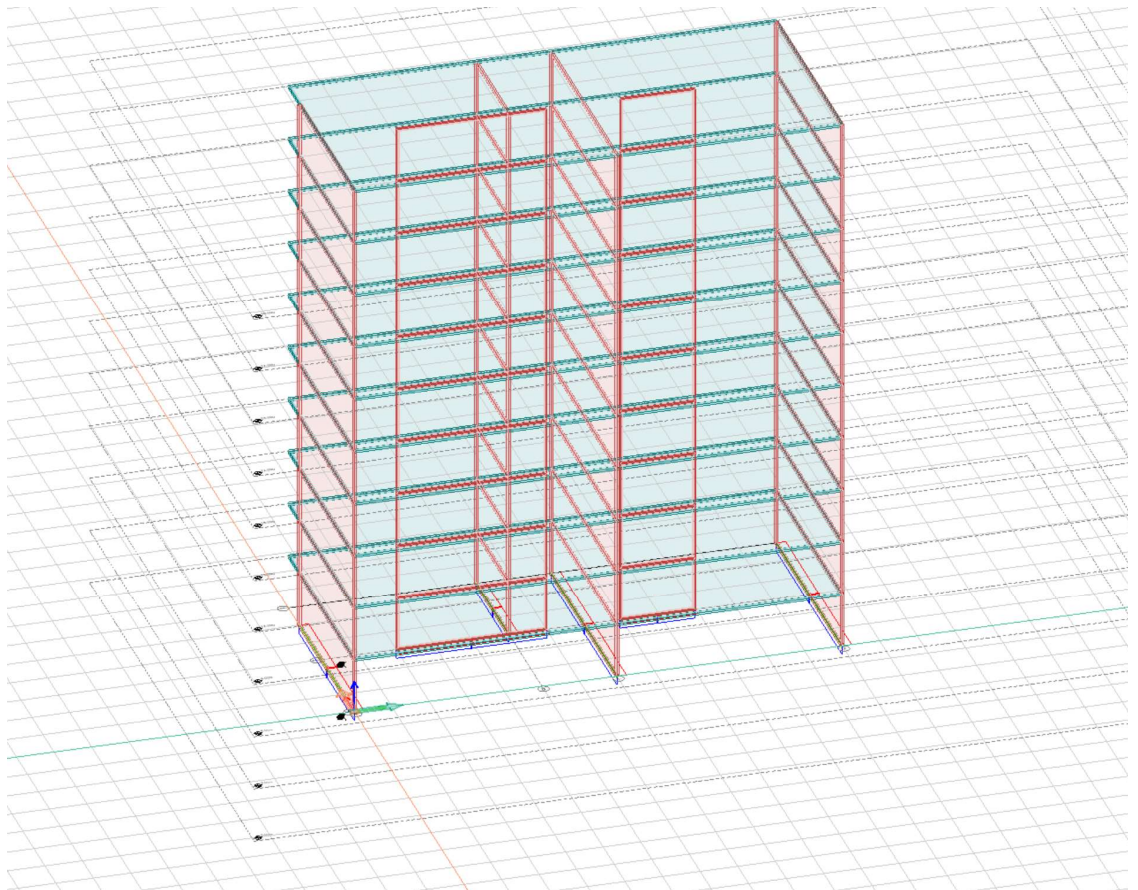
- Structure -välilehdeltä valittaessa "Copy storey(CST)"- nappula, avautuvalla välilehdellä voi valita kerroksen joka kopioidaan ja mihin kerrokseen/kerrokseen ne kopioidaan. Useita kerroksia voi valita maalaamalla tai klikkailemalla yksi kerrallaan CTRL- näppäin pohjassa. Lisäksi voi valita kopioidaanko kerroksien kuormat myös.

## Liite 8



## 2. Tarkastetaan 3D-näkymässä, että kaikki on kohdallaan.

- Structure-välilehdellä näkyy pelkkä rakenne ja "kuormat"-välilehdellä näkyy lisäksi kuormat.

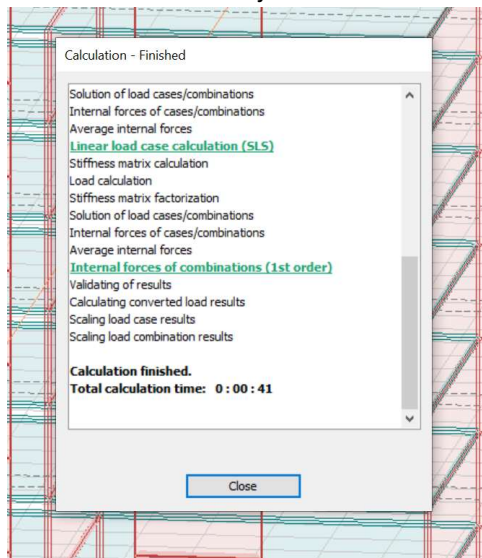


- "Loads"-välilehti



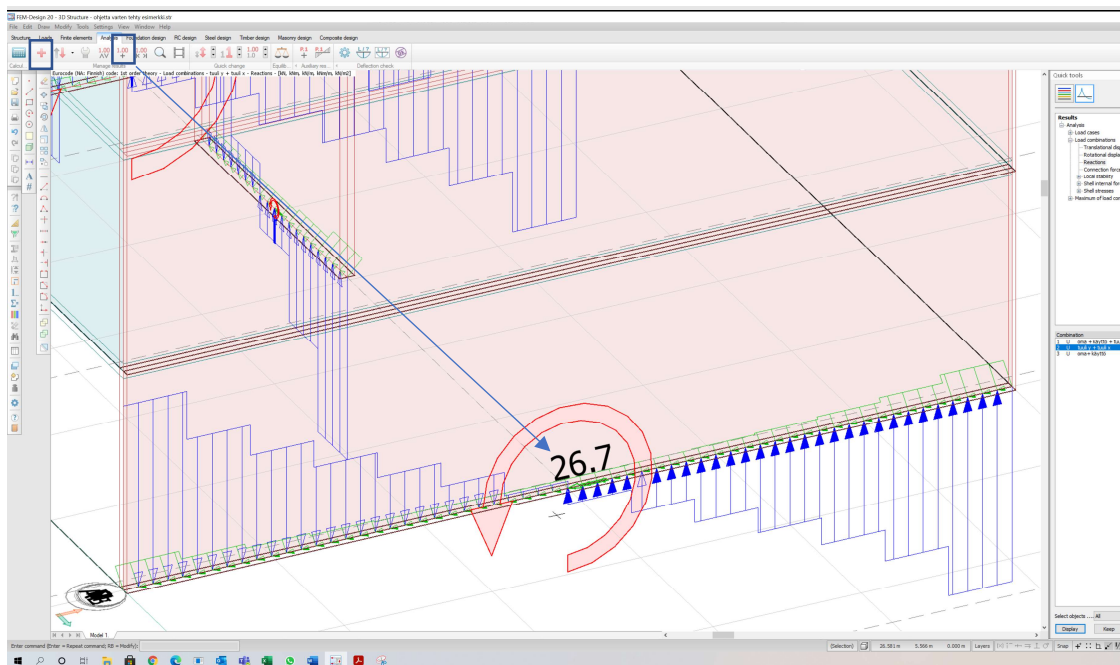
## Liite 8

- Laskelmien ei tulisi viedä kovin kauan, jos laskelmissa menee kauan, on luultavasti mallissa tai kuormissa jokin virhe mikä monimutkaistaa laskelmia turhaan.



### 1.8.1 2. Tämän jälkeen mallin voimia voi tarkastella "Analysis"- välilehdellä.

- "new result"-nappulasta saa valittua mitä tuloksia haluaa.
- "numeric value"-nappulasta saa toiminnon, jolla tietyn kohdan maalaamalla saa tuloksen.

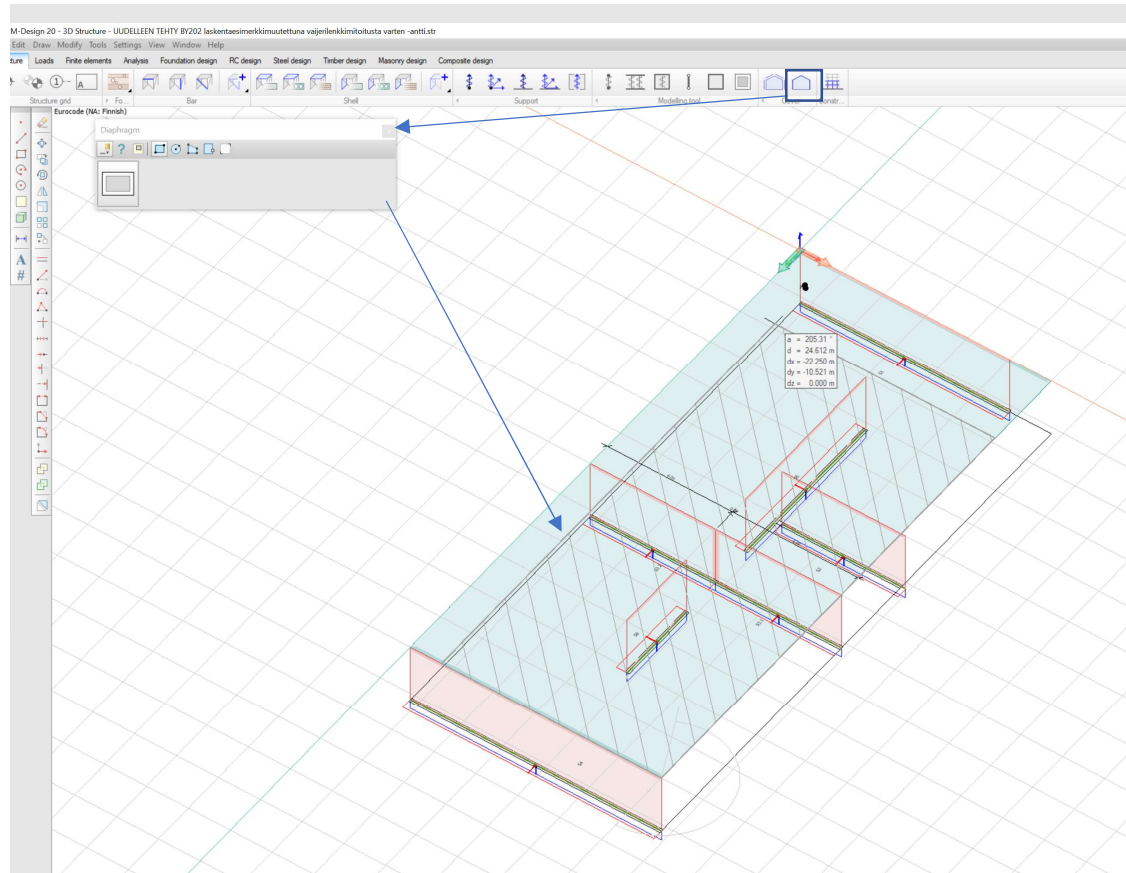


## Liite 8

## 1.9 Diaphragm

Diaphragm on työkalu, jolla voidaan määrittää laatta äärettömän jäykäksi horisontaalisia muodonmuutoksia, tai kaikkia muodonmuutoksia kohtaan, tällä työkalulla on mahdollista yksinkertaistaa mallia, jos laatasto tekee tulosten tulkitsemisesta vaikeaa.

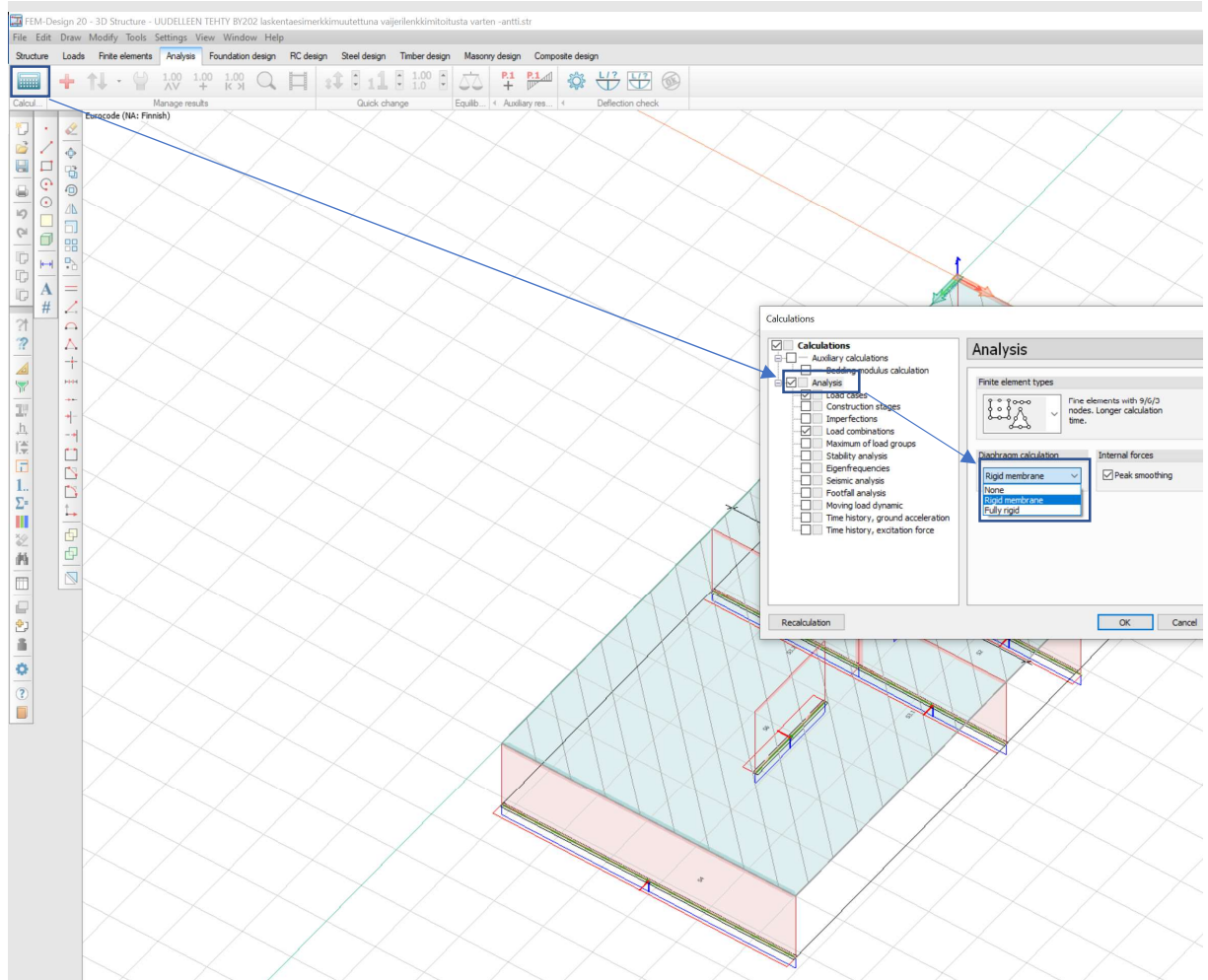
## 1. Diaphragmin asetus laatalle



## Liite 8

## 2. Diaphragm analyysissä

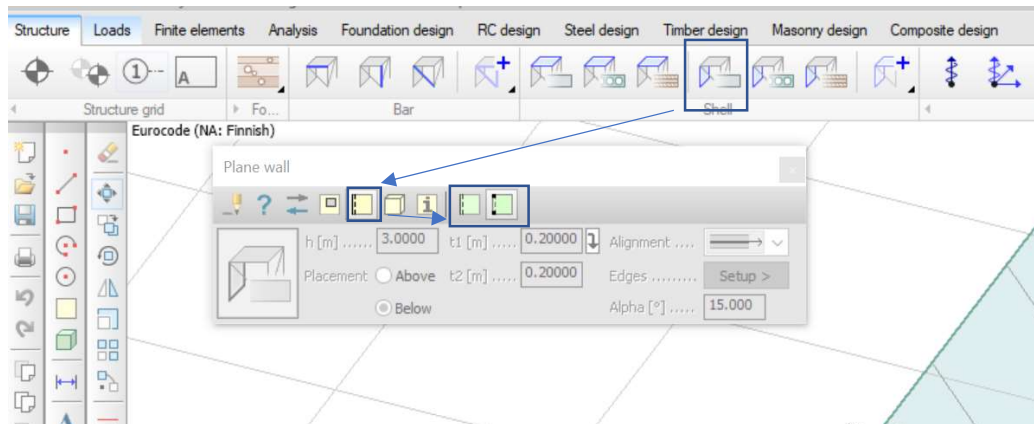
- "Analysis" – välilehden "Calculate" – toiminnolla avautuvassa ikkunassa valitaan kohta "Analysis". "Analysis" – kohdassa on "Diaphragm calculation" – alavetovalikko josta valitaan kuinka diaphragm toimii. "Rigid membrane" on horisontaalisesti jäykkä kalvo, eli laatta pääsee silloin taipumaan. "Fully rigid" on kaikkiin suuntiin jäykkä, jolloin laatta ei taivu mihinkään suuntaan.



## Liite 8

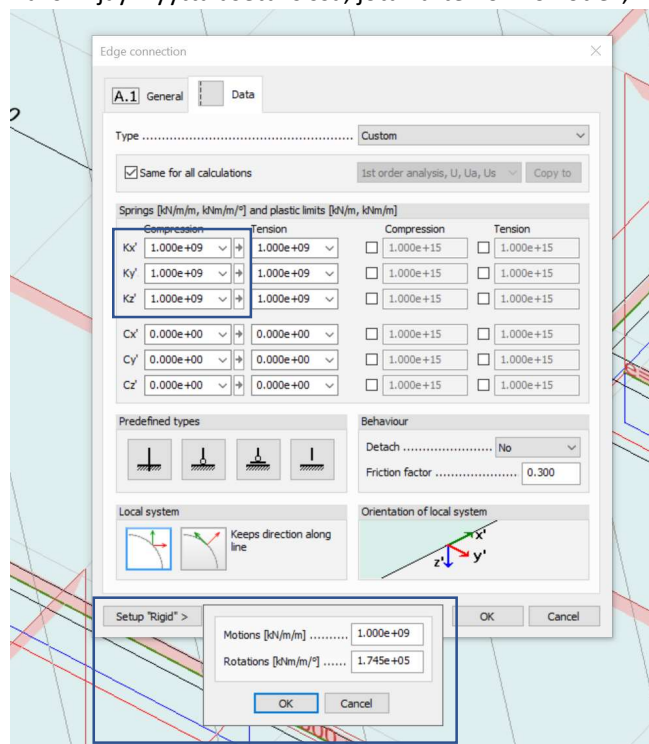
## 1.10 Edge connection

"Edge connection" työkalusta on kaksi eri valintaa, "Edge connection" ja "End point behaviour". "Edge connection" valinnan alla voi säädellä liitosten ominaisuuksia ja "end point behaviour" valinnan alla kulmien ominaisuuksia. "End point behaviour" valinnalla voidaan asettaa kulmat siten, että ne eivät sotke seinien liitosvoimia. Jäykistämällä saumoja ja irrottamalla kulmat päästään lähelle käsinlaskennan tuloksia.



## 1. Edge connection

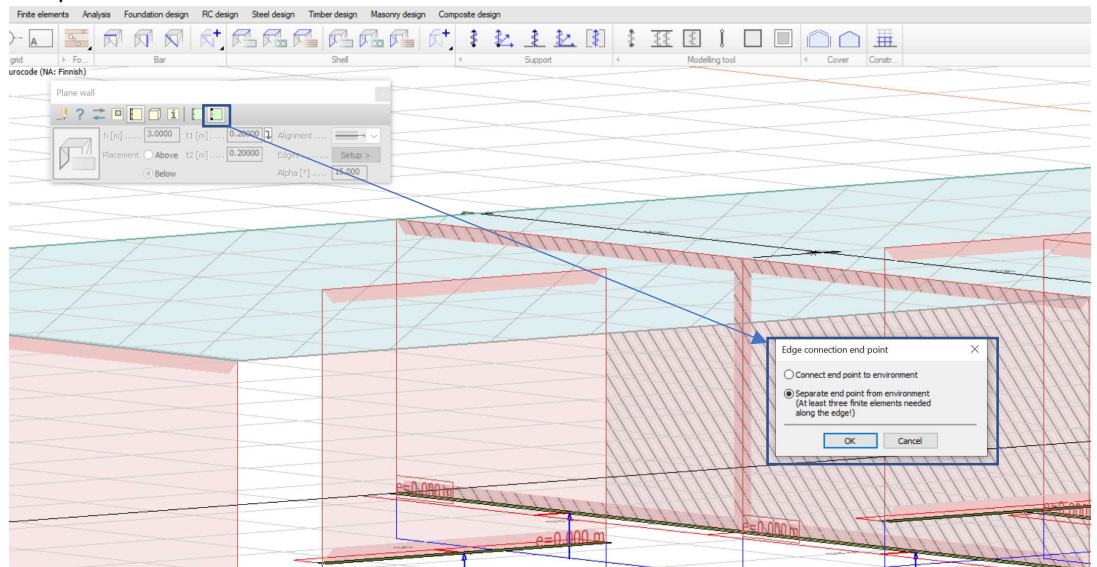
- Edge connection valikossa voi vaikuttaa sauman jäykkyyteen. Sauman ominaisuudet saadaan esille valitsemalla "edge connection" ja maalaamalla seinä(t), jo(i)ta tarkastellaan ja sen jälkeen sauma(t) jo(i)ta tarkastellaan. Valikossa voi muuttaa saumojen jäykkyyttä eri suuntiin. Saumoja jäykistäessä lisää pitää nostaa maksimijäykkyyttä asetuksissa, jota varten on "oikotie", "setup rigid" -painikkeessa.



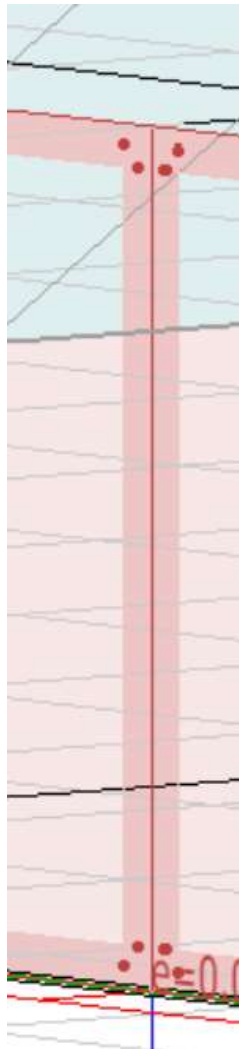
## Liite 8

## 2. End point behaviour

- End point behaviour valinnalla voidaan erottaa kulmat sotkemasta tuloksia.



- Erotetut kulmat näkyvät mallissa täplinä niissä kulmissa, joista on erotettu kulmat.

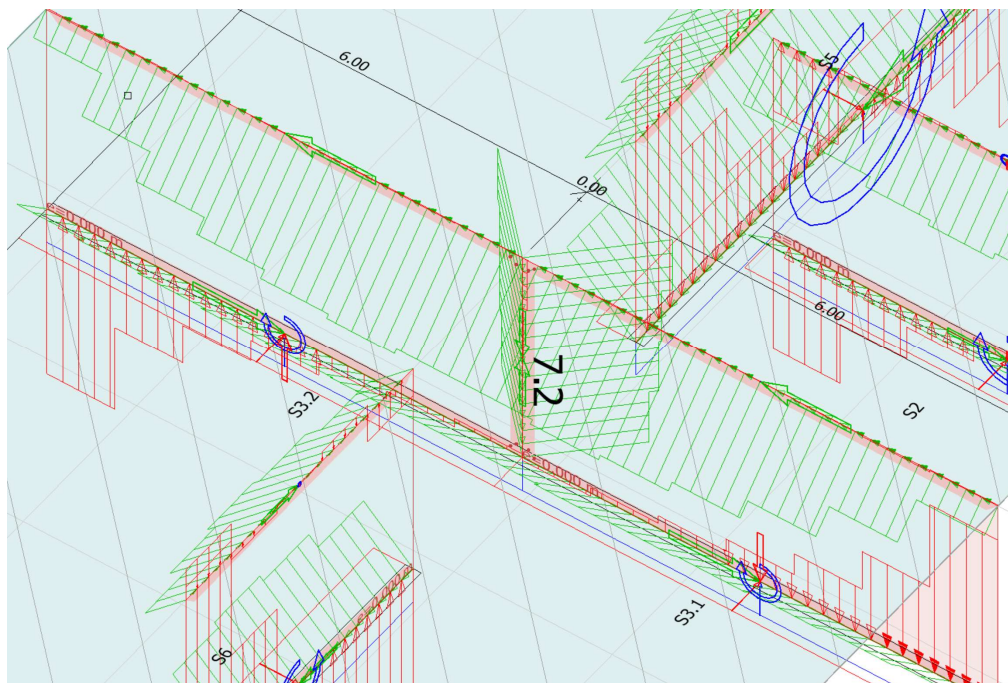


## Liite 8

**3. Käsinelaskennan tulokset vrt. jäykkään saumaan irroitetuilla kulmilla.**

Käsinelaskenta ei ota seinän sisäisiä leikkausvoimia huomioon, joten tulokset hieman eriävät.

FEM-design



käsinelaskentavertailu

Seinän s3.1 ja s.32 välinen leikkausvoima suuntaan Z			
$V_i = H_d * S / I$			
missä			
$V_i$	saumassa vaikuttava elikkauvoima [kN]		
$H_d$	Tarkastelussa olevan seinän vaakavoima [kN]		
$S$	Tarkastelussa olevan elementin staattinen momentti sauman suhteen [m <sup>3</sup> ]		
$I$	Tarkastelussa olevan seinän hitausmomentti [m <sup>4</sup> ]		
$H_d$	19.8	kN	BY202 harjoituksen seinä 3 jaettuna keskeltä seiniin 3.1 ja 3.2
$b$	0.2	m	
$L_{s3.1}$	6	m	

## Liite 8

L.s3.2	6	m					
L.yht	12	m					
Staattinen momentti							
S	$(b * L.3.1^2) / 2$						
s.3.1	3.6	m <sup>3</sup>					
s3.2	3.6	m <sup>3</sup>					
hitausmomentti							
I	$b * L.yht^3 / 12$						
I	28.8	m <sup>4</sup>					
V.i.3.1	2.475	kN/m	7.425	kN			