



# Betonirakenteisten korkeiden rakennusten FEM-laskentamallit

Jussi-Pekka Laurila

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2020

Rakennustekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

LAURILA JUSSI-PEKKA:  
Betonirakenteiden korkeiden rakennusten FEM-laskentamallit

Opinnäytetyö 76 sivua  
Joulukuu 2020

---

Opinnäytetyö käsittelee korkeiden rakennusten FEM-laskentamalleja. Työ tehtiin NQE Rakennetekniikka Oy:lle. Työn tavoitteena oli perehtyä monikerrosrakennuksen lujuslaskennassa esiintyviin ilmiöihin ja vertailla eri lujuslaskentaohjelmistoja.

Opinnäytetyössä käsitellään FEM-laskennan perusteita, jotka laskentaa suorittavan suunnittelijan tulisi hallita. Työssä tehtiin myös kirjallisuusselvitystä hyväksi havaittuihin käytäntöihin ja ohjeistuksiin. Lisäksi tarkasteltiin asioita, joita Helsingin korkean rakentamisen rakennustapaohjeessa on esitetty.

Korkeiden rakennusten suunnittelussa tulee huomioida tuulikuorman aiheuttamat värähtelyt ja kiihtyvyydet. Ominaistaajuudet monikerrosrakentamisessa lasketaan FEM-laskennalla. Työssä tarkasteltiin ohjelmien suoriutumista elementtime-  
netelmän mukaisessa ominaistaajuuden laskennassa. Lisäksi tyypillisiä korkean rakentamisen tutkinnan aiheita ovat vaiheittaisen rakentamisen vaikutukset. Omat painot kertyvät ja kuormittavat alempia yksi kerros kerrallaan, jonka huomiointiin ohjelmistoista löytyy työkaluja. Lisäksi betonirakenteen halkeilu vaikuttaa korkean rakennuksen rasituksiin. Tietokonelaskennasta saatuja laskentatuloksia vertailtiin käsin laskennasta saatuihin arvoihin.

Tutkimuksessa selvitettiin FEM-ohjelmistojen soveltuvuutta jatkuvan sortuman analysointiin. Jatkuvan sortuman tarkastelussa rakenteelta vaaditaan suurta muodonmuutoskykyä, jotta materiaalimenekki saadaan optimoitua. Selvitysten mukaan laskentaohjelmistojen epälineaarisisissa materiaalimalleissa on vielä kehitettävää, jotta laskenta saataisiin helposti tehtyä. Opinnäytetyössä esitetään laskentatapa, jossa rakenteen geometriaa FEM-mallissa muuttamalla voidaan rasituksia tutkia köysiteorian periaatteilla lineaarisen kimmoteorian mukaisella analyysimallilla.

Tutkimuksessa vertailtiin kolmen eri kaupallisen FEM-laskentaohjelmiston toiminnallisuuksia korkeiden rakennusten lujuslaskennan suorittamiseksi. Ohjelmiksi valittiin suunnittelutoimistoissa yleisesti käytössä olevat Robot Autodesk Structural Analysis, Dlubal RFEM sekä CSI American ETABS. Suoritettujen tutkimusten mukaan ETABS-ohjelmisto soveltuu parhaiten korkean rakennuksen analysointiin.

---

Asiasanat: korkea rakentaminen, FEM-laskenta, jäykistys, värähtely, betonirakenteet

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Construction Engineering Master's Degree

LAURILA JUSSI-PEKKA:

Analysis of multi-storey concrete building using finite element method

Master's thesis 76 pages  
December 2020

---

The purpose of this thesis was to study structural behavior of multi-storey concrete building and compare three commercial FEM-programs. Thesis was made for NQE Rakennetekniikka Ltd.

Structural designer should know the basics of statics and strength calculations. Finite element method fundamentals were opened in the beginning of the thesis. In addition, books and journal papers around the world were studied. Helsinki city has also guidelines for tall buildings which were reviewed.

When designing tall building, wind load effects should be considered. When the building rises higher, the dynamic vibration effects need more attention. Human comfort issues are depended on accelerations. Modal analysis of natural frequency is calculated using FEM-program. Also staged construction should be taken into account. Dead loads of structure will come floor by floor having influence on load distribution. Concrete cracking has also effects on how loads are distributed. Results from FEM-models were compared to manual calculations.

FEM-program suitability to perform progressive collapse analysis was studied. According to studies, non-linear material models on FEM-programs do not very well support very large deformation calculations or material models are laborious to use. One way to model catenary action is to change the geometry in linear elastic analysis model which is presented in the thesis.

In this research three common structural engineering programs were tested to see, how them perform analysing tall buildings. Programs were Robot Autodesk Structural Analysis, Dlubal RFEM and CSI American ETABS. According to studies ETABS managed best to analyse tall building statics.

---

Key words: tall buildings, concrete structures, finite element method

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	8
2	BETONIRAKENTEISEN KORKEAN RAKENNUKSEN SUUNNITTELUPERUSTEET JA OHJEET .....	9
2.1	Elementtimenetelmä .....	9
2.1.1	Yleinen elementtimenetelmä .....	9
2.1.2	Elementtimenetelmän rakenteet .....	11
2.1.3	Elementtimenetelmän ongelmat .....	12
2.2	Raudoitettun betonirakenteen ominaisuudet .....	12
2.3	Perustukset ja maaperän ominaisuudet .....	13
2.4	Kuormat monikerrosrakentamisessa .....	14
2.5	Lineaarinen ja epälineaarinen analyysi .....	15
2.6	Halkeillut ja ehjä poikkileikkaus .....	16
2.7	Värähtely .....	18
2.7.1	Yleistä värähtelystä .....	18
2.7.2	Laskenta elementtimenetelmän avulla .....	19
2.7.3	Rakenteen alin ominaistajuus likimääräismenettelyllä .....	20
2.7.4	Käyttäjän mukavuus värähtelyssä .....	20
2.8	Aukot rakenteellisessa seinässä .....	21
2.9	Vaiheistettu rakentaminen .....	24
2.10	FEM-rakennemallin tarkastus .....	28
2.11	Helsingin korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018 .....	28
3	FEM-LASKENTAMALLIEN VERTAILU .....	31
3.1	Vertailtavat ohjelmistot .....	31
3.1.1	Autodesk Robot Structural Analysis Professional .....	31
3.1.2	Dlubal RFEM .....	31
3.1.3	CSI American ETABS .....	32
3.2	Yleistä korkean rakentamisen FEM-mallintamisesta .....	32
3.3	Esimerkkirakenteen geometria .....	34
3.4	Rakenneosien mallinnus .....	35
3.4.1	Valmistelut ennen mallinnuksen aloitusta .....	35
3.4.2	Laskentamallien geometrian luonti .....	37
3.4.1	Aukotukset levyelementeissä .....	38
3.4.2	Näkymien rajaus .....	40
3.4.1	Levyelementtien verkotukset .....	41
3.4.1	Laskentamallien geometria, toistuvat kerrokset .....	43

3.4.2	Laskentamallin elementtien vapautukset.....	47
3.4.3	Laskentamallin nopeuden optimointi .....	47
3.5	Laskentamallien tulokset ja vertailu.....	48
3.5.1	Tukireaktiot.....	48
3.5.2	Aukkopielet seinässä.....	49
3.5.3	Vaiheistettu rakentaminen .....	54
3.5.4	Aukkopalkit .....	54
3.5.5	Ominaistaajuus.....	58
4	VAIHEITTAINEN RAKENTAMINEN .....	60
4.1	Tutkittavan laskentamallin geometria .....	60
4.2	Pilarikuormien vertailu.....	61
4.3	Seinän aukkopielen rasiusten vertailu.....	64
5	JATKUVAN SORTUMAN TARKASTELU FEM-LASKENTAMALLILLA .....	68
5.1	Jatkuva sortuma EN1991 mukaan .....	68
5.2	Köysiteoria FEM-laskennan avulla .....	69
5.3	Esimerkki seinälohkon poistamisen vaikutuksista FEM-laskennan avulla.....	69
6	POHDINTA .....	72
	LÄHTEET.....	75

## LYHENTEET JA TERMIT

a	siirtymä, mm tai m
b	rakenteen leveys, mm tai m
c	vaimennuskerroin, damping coefficient
ETABS	FEM-laskentaohjelma, American institute ETABS
FEA	Finite element analysis – elementtimenetelmällä suoritettu laskenta
FEM	Finite element method – elementtimenetelmä
k	kokonaisjäykkyys, complex stiffness
k	jousivakio
K	globaali jäykkyys
l	pituus
m	metri
m	massa, värähtelyä laskettaessa
mm	millimetri
m/s <sup>2</sup>	kiihtyvyys
M	taivutusmomentti
N	aksaalivoima
n <sub>1</sub>	alin ominaistajuuus, Hz
node	solmupiste
<i>p</i>	kuormitus
q	pintakuorma, N/mm <sup>2</sup>
Q	pistekuorma
RFEM	FEM-laskentaohjelma, Dlubal RFEM
Robot	FEM-laskentaohjelma, Autocad Robot Structural Analysis
SLS	käyttörajatila
ULS	murtorajatila
TATE	talotekniikka, sisältäen esim. LVIS ja automatiikka
u	solmun siirtymävektori
<i>v</i>	siirtymä
$\dot{v}$	nopeus
$\ddot{v}(t)$	kiihtyvyys

$\hat{v}$	dynaaminen siirtymä
$\ddot{Y}_n$	ominaismuodon siirtymätila
$\xi_n$	vaimennuskerroin
$\omega$	ominaistaajuus, Hz
$\Phi_n$	ominaismuoto, mode shape
$\delta$	jännitys, N/mm <sup>2</sup>

## 1 JOHDANTO

Tietävästi ensimmäiset askeleet kohti tietokoneavusteista suunnittelua teki Konrad Zuse vuonna 1941 kehittäessään ohjelmoitavan laskimen. Hän oli kylästynyt toistamaan laskentaproseduureja rakenteita suunniteltaessa. Zuse myös kehitti ensimmäisen algoritmisen ohjelmakielen ”Plankakuel”. Sitten FEM-ohjelmat ovat tehneet tuloaan rakennesuunnitteluun 1900-luvun loppupuolelta lähtien. Tietokoneavusteinen lujuuslaskenta elementtimenetelmää hyödyntäen tekee erityisesti monimutkaisten rakenteiden suunnittelun käsin laskentaa huomattavasti helpommaksi. Tietokonelaskenta on nopeampaa ja kustannustehokkaampaa. (Rombach 2011, 2)

FEM-laskentaan ei kuitenkaan saa sokeasti luottaa. Insinöörin tulee osata arvioida rasiusten suuruusluokkia manuaalisesti. Lisäksi elementtimenetelmän ja lujuuslaskennan perusteiden osaaminen auttaa tulkitsemaan tietokonelaskennan mahdollisia sudenkuoppia. Opinnäytetyössä perehdytään korkean rakentamisen kirjallisuuteen ja ohjeitukseen. Teorialähteiden lisäksi työssä havainnollistetaan esimerkkilaskelmin korkean rakentamisen lujuuslaskennassa esiintyviä ominaispiirteitä.

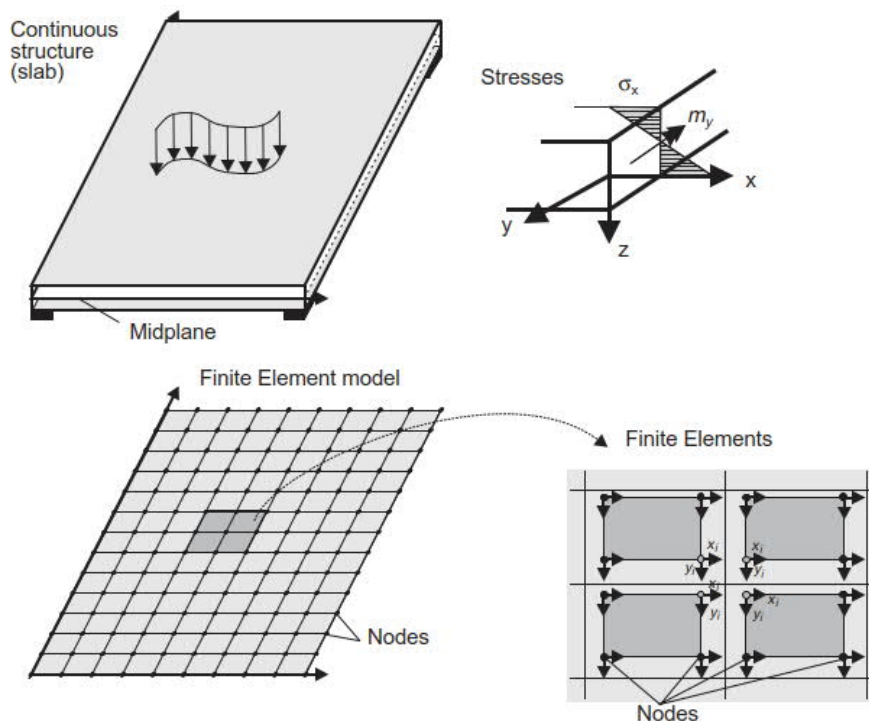
Tämä opinnäytetyö käsittelee FEM-laskentaohjelmia korkeiden pääosin levyelementeistä koostuvien rakennusten näkökulmasta. Työssä vertaillaan levyelementtien mallintamista sekä kolmen eri ohjelman soveltuvuutta monikerroksisen rakennuksen geometrian ja lujuuslaskennan hallintaan.

## 2 BETONIRAKENTEISEN KORKEAN RAKENNUKSEN SUUNNITTELUPE- RUSTEET JA OHJEET

### 2.1 Elementtimenetelmä

#### 2.1.1 Yleinen elementtimenetelmä

Numeerinen laskenta tietokoneavusteisesti äärelliseen elementtimenetelmään (eng. finite element method) perustuen on vakiintunut rakennesuunnittelussa rakenteiden kestävyysien tarkasteluun sekä materiaalimenekkien optimointiin. FEM-laskennassa rakenteet pilkotaan pienemmiksi palasiksi, joita kutsutaan elementeiksi. Elementtien nurkat kiinnittyvät toisiinsa solmupisteillä (eng. nodes). Kuviossa 1. asia on hahmoteltu siten, että FEM-mallissa laatta sisältää useita elementtejä sekä solmupisteitä. Todellisuudessa laattalla on paksuus, mutta elementtimenetelmässä laatta käsitellään keskipisteen suhteen paksuudettomalla kalvolla.



KUVIO 1. Elementit ja solmupisteet FEM-mallissa (Rombach 2011, 5)

Elementtimenetelmässä laskentaelementtien siirtymät, venymät ja jännitykset sekä solmuvoimat voidaan laskea muotofunktioilla ja niiden derivaatoilla. Yksittäiset elementit sitoutuvat toisiinsa vain solmupisteissä. Koko rakennemalli koostuu yksittäisistä elementeistä, jotka ovat liittyneet toisiinsa solmupisteiden avulla. Elementtien jäykkyyismatriisit summataan globaaliin jäykkyyismatriisiin, josta tuntematon solmusiirtymä voidaan laskea. (Rombach 2011, 5)

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

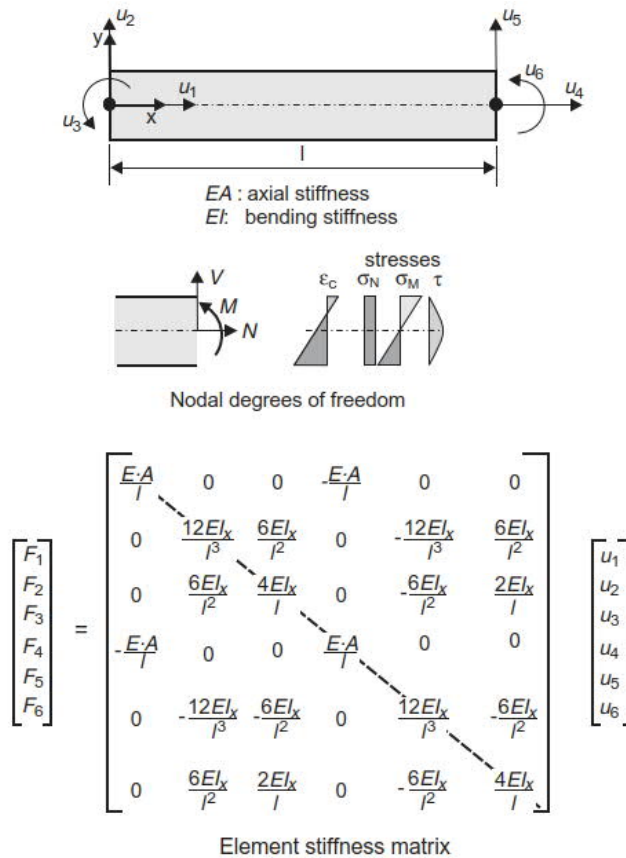
jossa:

$[K]$  on globaali jäykkyyismatriisi  $[K] = \sum [K]^e$

$\{u\}$  on solmun siirtymävektori

$\{F\}$  on solmun voimavektori, kuormitus

Laskennassa tarkoitus on löytää funktio, joka kuvaa riittävällä tarkkuudella yksittäistä elementtiä ja täyttää reunaehdot. Yksittäisen sauvaelementin relaatio voimalle  $F$  ja solmun siirtymälle  $u$  saadaan tasapainoehdon kautta. Muotofunktiota sauvaelementille ei tarvita. (Rombach 2011, 6)



KUVIO 2. Sauva-elementin tasapainoehto ilman vääntöä (Rombach 2011, 6)

### 2.1.2 Elementtimenetelmän rakenteet

Elementtimenetelmä koostuu solmupisteistä, joihin rakenneosat ovat sidottuja. Elementtejä ovat mm. sauvat, palkit, levyt sekä solidit eli umpinaiset rakenneosat. Mikäli rakennesuunnittelun tavanomaiset rakenteet jaetaan karkeasti kahteen eri kategoriaan, voisi todeta, että on sauva- ja levyelementtimalleja. Sauvamalleista tyypillinen on esim. kattilarakennus, jossa teräsrakenteiset pilari- ja palkkitasot on jäykistetty vinositeillä. Myös välipohjat ovat vinosidejäykisteisiä, tosin primäärit jäykistystasot voivat olla myös betonilaattojen avulla jäykistettyjä.

Levyelementtimalleista tavanomainen on esim. 12. kerroksinen kerrostalo. Siinä kantavat seinät ovat betonirakenteisia, ja ne toimivat samalla jäykistävinä rakenteina. Jäykistävinä tasoina toimivat joko paikallavaletut holvit tai ontelolaattatasot.

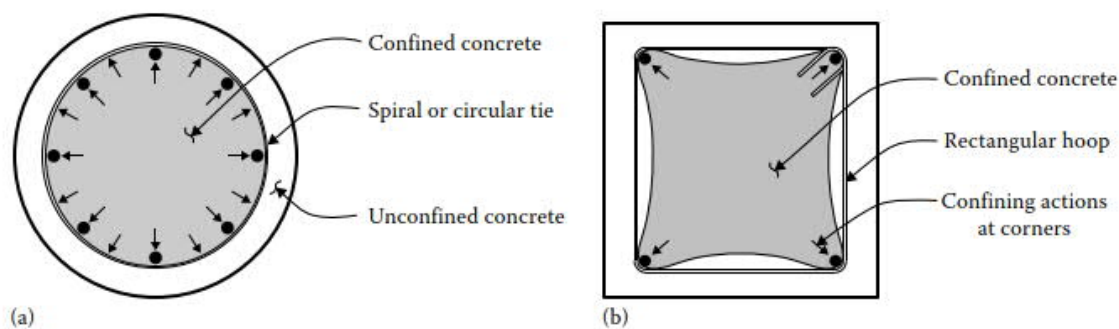
### 2.1.3 Elementtimenetelmän ongelmat

Elementtimenetelmä perustuu likimääräiseen menetelmään, jossa laskentayhtälöt suoritetaan interpoloinnin avulla. Tämän laskentatavan tarkkuus on riippuvainen mm. geometrian ja verkotuksen tarkkuudesta. Esimerkiksi kaarevat pintoja laskettaessa on syytä käyttää riittävän pientä verkotusta, jotta tuloksien virheet saadaan minimoitua.

Monesti FEM-ohjelma laskentaa suorittaessa antaa virheilmoituksen, kun ohjelmaan tulee kinemaattinen ongelma. Näissä tapauksissa systeemin yhtälöt eivät löydä solmupisteen siirtymälle ratkaisua. Nämä varoitukset voidaan usein jättää huomioimatta, koska ohjelma on käsitellyt suuren määrän dataa. Lisäksi jotkin ohjelmat korjaavat automaattisesti kinemaattiset vapausasteet. Voimien jakautumisien olleessa oikean suuntaisia, pieniä virheitä voimasuureissa ei huomioida, ja rakennekokonaisuus suunnitellaan virheilmoituksista huolimatta. (Rom-bach 2011, 12)

## 2.2 Raudoitettun betonirakenteen ominaisuudet

Teräsbetonirakenne soveltuu hyvin korkeaan rakentamiseen. Betoni pystyy vastaanottamaan suuria puristusjännityksiä. Betonilla on puristuslujuuteen verrattuna heikko vetolujuus. Betonirakenne raudoitetaan, jolla otetaan vastaan sekä rakenteelliset että kutistuman aiheuttamat vetovoimat. Raudoitus sitoo betonin. Pilarirakenteessa hakojen sisäpuolista betonia voidaan kutsua ”suljetuksi betoniksi” (eng. ”confined concrete”). Hakojen ulkopuolinen betoni on puolestaan halkeilulle altis. (Taranath 2010, 2)



KUVIO 3. Raudoitettu betonipilari (Taranath 2010, 2)

Betonirakenteen puristuslujuudet ovat korkeassa rakentamisessa matalampaa rakentamista korkeammat. Kun tavanomaisessa rakentamisessa käytetään yleisesti betonilujuutta C30/37, korkean rakennuksen alimmissa kerroksissa päädytään helposti betonilujuuksiin yli C40/50. Pilvenpiirtäjissä käytetään jopa C80/90 betonilujuutta. Aksiaalisen puristuman tasaamiseksi betonirakenteiden jännityksiä pyritään mahdollisuuksien mukaan suunnitella omalle painolle samansuuruisiksi. (Baker, Pawlikowski & Young 2009, 1474)

### 2.3 Perustukset ja maaperän ominaisuudet

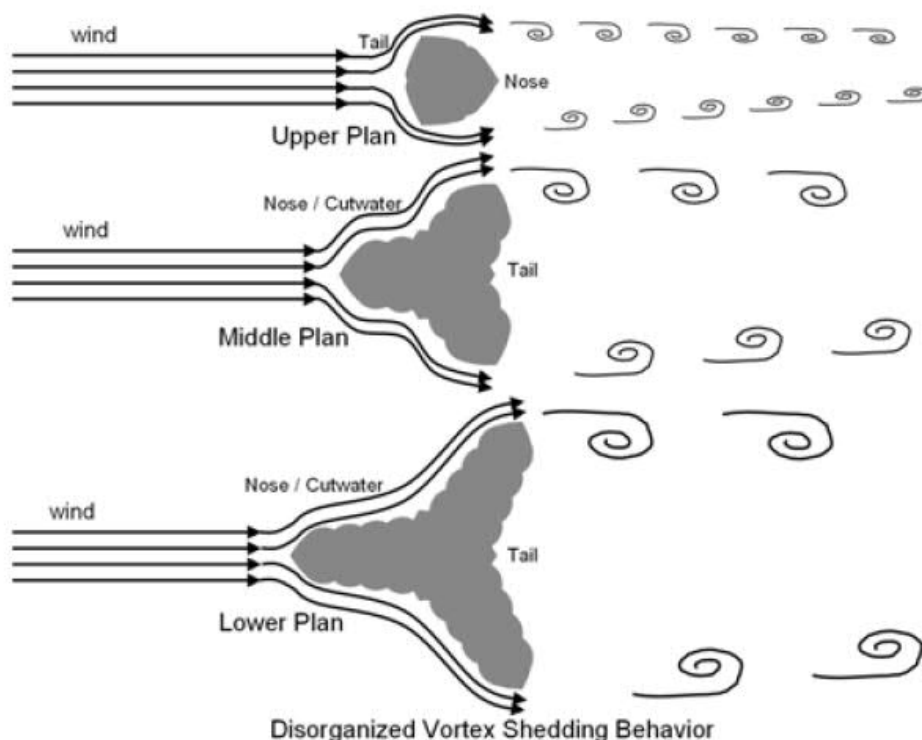
Pohjarakennussuunnittelija antaa rakennesuunnittelijalle lähtötiedoksi maaperän ja perustuksen rajapinnan lähtötiedot. Tyypillisesti maanvaraisella perustuksella annetaan perustusten pohjapaineelle murtorajatilassa kantokestävyyden maksimiarvo eli kuorma, jonka yhden neliön pinta-alaa voidaan kuormittaa. Paaluteuilla perustuksilla tarvitaan lähtötiedoksi paalujen puristuskestävyyksien maksimiarvot. Lisäksi tarvitaan maan sivusuuntaisen tuen jousikerroin.

Maaperän ominaisuudet ovat tärkeä huomioida korkeassa rakentamisessa. Esimerkiksi paalujen pituudet vaikuttavat siihen, kuinka perustukset painuvat. Perustusten painumaerot vaikuttavat rakennuksen kiertymään, mikä lisää rakennusta kaatavaa momenttia sekä kasvattaa leikkausseinien rasituksia

## 2.4 Kuormat monikerrosrakentamisessa

Monikerrosrakentamisessa tulee huomioida rakenteiden omat painot, hyötykuormat sekä luonnon kuormat. Myös maanjäristys on huomioitava, mikäli operoidaan maanjäristysalueella. Erityistä huomiota matalaan rakentamiseen verrattuna on kiinnitettävä tuulikuormaan. Tuulikuorma mitoittaa rakenteita staattisessa mielessä, mutta myös tuulen aiheuttamat värähtelyt ja huojunta pitää huomioida. Käyttäjämukavuuden osalta normaali taipumaraja ei yleensä takaa sitä, että ihminen ei tuntisi kovalla tuulella haitallisia tuntemuksia. Korkea rakennus aiheuttaa myös lähiympäristöön vaikutuksia, sillä korkean rakennuksen vieressä tuulikuormat voivat kasvaa huomattavan suuriksi. (Rakentajain kalenteri 2007, Kiviluoma)

Korkeassa rakentamisessa tuulitunnelikokeet tulevat harkittavaksi, kun yksi tai useampi asia seuraavista täyttyy. Rakennuksen muoto poikkeaa selvästi laatikkomaisesta, rakenteen alin ominaistajuus on alle 1 Hz, rakennus altistuu herätetäriinälle tai rakennus sijaitsee paikassa, jossa tuulenpaine voi merkittävästi kasvaa maaston muodosta tai tunnelointivaikutuksesta johtuen. Tuulitunnelikokeilla rakennukseen kohdistuvia tuulikuormia saadaan suunnittelunormia pienemmiksi. (Rakentajain kalenteri 2007, Kiviluoma)



KUVIO 4. Tuulen pyörreilmiöitä Burj Dubain tornista (Baker ym. 2009, 1478.)

Tuulenpaineesta aiheutuvaa taipumarajaa ei Eurokoodista löydy. Käsikirjoissa on esitetty arvoja 1:400...1:500 korkeuden suhteen. Näillä rajoituksilla pyritään minimoida julkisivun sekä ei-kantavien rakenteiden vaurioita. (Taranath 2010, 206).

## 2.5 Lineaarinen ja epälineaarinen analyysi

Elementtimenetelmällä suoritettu laskenta (FEA) voi olla lineaarista tai epälineaarista. Linearisessa laskennassa siirtymät ja kiertymät on oletettu olevan pieniä ja materiaalimalli on elastinen ja lineaarinen. Epälineaarinen laskenta on yleisesti ottaen hitaampaa kuin lineaarinen.

Epälinearisessa analyysissä voidaan ottaa huomioon mm. seuraavia asioita:

- materiaalimalli
  - myötörajan ylittyessä jännityksen ja muodonmuutoksen suhde on epälineaarinen
- siirtymät
  - siirtymillä on vaikutusta etenkin hoikilla rakenteilla. Siirtymät aiheuttavat toisen kertaluvun vaikutuksia, jonka huomioiminen vaatii

epälineaarista laskentaa. Lujuuslaskentaohjelmistoissa toisen ker-  
taluvun siirtymät huomioidaan yleensä P-Delta analyysillä.

- vaiheistettu rakentaminen, jossa siirtymät runkorakenteelle syntyvät ker-  
roksittain

## 2.6 Halkeillut ja ehjä poikkileikkaus

Raudoitettu betoni on epähomogeeninen materiaali, jolla on monimutkainen epälineaarinen materiaalmalli. Täten tarkan laskentamallin rakentaminen on liian kallista päivittäiseen insinööriyöhön. Rakenteiden voimasuureiden ja jännityksien laskenta perustuu yleisesti lineaariseen elastiseen rakennemalliin. Jäykkyyden rajoitukset halkeamien tai betonin myötäämisessä suurien puristusjännitysten alueella jätetään laskennassa huomioimatta. Nämä yksinkertaistukset tulee tiedostaa betonirakenteita mitoitettaessa. (Rombach 2011, 3.)

Monikerrosrakennusten jäykistävässä betonirakennemalleissa lasketaan yleisesti halkeamattoman ja halkeilleen betonipoikkileikkauksen mukaiset laskentamallit. Halkeilleessa rakennemallissa lineaarisella elastisella menetelmällä mitoitettaessa redusoidaan betonipoikkileikkauksen jäykkyyttä. Redusointikertoimia on esitetty esim. lähteissä FEMA 356, ACI 318 ja CSA. Pystyrakenteiden osalta saattavat kaikki pystyrakenteet pysyä puristettuina kaikissa kuormitusyhdistelyissä, mutta vaakarakenteet voidaan olettaa aina olevan haljenneita, koska vaakarakenteet ovat jatkuvan taivutusrasituksen alaisia johtuen tasojen pystykuormista. Halkeilleen ja halkeamattoman rajatilan laskentamalleista saadaan ala- ja ylälikiarvot rasituksille kuten siirtymille, ominaistajuuksille ja pystyvoimille. Rakenteet mitoitetaan sen laskentamallin mukaan, jossa rasitukset ovat suuremmat.

### TAULUKKO 1. Tehollisen jäykkyyden kertoimit (FEMA 356, 6-12)

Component	Flexural Rigidity	Shear Rigidity	Axial Rigidity
Beams—nonprestressed	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	—
Beams—prestressed	$E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	—
Columns with compression due to design gravity loads $\geq 0.5 A_g f_c$	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Columns with compression due to design gravity loads $\leq 0.3 A_g f_c$ or with tension	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_s A_s$
Walls—uncracked (on inspection)	$0.8E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Walls—cracked	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Flat Slabs—nonprestressed	See Section 6.5.4.2	$0.4E_c A_g$	—
Flat Slabs—prestressed	See Section 6.5.4.2	$0.4E_c A_g$	—

### TAULUKKO 2. Jäykkyyden pienennyskertoimet (ACI 318-14, 72)

**Table 6.6.3.1.1(a)—Moment of inertia and cross-sectional area permitted for elastic analysis at factored load level**

Member and condition		Moment of Inertia	Cross-sectional area
Columns		$0.70I_g$	$1.0A_g$
Walls	Uncracked	$0.70I_g$	
	Cracked	$0.35I_g$	
Beams		$0.35I_g$	
Flat plates and flat slabs		$0.25I_g$	

### TAULUKKO 3. Jäykkyyden redusointikertoimet (CSA A23.3, 69)

Modulus of elasticity	$E_c$ from Clause 8.6.2
Moment of inertia	
Beams	$0.35I_g$
Columns	$0.70I_g$
Walls — uncracked	$0.70I_g$
Walls — cracked	$0.35I_g$
Flat plates and flat slabs	$0.25I_g$
Area	$A_g$

## 2.7 Värähtely

### 2.7.1 Yleistä värähtelystä

Tyypillisen rakenteen dynaamisen ongelman ratkaisu on staattista tilannetta huomattavasti monimutkaisempi. Dynamiikassa tulee huomioida inertian ja vaimennuksen vaikutukset sekä aikariippuvuus. Käytännön suunnittelussa ainoa järkevä vaihtoehto on tietokonelaskennalla tehtävä ratkaisu. (Clough & Penzien 2003, 15)

Tuulikuormasta aiheutuva rakennuksen värähtely aiheutuu pääosin tuulen turbulentsisuudesta ja rakenteiden sivuilta irtoavista pyörteistä. Epätasainen tuuli saa rakenteen värähtelemään. Rakennuksen värähtelymitoituksessa tutkitaan rakenteen ominaistaajuus. Lisäksi selvitetään ekvivalentti staattinen kuorma sekä rakenteen kiihtyvyyssarvot ja amplitudit. Tuulivasteella tarkoitetaan rakennukseen reaktiota tuuleen eli siirtymiä ja kiihtyvyyksiä. (Kortelainen 2012, 26)

Värähtelyssä rakenteella on jaksollinen liike staattisen tasapainoaseman ympärillä. Värähtelylle altistavia tekijöitä ovat mm. hoikat rakenteet sekä rakennekonaisuuden keveys. Pääasialliset värähtelymuodot ovat aksiaali-, taivutus- ja vääntövärähtely. (Kukkonen 2020, 2)

Dynaamisten kuormien arvioimiseen on kaksi pohjimmiltaan erilaista lähestymiskeinoa, deterministinen ja ei-deterministinen. Laskentametodin valintaan vaikuttaa kuormien syöttötapa. Jos kuormien aikariippuvuus tunnetaan, käytetään determinististä menettelyä. Muussa tapauksessa ratkaisutapa on ei-deterministinen. (Clough & Penzien 2003, 15)

## 2.7.2 Laskenta elementtimenetelmän avulla

Yleisesti ottaen, rakenteellinen vaste dynaamiseen kuormaan voidaan ilmaista suhteessa rakenteen siirtymiin (Clough & Penzien 2003, 2). Minkä tahansa rakenteen siirtymätila voidaan ilmaista rajallisella määrällä erillisten koordinaattipisteiden siirtymiä yhdistämällä ja vertaamalla niitä rakennekokonaisuuden kokonaisuutensa. Elementtimenetelmän ratkaisu perustuu tähän lähestymistapaan. (Clough & Penzien 2003, 7)

Vaimennetun rakenteen modaalianalyysin numeerinen ratkaisu prosessi on seuraavanlainen. Ominaisuudet ja ominaistaajuudet saadaan ratkaisemalla seuraava ominaisarvo-ongelma

$$[k - \omega^2 m] \hat{v} = 0 \quad (2)$$

jossa  $k$  on kokonaisjäykkyys,  $\omega$  on ominaistaajuus,  $m$  on massa ja  $\hat{v}$  on dynaaminen siirtymä (Clough & Penzien 2003, 224)

Modaalinen liikeyhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad (3)$$

jossa  $m$  on massa,  $\ddot{v}(t)$  on kiihtyvyys,  $c$  on vaimennuskerroin,  $\dot{v}$  on nopeus,  $k$  on jousivakio,  $v$  on siirtymä ja  $p$  on kuormitus (Clough & Penzien 2003, 222)

Liikeyhtälön siirtymätila saa tällöin muodon

$$\ddot{Y}_n(t) + 2\xi_n\omega_n\dot{Y}_n(t) + \omega_n^2 Y_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (4)$$

$$\text{missä } M_n = \phi_n^T m \phi_n, P_n(t) = \phi_n^T p(t) \quad (5)$$

Jossa  $\ddot{Y}_n$  on ominaisuuden siirtymätila,  $\xi_n$  on vaimennuskerroin,  $\omega_n$  on vaimentamaton ominaistaajuus,  $P_n$  on kuormitus ja  $M_n$  on kokonaisuudessa (Clough & Penzien 2003, 223)

Edellisessä lausekkeessa  $\ddot{Y}$  tarkoittaa modaaliampplitudia, joka on ilmaistu Duhamelin aikaintegraalilla

$$Y_n(t) = \frac{1}{M_n \omega_n} \int_0^t P_n(\tau) \exp[-\xi_n \omega_n (t - \tau)] \sin \omega_{Dn} (t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Ominaismuoto saadaan ratkaista siirtymän koordinaattivektorin avulla.

$$\phi = \frac{v}{Y} \quad (7)$$

jossa  $\Phi$  on ominaistajuus,  $v$  on kokonaissiirtymä, ja  $Y$  on yleinen koordinaattivektori (Clough & Penzien 2003, 22)

### 2.7.3 Rakenteen alin ominaistajuus likimääräismenettelyllä

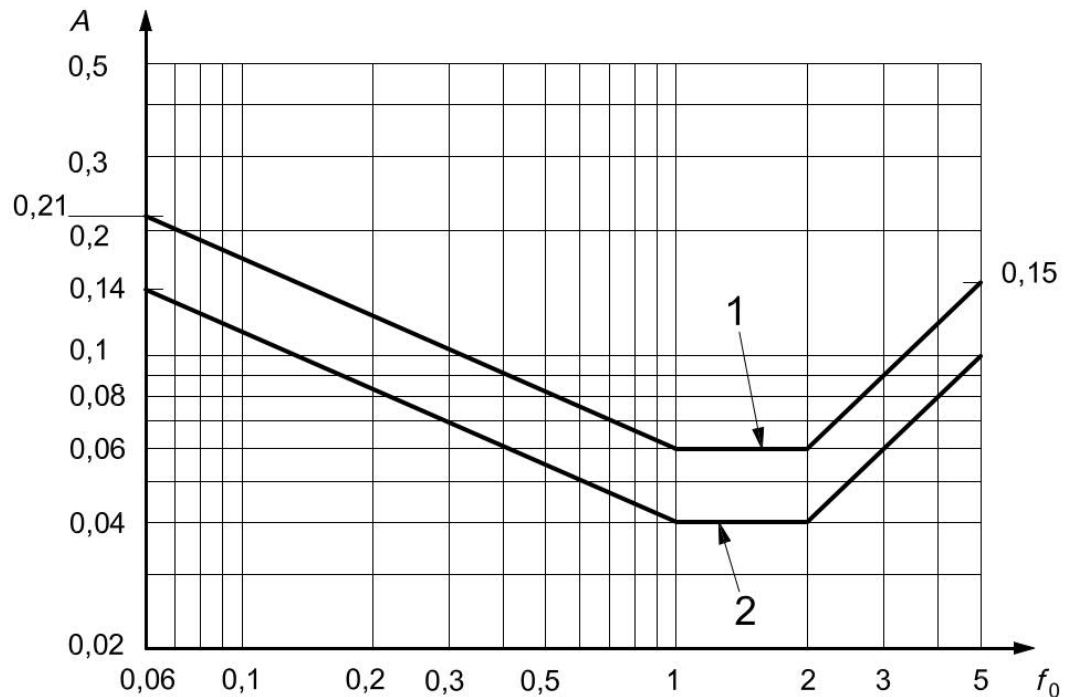
Rakenteen taivutusvärähtelyn alin ominaistajuus yli 50 m korkealla rakennuksella voidaan karkeasti arvioida seuraavalla kaavalla. (EN 1991-1-4 kaava F.2)

$$n_1 = \frac{46}{h} \text{ (Hz)} \quad (8)$$

jossa  $n_1$  on alin ominaistajuus ja  $h$  on rakennuksen korkeus metreinä

### 2.7.4 Käyttäjän mukavuus värähtelyssä

Eurokoodin EN1990 kohdassa A1.4.4 todetaan, että värähtelyominaisuuksia tarkasteltaessa on otettava huomioon käyttäjämukavuus (eng. human comfort). Käyttäjämukavuuskriteeri huomioi kiihtyvyyden, joka koetaan haitalliseksi. Kuviosta 5 voidaan todeta, että toimistorakennuksella on lievemmat vaatimukset kiihtyvyyden suhteen kuin asuinrakennuksilla. Iso-standardin mukaan kiihtyvyyttä verrataan kerran vuodessa esiintyvään tuulikuorman.

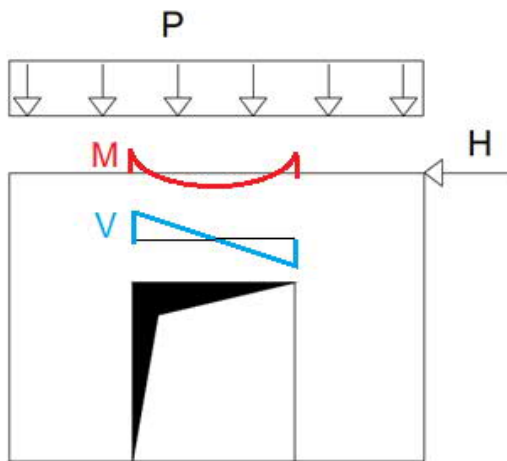


- $A$  kiihtyvyys m/s<sup>2</sup>  
 $f_0$  alin ominaistajuus Hz  
 1 toimistot  
 2 asuinrakennukset

KUVIO 5. Kiihtyvyyksien vertailukäyrä ISO 10137:2007 mukaan kerran vuodessa määritellyn tuulikuorman dynaamisille vaikutuksille.

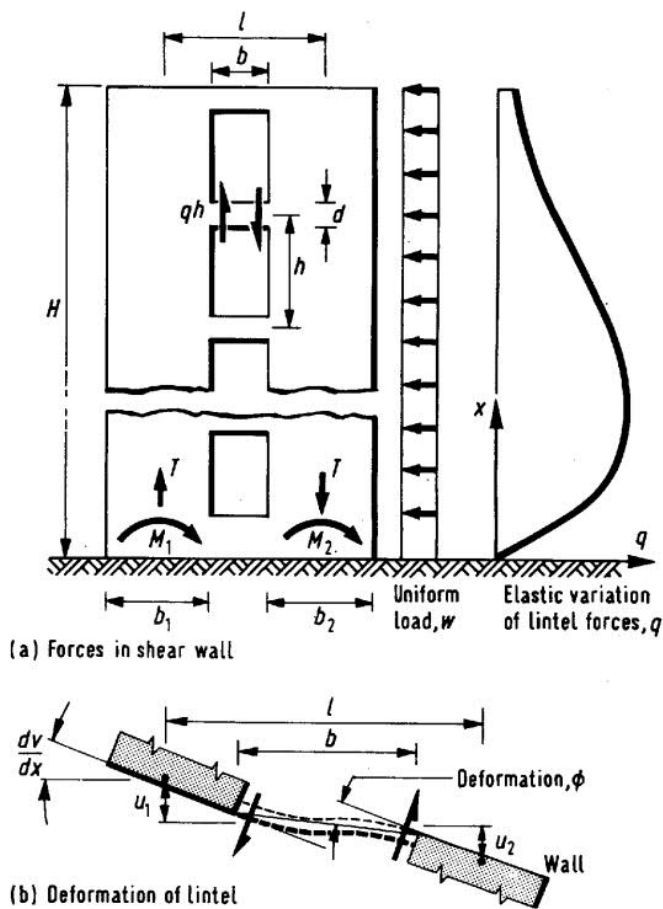
## 2.8 Aukot rakenteellisessa seinässä

Jäykistävässä tai kantavissa seinärakenteissa olevien aukkojen vieressä olevat pilari- ja palkkikaistat tulee huomioida ja mitoittaa. Myös TATE-asennuksien vaatimat merkittävät reiät tulee huomioida laskennassa. Aukkopalkkeihin syntyy rasituksia vaaka- ja pystykuormista, kuten kuviossa 6. on näytetty.



KUVIO 6. Aukkopalkin kuormat ja rasitukset

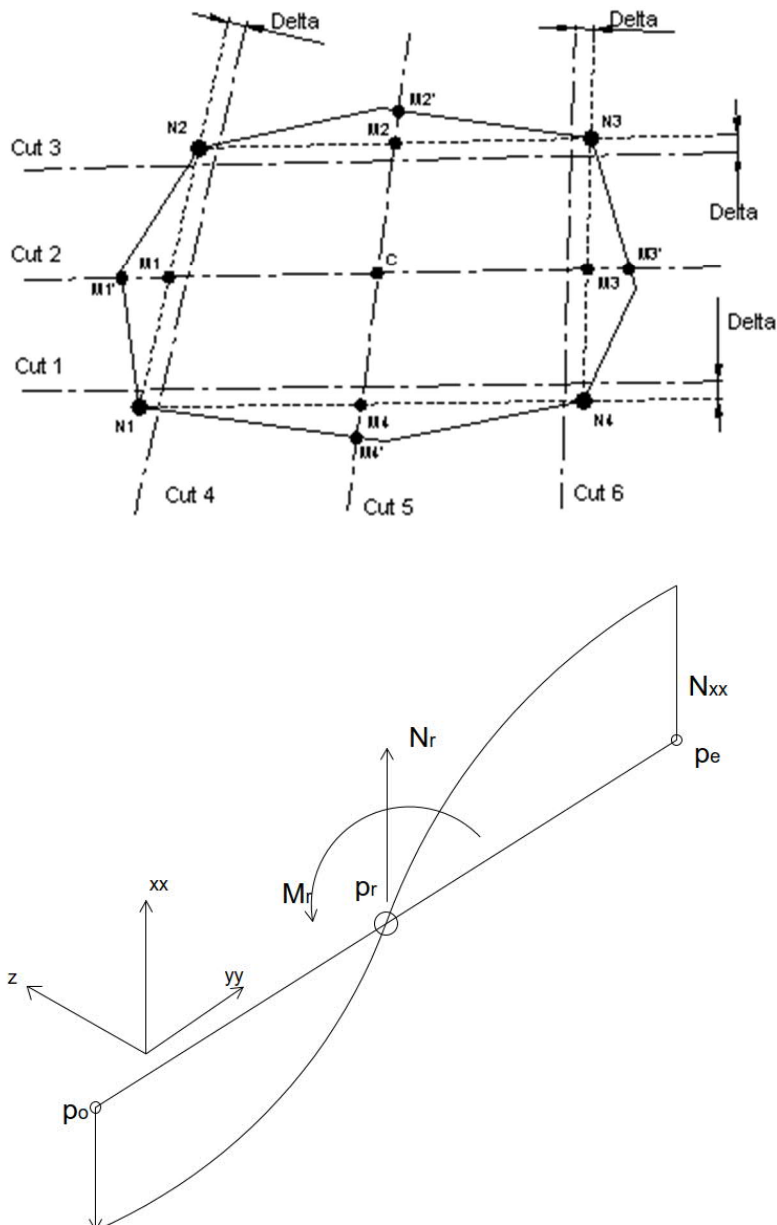
Voisi helposti ajatella, että suurimmat rasitukset olisivat alimmassa aukkopalkissa. Tämä ei välttämättä pidä paikkaansa, sillä tutkimusten mukaan leikkausseinässä olevien aukkojen suurimmat rasitukset voivat sijaita rakennuksen keskiosan alapuolella kuvion 7. mukaan.



KUVIO 7. Rasitusten jakautuminen aukkopalkkeilla rakennuksen korkeuden mukaan (CIRIA Report 102, 23)

Levyelementit elementtiteorian mukaan eivät sisällä levyn suuntaisia momentteja ja leikkausvoimia, joita suunnittelussa mielletään käyttä. FEM-ohjelmat sisältävät kuitenkin työkaluja, jotka osaavat muuttaa kalvorasitukset ns. palkin leikkaus- ja momenttikuvioiksi.

Robotissa toiminto on nimeltään reduced results for panels. Laskentaa varten ohjelma tekee sisäisiä poikkileikkaussolmuja kuvion 8. mukaisesti.



KUVIO 8. Sisäiset solmupisteet reduced results laskennassa ja voimasuureiden  $N_{rx}$  ja  $M_{rz}$  laskenta.

Voimasuureet lasketaan seuraavien integraalien avulla.

$$NR_x = \int_{\rho_0}^{\rho_e} N_{xx} \cdot dy y \quad (9)$$

$$MR_z = \int_{\rho_0}^{\rho_e} N_{xx} \cdot yy \cdot dy y \quad (10)$$

$$TR_y = \int_{\rho_0}^{\rho_e} N_{xy} \cdot dy y \quad (11)$$

$$MR_z = \int_{\rho_0}^{\rho_e} MN_{xx} \cdot dy y \quad (12)$$

$$TR_z = \int_{\rho_0}^{\rho_e} Q_{xx} \cdot dy y \quad (13)$$

jossa NR on redusoitu normaalivoima, MR on redusoitu momentti ja TR on redusoitu leikkausvoima (Reduced results for panels)

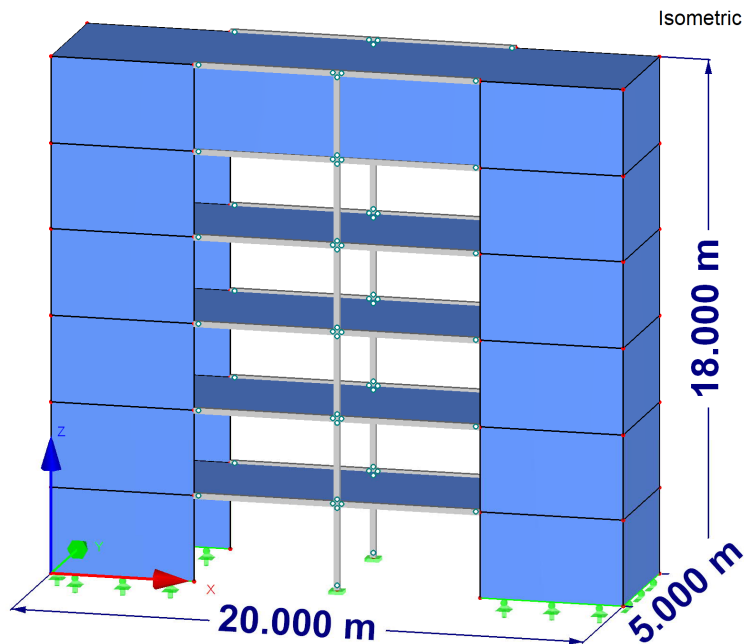
## 2.9 Vaiheistettu rakentaminen

Tavanomaiset FEM-laskentamallit kuvastavat valmiin ylös asti rakennetun rakenteen rakennemallia. Korkeilla rakennuksilla pitää myös rakennusvaihe huomioida. Mikäli vaiheistettua rakentamista ei oteta huomioon, pilareille tulee suuria jännityksiä ja painumia verrattuna aksiaalisesti jäykempiin sisäseiniin (Rombach s.328). Hooken lain mukaan jännitys on suoraan verrannollinen kimmokerrotimeen ja puristumaan.

$$\sigma = Ee \quad (14)$$

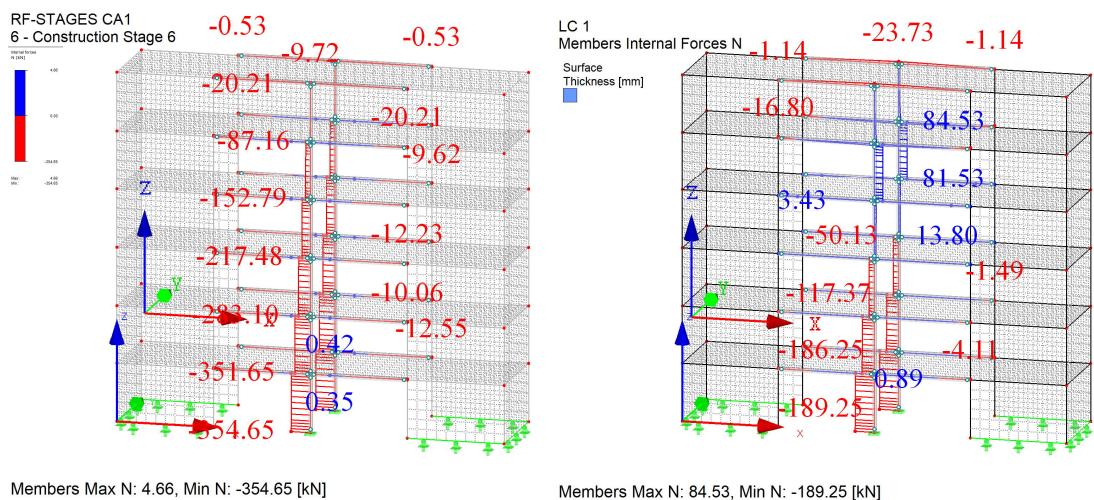
jossa on jännitys, E on kimmokerroin ja e on puristuma

Vaiheittain rakentamisen vaikutusta rasitukseen voidaan kuvata seuraavanlaisella esimerkillä. Rakenteen sivuilla on seinämäiset rakenteet, joilla on suuri pinta-ala verrattuna keskellä oleviin pilareihin. Keskellä rakennetta on pilari-palkki-rungon yläreunassa seinämäinen korkea rakenneosaa.



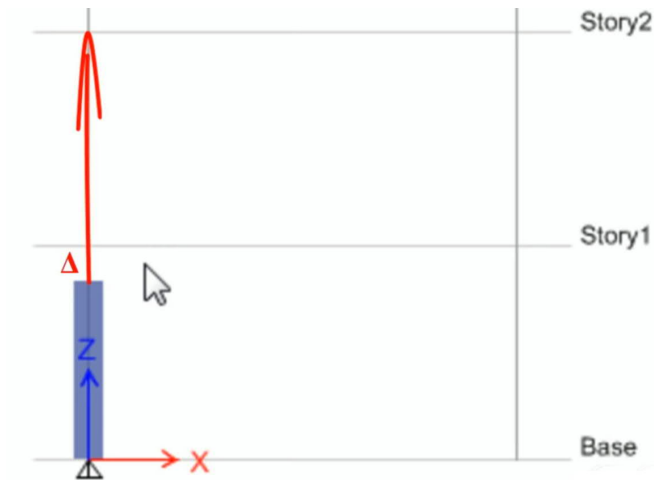
KUVIO 9, Vaiheittain rakentamisen vaikutuksia havainnollistavan esimerkin geometria.

Vaiheittain rakentaessa pilareille tulee omista painoista normaalivoimarasituksia kerroksittain. Yhden stepin laskennassa osa omien painojen kuormasta siirtyy seinämäisen palkin kautta aksiaalisesti jäykempiin reunaseiniin, jotka eivät pienemmän jännityksen vuoksi painu niin paljon kuin pilarit.



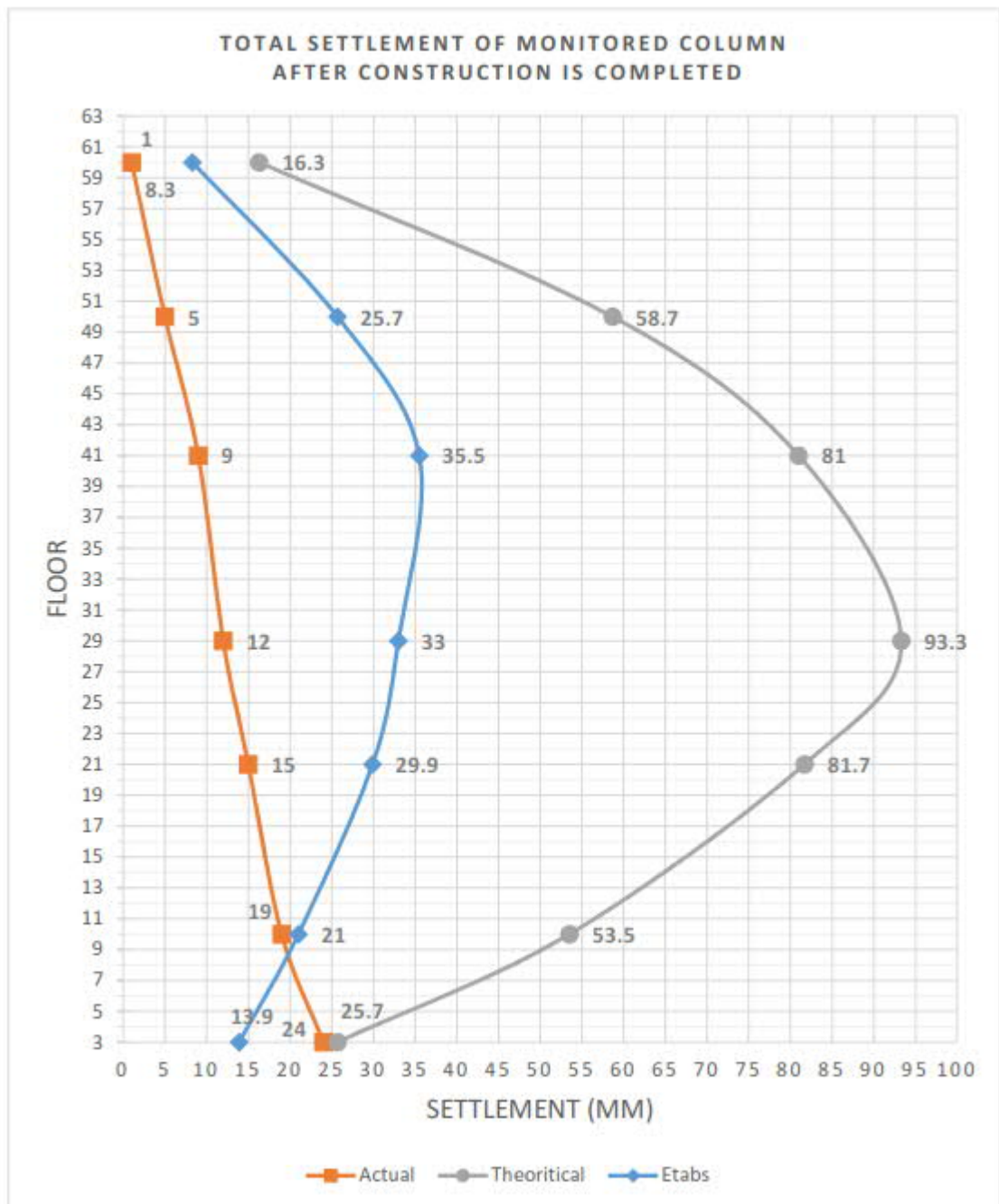
KUVIO 10. Pilarikuormien erot, kun vaiheittain rakentaminen on huomioitu (RF-STAGES) ja jätetty huomioimatta (LC1).

Vaiheittain rakentamisessa laskennassa huomioidaan myös jokaisen kerroksen rakentaminen suunnitelmien mukaiseen korkeusasemaan. Aikaisemmat painumat kompensoidaan, ja pystyrakenteet rakennetaan painuman verran pidemmiksi.



KUVIO 11. Vaiheittain rakentamisen huomiointi FEM-laskennassa. Seuraavan kerroksen pilari tehdään pidempänä ja aiempi painuma kompensoidaan. (Vertical Displacements in Tall Buildings)

Rakennusten painumat ovat huomattavasti pienempiä, kun kompensointi huomioidaan. Teoreettisesti painumat ovat suurimpia rakennuksen keskivaiheilla, kun ylä- ja alareunan painumat ovat lähellä toisiaan. Tämä johtuu siitä, että alimmassa kerroksessa on eniten pystykuormaa, mutta vähiten pituutta lyhennyttäväksi. Vastaavasti rakennuksen yläosassa on vähiten kuormaa, mutta rakenteen alapuolella eniten pituutta lyhennyttäväksi. Kuviossa 12. on esitetty erään kohteen mitattuja painumia rakennuksen valmistumisen jälkeen, jonka tuloksia on verrattu laskennallisiin painumiin.



KUVIO 12. Erään kohteen todellisen, teoreettisen ja Etabs-ohjelmalla laskettujen painumien vertailu. (Habrah, 53)

## 2.10 FEM-rakennemallin tarkastus

FEM-laskentamallin tulokset tarkastetaan ensi alkuun graafisten tulosten kautta. Geometrian tulee vastata todellista rakennusta mahdollisimman hyvin. Poikkeileikkausarvot sekä käytetyt materiaaliominaisuudet tarkistetaan tukiehtojen ja vapautusten lisäksi. Myös elementtien lokaalit akselit on syytä olla yhdensuuntaisia, jotta rasiituskuvaajat ovat helposti tulkittavissa. Elementtiverkotus pitää tarkastaa huolella. Liittyvätkö vierekkäisten elementtien solmut toisiinsa? Siirtymäkuvaajista on helppo todeta vierekkäisten elementtien yhdessä toimiminen. Toimivatko palkit ja laatat yhdessä? Onko elementtiverkon koko tarkoituksenmukainen?

Käytännön kokemukset osoittavat, että usein tietokoneavusteiseen laskentaan luotetaan sokeasti. Käyttäjät olettavat, että kalliissa ohjelmassa ei voi olla virheitä. Joka tapauksessa luottamuksen pitäisi olla järkevällä tasolla. Yleistäen voi sanoa, ettei mikään ohjelma ole virheetön. Täten on syytä suhtautua tuloksiin kriittisesti. On hyvä pitää mielessä, että FEM-ohjelma on vain numeerinen työkalu monilla oletuksilla ja yksinkertaistuksilla. Täten korkean rakentamisen laskenta on tehtävä rintarinnan FEM-ohjelmiston sekä käsin laskennan kanssa. (Rombach s. 321)

Ohjelmissa verkotukset vaikuttavat huomattavan paljon laskentatuloksiin. Esimerkiksi ETABS-ohjelmassa vakioasetukset eivät verkota esim. laattoja elementin keskialueella. Laskentaohjelma sitoo laatan pelkästään mallinnetuista nurkkapisteistä viereisiin elementteihin, mikäli käyttäjä ei muokkaa verkotusasetuksia. Tällöin esim. pilareihin, tai viereisten elementtien aukkoihin ei tartuta, jolloin voimat eivät siirry todenmukaisesti.

## 2.11 Helsingin korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018

Helsingin kaupunki edistää korkean rakentamisen laatua erillisellä rakentamistapaohjeella. Tähän on poimittu rakennesuunnitteluun ja erityisesti lujuuslaskentaan liittyviä seikkoja, jotka on mainittu ohjeessa vuodelta 2018.

Korkean rakentamisen vastaavalta rakennesuunnittelijalta vaaditaan kokemusta Eurokoodien soveltamisesta suomalaisiin olosuhteisiin vastaavien vaatimustason hankkeista. Kaikkien rakennusrungossa käytettävien materiaalien osalta on nimitettävä vastuullinen rakennesuunnittelija, jolla on kyseistä materiaalista poikkeuksellisen vaativan luokan pätevyys, jos vastaavalla rakennesuunnittelijalla ei kyseistä pätevyyttä ole. Usein rakennesuunnittelijat erikoistuvat yhteen materiaaliin, esimerkiksi betoniin tai teräkseen. Tästä syystä voidaan vastavaksi rakennesuunnittelijaksi valita henkilö, jolla on vain toinen näistä materiaaleista.

Mitoituslaskelmat staattisten ja dynaamisten rasitusten osalta on tehtävä rakennukselle ennen kuin rakennuslupahakemus jätetään. Lisäksi laskelmat on esiteltävä hyvissä ajoin rakennusvalvonnalle. Suunnittelulaajuus, suunnitelmien sisältö ja suunnitelmien toimittamisen aikataulu on sovittava erikseen rakennusvalvontaviranomaisen kanssa. Yhteensovitus arkkitehdin ja talotekniikkasuunnittelijoiden kanssa pääasiallisten aukkojen osalta tulee huomioida rakennuslupavaiheessa. Vaiheittaisen rakentamisen vaikutukset pitää huomioida suunnittelussa. Rakenteiden liitokset tulee suunnitella hyväksi todettujen rakennustapojen mukaan, käytettäessä uusia liitostekniikoita pitää niiden toimivuus esitellä rakennusvalvontaviranomaiselle erikseen. Korkeassa rakentamisessa tarvitaan kolmannen osapuolen tarkastus kantavista rakenteista ennen kuin rakennuslupa voidaan myöntää. Rakennusratkaisujen riskeistä ja mahdollisista onnettomuustilanteista on laadittava riskiarvio ja sitä on päivitettävä hankkeen edistymisen mukaisesti.

Tuulitunnelikokeet tehdään tarvittaessa. Rakennesuunnittelija perustelee viranomaiselle tuuliselvityksen tarpeen. Perusteluissa on käytävä ilmi rakennuksen muodon ja ympäristön, dynaamiset ominaisuudet, mahdollinen tunnelointivaikutus sekä viereiset rakennukset. Tuulisuusselvitys ja vaikutus alueen ympäristöön ja viereisiin rakennuksiin on esitettävä. Selvitys rakennuksen kiihtyvyyksien laskennassa käytetyistä tuulikuormista pitää tuoda esiin.

Alueella vallitsevat törmäyskuormavaarat sisältäen tie- raide- ja lentoliikenteen tulee esittää. Rakennusrungon pystytyksen aikaiset painumat sekä käytön aikaiset vaikutukset runkoon huomioitava kuten myös lämpöliikkeiden vaikutuksista

ja lämpötilan vaihteluista aiheutuvat pakkovoimat. Myös työnaikaiset tuentavoimat, nosturivoimat sekä varastointikuormat ja nostolaitteet on otettava huomioon. Kuormitukset esitetään rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen perusteiden ns. nolla-asiakirjassa.

Lujuuslaskenta tehdään 3D-malleja hyödyntäen. Kuitenkin tärkeimmät voimasuureet tarkistetaan manuaalisesti. Käsien laskennassa voidaan hyödyntää esim. excel- taulukkolaskentaohjelmaa. Rungon ja perustusten yhteistoiminta on otettava huomioon laskentamallissa. Lujuuslaskenta on tehtävä käyttäen luotettavaksi todettuja menetelmiä. Paalut mallinnetaan riittävän tarkasti vastaamaan todenmukaisia paalupituuksia. Laskentamalleissa on käytettävä riittävän tarkkoja ja tarkoitukseen soveltuvia elementtikokoja luotettavien tulosten varmistamiseksi.

Rakennusten voimasuureet tulee tarkistaa vähintään kahdella eri jäykkyysarvolla, joista saadaan ala- ja ylälikiarvot. Betonirakenteen halkeillut ja halkeilematon rajatila on huomioitava. Liitosten ominaisuuden tulee ottaa huomioon. Rakennuspaikan ominaispiirteet kuten tärinä ja mahdolliset seismiset asiat tarkastellaan tarpeen vaatiessa. Rakennesuunnittelun nolla-asiakirjassa on esitettävä dynaamisen mitoituksen perusteet. Laskelmista on tehtävä selkeä laskelmaraportti, josta laskennan kulku, laskentaperusteet ja tulokset ovat yksiselitteisesti luettavissa. Lähtötiedot on esitettävä sillä tarkkuudella, että niitä käyttäen laskelmat pystytään luotettavasti toistamaan. Kaikki rakennelaskelmat tulee dokumentoida.

## 3 FEM-LASKENTAMALLIEN VERTAILU

### 3.1 Vertailtavat ohjelmistot

Kaupallisista FEM-laskentaohjelmistoista valittiin kolme suunnittelutoimistoissa yleisesti käytössä olevaa ohjelmaa, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019, Dlubal RFEM 5.21 sekä CSI American ETABS 18. Jäljempänä tässä työssä ohjelmista käytetään nimiä Robot, RFEM ja ETABS. Robotista oli käytössä tutkimuksessa täysi kaupallinen versio. RFEM:stä oli käytössä opiskelijaversio, joka toimii täyden version mukaisesti. ETABS:sta oli tutkimuksessa Evaluation versio, jossa mm. kuormitustapauksia oli rajoitettu. Tästä syystä tutkimuksen kuormituksia ja kuormitusyhdistelmiä on karsittu.

#### 3.1.1 Autodesk Robot Structural Analysis Professional

Vertailtavissa ohjelmia käy jossain määrin ilmi ohjelmistojen kotimaa. Robot on alun perin Ranskassa kehitetty ohjelma (History of Robobat), ja sen käyttöliittymä tuntuu hienolta. Robotin ominaisuuksiin lukeutuu seikka, että ohjelma lähes aina suorittaa laskennan, vaikka mallinnus olisi puutteellinen. Mikäli Robot havaitsee mallissa virheitä, tekee se äärettömän jäykkiä linkkejä (eng. rigid link) elementtien väliin, jotta laskenta saadaan suoritettua. Toisaalta tässä on vaa-roja, sillä esim. kahden vierekkäisen levyelementin kytkeytymisessä toisiinsa on laskentamalleja tehdessä tullut ongelmia, ja levyt eivät ole kunnolla tarttuneet toisiinsa. Isoissa laskentamalleissa tällainen virhe saattaa jäädä suuren informaatiomäärän vuoksi huomaamatta.

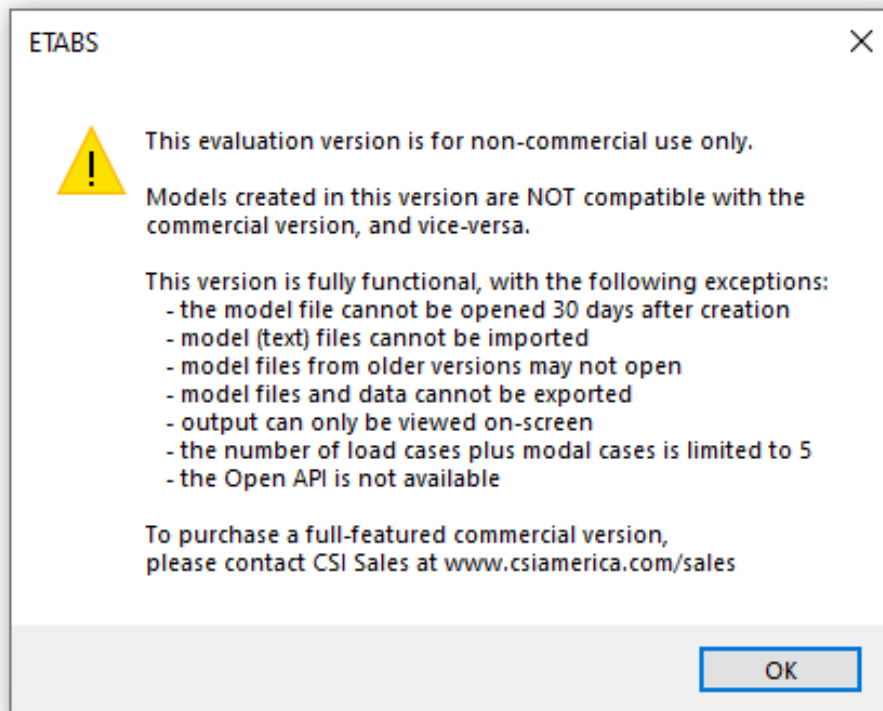
#### 3.1.2 Dlubal RFEM

RFEM on saksalaislähtöinen tuote (Dlubal Brief History), ja ohjelman käytössä syntyy heti alkuun insinöörimäinen vivahde. Asiat syötetään järjestelmällisesti, ja laskenta ei yleensä käynnisty, jos RFEM havaitsee laskentamallissa virheen.

Toisaalta ohjelmalla tulee rakenne mallinnettua harkitusti, joka vähentää tarkastuksessa tehtäviä korjaustarpeita.

### 3.1.3 CSI American ETABS

ETABS on amerikkalainen ohjelmisto (Computers & Structures Inc). Käyttöliittymä on vanhemman oloinen kuin Robotissa. ETABS:sta oli opinnäytetyössä käytössä evaluation kokeiluversio. Kokeiluversiolla voi käyttää yhden mallin rakentamiseen ja tarkasteluun 30 päivää. Tämän jälkeen kyseistä mallia ei enää saa auki. Kokeiluversion ei ole yhteensopiva kaupallisen version kanssa, joten evaluation versiolla luotuja malleja ei saa myöskään täydellä versiolla auki.



Kuva 1. Tutkimuksessa käytössä oli ETABS-ohjelman evaluation versio

## 3.2 Yleistä korkean rakentamisen FEM-mallintamisesta

FEM-malleja rakennettaessa tulee ottaa huomioon ohjelman monikerrosrakentamista tukevat toiminnot. Vertailtavista ohjelmistoista ETABS on erityisesti suun-

niteltu erityisen korkeaan rakentamiseen, koska siinä kerrosten linkitys on erityisen hyvin huomioitu. Yhtä linkitettyä kerrosta muuttamalla voidaan tehdä muutoksia kaikkiin vastaaviin kerroksiin. Jotkin ohjelmistot tukevat myös algoritmista suunnittelua, mm. Rhino Grashopperin avulla. Tässä työssä algoritmien hyödyntäminen on jätetty pois tarkastelusta.

Ennen kuin monikerrosrakennuksen FEM-geometriaa alkaa luoda, kannattaa ajatuksella käydä läpi, miten geometria luodaan. Pienempiä rakenteita suunniteltaessa usein lähdetään rakentaa mallia ilman tarkempaa suunnittelua. Monikerrosrakentamisessa suunnittelematon mallin luonti aiheuttaa pahimmillaan moninkertaisen työn, kun mallin virheitä korjataan jälkeinpäin.

Monikerrosrakennuksen laskentamallin luonnissa voidaan huomioida seuraavia seikkoja. Pienet, kokonaisuuteen vähäisesti vaikuttavat esim. käytävässä olevat pielet voi jättää mallintamatta. Lisäksi mallinnustarkkuuteen on hyvä kiinnittää huomiota. Omien kokemusten perusteella jäykistysmallia ei kannata mallintaa 10 mm tarkemmaksi. Erityisesti Robot on osoittanut haavoittuvuutensa liian tarkasta mallinnuksesta. Hyväksi tavaksi on osoittautunut toimintatapa, jossa luodaan grid-verkko siten, että moduuliviivat käsittävät kaikki jäykistävät seinälinjat. Tällöin niihin on helppo tarttua FEM-mallissa, ja samalla verkotusvirheet ja tihentymät vähenevät.

On myös mahdollista tuoda laskentaohjelmaan geometria suoraan esim. Tekla-mallista tai Revit-tiedostosta FEM-ohjelmaan. Tässä opinnäytetyössä jätetään rakennemallista exportatun geometrian hyödyntäminen käsittelemättä.

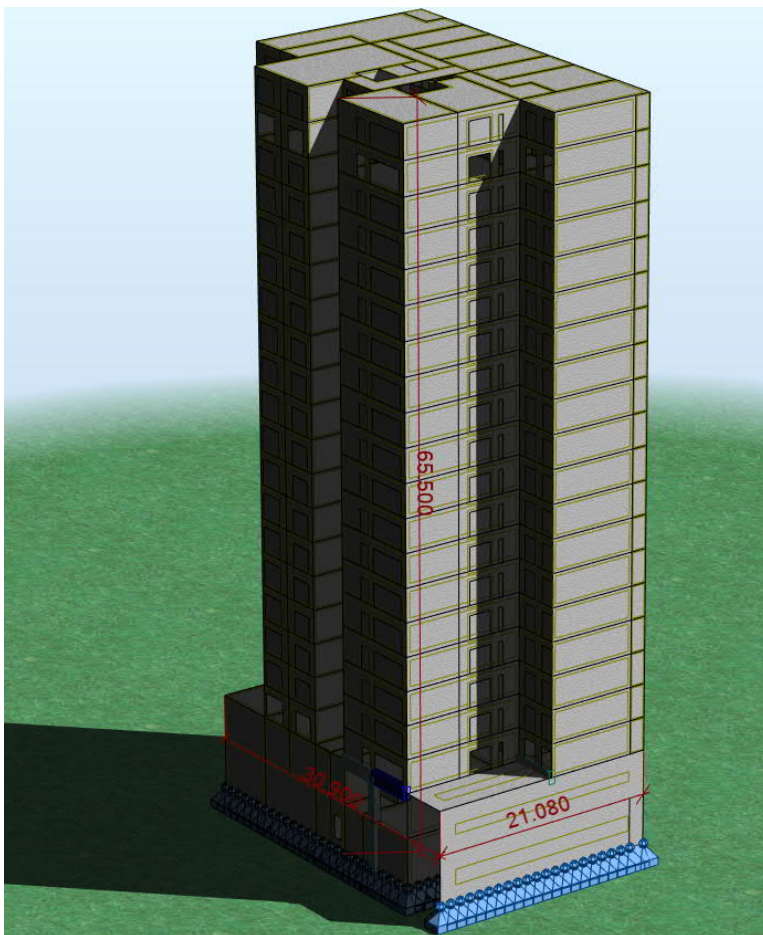
Laskentaohjelmistoilla on tapana toisinaan jumiutua kesken mallinnuksen siten, että tehtyjä muutoksia ei saada tallennettua. Tästä syystä on hyvä tallentaa työ säännöllisesti, ettei joudu mallintamaan asioita kahteen kertaan. Robot ja ETABS kaatui opinnäytetyön aikana joitain kertoja. RFEM sen sijaan vaikutti olevan kaikista toimintavarmin, eikä se kaatunut ollenkaan työtä tehdessä.

Mikäli laskentamalli rakennetaan kerroksittain, kannattaa väliajoin ajaa laskenta lävitse. Näin voidaan kerroksittain tarkistaa, että verkotus on kunnossa, ja laskentamalli ajaa laskennan läpi. Jos laskennasta tulee virheilmoituksia, on ne

helppo tarkistaa ja löytää virheet, kun prosessi tehdään vaiheittain rajatulla geometrialla.

### 3.3 Esimerkkirakenteen geometria

Esimerkkirakenteen geometria pohjautuu todelliseen kohteeseen. Geometriaa on osittain yksinkertaistettu, koska tässä opinnäytetyössä ei ole tarkoitus mitoitaa todellisia rakenteita, vaan vertailla eri ohjelmistoja ja korkean rakennuksen laskentaan liittyviä ilmiöitä. Rakennuksen korkeus myös poikkeaa todellisesta kohteesta. Esimerkkirakenteen leveys on 30 m ja pituus 21 m korkeuden ollessa 65,5 m. Vesikattorakenteita ja parvekkeita ei huomioitu.



KUVIO 13. Esimerkkirakenteen geometria Robot-mallissa

Laskentaohjelmissa rakenteiden omat painot sisältyvät automaattisesti laskentaan. Tuulikuormana koko rakennukselle käytettiin  $2.0 \text{ kN/m}^2$ . Lisävaakavoima lisätään esimerkkirakenteessa viivakuormaksi välipohjalle. Lisävaakavoiman arvona käytettiin molemmissa suunnissa välipohjatasoille arvoa  $g_{L_v,d}=2,5 \text{ kN/m}$ . Hyötykuormana laskennassa oli  $q_k=2,5 \text{ kN/m}^2$ . Hyötykuormavähennyksiä ei huomioitu.

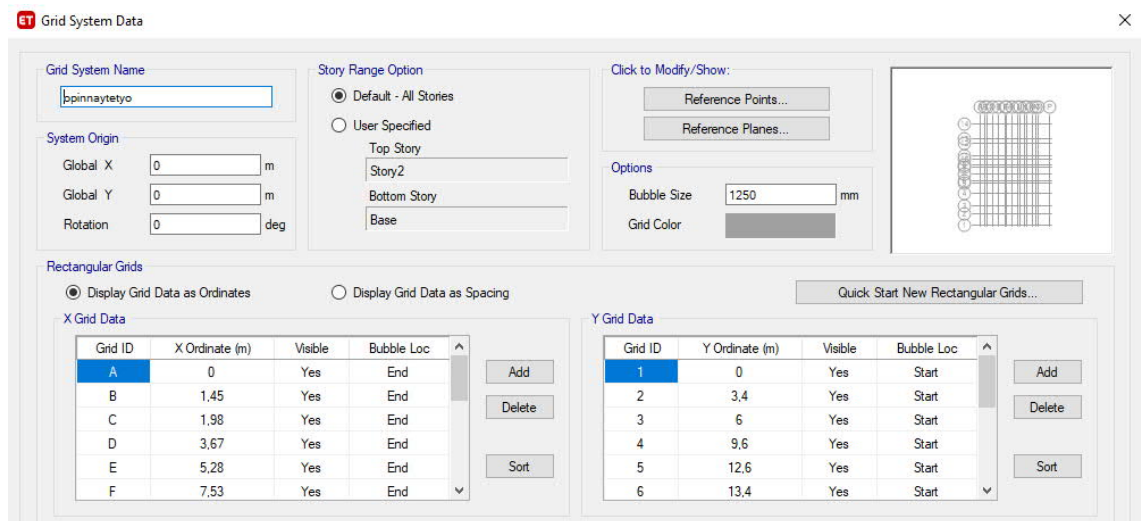
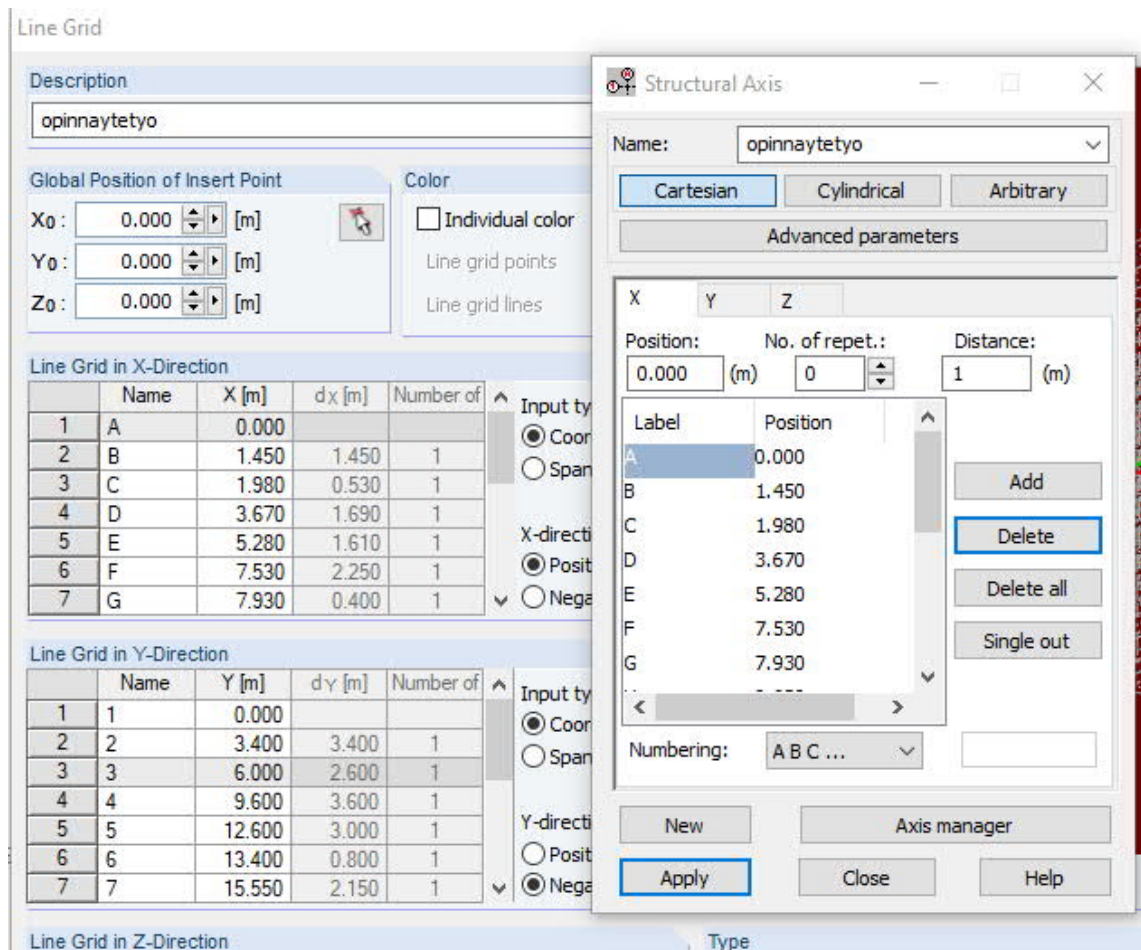
### **3.4 Rakenneosien mallinnus**

#### **3.4.1 Valmistelut ennen mallinnuksen aloitusta**

Tässä opinnäytetyössä ensimmäinen valmistava tehtävä oli tutustua ennalta itselle tuntemattomien ohjelmien käyttöön tekemällä pienempiä osamalleja. Näiden avulla vieraaseen ohjelmaan tutustuttiin ja varsinaisessa työssä työkalujen käyttö sujui vaivattomammin eikä itse ohjelman peruskäyttö vienyt liikaa energiaa. Lisäksi ennen mallinnusta on syytä tarkistaa laskentamalleista perusasetukset. Tyypillisiä ovat mallinnuksessa käytettävä mittajärjestelmä. Myös verkotusasetukset kannattaa tarkistaa ennen mallinnusta. Tosin verkotusasetusten muuttaminen on helppoa myös rakennuksen geometrian luonnin jälkeen.

Aluksi laskentamalleihin luotiin Grid-verkot. Jos rakenne mallinnetaan suoraan ohjelman työkalujen avulla, kannattaa tehdä rakenteesta tasokuva esim. Autocad-ohjelmalla. Tasokuvassa voidaan laittaa kaikkien kerrosten kantavien rakenteiden sijainnit erivärisillä viivoilla päällekkäin. Samalla tulee tarkastettua kuormalinjojen päällekkäisyys.

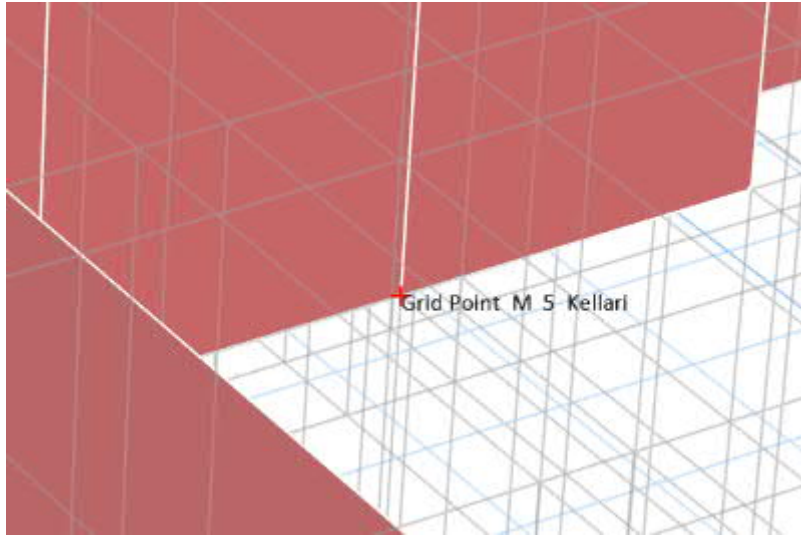
Arkkitehtisuunnitelmissa ei ensimmäisissä luonnossuunnitelmissa kantavat seinälinjat välttämättä ole riittävän hyvin päällekkäin, joten ne tulee yhteensovittaa heti alkuun. Kellarikerroksessa ja ensimmäisissä maanpäällisissä kerroksissa on usein poikkeava geometria kuin ylemmissä kerroksissa, joten ensimmäisiin kerroksiin tulee tavallisesti korkeita kuormansiirtopalkkeja ja pilarirakenteita.



KUVIO 14. Grid-verkot eri ohjelmistoilla

### 3.4.2 Laskentamallien geometrian luonti

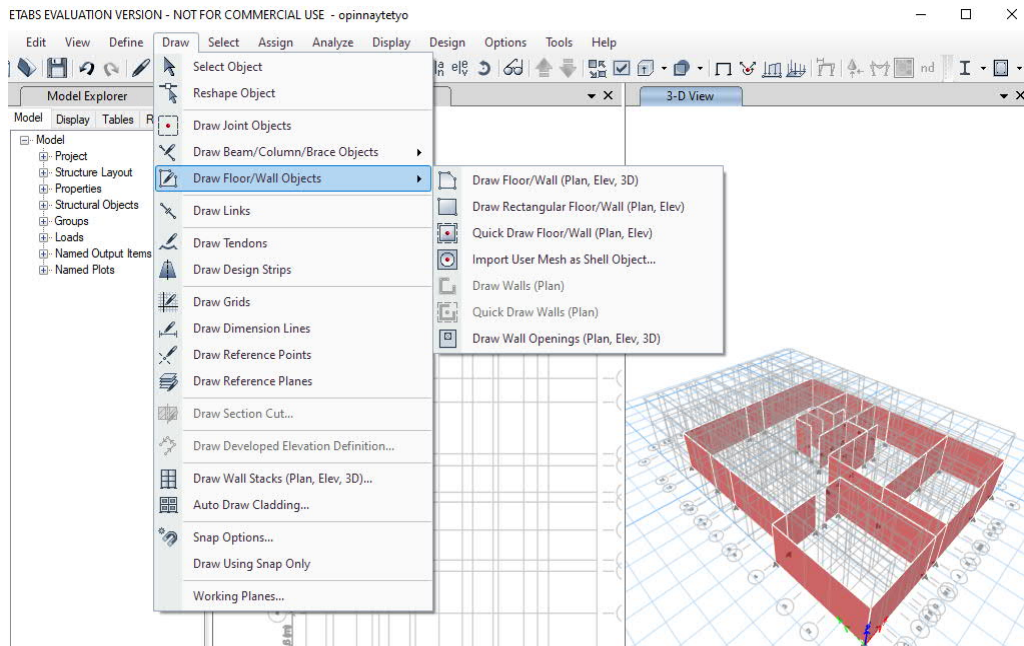
Levyelementtien mallinnus onnistuu kaikissa ohjelmissa monikulmiotyökalun avulla. Käyttökokemukseltaan ETABS:n työkalu oli käyttömukavuudeltaan paras. ETABS näyttää kursorilla grid-pisteen, johon tartutaan.



KUVIO 15. ETABS:ssa kursori löytää viivaviidakosta grid-moduulipisteen tunnuksen

Robotilla seinät mallinnetaan esimerkiksi structural elements walls toiminnolla tai polyline työkalulla. Seinä voidaan mallintaa joko node-pisteiden avulla, suoraan syöttämällä geometria koordinaatein, tai importoimalla geometria dwg-tiedostosta. Dwg-importointi robotissa toimii hyvin, jos geometria on yksinkertainen ja suorakulmikas. Vinojen rakenteita ohjelmaan tuotaessa tulee esille robotin verkotusten heikkous. Monimuotoisissa geometrioissa tulee helposti verkotustihentymiä, jotka hidastavat isoa mallia.

Seinät mallinnettiin draw wall object toimintoa käyttäen. Kun moduulilinjat FEM-malliin oli tehty kantavien seinälinjojen mukaisiksi, oli mallinnus helppoa ja selkeää.

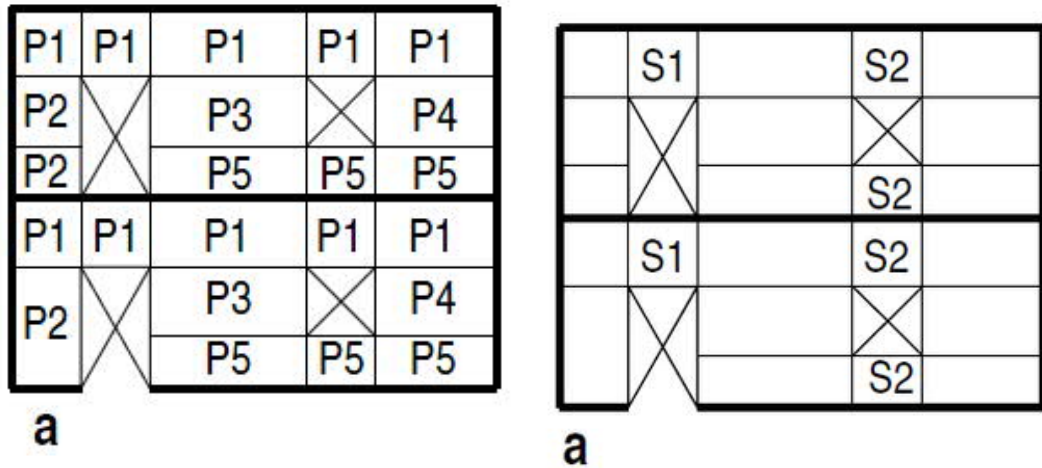


KUVIO 16. Levyelementin mallinnus ETABS:lla draw floor/wall objects toimintoa käyttäen.

### 3.4.1 Aukotukset levyelementeissä

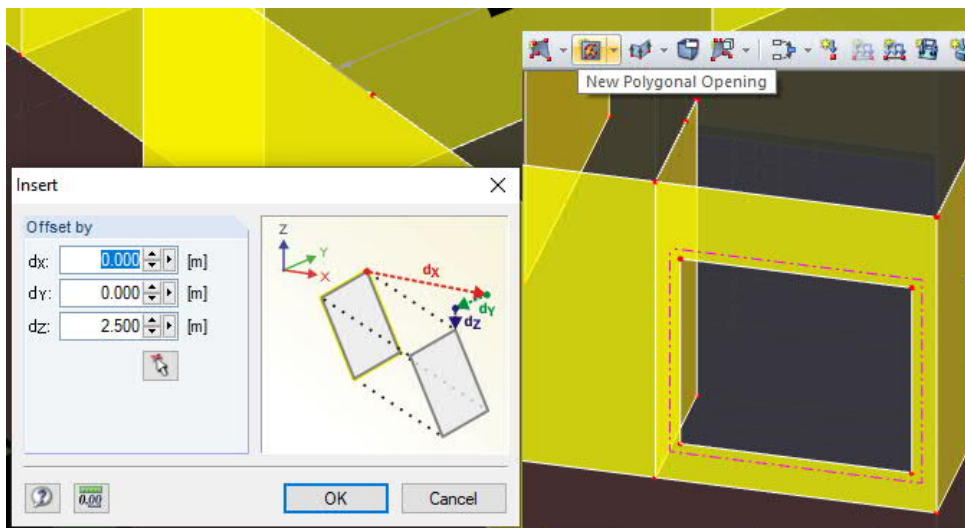
Aukot levyelementteihin tehdään robotissa joko contour tai opening työkalun avulla. Aukon päällä oleva palkkikaista kannattaa robotissa mallintaa omana elementtinä, jotta levyelementin rasitukset voidaan muuttaa reduced results avulla palkkimaisiksi leikkaus- ja momenttirasituksiksi.

ETABS:ssa pilari on "pier" ja palkki on "spandrel". Ohjelma jakaa seinäaukotukset divide walls toiminnolla pilari ja palkkikaistoihin, jolloin ohjelmasta saadaan tulostettua kyseisten alueiden rasitukset sauvarakenteiden tapaan.



KUVIO 17. ETABS pilkkoo automaattisesti seinäaukkojen vierustat pilari- ja palkkikaistoiksi

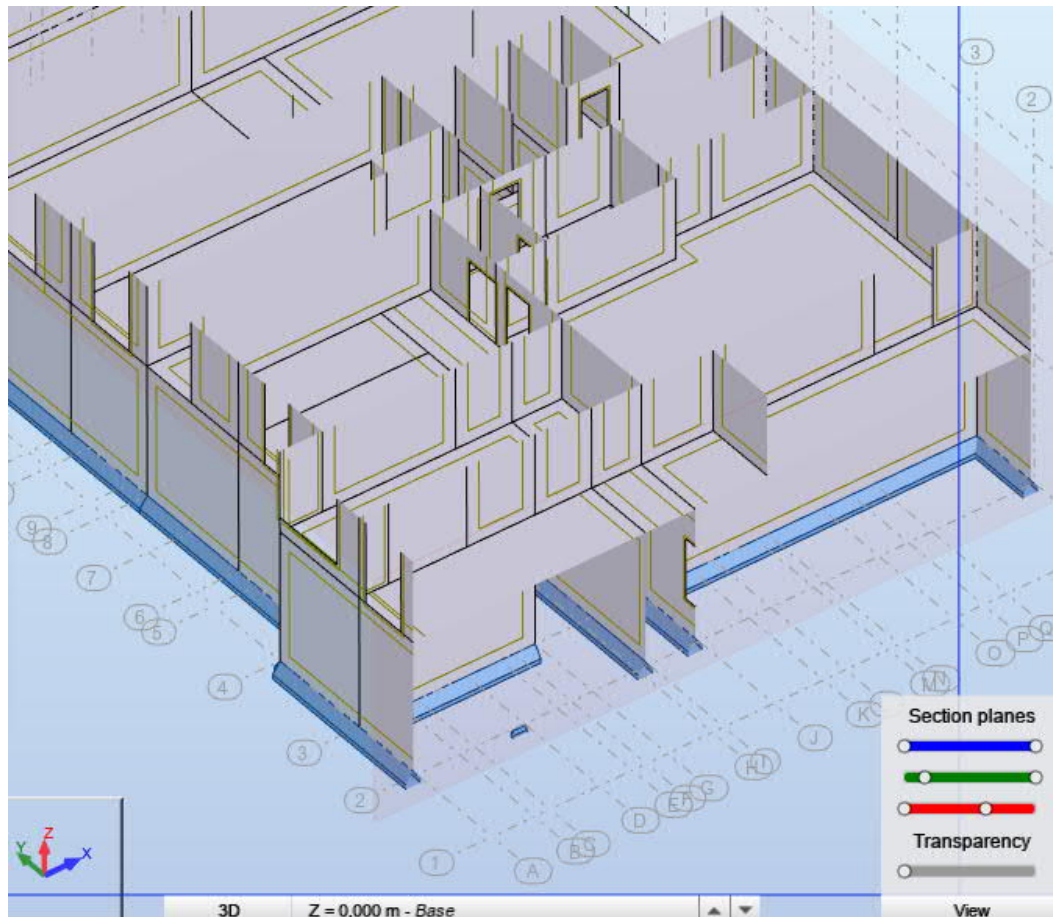
RFEM:llä solmupisteiden kopiointi on tehty helpoksi. Tämän vuoksi niiden avulla on helppo mallintaa esim. ikkuna-aukotukset. RFEM-ohjelmalla ei tarvitse pilari- ja palkkikaistoja pilkkoa, koska Result beam työkalulla saadaan rasitukset saurakenteen tavoin.



KUVIO 18. RFEM ohjelman kopiointityökalut ovat helppoja käyttää

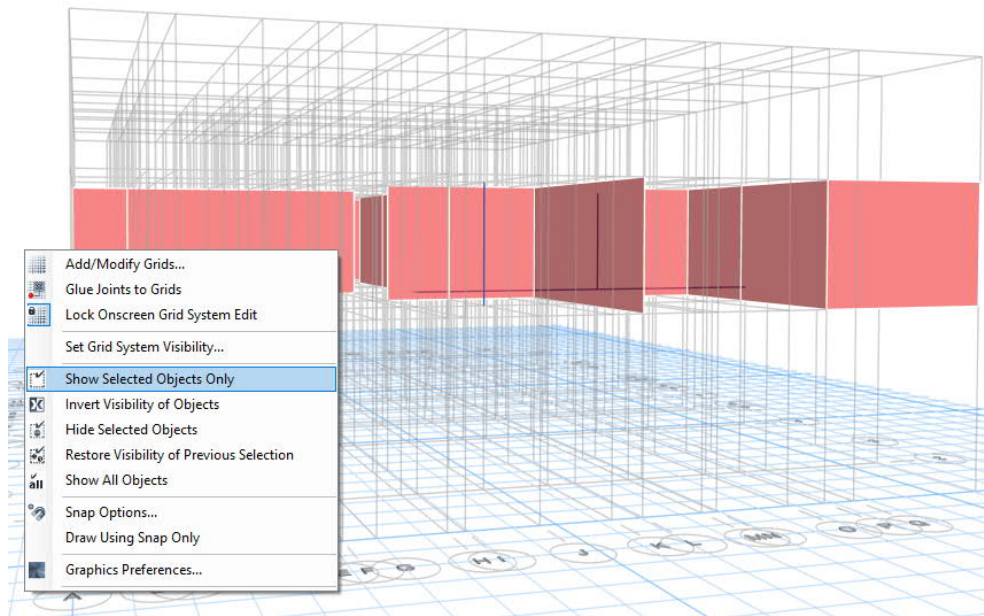
### 3.4.2 Näkymien rajaus

Suuren määrän geometriaa sisältävän rakenteen näkymää pitää saada rajattua. Robotin view section planes osoittautui paremmaksi kuin muiden ohjelmien vastaavat näkymän leikkaustyökalut. Näillä työkaluilla voidaan leikata näkymää, jotta päästään paremmin mallin sisäpuolella oleviin rakenteisiin käsiksi.



KUVIO 19. Robotin view section planes

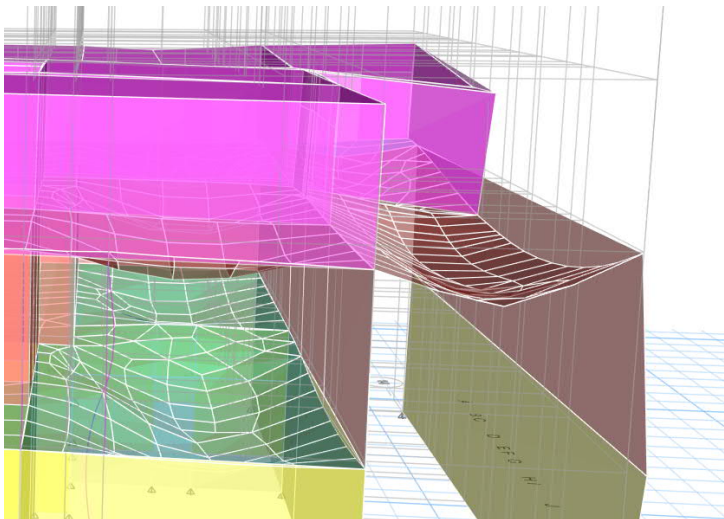
RFEM:llä ja ETABS:lla leikkaustyökalua näkymän rajaukseen toimii paremmin näytä valitut objektit toiminto. Alue työkalulla haetaan näytettäväksi halutut elementit, ja valitse näytä vain valitut elementit toiminnolla saadaan ko. elementit näkyville. Tällöin saadaan näkymä rajattua halutuksi.



KUVIO 20. Näytä valitut objektit aluevalinta työkalulla ETABS-ohjelmassa.

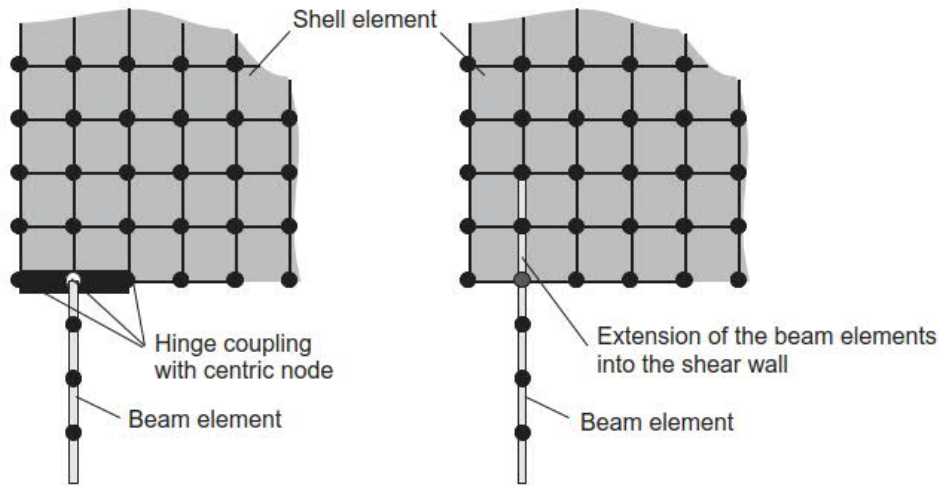
### 3.4.1 Levyelementtien verkotukset

Laskentamallia luodessa tulee ohjelman verkotusasetukset tarkistaa. Esim. ETABS:ssa vakioasetuksella seiniä ei verkoteta erikseen, vaan niiden solmupisteinä toimivat mallinnetun levyelementin solmupisteet. Esimerkiksi pilarit tai eri kohtaan osuvat seinät eivät toimi yhdessä rakenteen kanssa.



KUVIO 21. ETABS-laskentamallin vakioasetuksilla kaikki solmut eivät ole tarttuneet toisiinsa.

Lisäksi esim. korkeiden palkkien ja pilarien liitoksissa on syytä tarkentaa verkotusta. Vaihtoehtoja liitokseen on esim. rigid linkin käyttö liitoksessa, tai viemällä sauvaelementti levyelementin sisään.



KUVIO 22. Liitosalueilla verkotusasetuksia ja elementtien limityksiä tulee harkita tapauskohtaisesti. (Rombach, 154)

Verkotuksen kokoon vaikuttaa myös rakenteen tyyppi. Yleisesti ottaen seinämäiset rakenteet voidaan verkottaa harvemmalla verkotuksella kuin laattaelementit. Seinät ottavat pääasiassa pystykuormia ja leikkausvoimia, kun taas laattaelementit ottavat lisäksi momenttia. On vaikea yleistää, minkäkokoinen verkotus laskentamallilla olisi hyvä olla. Lähtökohtana voidaan pitää 1 m x 1 m verkkoa. Ylempänä rakennusta voidaan käyttää jopa harvempaa verkotusta, kun taas alaosissa tiheämpi verkotus voi olla tarpeen. Laatoilla käytetään tarpeen mukaan tiheämpää verkotusta. Verkotuksen tiheyden vaikutusta laskenta-aikaan on näytetty taulukossa 4.

No.	Mesh density (size of FE)	M <sub>xx</sub> [kNm/m]	Difference [%]
1.	80 cm × 80 cm	33.30	-
2.	40 cm × 40 cm	34.02	2.16
3.	20 cm × 20 cm	34.66	1.88
4.	10 cm × 10 cm	34.86	0.58

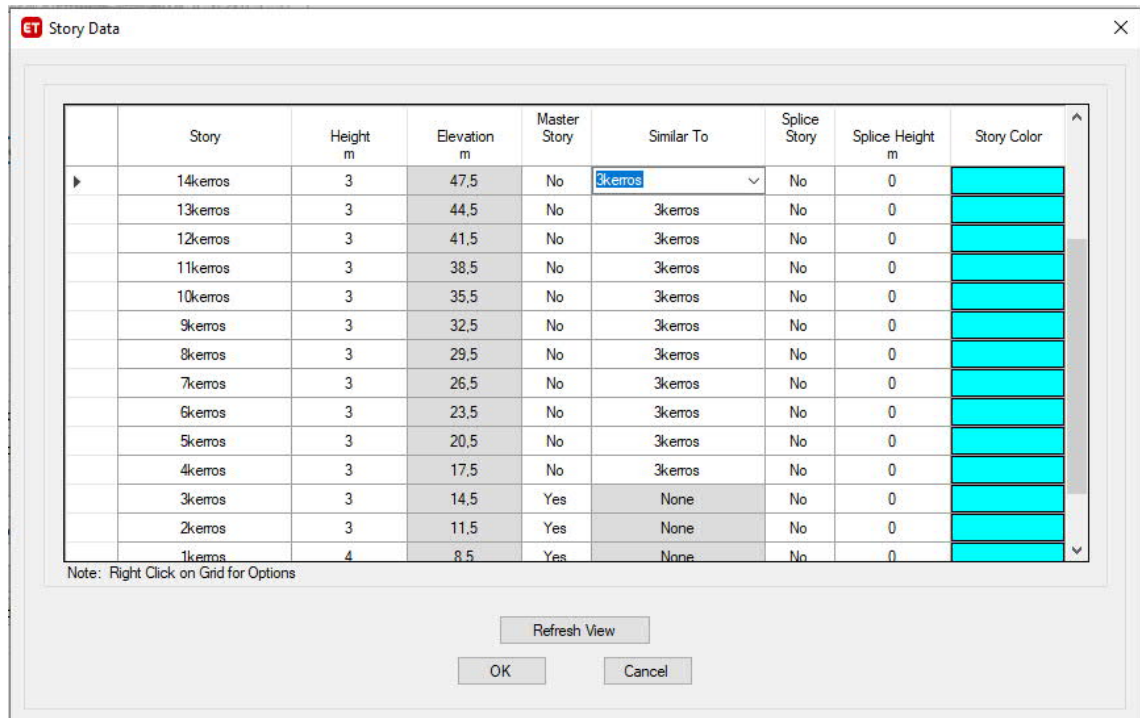
**Table 2.** Computation time and output file size under convergence of the FE mesh.

No.	Mesh density (size of FE)	Time	Output file size
1.	80 cm × 80 cm	5 s	4.2 MB
2.	40 cm × 40 cm	20 s	7.5 MB
3.	20 cm × 20 cm	2 min	24.7 MB
4.	10 cm × 10 cm	25 min	92.8 MB

TAULUKKO 4. Verkotuksen tiheyden vaikutus 20 cm korkean laattarakenteen momentteihin ja laskenta-aikaan. (Simplified method of applying loads, 4)

### 3.4.1 Laskentamallien geometria, toistuvat kerrokset

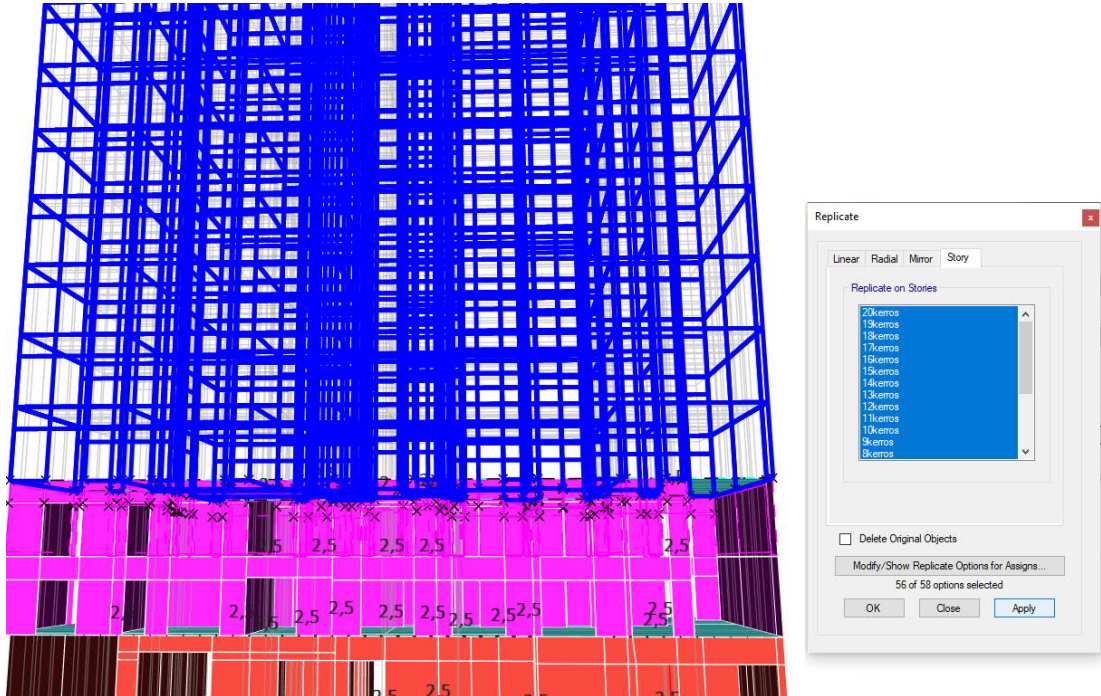
ETABS-ohjelmassa toistuvien kerrosten hallinta oli ohjelmistoita parhain. Jotta toistuvat kerrokset linkittyvät, eivät ne saa olla määritettyinä pääkerroksiksi. Lisäksi pitää määrittää, minkä kerroksen kanssa taso on samanlainen.



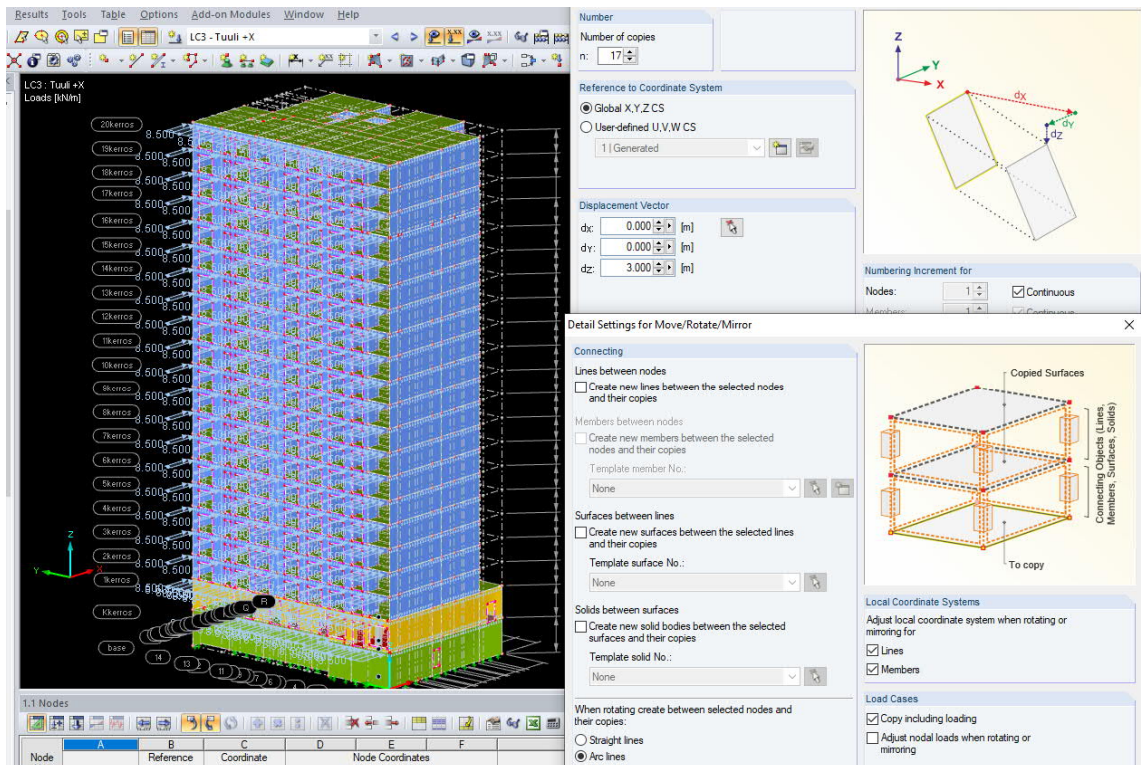
KUVIO 23. Toistuvien kerrosten määrittäminen ETABS:illa

Muutoin toistuvien kerrosten kopiointi ohjelmistoissa oli periaatteeltaan samanlainen. Valittiin joko osat tai kerrokset, jotka kopioidaan. Kaikissa ohjelmistoissa

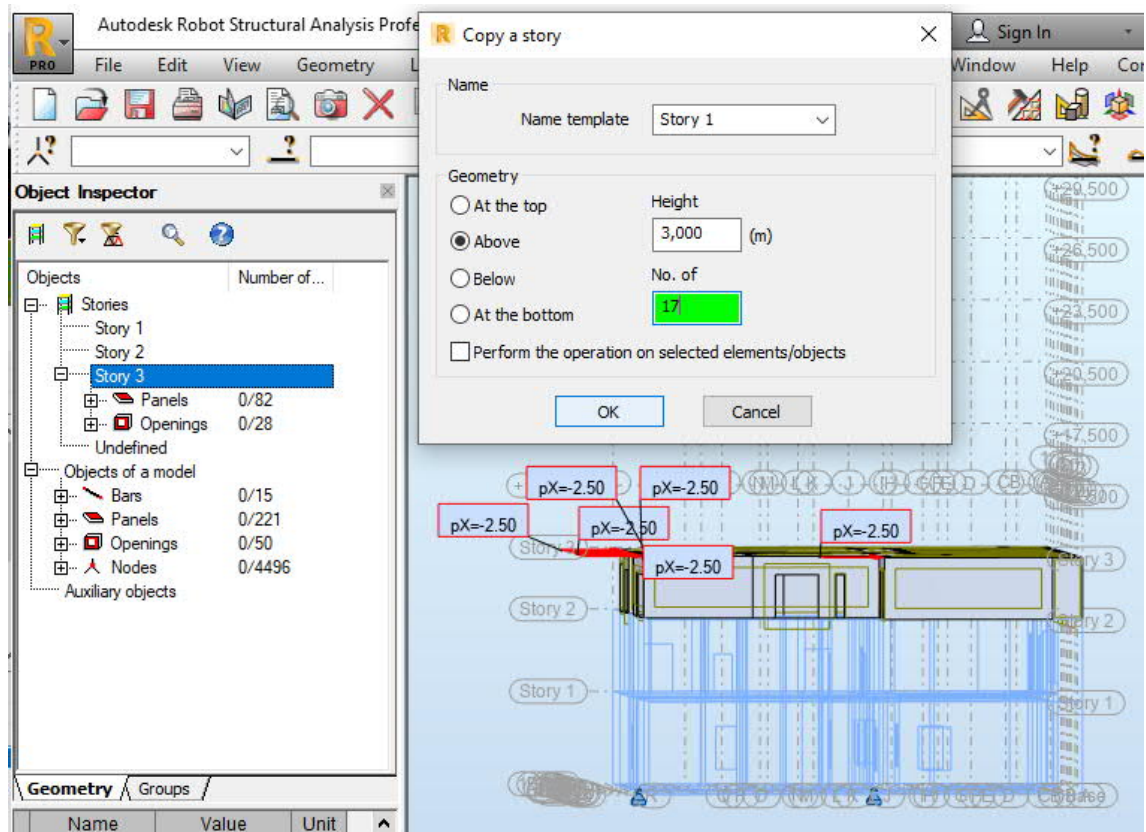
kopiointi onnistui hyvin, solmupisteet tarttuivat kerroksittain toisiinsa, kuormat kopioituivat ja laskentamalli saatiin laskettua kopiointin jälkeen ilman virheilmoituksia. RFEM-ohjelmassa tulee kopiointiasetuksista varmistaa, että kopiointi huomioi myös syötetyt kuormat.



KUVIO 24. Toistuvien kerrosten kopiointi ETABS:lla

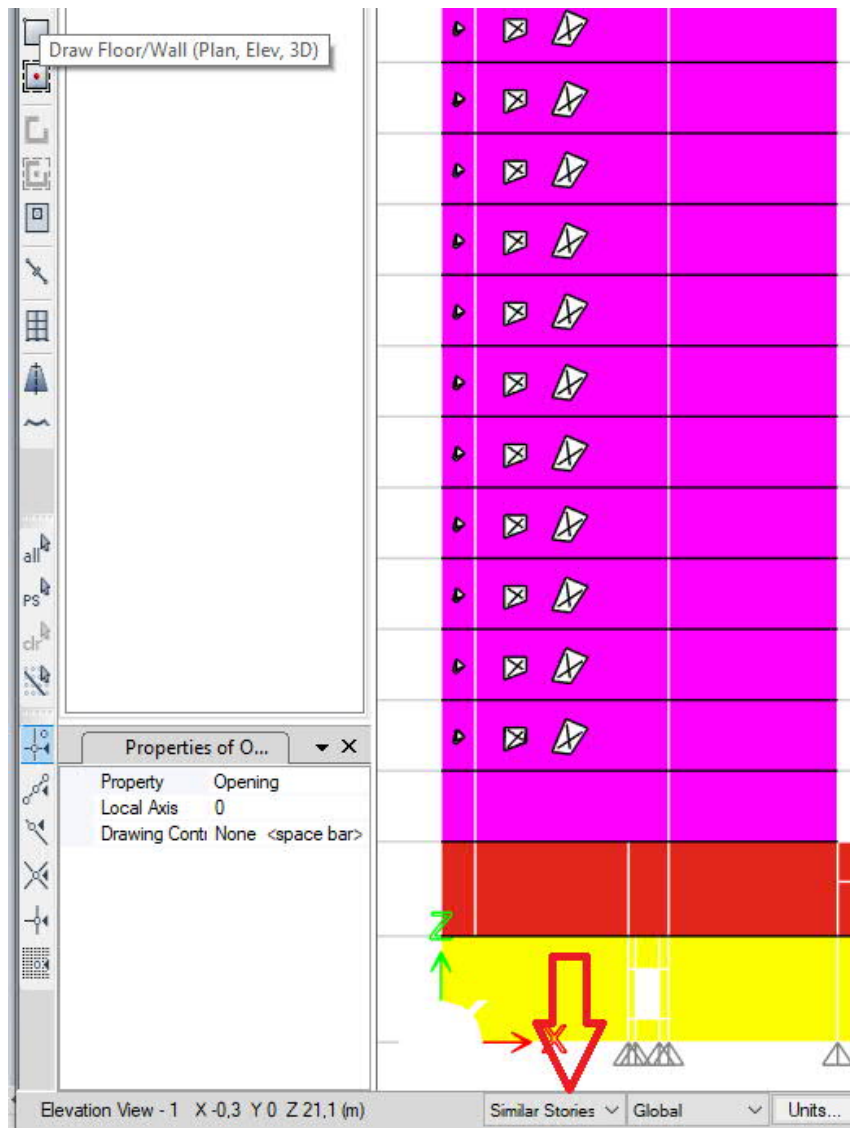


KUVIO 25. Toistuvien kerrosten kopiointi RFEM:llä



KUVIO 26. Kerroksen kopiointi Robotissa.

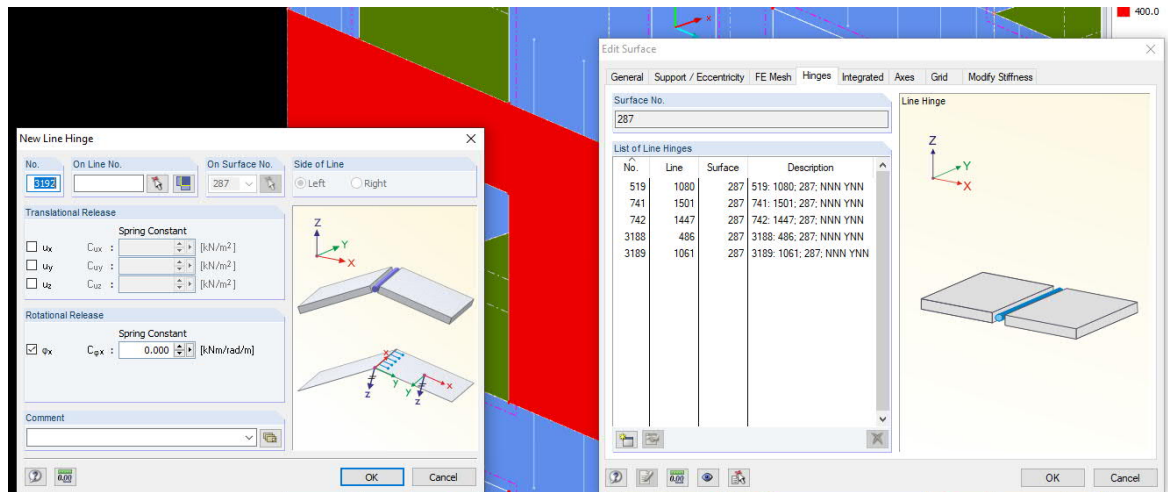
Toistuvien kerrosten muokkauksen osalta ohjelmistoissa sen sijaan tulee eroavaisuuksia. RFEM:llä ja Robotilla ei opinnäytetyötä tehdessä löydetty työkalua, joka huomioisi toistuvat kerrokset. Sen sijaan ETABS-ohjelmassa on toimintoja, joilla muokkaukset tulevat kaikkiin kerroksiin tai määriteltyihin samanlaisiin kerroksiin. Draw wall toiminnolla koitettiin toistuvan kerroksen muokkausta ETABS:ssa. Kun similar stories valinta on päällä, tulee kolmanteen kerrokseen mallinnettu aukko kaikkiin samanlaisiin kerroksiin. Myös kuormien syöttö toimi onnistuneesti.



KUVIO 27. Samanlaisten kerrosten muokkaus ETABS-ohjelmassa yhtä kerrosta muuttamalla

### 3.4.2 Laskentamallin elementtien vapautukset

Mikäli runkorakenteessa käytetään elementtitehtaalla tehtyjä valmisosarakenteita, tulee rakenteiden vapautukset mallintaa tarkoituksenmukaisiksi. Pilarit voisivat ankkuripulttiliitoksen vuoksi toimia mastoina, mutta onko tarkoituksenmukaista ottaa niille jäykkyyttä, koska rakennuksessa on paljon leikkausseiniä jäykisteinä? Ulkoseinillä liitososa on esimerkiksi seinäkenkäliitos, joka ei ota vastaan seinän taivutusjäykkyyden suuntaista täyttä momenttikapasiteettia. Lisäksi jos ylemmissä kerroksissa käytetään ontelolaattoja, eivät seinäliitoksessa pystyteräkset mene molemmissa pinnoissa läpi, jolloin liitoksesta tulee osittain jäykkä. On turvallisempaa mallintaa liitos nivellellisenä, jos liitos on osittain jäykkä.



KUVIO 28. Levyelementin reunan vapautus RFEM-ohjelmassa.

### 3.4.3 Laskentamallin nopeuden optimointi

Laajassa laskentamallissa laskenta-aika kasvaa helposti pitkäksi. Pääjäykistyslaskentamallin laskennassa voidaan tehdä toimenpiteitä laskentamallin tarkkuuden suhteen. Laskentamallin nopeuteen voidaan vaikuttaa verkotuksen tiheydellä. Verkotuksen tiheyden tulee olla tarkoituksenmukainen. Alimmissa kerroksissa on yleensä suurimmat voimat, jotka vaativat tarkempaa tutkintaa. Täten rakennuksen alaosissa on syytä käyttää tiheämpää verkotusta.

Laskentamallin nopeuteen voidaan vaikuttaa myös elementtien laskenta-asetuksia säätämällä. Kun korkeassa rakentamisen pääjäykistyslaskennassa

olla kiinnostuneita värähtelystä, yksittäisen kerroksen laattojen mitoitus tason pystykuormille voidaan tehdä erillisellä pienemmällä laskentamallilla. Tällöin voidaan tarkoituksenmukaisesti käyttää laatoilla jäykkiä kalvoja laskenta-asetuksena. Jäykillä kalvoilla on äärettömät tasossa olevat jäykkyysominaisuudet, joten laatoille ei tule taipumia (Rigid vs. Semi-rigid diaphragm). Kun laskenta jättää pois taipuman laskennan ja analysoinnin, nopeuttaa se laskentaa.

### 3.5 Laskentamallien tulokset ja vertailu

#### 3.5.1 Tukireaktiot

Laskentamallin toiminnan ja kuormien alas tuonti voidaan tarkistaa kokonaistukireaktioiden avulla. Näin saadaan selvitettyä, onko kuormat syötetty onnistuneesti. Ohjelmistojen tukireaktiot vastasivat hyvin käsin laskettuja arvoja, kuten taulukosta 5 nähdään.

Case 4 (C)	ULS Tuuli +X					
Sum of val.	-9100,82	-0,00	235513,69	-5,42	-36,78	-4,95
Sum of reac.	-9100,82	-0,00	235513,69	3515885,73	-2587782,34	140608,69
Sum of forc.	9100,82	0,0	-235513,69	-3515885,49	2587784,23	-140607,71
Check val.	0,00	-0,00	-0,00	0,24	1,89	0,98
Precision	4,21534e-04	1,28464e-10				

#### ET Base Reactions

File	Edit	Format-Filter-Sort	Select	Options	
Units: As Noted		Hidden Columns: No		Sort: None	
Filter: None					
	Output Case	Case Type	FX kN	FY kN	FZ kN
	ULS Tuuli +X	Combination	-9100,8225	0	236055,3655

CO1 - ULS Tuuli +X	
Sum of loads in X	9012.47 kN
Sum of support forces in X	9012.46 kN
Sum of loads in Y	0.00 kN
Sum of support forces in Y	0.00 kN
Sum of loads in Z	-2.46E+05 kN
Sum of support forces in Z	-2.46E+05 kN
Resultant of reactions about X	2504.360 kNm
Resultant of reactions about Y	12582.200 kNm
Resultant of reactions about Z	-5183.510 kNm

KUVIO 29. Kokonaistukireaktiot laskentamalleissa.

TAULUKKO 5. Vaaka- ja pystytukireaktioiden vertailu

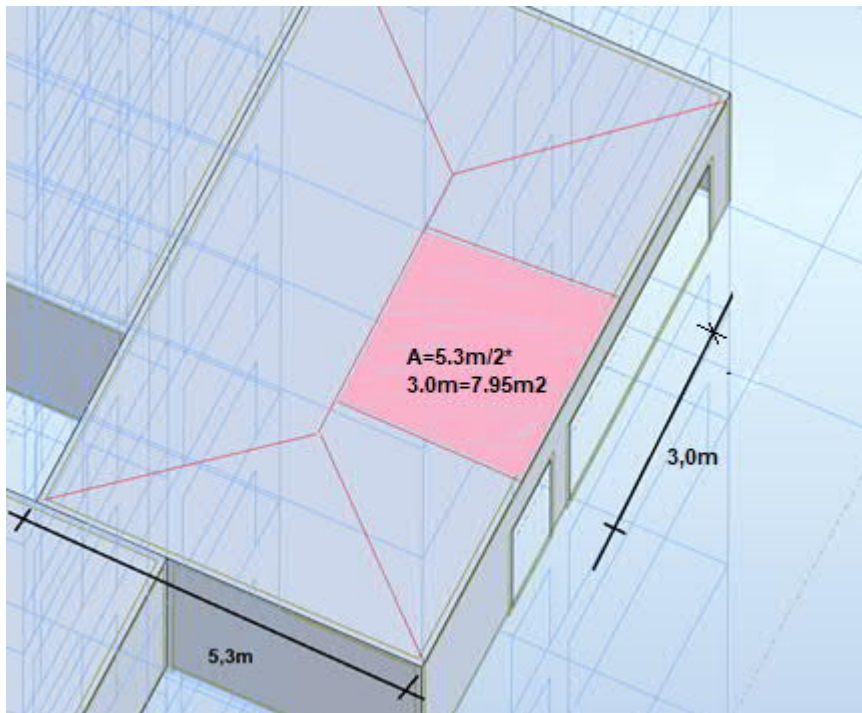
Tukireaktiot Laskentamallin kuvaus	Tukireaktio $F_x$ (kN)	Eroavaisuus käsin lasketaan	Tukireaktio $F_z$ (kN)	Eroavaisuus käsin lasketaan
ETABS	9101	0.01 %	236055	-3,3 %
RFEM	9012	-0,98 %	246000	0.9 %
Robot	9100	-0,00 %	235514	-3.5 %
Käsin laskenta	9100	-	243756	-

### 3.5.2 Aukkopielet seinässä

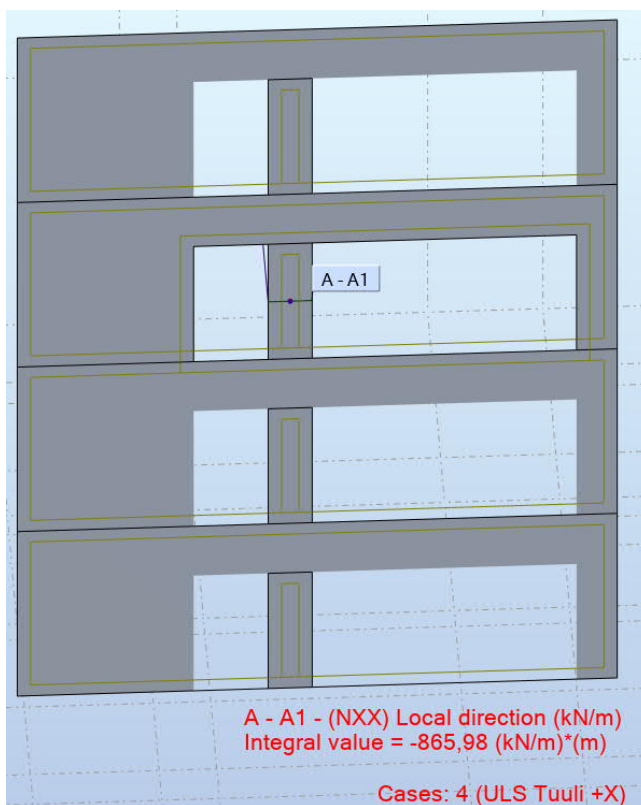
Tarkastellaan neljännessä kerroksessa moduulilinjalla R/4 sijaitsevaa aukko-  
pieltä. Tarkoituksena on selvittää, kuinka FEM-laskennasta saatu arvo vastaa  
pinta-ala menetelmällä käsin laskettua rasiitusta. Lisäksi tutkitaan, miten aukko-  
pilarin kimmokertoimen kasvatus vaikuttaa rasiitukseen.

Lasketaan käsin pystykuorman suuruus pinta-alamenetelmällä.

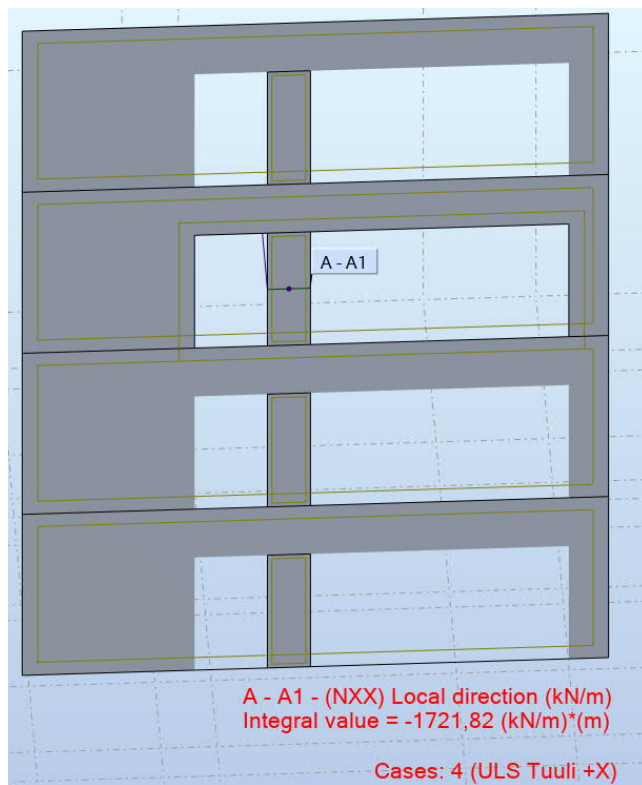
- yhden kerroksen kuormituspinta-ala on  $8,2 \text{ m}^2$
- kun tuulikuorma asetetaan määrääväksi, saadaan murtorajatilassa ne-  
liökuormaksi  $1,27 \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 + 1,65 \cdot 0,7 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 12,41 \text{ kN/m}^2$
- kuorma kerrosta kohden on  $8,2 \text{ m}^2 \cdot 12,41 \text{ kN/m}^2 = 101,8 \text{ kN/kr}$
- seinän paino aukkovähennykset huomioituna on  $(3\text{m} \cdot 2,7\text{m} -$   
 $2,3\text{m} \cdot 2,2\text{m}) \cdot 0,2\text{m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 15,2 \text{ kN}$
- hyötykuormien ja omien painojen kokonaiskuorma  $(101,8 \text{ kN} + 15,2 \text{ kN}) \cdot$   
 $14\text{kr} = 1638 \text{ kN}$
- jäykistyslisäksi arvioidaan  $150 \text{ kN}$  aukkopilarin kohdalla
- kuorma yhteensä  $1638 \text{ kN} + 150 \text{ kN} = 1788 \text{ kN}$



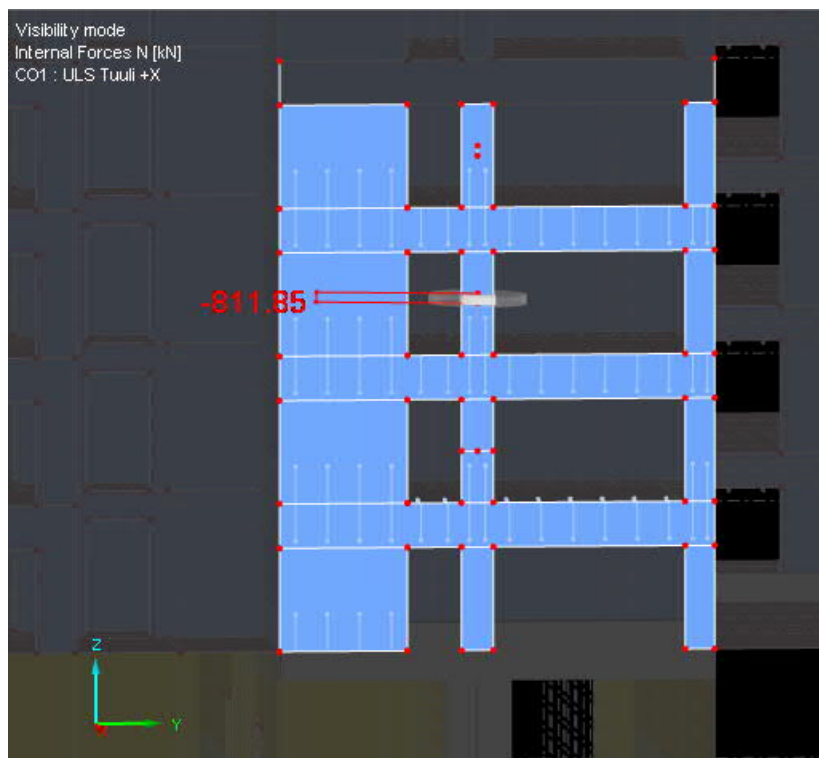
KUVIO 30. Kuormituspinta-alan määrittäminen käsin laskennassa.



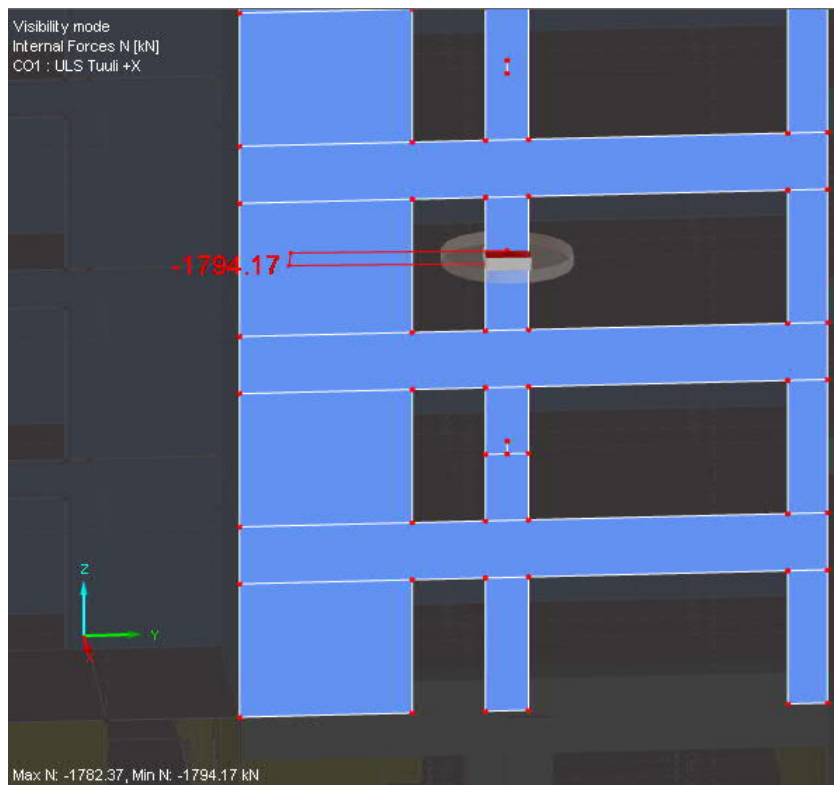
KUVIO 31. Aukkopilarin rasitukset Robotilla ilman muutettuja jäykkyyksiä



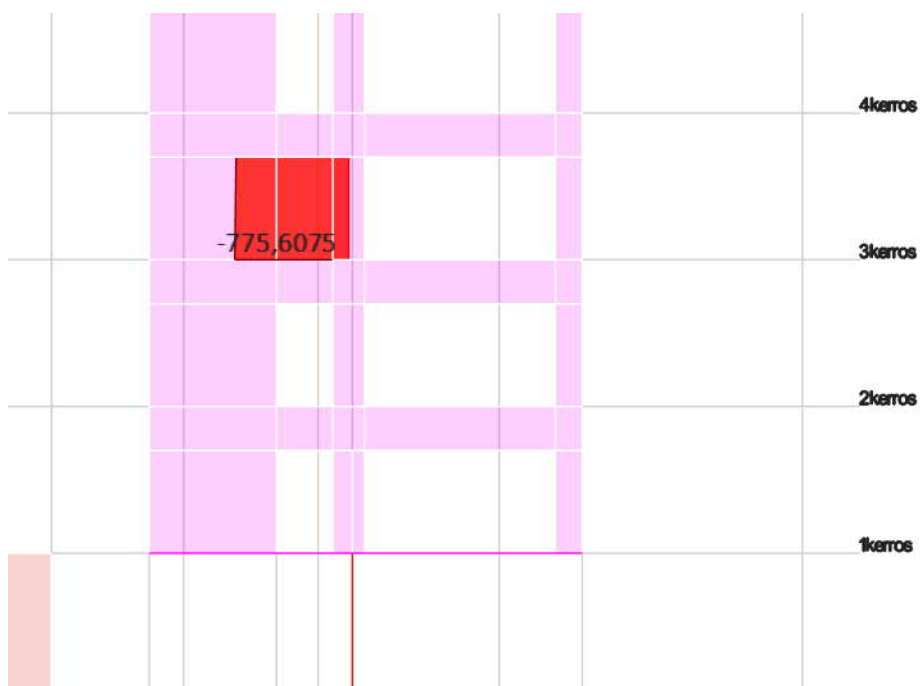
KUVIO 32. Aukkopilarin rasitukset Robotilla, kun aukkopilarin jäykkyyttä on kasvatettu



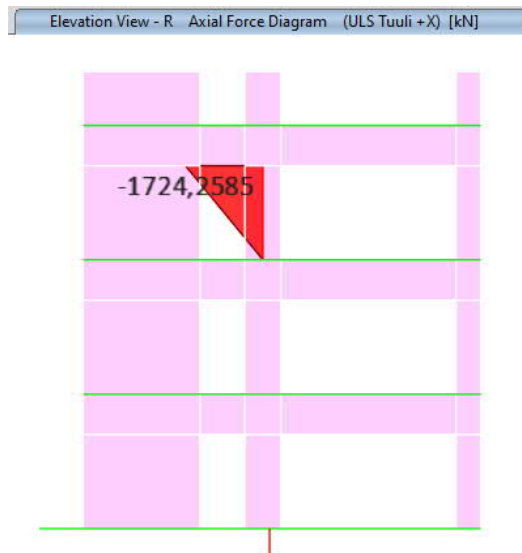
KUVIO 33. Aukkopilarin rasitukset RFEM-ohjelmassa ilman muutettuja jäykkyyksiä



KUVIO 34. Aukkopilarin rasitukset RFEM-ohjelmassa, kun aukkopilarin jäykkyyttä on kasvatettu



KUVIO 35. Aukkopilarin rasitukset ETABS-ohjelmassa ilman muutettuja jäykkyyksiä



KUVIO 36. Aukkopilarin rasitukset ETABS-ohjelmassa, kun aukkopilarin jäykkyyttä on kasvatettu

Taulukosta 6 huomataan, että tavanomaisella FEM-laskentamallilla lasketun seinän aukkopielen normaalivoimarasitukset poikkeavat huomattavasti käsin laskennalla saadusta arvosta. Rakennemallissa seinän alla on pilari, joka painuu enemmän kuin pienemmällä normaalijännityksellä olevat seinät. Ikkunan päällä on palkkimainen rakenneosa, joka siirtää voimia vähemmän painuville rakenteille. Lisäksi käsin laskennassa on kaistamenetelmällä siirretty kuormat kahdelle tuelle lasketussa kentässä. Todellisuudessa laatta siirtää osan kuormasta pidemmän kentän suunnassa. Kun kimmokerrointa kasvatetaan aukkopielessä kolminkertaiseksi, lähestyy normaalivoiman arvo manuaalisesti lasketua arvoa. Mikäli kimmokertoimia kasvattaa, tulisi käsin laskenta tehdä mahdollisimman tarkasti, jotta osataan valita järkevä kasvatuskerroin kimmomoduulille.

TAULUKKO 6. Aukkopilarin normaalivoimarasitusten vertailu

<b>Aukkopilari</b>	Normaalivoima	Eroavaisuus	Normaalivoima	Eroavaisuus
Laskentamallin kuvaus	Kimmokerroin 100% $F_x$ (kN)	käsin lasketaan	Kimmokerroin 300% $F_x$ (kN)	käsin lasketaan
ETABS	775	-56,7 %	1724	-3,7 %
RFEM	812	-54,6 %	1794	0,3 %
Robot	866	-51,6 %	1722	-3,8 %
Käsin laskenta	1788	-	1788	-

### 3.5.3 Vaiheistettu rakentaminen

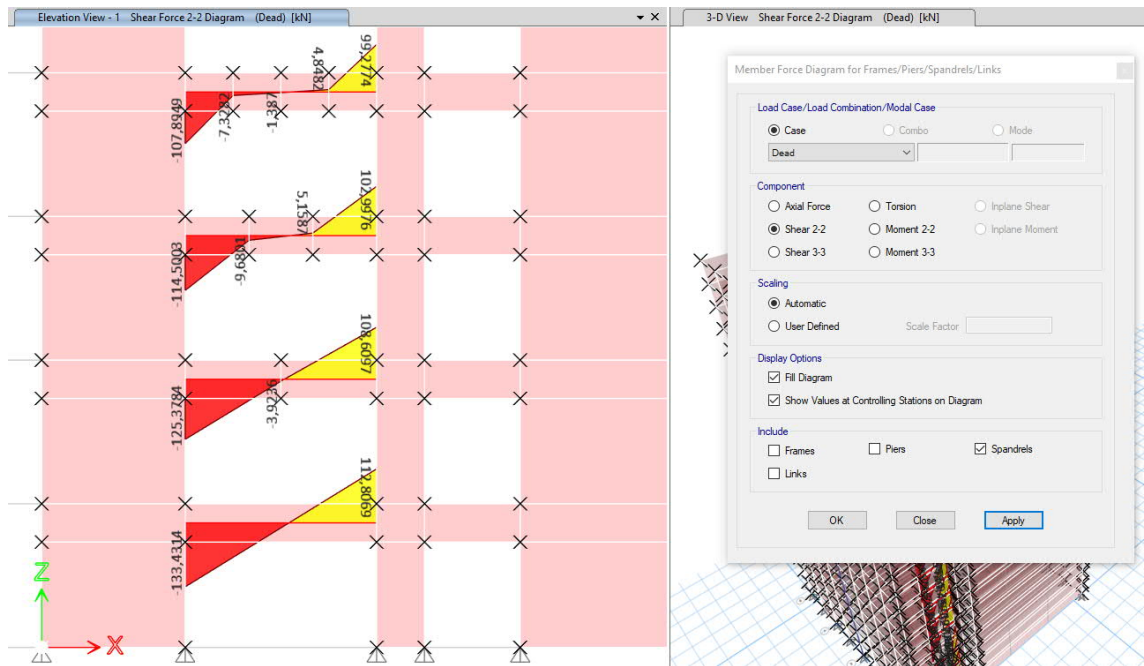
Vaiheistetun rakentamisen (eng. staged construction tai sequential construction) analysointiin löytyy kaikista kolmesta ohjelmasta työkalu. Vaiheittaisen rakentamisen laskentaa varten tulee rakennemallia rakentaessa huomioida, että tuki- ja vapautusehtojen tulee täytyä kerroksittain. Muutoin laskentaa ei välttämättä saada suoritettua. RFEM-ohjelmassa ja Robotissa pitää manuaalisesti valita osat, jotka ohjelma laskee vaiheittain. Pienempiä osamalleja tehtäessä saatiin näillä ohjelmilla laskenta suoritettua, mutta esimerkkirakenteen geometrian analysoinnissa ohjelmat ilmoittivat virheistä, ja laskenta keskeytyi. Opinnäytetyön puitteissa ei näillä kahdella ohjelmalla saatu vaiheittaisen rakentamisen analyysiä suoritettua.

Vaiheistetun rakentamisen analysointiin paras työkalu on ETABS-ohjelmassa. Siinä ei tarvitse itse rakentaa vaiheita manuaalisesti, vaan ohjelma osaa poimia rakenneosat vaiheittain määritettyjen ehtojen mukaan automaattisesti. Lisäksi ohjelma sai laajan rakenteen laskettua ilman virheilmoituksia. Koska kaikki ohjelmat eivät rajallisista korjaustoimenpiteistä huolimatta laskeneet rakennetta, eriytettiin vaiheistetun rakentamisen tutkinta neljänteen lukuun, jossa vaiheittaisen rakentamisen ilmiötä tutkittiin pelkästään ETABS-ohjelmalla.

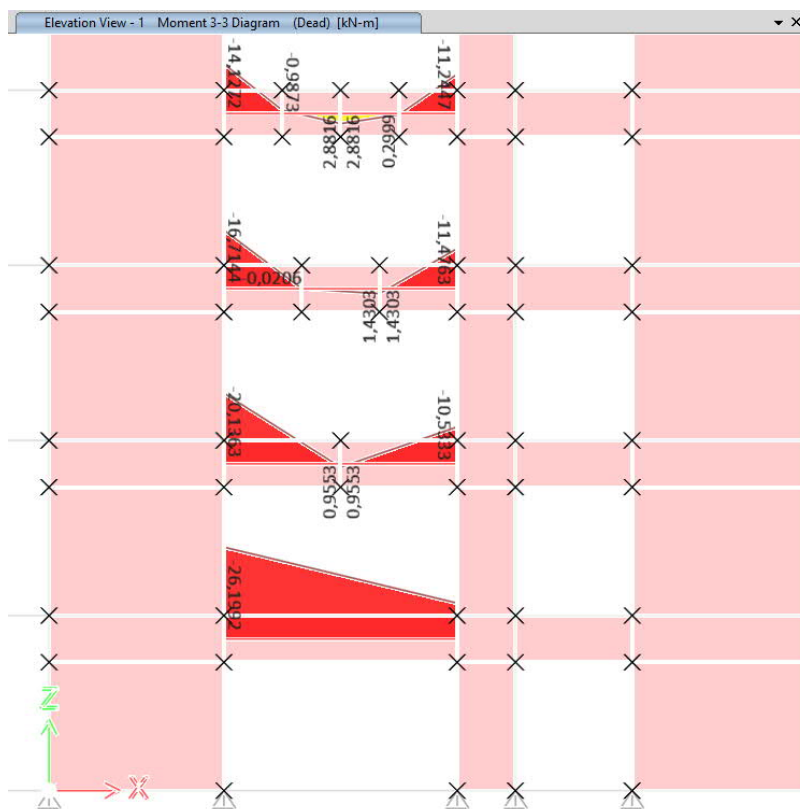
### 3.5.4 Aukkopalkit

Levyelementeillä kalvovoimat eivät kuvaa rasituksia palkkien tavoin. Jotta rasitukset saadaan palkkimaisiksi, ohjelmissa erilaiset työkalut tekevät muuntotoimen. Palkkimaiset momentit ja leikkausvoimat ovat helpommin tulkittavissa.

ETABS-ohjelmassa seinien aukotuksen jälkeen tulee aukon yläpuolinen kaista nimetä spandrel toiminnolla. Ohjelman toiminto muuttaa levykentän oikeaan ja vasempaan reunaan rasitukset momenteiksi ja leikkausvoimiksi. Väliarvoja elementin sisällä ei näytetä. Jotta aukon kenttämomentti saadaan esiin, pitää levyt pilkkoa manuaalisesti pienempiin osiin. Kuvioissa 37 ja 38 on näytetty vertailuja siitä, kuinka pienempiin osiin pilkkomisella saadaan kentässä vaikuttavat rasitukset näkyville.



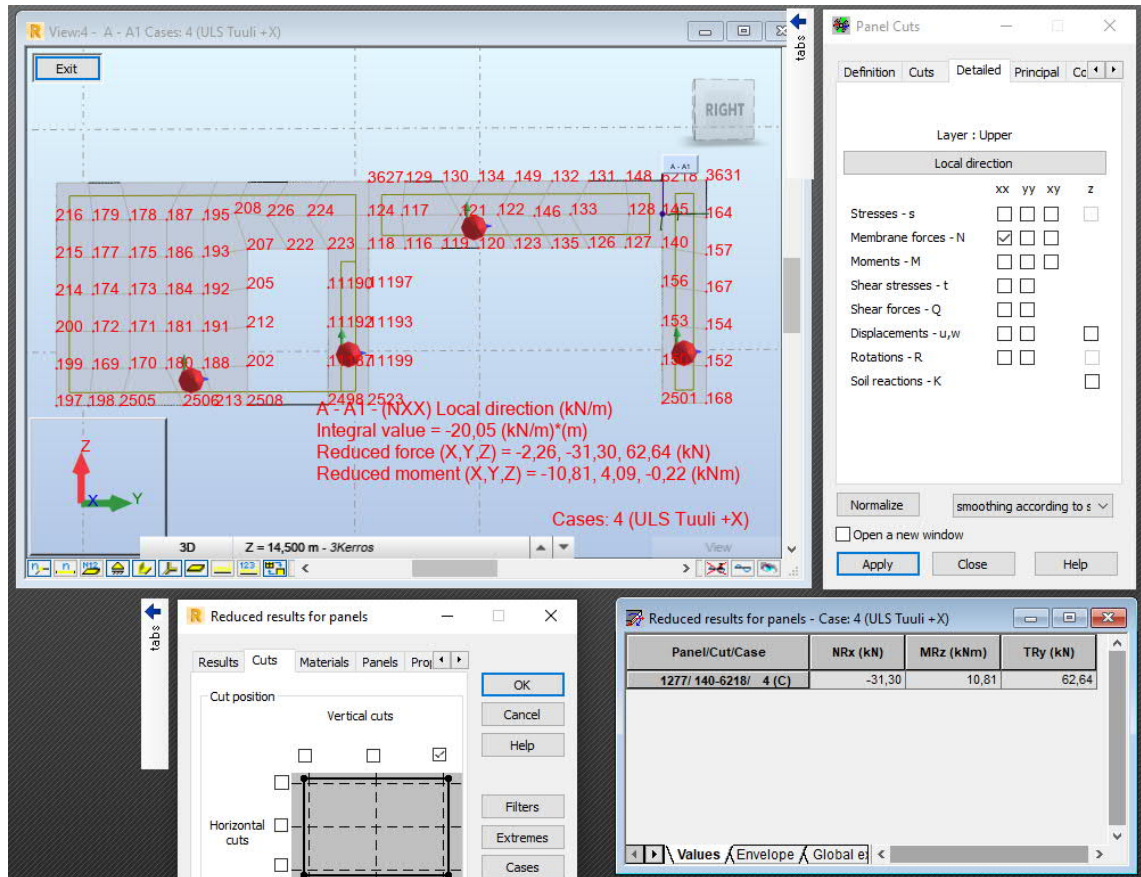
KUVIO 37. Aukkopalkin leikkausvoimakuvaja ETABS:ssa



KUVIO 38. Aukkopalkin momenttikuvaja ETABS:ssa

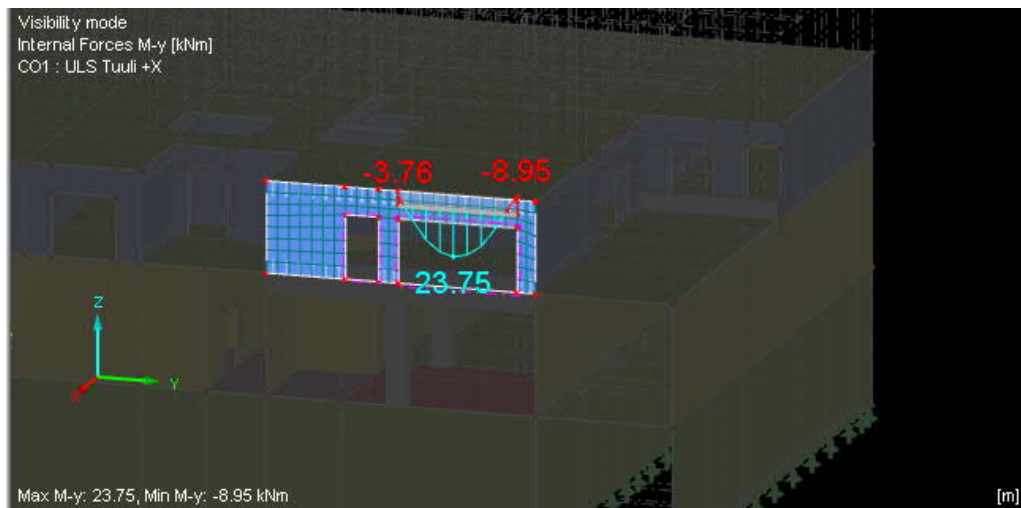
Robotissa toiminto on nimellä reduce results for panels. Kokonaisuutena levyelementtien rasituksen muuttaminen palkkimaisiksi on ontuva. Toiminnot ovat

vaikeasti löydettävissä. Kuviossa 39 on näytetty, kuinka tulokset saadaan taulukon ja panel cutin kautta esiin.

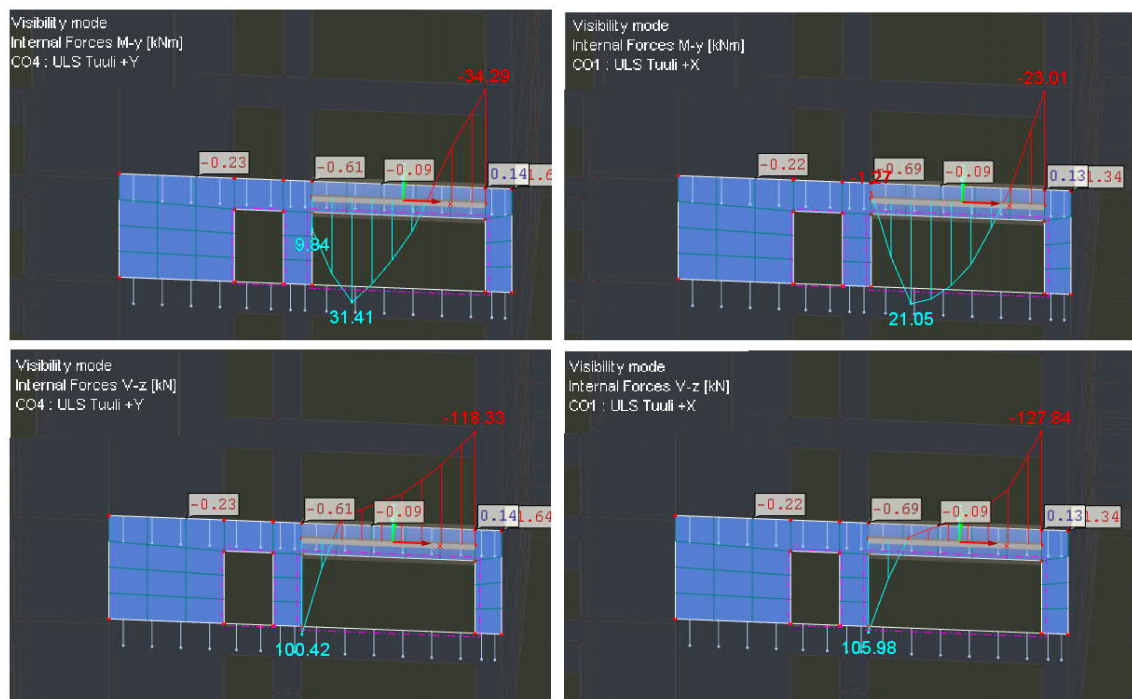


KUVIO 39. Robotin aukkopalkin rasituksia reduced results avulla.

RFEM-ohjelmassa aukkopalkin rasitukset saadaan result beam toiminnolla näytettyä. Result beam pitää mallintaa leveydelementin neutraaliakselille, jotta momenttikuvaaja tulee oikein. Result beam antaa väliarvot automaattisesti, toisin kuin kahdessa muussa ohjelmassa.



KUVIO 40. Aukkopalkin rasitukset RFEM-ohjelmassa, kun ylemmät kerrokset on poistettu.



KUVIO 41. Aukkopalkin rasitukset RFEM-ohjelmassa esimerkkirakenteen geometrialla

RFEM-ohjelmalla tarkasteltiin korkean rakentamisen vaikutusta aukkopalkin rasitukseen. Kuviossa 40 on näytetty aukkopalkin momenttikuvaaja vertailurakenteella, joka on 3 kerrosta korkea. Matalammalla rakennemallilla kuvataan yhden kerroksen pystyvoimien aiheuttamia aukkorasituksia. Kuviossa 41 on näytetty esimerkkirakenteen geometrialla momentti- ja leikkausvoimakuvaajat. Momenttikuvioista nähdään, että korkea rakentaminen lisää vaakavoimien vuoksi aukkopalkin rasituksia.

### 3.5.5 Ominaistaajuus

FEM-ohjelmien ominaistaajuuden vertailua varten laskettiin rakenteen ominaistaajuuden suuruusluokka Eurokoodin likimääräiskaavalla.

$$n_1 = \frac{46}{h} (\text{Hz})$$

$$n_1 = \frac{46}{65,5} = 0,70 \text{ Hz}$$

FEM-laskentaohjelmilla saatiin modaalianalyysin avulla laskettua alimmat ominaistaajuudet. RFEM-ohjelmassa ominaistaajuuden laskenta vaatii erillisen RF-DYNAM lisäosan. Robotilla ja ETABS:ssa ohjelman perusversioon sisältyy ominaistaajuuden laskentatyökalu.

Mode No.	A Eigenvalue $\lambda$ [1/s <sup>2</sup> ]	B Angular Frequency $\omega$ [rad/s]	C Natural frequency f [Hz]	D Natural period T [s]
1	86.452	9.298	1.480	0.676
2	97.161	9.857	1.569	0.637
3	200.850	14.172	2.256	0.443
4	1014.227	31.847	5.069	0.197

Case/Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)
10/ 1	1,43	0,70
10/ 2	1,64	0,61
10/ 3	2,02	0,49
10/ 4	2,29	0,44
10/ 5	5,40	0,19

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
Moda2	1	0,672	1,489	9,3584	87,5414
Moda2	2	0,115	8,673	54,4968	2969,8991

KUVIO 42. Ominaistaajuuksien tuloksia FEM-ohjelmistoista

Laskentaohjelmistojen modaalianalyseillä saatiin hyvin samasuuntaisia tuloksia keskenään, kuten taulukosta 7 voidaan todeta. Koska kolmella ohjelmistolla saatiin lähellä toisia olevia tuloksia, voidaan niiden laskentaa pitää luotettavana. Samalla nähdään, että likimääräiskaavalla lasketun arvon virhe voi olla suuri, koska se ei huomioi rakennuksen jäykkyyttä.

TAULUKKO 7. Alimpien ominaistajuuksien vertailu

Laskentamallin kuvaus	Alin ominaistajuus Hz	Eroavaisuus Robotin tulokseen	Eroavaisuus käsin laskentaan
ETABS	1.49	4,2 %	93,5 %
RFEM	1.48	3,5 %	92.2 %
Robot	1.43	-	85.7 %
Käsin laskenta likimääräiskaavalla	0.77	-46.2	-

## 4 VAIHEITTAINEN RAKENTAMINEN

### 4.1 Tutkittavan laskentamallin geometria

Vaiheittaisen rakentamisen rakentamiseen liittyvä tutkinta tehtiin opinnäytetyössä ETABS-ohjelmalla, koska muiden vastaavat työkalut eivät toimineet toivotulla tavalla. ETABS-ohjelmassa on auto construction sequence toiminto, jossa määritellään perusasetukset vaiheittaisen rakentamisen laskentaa varten. Suuria malleja laskettaessa voidaan kerroksia yhdistää laskentaa varten, jolloin laskenta-aikaa saadaan nopeutettua.

**Auto Construction Sequence Load Case**

General

Case is Active

Auto Construction Sequence Load Case Name: AutoSeq

Geometric Nonlinearity Option: None

Construction Sequence

Combine this number of Stories in each Construction Sequence Group: 1

Exclude this Group Until the Last Step

Loads Applied

Load Pattern Name	Scale Factor
Dead	1

Design Combinations

Replace Dead Type Load Cases with this Load Case in all Default Design Combinations

**Load Case Data**

General

Load Case Name: AutoSeq

Load Case Type: Nonlinear Staged Construction

Mass Source: Previous

Analysis Model: Default

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case:

Stage Definition

Stage Number	Stage Name	Duration, Days	Provide Output	User Comment	Number Operations
1	1	0	Yes		3
2	2	0	Yes		2
3	3	0	Yes		2
4	4	0	Yes		2
5	5	0	Yes		2
6	6	0	Yes		2
7	7	0	Yes		2

Other Parameters

Geometric Nonlinearity Option: None

Results Saved: End of Each Stage

Nonlinear Parameters: Default

Material Properties Are Time Dependent

**Stage Data**

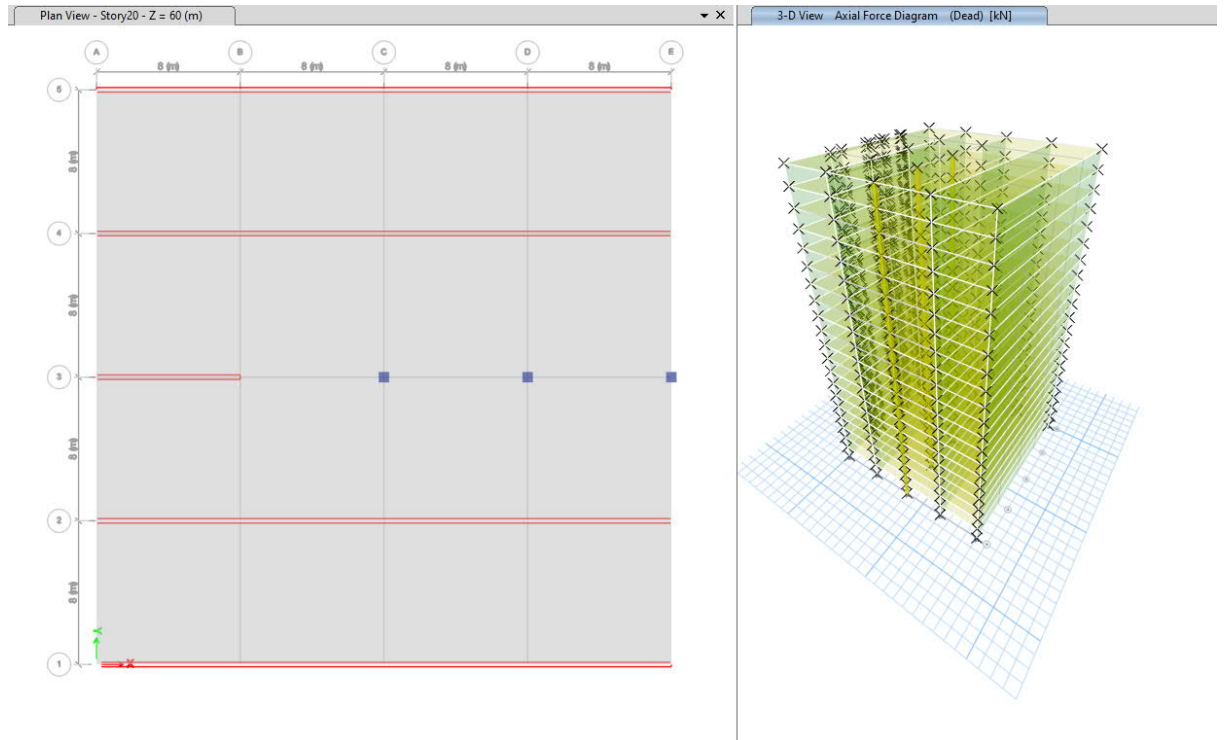
Operation	Object Type	Object Name	Age at Add, days	Type	Name	Scale Factor
Add Structure	Story	Base	0			
Add Structure	Story	Story1	0			
Load Objects # Added	Group	All		Load Pattern	Dead	1

Stage Name: 1 Stage: 1 of 20

KUVIO 43. Vaiheittaisen rakentamisen laskenta-asetuksia ETABS-ohjelmassa

Vaiheittaisen rakentamisen tutkimista varten rakennettiin kuvion 43 mukainen laskentamalli. Moduuliverkko on 8 m x 8 m ja kerroksia on 20 kpl. Kerroskor-

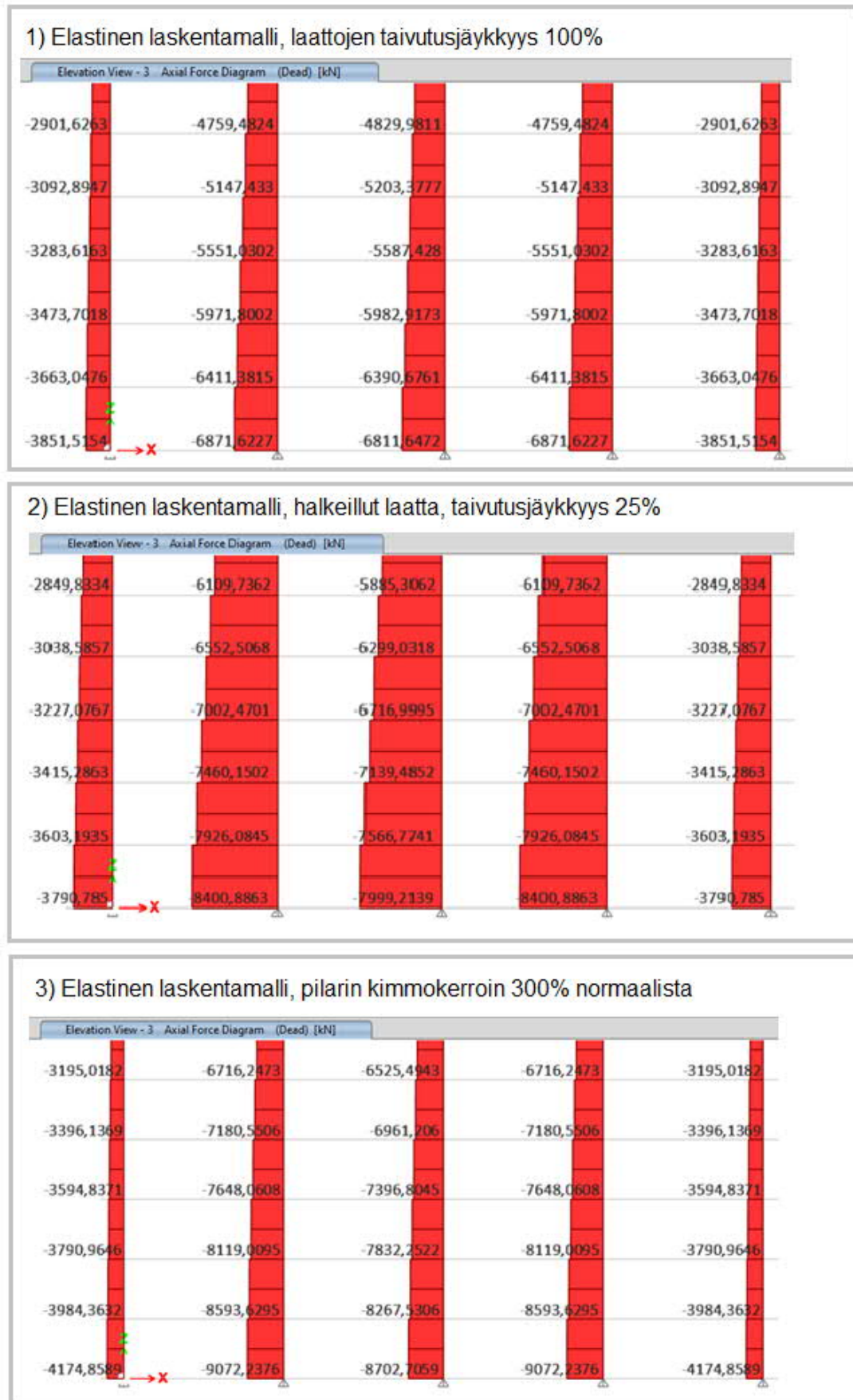
keus on 3 m. Pilarit ovat neliön muotoisia, leveydeltään 580 mm. Pilarien lujuusluokka on C50/60. Punaisella näkyvät ovat betoniseinä, ja niiden leveys on 250 mm lujuuden ollessa C35/45. Välipohjalaattojen paksuus on 280 mm.



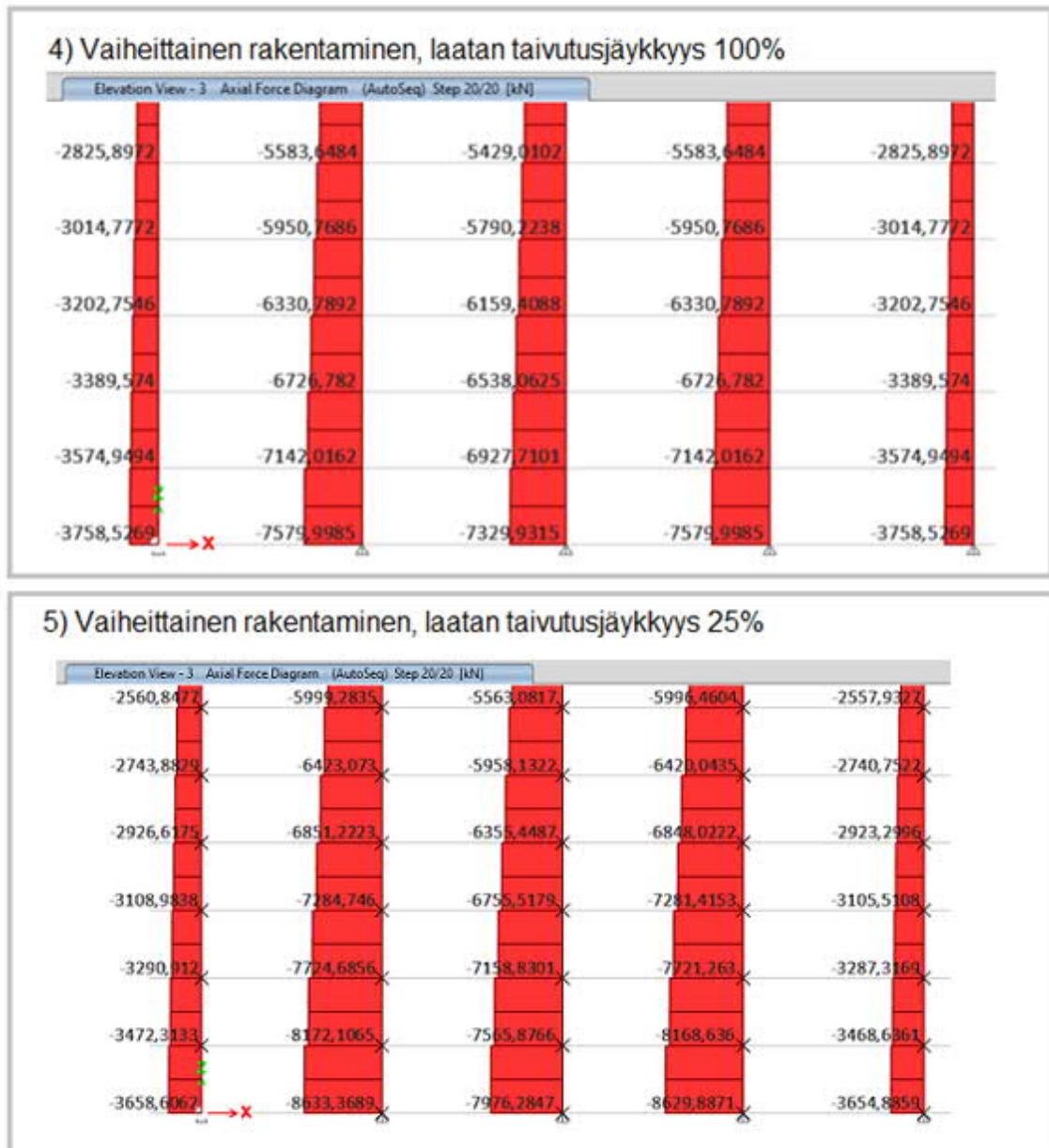
KUVIO 44. Havainnekuva tutkitusta rakenteesta

## 4.2 Pilarikuormien vertailu

Valitussa rakennemallissa on pääosa seiniä, joilla on suuri pinta-ala verrattuna keskellä oleviin pilareihin. Kun rakenteiden aksiaalisessa pystysuunnassa on rakenteilla jäykkyyseroja, rasitukset pyrkivät jakautumaan laattojen taivutusjäykkyyksien ja pystyrakenteiden aksiaalisten jäykkyyksien suhteessa. Tällä laskentamallilla oli tarkoitus löytää eroja pystykuormien suhteen. Pilarien lyhentymää ei tässä tarkasteltu, sillä aiheesta löytyy tutkimuksia, esim. Samuli Heiskanen diplomityö (Heiskanen, 2).



KUVIO 45. Elastisten laskentamallien tulokset



KUVIO 46. Laskentamallien tulokset, kun vaiheittaisen rakentamisen vaikutus on huomioitu

Vaiheittaisen rakentamisen analyysissä tehtiin seuraavia havaintoja:

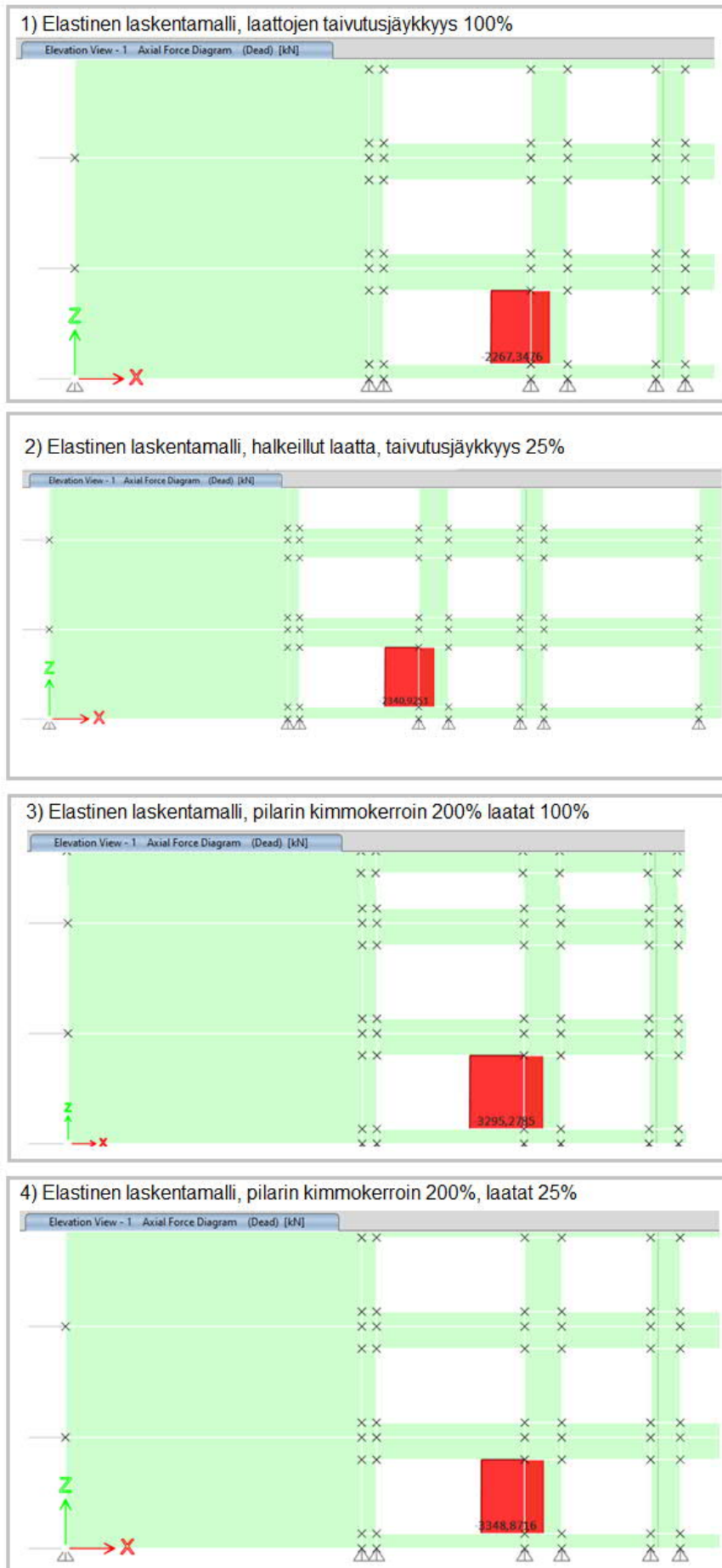
- elastinen jatkuva laskentamalli antaa pienimmän pystyvoiman arvon pilarille
- kimmokertoimella voidaan pelata pilarin normaalivoima käsin laskentaa vastaavaksi
- 20 kerrosta korkealla rakennuksella pelkästään laatan halkeilutilan huomiointi antaa huomattavan paljon paremman tuloksen pilarin normaalivoimasta
- pinta-alamenetelmä ei huomioi laattojen jatkuvuutta

TAULUKKO 8. Pilarin normaalivoimarasitusten vertailu

<b>Pilari</b> ETABS Laskentamallin kuvaus	Normaali- voima Fx (kN)	Eroavaisuus käsin lasketaan	Eroavaisuus laskentamalliin 5
1) Elastinen laskentamalli, laattojen taivutusjäykkyys 100%	6812	-28,0 %	-14,6 %
2) Elastinen laskentamalli, halkeillut laatta, taivutusjäykkyys 25%	7999	-15,5 %	0,3 %
3) Elastinen laskentamalli, pilarin kimmo-kerroin 300% normaalista	8702	18,7 %	9,1 %
4) Vaiheittainen rakentaminen, laatan taivutusjäykkyys 100%	7329	-22,6 %	-8,1 %
5) Vaiheittainen rakentaminen, laatan taivutusjäykkyys 25%	7976	-15,7 %	-
6) Käsin laskenta, pinta-alamenetelmä	9465	-	18,7 %
7) Käsin laskenta, pinta-alamenetelmä laatan jatkuvuus huomioituna	8793	-7,1 %	10,2 %

### 4.3 Seinän aukkopielen rasiusten vertailu

Moduulilinjalte 1 tehtiin laskentamalliin seinille aukkoja. Tarkoitus oli tutkia, miten vaiheittainen rakentaminen vaikuttaa aukkopieleen. Aukon yläpuolella on palkkimainen rakenne, joka taivutusjäykkyyden ansiosta siirtää kuomia aksiaali-jäykkyydeltään suuremmalle seinäkaistalle.



KUVIO 47. Elastisten laskentamallien tulokset aukkopilarin tarkastelussa



KUVIO 48. Vaiheittaisen rakentamisen huomioivien laskentamallien tulokset aukkopilarin tarkastelussa

TAULUKKO 9. Aukkopielen normaalivoimarasitusten vertailu

<b>Seinän aukon pieli</b> ETABS Laskentamallin kuvaus	Normaali- voima Fx (kN)	Eroavaisuus käsin lasketaan	Eroavaisuus laskentamalliin 6
1) Elastinen laskentamalli, laattojen taivutusjäykkyys 100%	2267	-27,5 %	-16,4 %
2) Elastinen laskentamalli, halkeillut laatta, taivutusjäykkyys 25%	2341	-25,1 %	-13,6 %
3) Elastinen laskentamalli, pilarin kimmokerroin 200% laatat 100%	4031	28.9 %	48,7%
4) Elastinen laskentamalli, pilarin kimmokerroin 200%, laatat 25%	3349	7,1 %	23,53 %
5) Vaiheittainen rakentaminen, laatan jäykkyys 100%	2457	-21.4 %	-9,4 %
6) Vaiheittainen rakentaminen, laatan jäykkyys 25% ja pilarin 110 %	2711	-13.3 %	-
7) Käsin laskenta, pinta-alamenetelmä	3127	-	15.34 %

Taulukosta 9 nähdään, että aukkopielen kimmokerrointa kasvattamalla saadaan helposti liian suuria normaalivoimia seinäaukon rakenteelle. Vaiheittaisen rakentamisen laskentamallia 6, jossa laatan jäykkyys on redusoitu ja lisäksi aukkopielen kimmokerrointa on kasvatettu suuremman teräsmäärän vuoksi, voidaan pitää todenmukaisimpana arvona. Siihen verrattuna tavanomainen laskentamalli ilman betonirakenteen halkeilun huomiointia antaa suuruusluokaltaan 16% virheen. Voidaan myös huomata, että halkeilun merkitys tutkitulla rakennemallilla on pieni. Ikkunan pielen raudoitusta suunniteltaessa nähdään, että pinta-alamenetelmällä laskettu normaalivoiman arvo antaa varmalla puolella olevan tuloksen. Pilarin kimmokerroimen suurennuskerroin on arvioitu raudoitussuhteen vaikutuksella pilarin kokoonpuristumaan.

## 5 JATKUVAN SORTUMAN TARKASTELU FEM-LASKENTAMALLILLA

### 5.1 Jatkuva sortuma EN1991 mukaan

Eurokoodi jakaa rakennukset seuraamusluokkiin mahdollisen vaurion vakavuuden mukaan. Seuraamusluokka 1 on kevein, kun taas luokka 3 on vaativin. Monikerrosrakennukset kuuluvat eurokoodin kansallisen liitteen mukaan seuraamusluokkaan CC3. CC3 luokassa on kaksi alaluokkaa. Alempaan luokkaan CC3 a kuuluvat 9-15-kerrosta sisältävät rakennukset. Vaativampaan luokkaan CC3 b sijoittuvat muut kerrosluvultaan yli 8-kerroksiset rakenteet. Kerroksiin luetaan kellarirakenteet mukaan. (SFS-EN 1991 kansallinen liite 2019, 44)

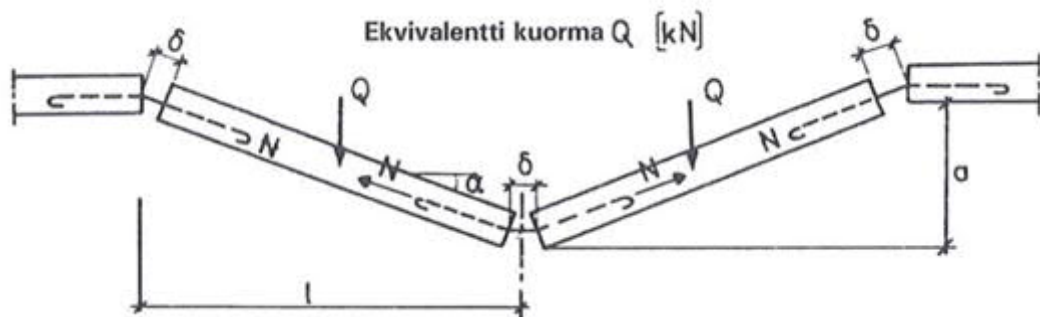
Paikallisen sortuman ajatellaan korkeassa rakennuksessa olevan laajuudeltaan 15 prosenttiyksikköä yhden kerroksen pinta-alasta, mutta enintään sata neliometriä kerrosta kohden. Vaurioitumisen laajuus tulee huomioida kahdessa kerroksessa päällekkäin. (SFS-EN 1991 kansallinen liite 2019, 36)

Seuraamusluokassa 3b tulee kyseeseen vaihtoehtoisten kuormansiirtoreittien huomiointi. Kuormansiirtoreitit mitoitetaan onnettomuustilanteessa vallitseville kuormituksille. Vaihtoehtoisen kuormareitin tilanteessa rakenteesta ajatellaan poistettavan palkki, pilari tai seinälohko. Kun seinä ajatellaan tulevan poistetuksi, määrittää kansallinen liite poistettavan seinän pituudeksi enintään  $2,2 \cdot H$ , joka tyypillisellä kerroskorkeudella tarkoittaa  $2,25 \cdot 3 \text{ m} = 6,75 \text{ m}$  poistettavaa kaistaa. Muun rakenteen on kestettävä poistettavaksi ajatellun rakenteen seuraamukset. (SFS-EN 1991 kansallinen liite 2019, 44)

Laskentamenetelmiä vaihtoehtoisten kuormansiirtoreittien määrittämiseen ovat mm. lineaarinen kimmoteoria, staattinen epälineaarinen menetelmä, pushover-analyysi, epälineaarinen ja lineaarinen dynaaminen laskenta sekä energiatasapainoon pohjautuva laskentatapa (Kyngäs 2019, 37).

## 5.2 Köysiteoria FEM-laskennan avulla

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan jatkuvan sortuman laskentaa hybridiratkaisulla. Laskenta suoritetaan FEM-laskennalla lineaarisella menetelmällä, mutta rakenne mallinneeetaan köysiteorian tavoin jatkuvan sortuman alueella. Köysimallin geometria voidaan valita pystysuuntaisen siirtymän suhteella jänneväliin. Uuden tasapainotilanteen siirtymänä voidaan käyttää suuruusluokkaa  $a=L/5 \dots L/4$ . (Betoninormikortti 23. 9)



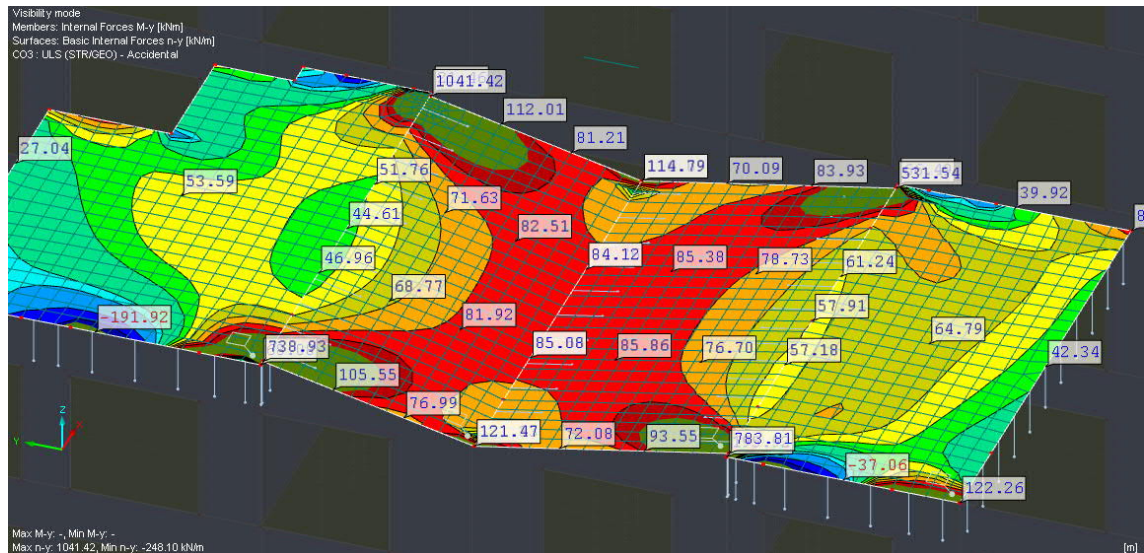
$$N = \frac{Q \cdot l}{2 \cdot a} = \frac{ql^2}{2 \cdot a} = 2 \dots 2,5 \cdot q \cdot l$$

KUVIO 49. Korvaavan rakennesysteemin köysimalli (Betoninormikortti 23. 10, alkuperäinen lähde FIP 1982)

## 5.3 Esimerkki seinälohkon poistamisen vaikutuksista FEM-laskennan avulla

Tarkastellaan esimerkkirakenteen seinälohkon poistoa rakennuksen keskialueella. Köysirakenteen geometrian määrää lyhempi alkuperäisistä jänneväleistä, joten kyseisellä geometrialla siirtymäksi  $a$  valitaan  $3,8 \text{ m} / 4 \dots 5 = \sim 0,8 \text{ m}$ . Kulmamuuutosalueella laatan kiertymä vapautetaan, jolloin liitosalue toimii nivelenä, ja jatkuvan sortuman tilanteessa raudoitukset saadaan toimimaan momentin sijasta normaalivoimaa vastaan.

Köysimallin mukaisella geometrialla FEM-laskennalla saadaan normaalivoiman arvoksi kuvion 50 mukaan 85,9 kN. jolloin rauditusmääräksi saadaan  $A_s = N/f_y = 85 \text{ kN} / 500 \text{ N/mm}^2 = 172 \text{ mm}^2/\text{m}$



KUVIO 50. Normaalivoimakuvaaaja köysiteorian mukaisella FEM-mallilla

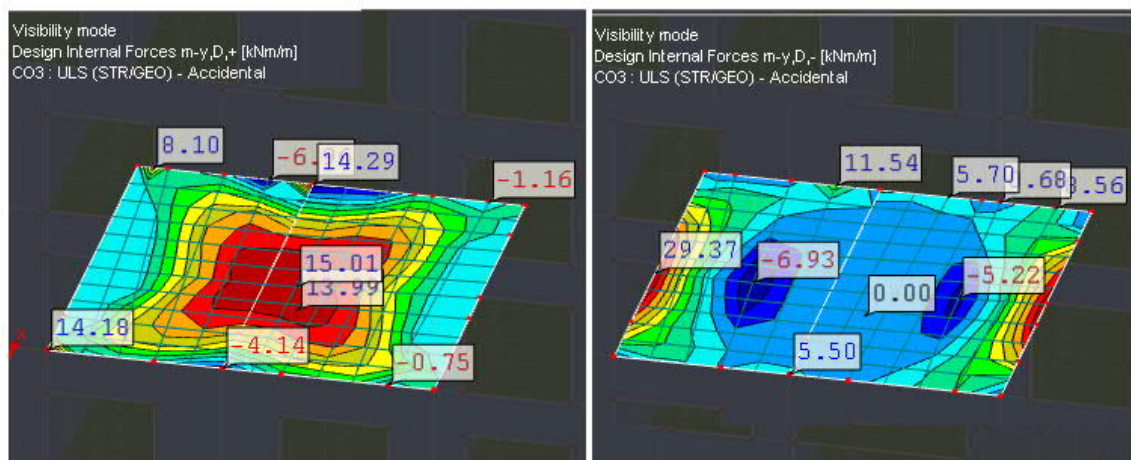
Käsin laskennalla saadaan normaalivoimaksi

$$N = \frac{ql^2}{2 \cdot a} = \frac{(0,3m \cdot 25 \frac{kN}{m^2} + 1,0 \frac{kN}{m^2} + 0,3 \cdot 2,5 \frac{kN}{m^2}) \cdot (3,8m)^2}{2 \cdot 0,8m} = 83,5 \text{ kN}$$

Tällöin tarvittava rauditus  $A_s = N/f_y = 83 \text{ kN} / 500 \text{ N/mm}^2 = 167 \text{ mm}^2/m$

Vertailun vuoksi lasketaan, minkälainen rauditus tarvittaisiin tavanomaisella lineaarisella kimboteorian mukaisella laskentamallilla. Tällöin voimat siirtyvät lelyn taivutusteorian mukaisesti. Tarvittava rauditus momenttirasituksen mukaan on

$$\text{- tuella maksimi } A_s = \frac{M}{Z f_y} = \frac{29\,370\,000 \text{ Nm}}{0,8 \cdot 300 \text{ mm} \cdot 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 245 \text{ mm}^2/m$$



KUVIO 51. Momenttikuvaaajat kimmoteorian mukaisella laskentamallilla

Taulukosta 10 voidaan todeta, että köysiteorian mukaisesti mallinnettu geometria lineaarisella elastisella FEM-laskentamallilla antaa samanlaisia tuloksia käsin laskennan kanssa. Lisäksi havaitaan, että mikäli jatkuvan sortuman tilanteen rakenne lasketaan tavanomaisella tasossa säilyvällä elastisella rakennemallilla, tarvittava rauditusmäärä on huomattavasti suurempi köysiteoriaan verrattuna. Toisaalta esimerkkirakenteessa välipohja on paikallavalettu ja neljältä sivulta tuettu. Voidaan kyseenalaistaa, pystyykö rakennemalliin syntyä köysiteorian mukaista rakennemallia, joka vaatii suuren siirtymän.

TAULUKKO 10. Tarvittavan raudituksen vertailu köysiteorian ja tasossa säilyvän kimmoisen mallin mukaan.

<b>Laskentamallin kuvaus</b>	Tarvittava rauditus mm <sup>2</sup>	Eroavaisuus käsin laskentaan
Käsin laskenta köysiteorian mukaan	167	-
Elastinen FEM-laskentamalli köysiteorian mukaisella geometrialla	172	3,0 %
Elastinen FEM-laskentamalli, tukimomentti	245	46,6 %

## 6 POHDINTA

Monikerrosrakentamisen tietokoneavusteisen analyysin tutkiminen oli mielenkiintoinen ja antoisa tehtävä. Tuhansia elementtejä sisältävän rakenteen analysoiminen käsin laskennalla on aikaa vievää ja kustannustehokkuus verrattuna tietokonelaskentaan on merkittävästi huonompi. Tietokoneella laskettaessa suunnittelijan on syytä tietää laskennan ja elementtimenetelmän perusteet riittävästi hyvin. Tietokonelaskennassa on aina oletuksia ja yksinkertaistuksia, jotka on tiedostettava.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Suomessa rakennesuunnittelutoimistoissa olevia FEM-ohjelmistoja. Pintaraapaisun jälkeen voidaan todeta, että näistä jokainen soveltuvat monikerrosrakenteisen kerrostalon rakennesuunnitteluun. Kaikissa ohjelmistoissa on hyviä ja huonoja puolia toisiinsa verrattuina.

Robot oli allekirjoittaneelle ohjelmistoista alkujaan kaikista tutuin, koska ohjelmaa on tullut työn merkeissä käytettyä ennen opinnäytetyön tekoa. Robotin heikkoudeksi voidaan todeta sen verkotuksen, joka vaikeilla geometrioilla tuottaa ongelmia, jopa vääristää tuloksia. Opinnäytetyön geometria oli suhteellisen helppo, joten ohjelma selvisi kohtuullisen hyvin verkotuksesta.

RFEM-ohjelma oli helppo ja sujuva käyttää. Levyelementtien verkotukset toimivat hyvin, eikä niistä tule laskennassa virheilmoituksia. Toisaalta tämä voi johtua siitä, että rakenteen mallintaminen RFEM:ssä on siinä mielessä tarkkaa, että jos rakennemallissa on virhe, ohjelma ei suostu laskemaan rakennemallia.

ETABS-ohjelmasta ei ollut allekirjoittaneella kokemusta ennen opinnäytetyön tekoa. Alkuun ohjelma tuntui kankealta käyttää. Voisi todeta, että sen toimintaperiaatteet ovat erityyppiset kuin kahdessa muussa ohjelmassa. Kun ohjelmaan pääsi sisään, alkoi sen käyttö tuntua koko ajan paremmalta.

Opinnäytetyössä tutkittiin pilarimaisten rakenteiden rasituksia monikerrosrakentamisessa. Havaittiin, että vaiheittaisen rakentamisen vaikutukset ovat hyvin geometriariippuvaisia. Harvalla pilarijaolla vaiheittaisen rakentamisen vaikutus ei välttämässä ole kovin suuri. Voimat jakautuvat suhteessa rakenteiden jäykkyyksien ja geometrian mukaan. Jännevälien ollessa pitkiä, eivät vaakasuuntaisten rakenteiden jäykkyys riitä siirtämään huomattavaa määrää pystykuormaa viereisille rakenteille. Täten vaiheittaisen rakentamisen vaikutukset ovat sitä suuremmat, mitä lähempänä pystyrakenteet ovat toisiaan. Myös betonirakenteen halkeilutila vaikuttaa voimien uudelleenjakaantumiseen riippuen geometriasta ja rakenteiden aksiaali- ja taivutusjäykkyyksistä.

Työssä tutkittiin myös FEM-laskentamallien ominaisuutta juoksuttaa kuormia eri tavalla pinta-alamenetelmään verrattuna seinärakenteilla. Vaiheittaisen rakentamisen ja halkeilutilan huomiointi vähentää kuormien siirtymistä toisaalle verrattuna elastiseen lineaariseen laskentamalliin. Toisaalta huomattiin, että ulkoseinän aukkopielen tapauksessa merkitys ei aina ole kovin suuri. Tämä johtuu siitä, että seinämäisellä rakenteella voi ikkunan päällä olla korkea palkkikaista, joka pystyy siirtää kuormia tehokkaasti viereisille aksiaalisilta ominaisuuksiltaan jäykemmille pystyrakenteille.

Laskentamallin tallennustilan koko kasvaa korkeassa rakentamisessa helposti suureksi. Kun suureen määrään laskentaelementtejä yhdistää korkean rakentamisen laskennassa vaadittavan epälineaarisen analyysin, mallin laskenta-aika huomattavasti. Pääjäykistysmallia tarkasteltaessa voidaan kerrostasolla vaikuttavia yksityiskohtia karsia. Laskentaohjelmistot tarjoavat ratkaisuksi esim. välipohjien osalta jäykkiä kalvoja (eng. rigid diaphragm). Tällöin jäykkyyismatriisien lukumäärä pienenee huomattavasti, joka nopeuttaa laskenta-aikaa. Jäykkien kalvojen vaikutusta laskenta-aikaan ei tässä työssä tutkittu, mutta sitä ja muita laskentaa nopeuttavia toimenpiteitä olisi ollut mielenkiintoista tutkia tarkemmin.

Opinnäytetyössä perustukset mallinnettiin painumattomina. Perustusten painumien vaikutusta korkeaan rakentamiseen rakenteisiin olisi mielekäs lisätutkiminnan aihe. Laskentamallit mallinnettiin ohjelmien mallinnustyökalujen avulla. Ajankäy-

töllisesti olisi tehokasta, jos geometria tuotaisiin laskentaohjelmaan 3D-referenssin avulla. Jatkotutkimukset toisesta ohjelmasta tuodun geometrian hyödyntämistä olisi paikallaan.

Korkean rakentamisen laskennassa tulee käyttäjän tietää ohjelmiston ominaisuudet. Esim. verkotusten asetukset saattavat vakiona olla sellaiset, etteivät elementit sitoudu viereisiin elementteihin keskialueella. Lisäksi käyttäjällä olisi hyvä olla ohjelmistosta sen verran hyvä tuntuma, ettei energia mene ohjelman käyttöön, vaan ajatus olisi mukana rakenteellisissa asioissa.

Korkean rakentamisen FEM-laskentaohjelmaa tulisi olla helppo käyttää. Suuren laskentamäärän vuoksi ohjelman graafisen käyttöliittymän tulisi toimia sujuvasti. Kun kerroskorkeus menee yli 20 kerroksen, alkaa korkean rakentamisen ilmiöt kuten vaiheittainen rakentaminen ja toistuvien kerrosten muokkaus nousta selvemmin esiin. Tällöin hyvä ohjelmisto nousee oikeuksiinsa. Vertailtavista ohjelmistoista ETABS:n ominaisuudet täyttävät nämä vaatimukset parhaiten.

## LÄHTEET

ACI 318-14. American concrete institute. 2014. Building code requirements for structural concrete.

A23.3-14, Design of concrete structures. CSA GROUP. 2014.

Baked, Pawlikowski, Young. 2009. The Challenges in Designin the Word's tallest Structure: The Burj Dubai Tower.

Bungale S. Taranath. 2010. Reinforced concrete design of tall buildings.

Computers Structures, Inc. Luettu 4.1.2020.  
<https://www.csiamerica.com/contact>

Dlupal Brief History and Facts  
<https://www.dlupal.com/en/company/about-us/history-and-facts> Luettu 4.1.2020.

FEMA 356 / November 2000. Federal emergency management agency. Prestandars and commentary for the seismic rehabilitation of buildings.

Goal of reduced forces calculation, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Luettu 18.12.2019.  
<https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-003921A4-A845-4E06-808F-BC0CFF8A2FDE-htm.html>

Habrah Alaa. 2016. A Correlation between Theoretical and Actual Column Shortening and Lateral Sway in a Vertically Asymmetric High-Rise Concrete Building.

Heiskanen Samuli. 2020. Teräsbetonisten pystyrakenteiden kokoonpuristuminen korkeassa rakennuksessa. Diplomityö, Tampereen yliopisto.

History of Robobat and the BIMware Brand. Luettu 4.1.2020.  
<https://bimware.com/company/history.html>

Kiviluoma Risto. 2007. Rakentajain kalenteri, Suomen korkeimman rakennuksen turvalliset rakenneratkaisut, tuulen vaikutus.

Kortelainen Petri. 2012. Korkeiden rakennusten vaste tuulikuormituksessa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.

Kukkonen Juha. DI. 2020. Rakenteiden mekaniikan sovellukset, luentomoniste YR00DR09 jakso 3.

Kyngäs Janne. 2019. Jatkuvan sortuman analyysimenetelmät. Diplomityö, Oulun yliopisto

Method of reduced forces calculations, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Luettu 18.12.2019.

<https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-3936FDA3-5DFD-4F31-B16A-F0208A451282-htm.html>

Ray W. Clough, Joseph Penzien. 2003. Dynamics of structures.

Reduced Results for Panels, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Luettu 18.12.2019.

<https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-E4FB7DFA-910C-4037-BC76-D37B9BF2E66B-htm.html>

Rigid vs. Semi-rigid diaphragm. Luettu 18.10.2020.

<https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Rigid+vs.+Semi-rigid+diaphragm>

Rombach, G. A. 2011. Finite-element design of concrete structures: practical problems and their solutions.

SFS-EN 1991 kansallinen liite. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

Solarczyk Ambroziak. 2018 Web conference. Simplified method of applying loads to flat slab floor structural model.

Vertical Displacements in Tall Buildings: Watch & Learn, ETABS – 23. Luettu 18.10.2020.

<https://www.csiamerica.com/products/etabs/watch-and-learn>