



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PAIKALLAVALURUNGON RAU- DOITUKSEN LASKEMINEN FEM-DESIGN 14 -OHJELMALLA

TEKIJÄ/T: Janne Vääränen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Janne Vääränen			
Työn nimi Paikallavalurungon laskenta FEM-Design 14 -ohjelmalla			
Päiväys	03.12.2015	Sivumäärä/Liitteet	36/9
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja lehtori, DI Harry Dunkel			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rakennussuunnittelutoimisto Sormunen & Timonen Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyössä oli tavoitteena opetella käyttämään FEM-Design 14 -ohjelmaa ja laskea sillä paikalla valettavan rungon raudoitusta. Tarkoituksena oli myös syventää omaa osaamista rakennesuunnittelijan tehtävissä ja betoni-rakenteiden suunnittelussa. Työ tehtiin yhteistyössä Rakennussuunnittelutoimisto Sormunen & Timonen kanssa.</p> <p>Aluksi perehdyttiin yleisesti paikalla valettavan asuinkerrostalon suunnittelussa huomioon otettaviin asioihin sekä FEM-Design 14 -ohjelman käyttöön. Tämän jälkeen valittiin esimerkikohteeksi Kuopioon rakennettava asuinkerrostalo, jonka arkkitehti- ja rakennekuvien pohjalta luotiin ohjelmalla elementtimenetelmän mukainen FEM-laskentamalli. Laskentamalliin syötettiin rakennukselle tulevat kuormat sekä betonin materiaaliominaisuudet. Lopuksi ohjelmalla laskettiin laatoille ja seinille tulevat raudoitukset, joita vertailtiin käsin laskettuihin tuloksiin.</p> <p>Ohjelmalla saatiin tarkasteltua rakennuksen rungon käyttäytymistä eri kuormitustapauksissa sekä tuotettua hyödyllistä tietoa raudoituskannan avuksi. Insinööryöstä saatiin varsin kattava esitys ohjelman käytöstä, mutta myös lisäopiskeltavaa vielä jäi.</p>			
Avainsanat FEM-Design 14, paikallavalu rakentaminen, betonirakenteet, elementtimenetelmä			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Janne Vääränen			
Title of Thesis Designing In Situ Concrete Frame Reinforcements with FEM-Design 14			
Date	03 December 2015	Pages/Appendices	36/9
Supervisor(s) PhD Arto Puurula, Principal Lecturer, Mr Harry Dunkel, Lecturer			
Client Organisation /Partners Rakennussuunnittelutoimisto Sormunen & Timonen Ltd.			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to learn how to use the FEM-Design 14 program and to calculate an in situ concrete frame by using the program. Another aim was to deepen the author's know-how as a structural engineer and in designing concrete structures. The thesis was made in co-operation with Rakennussuunnittelutoimisto Sormunen & Timonen.</p> <p>First, the general features of planning an in situ concrete apartment building and the use of the FEM-Design 14 program were familiarized with. After this, an example building which was going to be built in Kuopio was selected to be as the finite element method calculation model based on the architectural and structural plans of the building. Loads and concrete properties were included in the model. Finally, the reinforcements were calculated by using the program and compared to the manually calculated results.</p> <p>As a result, the actions of the frame on the building were checked in different load combinations by using the program and useful data was produced to help with reinforcement calculations. This thesis produced quite comprehensive presentation of the program although there is still plenty of studying left.</p>			
<p>Keywords FEM-Design 14, in situ constructions, concrete structures, finite element method</p>			

ALKUSANAT

Haluan kiittää Rakennussuunnittelutoimisto Sormunen & Timonen Oy:tä opinnäytetyön mahdollistamisesta ja asiantuntevista neuvoista. Kiitokset myös mielenkiintoisen aiheen inspiroinnista Savonia-ammattikorkeakoulun rakennetekniikan yliopettajalle TkT Arto Puurulalle. Hänen, sekä lehtori DI Harry Dunkelin arvokkaiden kommenttien avulla työ saatiin toteutettua suunnitellusti.

Eriyisesti kiitän perhettäni ja ystäviäni opintojeni aikaisesta tuesta ja kannustuksesta.

Kuopiossa joulukuussa 2015

Janne Vääränen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
1.1	Taustat ja tavoitteet.....	7
1.2	FEM-Design 14	7
2	RAKENTEIDEN KUORMITUKSET YLEISESTI JA FEM-DESIGNISSA.....	8
2.1	Kuormitukset	8
2.1.1	Pysyvät kuormat	8
2.1.2	Hyötykuormat	8
2.1.3	Lumikuormat	8
2.1.4	Tuulikuormat	9
2.2	Kuormitusyhdistelyt.....	10
2.2.1	Murtorajatila	10
2.2.2	Käyttörajatila	11
2.3	Kuormitukset FEM-Designissa	12
3	YLEISTÄ BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELUSTA.....	18
3.1	Materiaaliominaisuudet.....	18
3.1.1	Kutistuma	18
3.1.2	Viruma	19
3.2	Rakenneseosien suunnittelu.....	20
3.2.1	Seinät.....	20
3.2.2	Laatat.....	21
4	ESIMERKKILASKELMA.....	23
4.1	Rakennus	23
4.2	Kuormitukset	24
4.3	Mallintaminen	25
4.4	Laskenta	27
4.5	Tulosten tarkastelu	34
5	POHDINTA.....	35
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	36
	LIITE 1: VIRUMA	37

LIITE 2: KUTISTUMA	39
LIITE 3: LAATAN RAUDOITUS	41
LIITE 4: SEINÄN PURISTUSKESTÄVYYS.....	45

1 JOHDANTO

1.1 Taustat ja tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua FEM-Design 14 -ohjelman käyttöön ja erityisesti sen hyödyntämiseen betonisen paikallavalurungon laskemisessa. Työ tehdään yhteistyössä Rakennus-suunnittelutoimisto Sormunen & Timonen kanssa, jolla kyseinen ohjelma on päivittäisessä käytössä rakennesuunnittelun apuna. Ohjelman avulla lasketaan Kuopioon rakennettavan asuinkerrostalon kantavien seinien sekä väli- ja yläpohjalaattojen raudoitus. Tarkoituksena on myös syventää osaa-mista rakennesuunnittelijan työssä ja kehittää omaa tietämystä muuttuvien rakennusmääräysten maailmassa.

1.2 FEM-Design 14

FEM-Design 14 -ohjelman kehittäjä on ruotsalainen Strusoft AB. Strusoft on erikoistunut tuottamaan ohjelmia rakennusalan käyttöön jo yli kolmenkymmenen vuoden ajan yhteistyössä erilaisten rakennusalan yritysten kanssa ympäri maailman. Heidän pääohjelmiaan ovat muun muassa FEM-Design, WIN-Statik ja VIP-Energy. Ohjelmat sisältävät esimerkiksi 3D-mallinnusta, rakenteiden ja energiankulutuksen tarkastelua sekä mitoitusta. Strusoftin kehittämiä ohjelmia on käytössä yli kahdessakymmenessä maassa. (strusoft.com.)

FEM-Design 14 on rakennesuunnittelijoiden käyttöön tarkoitettu ohjelma, jonka laskenta perustuu niin sanottuun *finite element methodin* eli elementtimenetelmään. Elementtimenetelmässä rakennetta tarkastellaan jäykkyyssmatriisin avulla, joka koostuu rakenteen eri osien eli elementtien tunnetuista rakenteellisista ominaisuuksista. Jäykkyyssmatriisin avulla saadaan laskettua elementtien välisten liitosten eli solmukohtien kohdistuvat voimat ja muutokset. (Dhatt, Lefrançois7 ja Touzot 2012, 7.)

FEM-Designilla pystytään mitoittamaan niin yksittäisiä rakennusten osia kuin kokonasiakin rakennuksia eurokoodien mukaan. Ohjelma muodostuu kuudesta eri moduulista: *Plate, Wall, Plane Strain, 3D Frame, 3D Structure* ja *PreDesign*. (User Manual 2010, 3.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään *3D Structuren* käyttöön.

2 RAKENTEIDEN KUORMITUKSET YLEISESTI JA FEM-DESIGNISSA

2.1 Kuormitukset

2.1.1 Pysyvät kuormat

Pysyviin kuormiin luokitellaan rakenteiden ja kiinteiden laitteiden oma paino sekä kutistumista ja epätasaisista painumista aiheutuvat välilliset kuormat. Rakenteen oma paino saadaan nimellismittojen ja tilavuuspainojen ominaisarvojen avulla. Nimellismittoina käytetään piirustuksissa annettuja arvoja. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 29, 63.)

2.1.2 Hyötykuormat

Muuttuvia liikkuvia kuormia kutsutaan hyötykuormiksi. Hyötykuormiksi lasketaan muun muassa huonekalut, ihmiset, ajoneuvot ja siirrettävät väliseinät. Hyötykuormat väli- ja yläpohjille on jaettu eri luokkiin rakennuksen tai tilan käyttötarkoituksen mukaan. Hyötykuorma otetaan huomioon sen epäedullisimman vaikutuksen aiheuttavassa paikassa. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 64.) Luokat ja hyötykuormien arvot on taulukoitu Eurokoodi 1 osan 1-1 Suomen kansallisessa liitteessä (SFS-käsikirja 201 2011, 44 - 46).

2.1.3 Lumikuormat

Lumikuorma on lumen painosta aiheutuva muuttuva kiinteä kuorma. Lumikuormaa määritettäessä tulee ottaa huomioon, että lumi voi kinostua eri tavoin katolle. Katon muoto ja sen lämpöominaisuudet tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Myös vallitseva ilmasto tulee ottaa huomioon, koska esimerkiksi tuulisilla alueilla lumi voi kinostua johonkin tiettyyn paikkaan tuulen vaikutuksesta. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 94.)

Lumikuorman kuormituskaavioissa huomioidaan kinostunut ja kinostumaton lumi. Lumikuorma saadaan kaavasta

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (1)$$

missä

μ_i	lumikuorman muotokerroin
s_k	maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [kN/m ²]
C_e	tuulensuojaisuuskerroin (1,0 tai 0,8)
C_t	lämpökerroin, jonka arvo on tavallisesti 1,0

Tavallisesti kaava supistuu muotoon

$$s = \mu_i s_k \quad (2)$$

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 94.)

Lumikuorman ominaisarvot ja kertoimet löytyvät Eurokoodi 1 osan 1-3 Suomen kansallisesta liitteestä (SFS-käsikirja 201 2011, 153 - 154).

2.1.4 Tuulikuormat

Tuulikuorma on tuulen paineesta aiheutuvaa kuormitusta rakenteen ulkopinnalle. Tuulikuorma vaikuttaa ulkopinnan huokoisuuden vuoksi myös välillisesti sisäpintoihin. Pinnan suunnassa tuuli voi aiheuttaa suuriakin kitkakuormia rakenteelle. Tuulikuorman arvona käytetään suurimpia tuulenpuuska vastaavia voimien joukkoja tai paineita. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 123.)

Ympäröivä maasto vaikuttaa tuulen kuormittavuuteen. Vallitsevat olosuhteet on jaettu viiteen eri maastoluokkaan, joiden mukaan tuulen nopeus määritellään. Maastoluokan avulla saadaan puuskanopeuspaineet ja voidaan laskea rakenteen pintoihin vaikuttavat paineet. Ulkopintoihin vaikuttava tuulen paine lasketaan kaavalla (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 125 - 126.)

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} \quad (3)$$

missä

w_e yksittäiseen pintaan korkeudella z_e vaikuttava ulkopuolinen paine

$q_p(z_e)$ puuskanopeuspaine

c_{pe} ulkopuolisen paineen painekerroin

z_e ulkopuolisen paineen nopeuspainekorkeus

Sisäpintoihin vaikuttava tuulenpaine saadaan kaavasta

$$w_i = q_p(z_i) c_{pi} \quad (4)$$

missä

w_i yksittäiseen pintaan korkeudella z_i vaikuttava sisäpuolinen paine

$q_p(z_i)$ puuskanopeuspaine

c_{pi} sisäpuolisen paineen painekerroin

z_i sisäpuolisen paineen nopeuspainekorkeus

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 134-135.)

Tuulikuorman maastoluokat löytyvät Eurokoodi 1 osasta 1-4 (SFS-käsikirja 201 2011, 177).

2.2 Kuormitusyhdistelyt

Rakenteisiin vaikuttavia kuormituksia tarkastellaan rajatilamitoituksella. Yleisimpiä käytettäviä rajatiloja ovat murto- ja käyttörajatila. Rajatilamitoituksessa mikään rajatila ei saa ylittyä, kun kaikissa mitoitustilanteissa käytetään osavarmuuslukumenetelmän mukaisia arvoja kaikille huomioon otettaville kuormitustapauksille. Muuttuvista kuormista tulee selvittää määräävä kuormitustapaus ja sen vaikutus muiden muuttuvien ja pysyvien kuormien kanssa. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 27-28.)

Kuormitusyhdistelyissä käytettävät merkinnät:

K_{FI}	kuormakerroin seuraamusluokan mukaan
$G_{k,j}$	pysyvät kuormat
$Q_{k,1}$	määräävä muuttuva kuorma
$Q_{k,j}$	muut muuttuvat kuormat
ψ	yhdistelykerroin
P	esijännitysvoima
A_d	onnettomuuskuorma

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 37.)

2.2.1 Murtorajatila

Murtorajatila on tila, jossa rakenne menettää tasapainonsa tai vaurioituu. Murtorajatilan avulla pyritään turvaamaan ihmisten turvallisuus ja rakenteiden varmuus. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 27.)

Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät ovat

a) Rakennuksen tai rakenteen (jäykkä kappale) staattinen tasapaino

$$\left. \begin{matrix} 1,1K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5)$$

b) Rakenteen tai rakenneosien kestävyys/geotekninen kantavuus

$$\left. \begin{matrix} 1,15K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6)$$

kuitenkin vähintään

$$\left. \begin{matrix} 1,35K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j}$$

c) Geotekninen kantavuus

$$\left. \begin{matrix} 1,0K_{FI} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,3K_{FI} Q_{k,1} + 1,3K_{FI} \sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (7)$$

d) Onnettomuustilanne

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad \text{Pääasiallinen kuorma (} Q_{k1} \text{)} \quad (8)$$

lumi-, jää- tai tuulikuorma

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{21} Q_{k1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad \text{Pääasiallinen kuorma (} Q_{k1} \text{)} \quad (9)$$

on muu kuin lumi-, jää- tai tuulikuorma

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 38 - 39.)

2.2.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa rakennetta tarkastellaan käyttökelpoisuuden mukaan. Tarkasteltavia tilanteita voivat olla mm. ulkonäköön vaikuttavat siirtymät, värähtelyt, jotka rajoittavat rakenteen käyttötarkoitusta, tai vauriot, jotka vaikuttavat ulkonäköön ja säilyvyyteen. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 28.)

Käyttörajatilassa osoitetaan

$$E_d \leq C_d \quad (10)$$

missä

E_d käyttökelpoisuusksiteereissä määriteltyjen kuormien vaikutusten mitoitusarvo

C_d käyttökelpoisuusksiteerin mukainen rajoittava mitoitusarvo

Käyttökelpoisuusksiteerit ovat hankekohtaisia arvoja, jotka sovitaan tilaajan kanssa. Käyttökelpoisuusksiteerien minimivaatimuksia on esitetty EN1990- ja EN1991-standardeissa. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat:RIL 201-1-2008, 40.)

Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät ovat

a) Ominaisyhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (11)$$

Ominaisyhdistelmää käytetään palautumattomille tiloille. Palautumattomassa tilassa kuormien poistamisen jälkeen kuormista aiheutuvat vaikutukset jäävät näkyviin.

b) Tavallinen yhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (12)$$

Tavallista kuormitusyhdistelmää käytetään palautuville tiloille. Palautuvassa tilassa rakenne palautuu ennalleen kuormien poistamisen jälkeen.

c) Pitkäaikaisyhdistelmä

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (13)$$

Pitkäaikaisyhdistelmä on tarkoitettu vaikutuksille, joiden keston oletetaan olevaan pitkä ja vaikuttavan rakenteen ulkonäköön.

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201-1-2008, 41 - 42.)

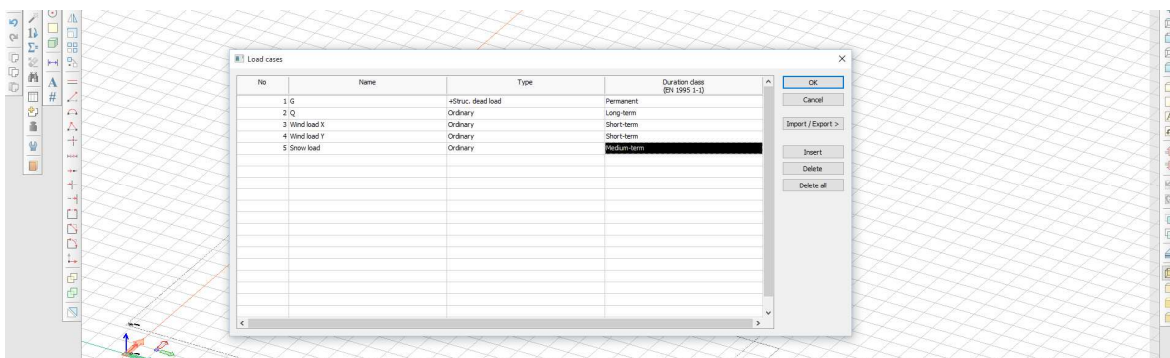
2.3 Kuormitukset FEM-Designissa

FEM-Designissa kuormien syöttäminen aloitetaan määrittelemällä kuormitustapaukset *Load cases* – toiminnon avulla. Toiminnolla kuormat nimetään ja numeroidaan sekä määritellään niiden tyyppi ja kesto (User manual 2010, 185).

Ensimmäiseksi kuormitustapaukseksi määritellään yleensä *+Struc. dead load* eli rakenteiden oma paino. Näin FEM-Design osaa automaattisesti laskea oman painon kaikille kantaville rakenteille mallissa. Oma paino -kuormatyyppi voi sisältää myös myöhemmin malliin manuaalisesti lisättäviä kuormia. (User manual 2010, 185.)

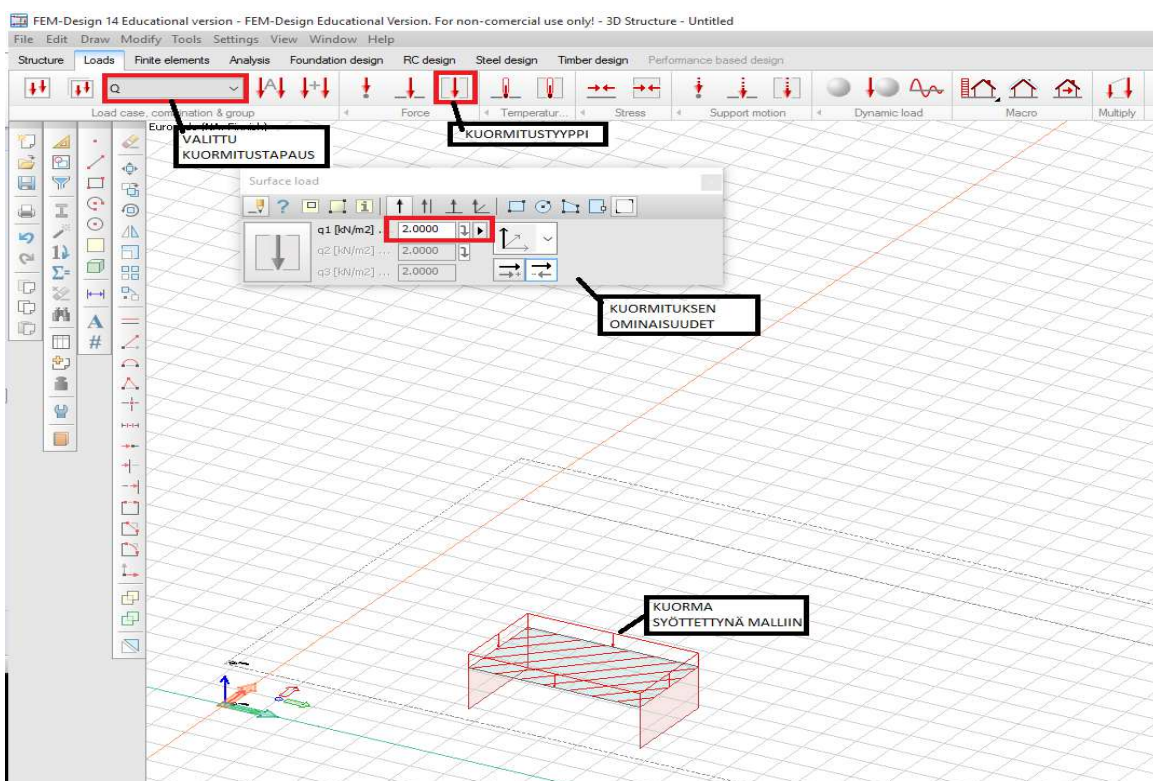
Muita kuormatyyppejä ovat *Ordinary*, *Soil dead load*, *Shrinkage* ja *Seis load*. *Ordinary*-kuormitustyyppiä käytetään, kun kuormalle ei haluta ohjelman toimesta mitään lisäominaisuuksia (User manual 2010, 185). Käytännössä sitä käytetään aina, kun kyseessä ei ole mikään muu neljästä kuormitustyyppistä. *Soil dead load* on maaperän omaa painoa varten, ja FEM-Design laskee sen automaattisesti, mikäli maaperää on ohjelmaan mallinnettu. *Shrinkage* on teräsbetonirakenteiden kutistumaa varten oleva kuormitustyyppi (User manual 2010, 185). *Seis load* on maanjäristyskuormia varten, joita tässä työssä ei käsitellä niiden harvinaisuuden vuoksi.

Kuormitusten ajallinen kesto riippuu kuormitustyyppistä. FEM-Designissa kuormituksen keston voi määritellä pysyväksi, pitkäaikaiseksi, keskipitkäksi, lyhytaikaiseksi tai välittömäksi. FEM-Designin ohjekirjassa on annettu esimerkkejä kestojen aikaväleistä, mutta koska kuormituksen kesto-ominaisuudet vaihtelevat maittain, kannattaa asia tarkistaa aina epäselvissä tilanteissa käytössä olevasta standardista. (User manual 2010, 186.) Kuvassa 2.1 on esimerkki FEM-Designiin luoduista kuormitustapauksista.



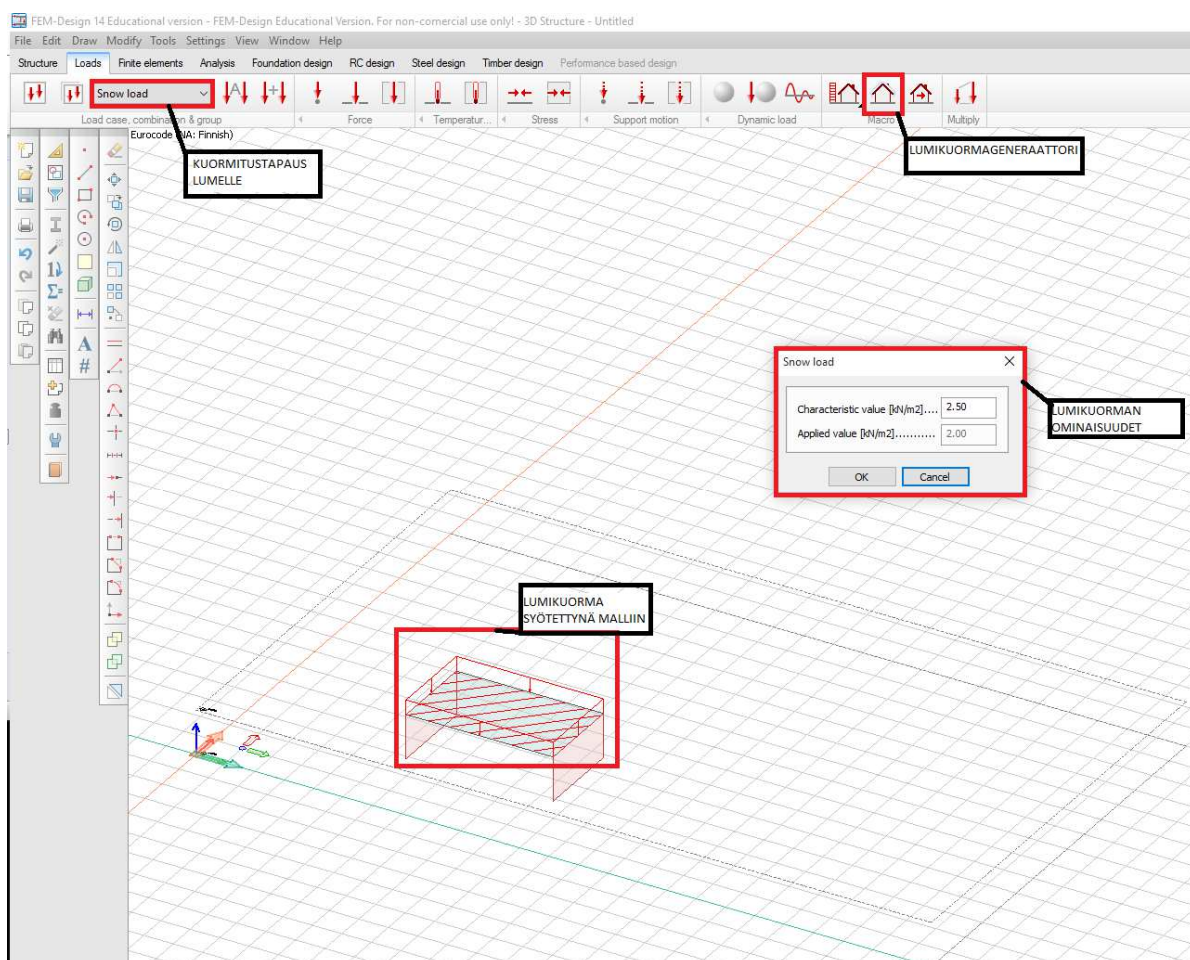
KUVA 2.1 Esimerkki malliin tehdyistä kuormitustapauksista (Vääränen 2015-10-20)

Kuormitustapausten luonnin jälkeen voidaan syöttää kaikki haluttavat kuormat malliin. Kuormien syöttäminen aloitetaan valitsemalla kuormitustapaus, johon mallinnettava kuorma kuuluu. Tämän jälkeen valitaan, onko kuorma piste-, viiva- vai neliökuorma. Esimerkiksi kuvassa 2.2 näkyy malliin syötetty neliökuorma laatalle.



KUVA 2.2 Esimerkki malliin syötetystä kuormasta (Vääränen 2015-10-20)

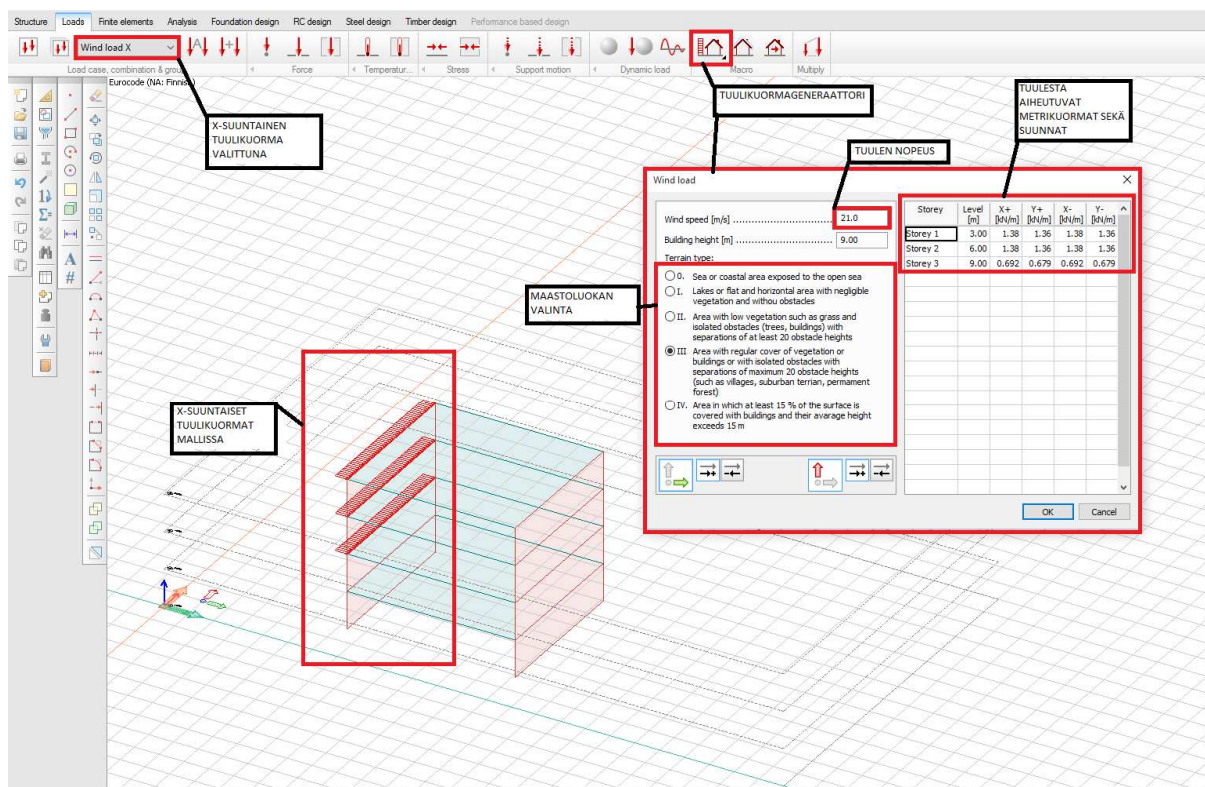
Lumikuorman syöttäminen malliin onnistuu automaattisesti FEM-Designin omalla lumikuorma-generaattorilla (KUVA 2.3). Lumikuormalle annetaan lumen ominaisarvo, ja FEM-Design lisää kuorman automaattisesti malliin. FEM-Design luo myös oman kuormitustapauksen lumikuormalle, ja lisättyä kuormitusta voi halutessaan muokata. Ohjelma laskee lumesta aiheutuvan kuormituksen käytössä olevan Eurokoodin mukaan (User manual 2010, 206).



KUVA 2.3 Lumikuorma syötettynä malliin (Vääränen 2015-10-20)

Kuten lumikuormallekin, myös tuulikuormalle on oma generaattori FEM-Designissa. Tuulikuormia voidaan mallintaa kahdella eri tavalla riippuen rakennuksen muodosta. Tässä työssä keskitytään käyttämään vain *Regular building*-komentoa, koska sillä saadaan määritettyä tuulikuormat riittäväällä tarkkuudella.

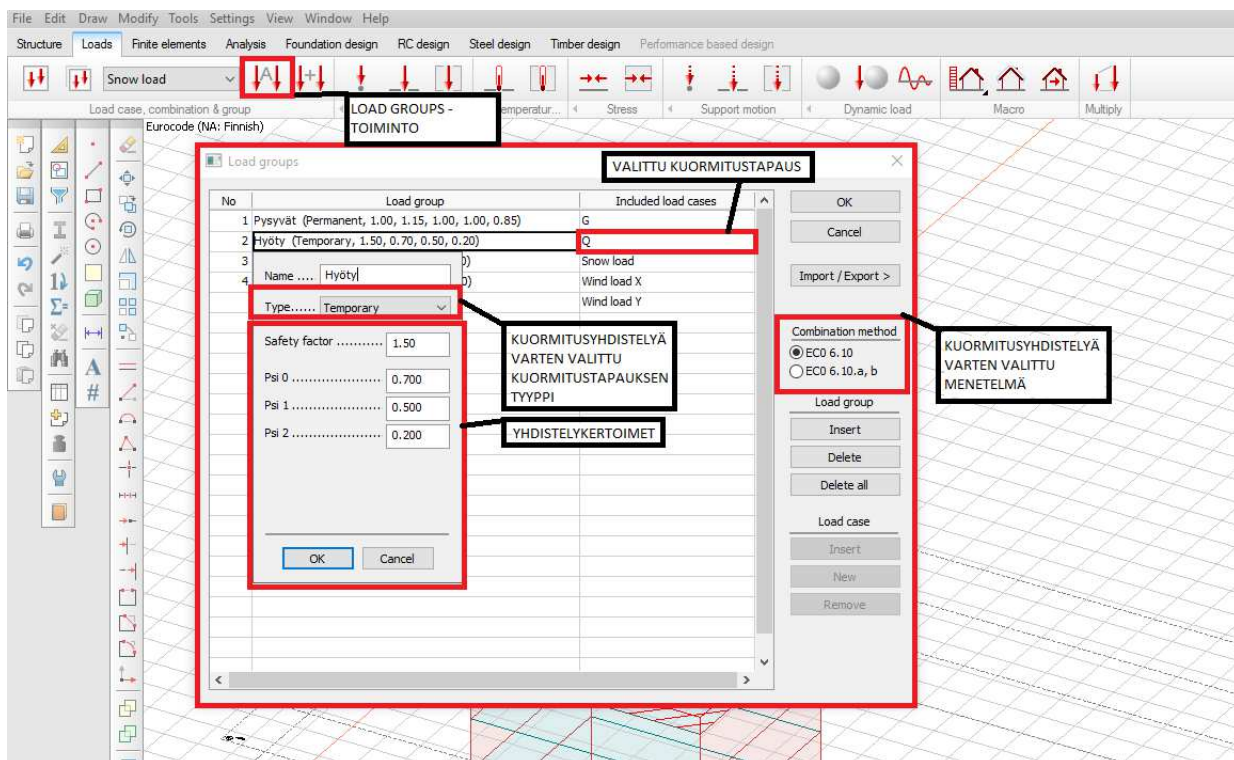
Tavallisille rakennuksille tuulikuormia määritettäessä FEM-Designiin tulee syöttää käytettävä tuulen nopeus ja valita Eurokoodin mukainen maastoluokka (KUVA 2.4). Rakennuksen koon ohjelma osaa määrittää automaattisesti mallista (User manual 2010, 194). Kun arvot on annettu, FEM-Design luo malliin x- ja y-suuntaiset tuulesta aiheutuvat viivakuormat laattojen liitoskohtiin sekä lisää tuulen kuormitustapaukset malliin.



KUVA 2.4 Tuulikuorma syötettynä malliin (Vääränen 2015-10-20)

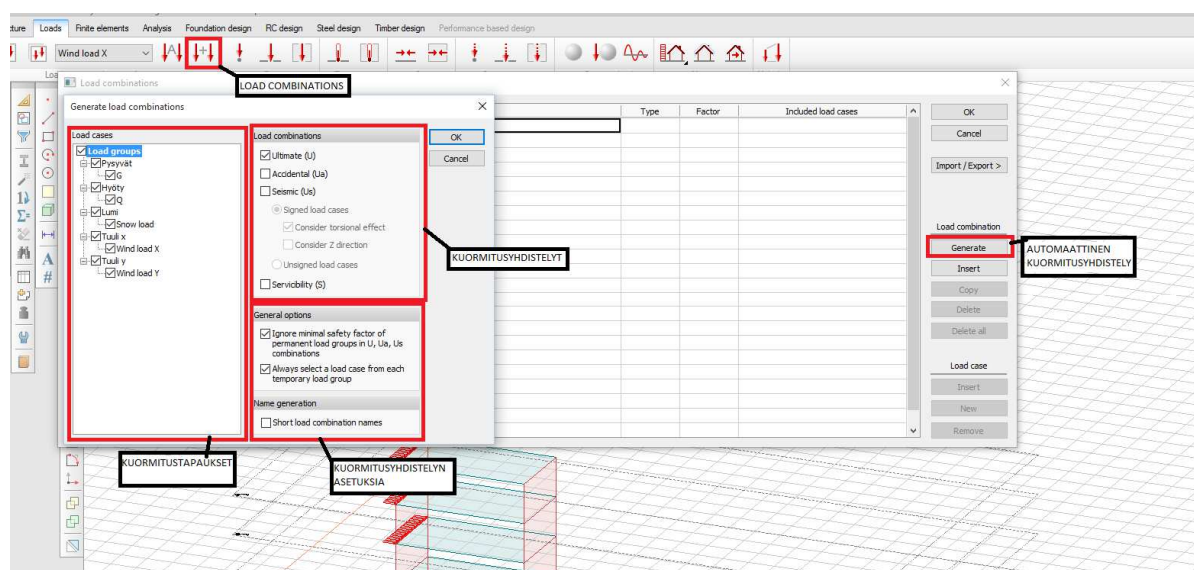
Kun kaikki halutut kuormitustapaukset on luotu ja kuormat on syötetty malliin, voidaan tehdä kuormitusyhdistelyt. FEM-Design tukee neljää eri kuormitusyhdistelmää: murtorajatila (U), onnettomuus (U_a), maanjäristys (U_s) ja käyttörajatila (S) (User manual 2010, 225 - 226). Kuormitusyhdistelyt voi tehdä manuaalisesti haluamallaan tavalla *Load combinations*-komennolla, mutta FEM-Designissa on Eurokoodin mukaisia kuormitusyhdistelyitä varten automaattinen *Load groups*-toiminto.

Load groups-toiminnolla määritetään kullekin kuormitustapaukselle niiden osavarmuuslukumenetelmän mukaiset kertoimet. Aluksi valitaan, kumpaa Eurokoodi 0:n mukaista kuormitusyhdistelyä halutaan käyttää. Tämän jälkeen syötetään halutut kuormitustapaukset. Kuormitustapausta syötettäessä määritellään kuorman tyyppi ja Eurokoodin mukaiset kertoimet. Esimerkiksi kuvassa 2.5 kuormitustapaukseksi on valittu hyötykuorma ja tälle on annettu kuormitusyhdistelyä varten omat kertoimensa. Jotta kaikki kuormitustapaukset otetaan huomioon jokaisessa kuormitusyhdistelmässä, joudutaan kaikille kuormitustapauksille luomaan omat tyyppinsä ja kertoimensa.



KUVA 2.5 Kuormitustapausten määrittelyä Load groups -toiminnolla (Vääränen 2015-10-20)

Load combinations -komennolla saadaan kuormitustapaukset yhdisteltyä ja laskettua niiden vaikutus rakenteelle. Kun halutaan, että FEM-Design luo automaattisesti kaikki tarvittavat kuormitusyhdistelmät, painetaan *Generate*-painiketta. Painikkeen alta avautuu ikkuna, josta löytyvät kaikki kuormitustapaukset sekä niiden yhdistelyyn liittyvät asetukset (KUVA 2.6). Ikkunasta valitaan halutut kuormitustapaukset sekä kuormitusyhdistelyt ja klikataan OK-painiketta. Kuvassa 2.7 näkyy esimerkki, kun *Load groups* -toiminnolla ja automaattisella kuormitusyhdistelyllä on luotu murtorajatilan mukaiset kuormitusyhdistelmät. Kun kuormitusyhdistelyt on luotu oikein, saadaan FEM-Designista vaivattomasti määräävät kuormitustapaukset rakenteiden suunnittelua varten.



KUVA 2.6 Asetusten valitseminen automaattista kuormitusyhdistelyä varten (Vääränen 2015-10-20)

No	Name	Type	Factor	Included load cases
1	$1.15^*G + 1.50^*Q + 1.50^*0.70^*Snow\ load + 1.50^*0.70^*Wind\ load\ X$	U	1.15 G 1.50 Q	1.05 Snow load 1.05 Wind load X
2	$1.15^*G + 1.50^*0.70^*Q + 1.50^*Snow\ load + 1.50^*0.70^*Wind\ load\ X$	U	1.15 G 1.05 Q	1.50 Snow load 1.05 Wind load X
3	$1.15^*G + 1.50^*0.70^*Q + 1.50^*0.70^*Snow\ load + 1.50^*Wind\ load\ X$	U	1.15 G 1.05 Q	1.50 Snow load 1.50 Wind load X
4	$1.15^*G + 1.50^*Q + 1.50^*0.70^*Snow\ load + 1.50^*0.70^*Wind\ load\ Y$	U	1.15 G 1.50 Q	1.05 Snow load 1.05 Wind load Y
5	$1.15^*G + 1.50^*0.70^*Q + 1.50^*Snow\ load + 1.50^*0.70^*Wind\ load\ Y$	U	1.15 G 1.05 Q	1.50 Snow load 1.05 Wind load Y
6	$1.15^*G + 1.50^*0.70^*Q + 1.50^*0.70^*Snow\ load + 1.50^*Wind\ load\ Y$	U	1.15 G 1.05 Q	1.50 Snow load 1.50 Wind load Y

KUVA 2.7 Kuormitusyhdistelyt luotuna automaattisesti murtorajatilamitoitusta varten (Vääränen 2015-10-20)

3 YLEISTÄ BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELUSTA

3.1 Materiaaliominaisuudet

Betonirakenteita suunniteltaessa tulee ottaa huomioon lämpötilasta, vukumisesta ja kutistumisesta johtuvat muodonmuutokset. Lämpötilasta ja kutistumisesta aiheutuvat muutokset voidaan kuitenkin jättää huomioimatta talorakenteissa, mikäli rakenteessa on käytetty liikuntasauvoja. Paikallavalurakenteissa lämmitettyjen rakenneosien pituus on tavallisesti maksimissaan 25 m. (Betonirakenteiden suunnitteluohje: RIL 202-2011/by 61, 18.)

3.1.1 Kutistuma

Kutistuma on ajasta riippuva, mutta jännityksistä riippumaton betonin ominaisuus. Se ei ole tasaista, ja siihen vaikuttavat muun muassa rakenteen koko ja suhteellinen kosteus. Raudoitus estää betonin vapaan kutistumisen ja tuottaa näin betoniin vetojännityksiä. Betoni halkeaa, kun kutistumisesta johtuvat vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden. Halkeilu voidaan estää esimerkiksi liikuntasauvoilla, jolloin vetojännitykset pääsevät purkautumaan saumakohtaan. (Leskelä 2008, 40 - 41, 348.)

Kutistuman kokonaisarvo $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) \quad (14)$$

missä

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \varepsilon_{cd,\infty} \beta_{ds}; \quad \beta_{ds} = \sqrt{\frac{t - t_s}{0,035 h_0^2 + t - t_s}} \quad \text{ja} \quad \varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0}(f_{cm}) \beta_{RH}(RH)$$

$$\varepsilon_{cd,0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{-\alpha_{ds2} f_{cm}/10}] * 10^{-6} \quad \text{ja}$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 * \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right], \text{ kun} \quad RH < \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} * 99\% \quad \text{tai}$$

$$\beta_{RH}(RH) = -0,25, \text{ kun} \quad RH \geq \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} * 99\%$$

ja

$$\varepsilon_{ca}(t) = \varepsilon_{ca0}(f_{cm}) \beta_{as}(t)$$

$$\varepsilon_{ca0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{\frac{f_{cm}}{10}}{6 + \frac{f_{cm}}{10}} \right)^{2,5} * 10^{-6}; \quad \beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}}$$

$\alpha_{as}, \alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$ ovat sementtilajista riippuvia lukuja

RH on ympäristön suhteellinen kosteus, %

t on betonin ikä, vrk

t_s on betonin ikä kuivumisen alkaessa, vrk

$h_0 = 2A_c/u$ on betonin muunnettu paksuus, A_c = poikkileikkausala ja u = kosteutta haihduttavan piirin pituus.

(Leskelä 2008, 41 - 42.)

FEM-Designissa ei ole toimintoa, joka laskee automaattisesti kutistuman, mutta siitä johtuvat jännitykset ohjelma osaa laskea. Betonirakennetta mallinnettaessa ohjelmaan voidaan syöttää kutistuman kokonaisarvo. Tämän jälkeen kutistumalle luodaan kuormitustapaus ja sen tyyppiä valitaan *+Shrinkage*. Näin FEM-Design osaa laskea kutistumasta johtuvat jännitykset ja ottaa ne huomioon raudoitusta suunniteltaessa. (User manual 2010, 189 - 190.)

3.1.2 Viruma

Viruma on betonin koostumuksesta ja ympäristötekijöistä johtuva tapahtuma. Virumista tapahtuu, kun sementtiainekset pääsevät liikkumaan betonin huokosissa veden vaikutuksesta. Viruminen ei varsinaisesti lopu koskaan, mutta vähenee ajan myötä. Tärkeimpiä virumiseen vaikuttavia asioita ovat kapillaarihuokoisuus, vesi/sementtisuhte ja ympäristön suhteellinen kosteus sekä betonin ikä, kun sitä aletaan kuormittaa. (Leskelä 2008, 44 - 45.)

Betonin virumisesta voi olla rakenteelle joko hyötyä tai haittaa. Se voi jakaa jännityksiä tasaisemmin, mutta lisätä myös taipumia. Viruma otetaan suunnittelussa huomioon virumaluvulla, joka on virumasta aiheutuvan muodonmuutoksen suhde jännityksestä aiheutuvaan muutokseen. Virumaluku lasketaan kaavalla

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (15)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (16)$$

missä

φ_0 on virumaluvun perusarvo

β_c on virumaluvun aikafunktio

t_0 on betonin ikä kuormittamisen alkaessa, vrk

ja virumaluvun perusarvossa

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0,1^3 \sqrt{h_0}}, \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (17.1)$$

$$\varphi_{RH} = \alpha_2 \left[1 + \alpha_1 \frac{1-RH/100}{0,1^3 \sqrt{h_0}} \right], \text{ kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (17.2)$$

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}; \quad \alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7}; \quad \alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}; \quad \beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}$$

ja virumankuvun aikafunktiossa

$$\beta_C(t - t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} \quad (18)$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012RH)^{18})h_0 + 250 \leq 1500, \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012RH)^{18})h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3, \text{ kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5}$$

RH on ympäristön suhteellinen kosteus, %

$h_0 = 2A_c/u$ on betonin muunnettu paksuus, A_c = poikkileikkausala ja u = kosteutta haihduttavan piirin pituus.

t on betonin ikä, vrk

Betonin iälle t käytetään niin sanottua lämpötilakorjattua ikää t_T , kun lämpötilan muutos kahdestakymmenestä asteesta on ± 40 astetta.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)}\right)^{-13,65}} \quad (19)$$

missä

$T(\Delta t_i)$ on betonin lämpötila °C aikajaksossa Δt_i

Δt_i on aikajakson i pituus, vrk

(Leskelä 2008, 45 - 47.)

FEM-Designissa virumaluku syötetään kutistuman tavoin betonirakenteen materiaaliominaisuuksiin. Näin ohjelmaa osaa ottaa sen huomioon raudoitusta suunniteltaessa.

3.2 Rakenneosien suunnittelu

3.2.1 Seinät

Seinät ovat yleensä puristettuja levyrakenteita, joiden pituus on neljä kertaa suurempi kuin niiden paksuus. Tätä pienemmät rakenteet luokitellaan pilareiksi. Seinät mitoitetaan pääasiassa betonin kestävyuden mukaan normaalivoimalle ja momentille pilareiden tapaan. (Leskelä 2008, 425, 428.) Mikäli seinään kohdistuu tasoa vasten kohtisuoraa taivutusta, mitoitetaan ne kuten laatat (Betonirakenteiden suunnitteluohje: RIL 202-2011/by 61, 78).

Raudoitettuihin seiniin sijoitetaan aina minimiraudoitus ja pitkissä (3-5 m) seinissä käytetään lisäksi kutistumasta aiheutuvan halkeilun estävää kutistumaraudoitusta. Yli 5 metriä pitkät seinät suunnitellaan aina raudoitettuna. (Leskelä 2008, 427-428.)

Teräsbetoniseiniä minimiraudoitus lasketaan kaavalla

$$A_{s,vmin} = 0,002A_c \quad (20)$$

eli pystyraudoitusta on kaksi promillea betonin poikkileikkauspinta-alasta. Tankojen välinen etäisyys saa olla maksimissaan kolme kertaa seinän paksuus tai 400 mm riippuen siitä, kumpi on pienempi. Vaakaraudoitusta tulee seiniin 25 % pystyraudoituksesta tai $0,001A_c$, riippuen kumpi on suurempi. Tankoväli saa olla maksimissaan 400 mm. (SFS-käsikirja 202 2007, 167.)

Seinä voidaan tehdä raudoittamattomana, mikäli normaalivoimasta aiheutuva epäkeskisyyden ei tuota seinälle merkittävää vetoa ja seinän puristuskestävyys N_{Rd} on riittävä (Leskelä 2008, 426). Raudoittamattoman seinän normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo yksinkertaistetulla menetelmällä saadaan kaavalla:

$$N_{Rd} = \beta * h_w * f_{cd} * \phi \quad (21)$$

jossa

β on tukiehoista riippuva kerroin

h_w on seinän poikkileikkauksen kokonaispaksuus

f_{cd} on $0,8f_{ck}/\gamma_c$

ϕ on epäkeskisyyden huomioon ottava kerroin. Jäykistetyissä rakennosissa

$$\phi = 1,14 * \left(1 - \frac{2e_{tot}}{h_w}\right) - 0,02 * l_0/h_w \leq (1 - 2e_{tot}/h_w) ; \quad (22)$$

$e_{tot}=e_0+e_i$, missä e_0 on perusepäkeskisyyden ja $e_i = l_0/400$, l_0 =seinän tehollinen pituus (SFS-käsikirja 202 2007, 61, 198 - 199.)

3.2.2 Laatat

Laatta voi olla joko yhteen suuntaan tai ristiin kantava. Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa taivutus tapahtuu laatan jänteen suunnassa, kun taas ristiin kantavissa laatoissa taivutusta tapahtuu kahdessa toisiaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. (Leskelä 2008, 389.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään ristiin kantaviin laattoihin.

Ristiin kantavien laattojen raudoituksen voi laskea niin sanotulla myötöviivateorialla. Myötöviivateoriassa ratkaistaan rajakuorman arvo, joka on vähintään laatan mitoituskuorman arvoinen. Laatan tukija kenttämomentit lasketaan kaavalla

$$m_{Ed} = \alpha P_d L_x^2 \quad (23)$$

missä

α on mitoituskuormaa vastaava tuki- tai kenttämomentti, saadaan esim. Rakentajain kalenterin taulukkosarjasta I

P_d on mitoituskuorma

L_x on laatan lyhyempi sivumitta

Minimiraudoitus saadaan laskettua kaavalla

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d \quad (24)$$

missä

ρ_{min} on raudoitussuhde, saadaan esim. RIL202-2011/by 61 taulukosta 9.1S

b_t on vetopuolen keskimääräinen leveys

d on tehollinen korkeus

Kun mitoitusmomentti on tiedossa, voidaan laskea vaadittu raudoitus kaavalla

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} \quad (25)$$

missä

z sisäinen momenttivarsi $z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$, missä $\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu}$; $\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2}$

f_{yd} on teräksen mitoitusmyötölujuus

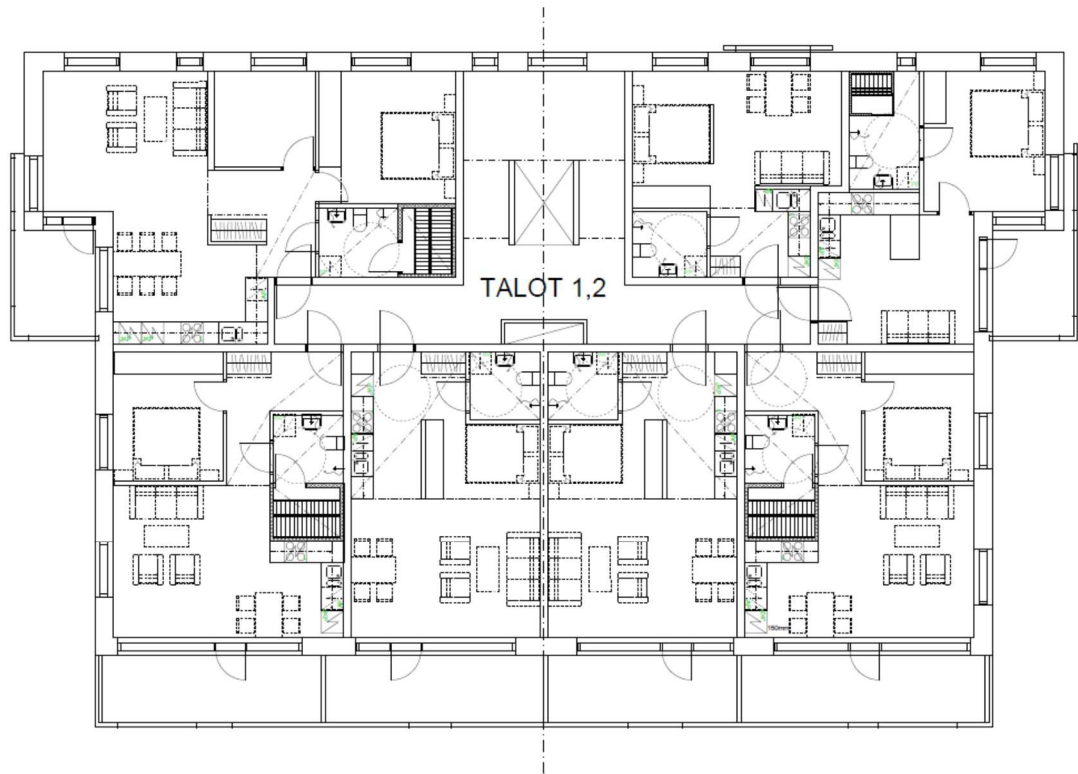
(Leskelä 2008, 203, 381, 398 - 399.)

Mitoituksessa tulee huomioida myös laatan taipuma. Rakenteen toiminnalle ei saa aiheutua taipumista haittaa tai häiritseviä ulkonäkö vaurioita. Pysyvistä kuormista aiheutuvan taipuman rajana voidaan käyttää $L/500$, missä L on rakenteen jännemitta tai ulokkeen pituus. (Leskelä 2008, 327-328.)

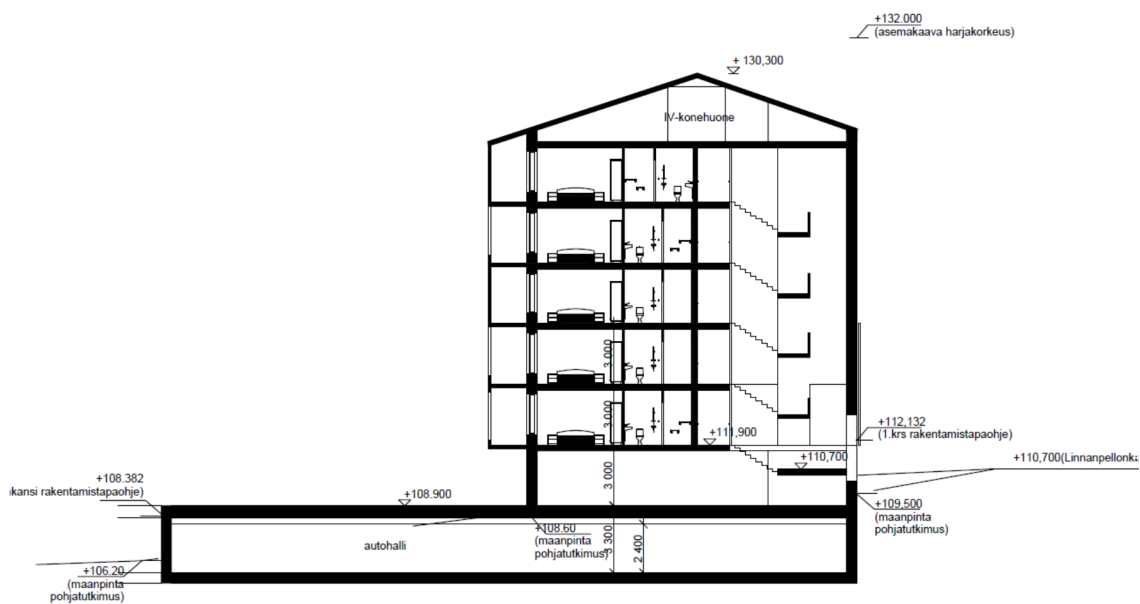
4 ESIMERKKILASKELMA

4.1 Rakennus

Esimerkkilaskelmassa käytettävä kohde sisälsi viisi pohjaratkaisulta identtistä asuinkerrosta (KUVA 4.1) sekä kellarikerroksen. Kellarikerroksen alla sijaitsi elementtirakenteinen autohalli (KUVA 4.2). Autohalli ja kellarikerros jätettiin tässä laskelmassa pois.

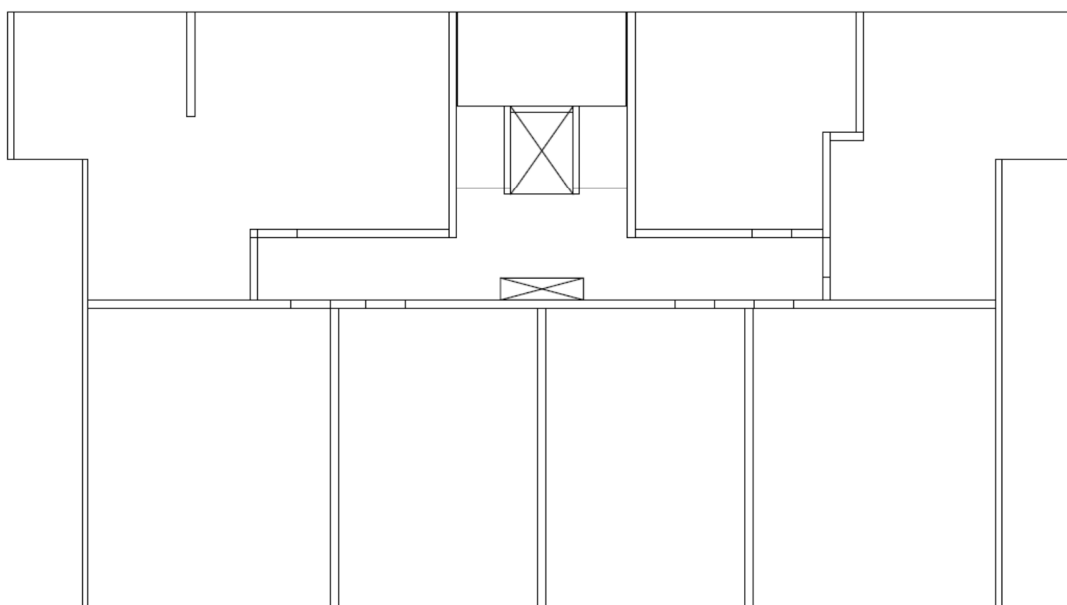


KUVA 4.1 Asuinkerrosten pohjapiirros (Vääränen 2015-10-20)



KUVA 4.2 Rakennuksen leikkaus (Vääränen 2015-10-20)

Asuinkerroksen pohjakuvan perusteella muodostettiin rakenneplaani (KUVA 4.3), jossa näkyvät kantavat seinät ja aukot.



KUVA 4.3 Rakenneplaani (VÄÄRÄNEN 2015-10-20)

4.2 Kuormitukset

Kuormitukseen ei tarvinnut ottaa huomioon rakenteiden omia painoja, koska FEM-Design määrittää ne itse. Näin ollen pysyviin kuormiin arvioitiin vain ei-kantavista kiinteistä rakenteista aiheutuvat kuormat. Yläpohjaan arvioitiin kattorakenteista syntyvät kuormat.

Muuttuviin kuormiin hyötykuormien ominaisarvot saatiin RIL-201-1-2008 Osa 1.1 taulukosta 6.1S. Lumikuorma saatiin FEM-Designin omasta lumikuormalaskurista, johon syötettiin Kuopion seudun lumen ominaisarvoa maassa. Arvo saatiin RIL-201-1-2008 Osa 1.1 kuvasta 4.1 (FI). Tuulikuorma määritettiin myös FEM-Designin omalla laskurilla. Tuulen nopeudeksi syötettiin 21 m/s ja maastoluokaksi valittiin 3.

OMINAISKUORMAT

Pysyvät kuormat

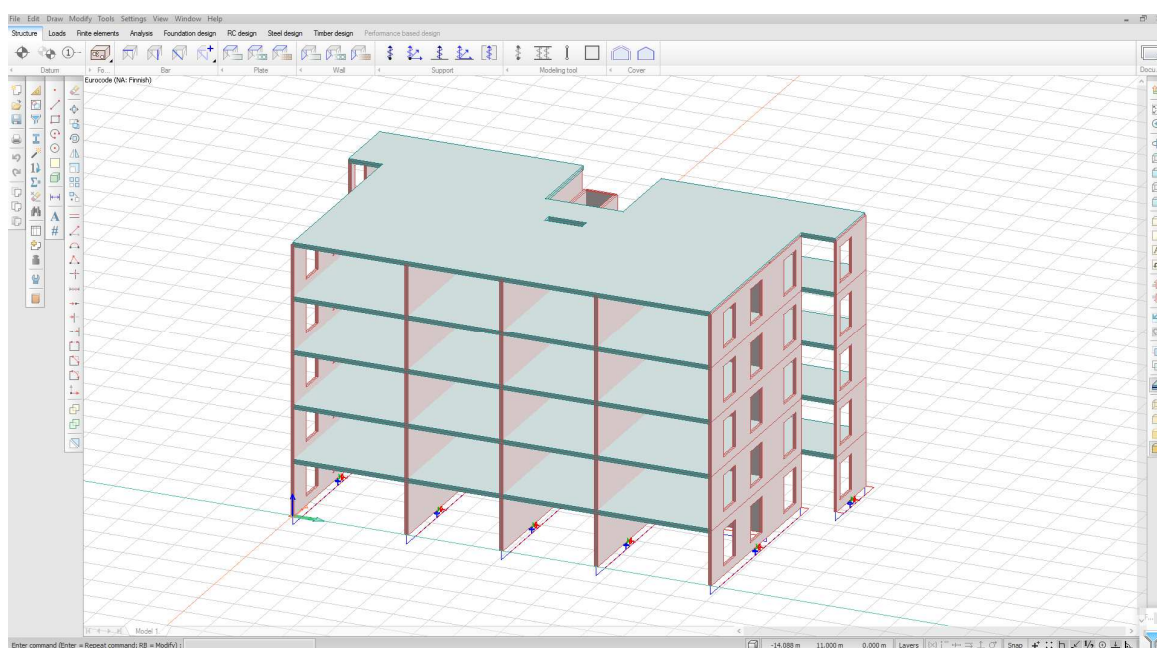
Välipohja	g_k	$1,0 \text{ kN/m}^2$
Yläpohja	g_k	$1,0 \text{ kN/m}^2$

Muuttuvat kuormat

Välipohja	q_k	$2,0 \text{ kN/m}^2$
Yläpohja	q_k	$0,4 \text{ kN/m}^2$

4.3 Mallintaminen

Aluksi luotiin rakennuksen geometria. Kantavat seinät sijoitettiin rakenneplaenin mukaisesti, minkä jälkeen voitiin piirtää laatan ääriiviivat. Tämän jälkeen lisättiin laatan aukot sekä määritettiin tuet. Tuet lisättiin siten, että rakennus määriteltiin jäykästi kiinnittyväksi alapuolisiin rakenteisiin. Toisin sanoen tuet tarvitsi lisätä vain alimman kerroksen seinien alaosiin. Kuvassa 4.4 näkyy mallin geometria luotuna.



KUVA 4.4 Mallin geometria luotuna (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Kun rakennuksen geometria oli valmiina, voitiin määrittellä betonin materiaaliominaisuudet. Betonin lujuudeksi valittiin sekä seinissä että laatoissa C30/37. Laattojen ja 200 mm paksujen seinien virumaksi saatiin 2,21 ja 150 mm paksuille 2,29 (LIITE 1). Kutistumaksi seinille ja laatoille saatiin noin 0,9 promillea (LIITE 2).

Kuormien mallinnus aloitettiin syöttämällä eri kuormitustapaukset ja määrittelemällä niiden tyyppi sekä kesto (KUVA 4.5). Kun kuormitustapaukset oli luotu, ne voitiin syöttää kerroksittain käyttämällä kuormien ominaisarvoja. Tuuli- ja lumikuormia varten käytettiin FEM-Designin omia laskureita (KUVA 4.6).

No	Name	Type	Duration class (EN 1995 1-1)
1	G	+Struc. dead load	Permanent
2	Q	Ordinary	Long-term
3	Kutistuma	+Shrinkage	Permanent
4	Wind load X	Ordinary	Short-term
5	Wind load Y	Ordinary	Short-term
6	Snow load	Ordinary	Medium-term

KUVA 4.5 Kuormitustapaukset syötettyinä FEM-Designiin (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Wind load

Wind speed [m/s] 21.0
 Building height [m] 15.0

Terrain type:

- 0. Sea or coastal area exposed to the open sea
- I. Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles
- II. Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights
- III. Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)
- IV. Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m

Storey	Level [m]	X+ [kN/m]	Y+ [kN/m]	X- [kN/m]	Y- [kN/m]
Foundation	3.00	1.80	1.67	1.80	1.67
Storey 1	6.00	1.80	1.67	1.80	1.67
Storey 2	9.00	1.80	1.67	1.80	1.67
Storey 3	12.0	1.80	1.67	1.80	1.67
Storey 4	15.0	0.901	0.835	0.901	0.835

Snow load

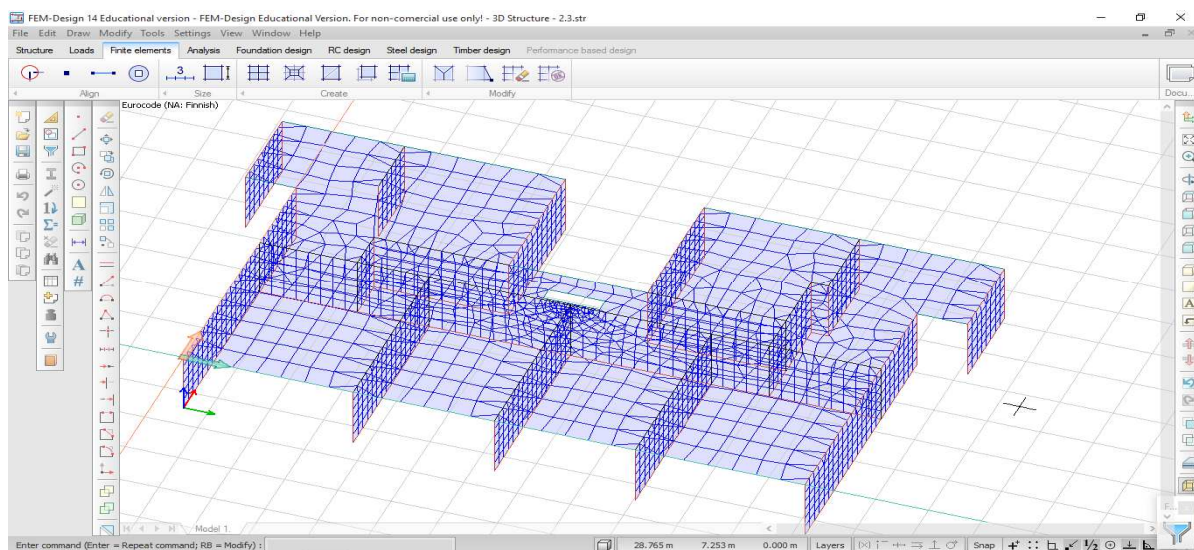
Characteristic value [kN/m²].... 2.50
 Applied value [kN/m²]..... 2.00

KUVA 4.6 FEM-Designin lumi- ja tuulikuormalaskuri (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

FEM-Designin *Load groups* toiminnolla luotiin eri kuormitustapauksille kertoimet kuormitusyhdistelmiä varten. Rakennus määriteltiin kuuluvaksi seuraamusluokkaan CC2, eli kertoimeksi K_{FT} muodostui 1. Yhdistelykertoimet Suomen kansallisen liitteen mukaisesti saatiin RIL-201-1-2008 Osa 1.1 taulukosta A1.1(FI).

Laskentaa varten rakenteille määriteltiin niiden elementtiverkot. Elementtiverkolla tarkoitetaan solmupisteverkkoa, jonka mukaan FEM-Design laskee rakenteelle aiheutuvat rasitukset. FEM-Design luo elementtiverkon automaattisesti laskentaa varten, mikäli sitä ei itse määritä. Ohjelmalla laskettiin tuloksia ensin automaattisella elementtiverkolla ja tämän jälkeen muuttamalla elementtiverkkoa itse, jotta tuloksia voitiin vertailla.

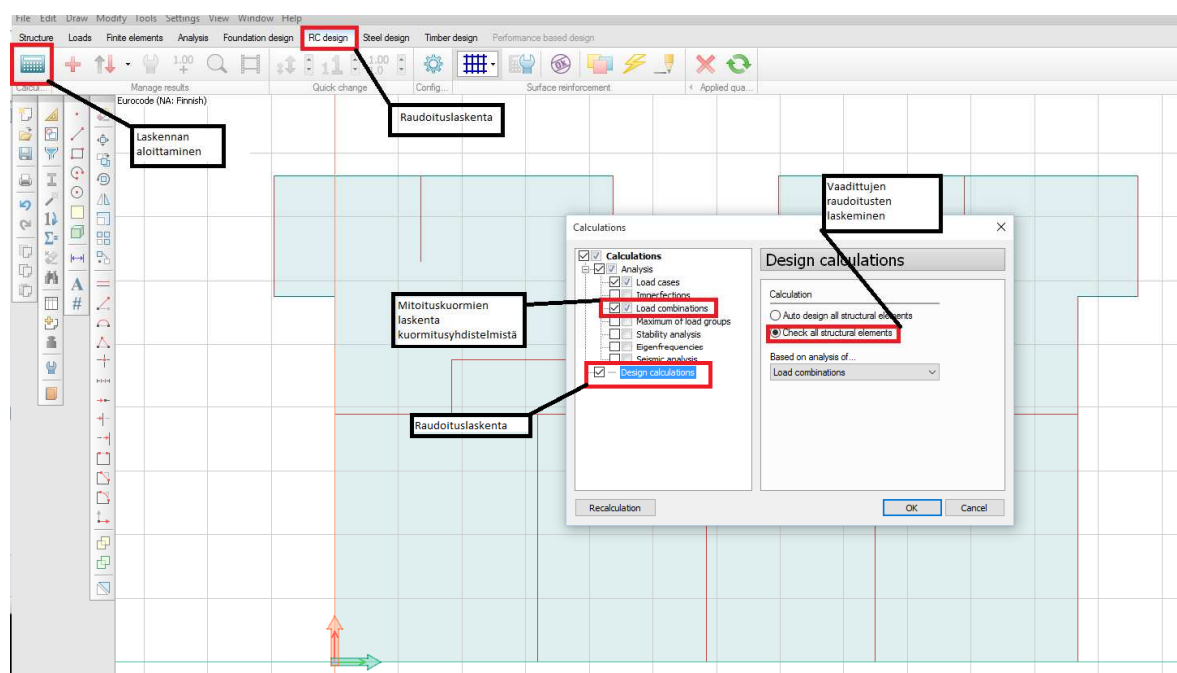
Kuvassa 4.7 näkyy itse valituilla arvoilla tehty elementtiverkko. Laatan elementtiverkon solmupisteiden väliksi valittiin 1 metri ja seinille 0,5 metriä.



KUVA 4.7 Elementtiverkko luotuna ensimmäiseen kerrokseen (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

4.4 Laskenta

Mallin geometrian luonnin ja kuormitusten syöttämisen jälkeen voitiin suorittaa laskenta. Laskenta suoritettiin siten, että FEM-Design laski kuormitusyhdistelmistä mitoituskuormat ja suoritti samalla raudituksen laskentaa varten vaadittujen raudoitusten määrän. Kuvassa 4.8 näkyvät valitut asetukset laskennasta.



KUVA 4.8 FEM-Designin raudituksen laskentavalikko (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

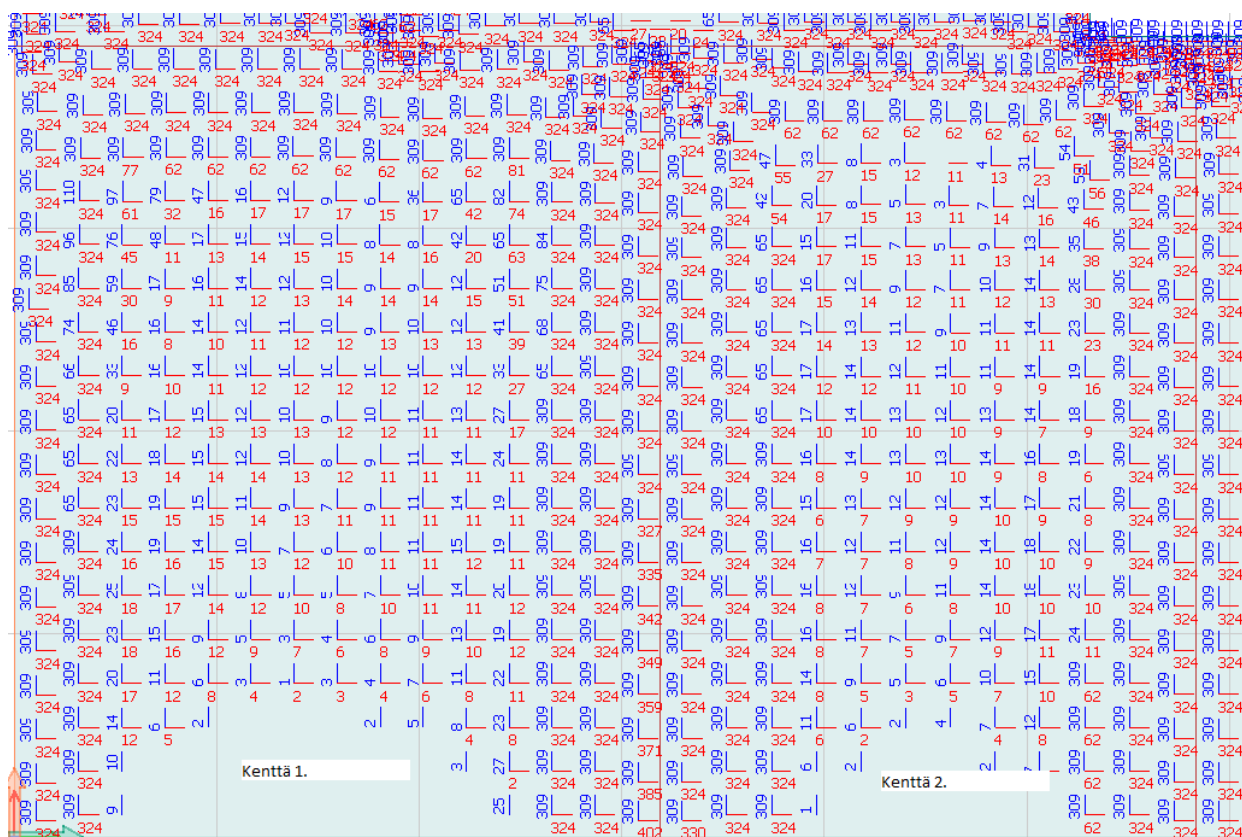
Laskennan jälkeen saadut arvot taulukoitiin tulosten vertailua varten. Taulukossa 1 näkyvät kahden laattakentän käsin lasketut raudoitusalan arvot taulukkomenetelmä A:n mukaan (LIITE 3) sekä manuaalisesti ja automaattisesti luodun elementtiverkon maksimi-arvot.

TAULUKKO 1. Laatan vaaditut raudoitusalat

	Käsin lasketut	FEM-Design (Auto)	FEM-Design (Manual)	
(mm ² /m)				
Alapinta x	311,1	324	324	Kenttä 1
Alapinta y	299	309	309	
Yläpinta x	413,5	402	324	
Yläpinta y	299	309	309	
Alapinta x	311,1	324	324	Kenttä 2
Alapinta y	299	309	309	
Yläpinta x	328,1	324	324	
Yläpinta y	299	309	309	

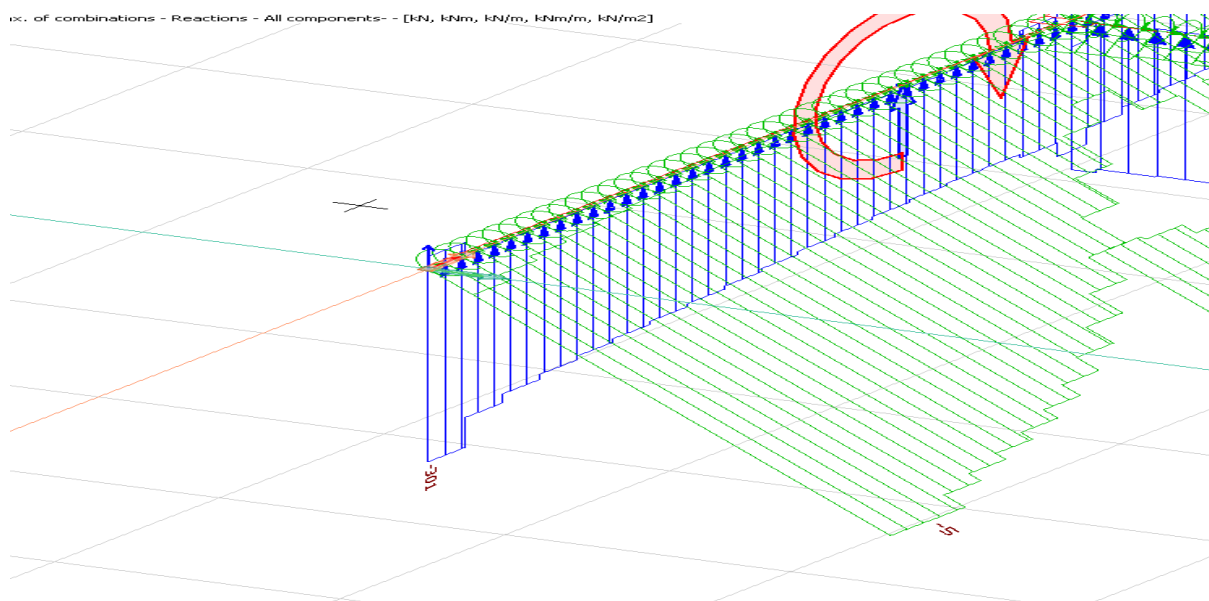
Taulukon arvojen perusteella voitiin päätellä, että manuaalisesti luotu elementtiverkko oli liian epätarkka raudoituksen laskentaa varten vertailtaessa sitä käsin laskettuihin arvoihin. Automaattisesti luotu elementtiverkko katsottiin sen sijaan sopivaksi, koska sen saamat maksimi-arvot vastasivat hyvin käsin laskettuja arvoja. Näin päädyttiin käyttämään automaattista elementtiverkkoa raudoituksen laskentaa varten.

Kuvassa 4.9 näkyvät laattakentät, joihin on laskettu yläpinnan vaadittu raudoitus x- ja y-suunnassa automaattisella elementtiverkolla. Samoista kentistä tehtiin myös käsin laskennat.

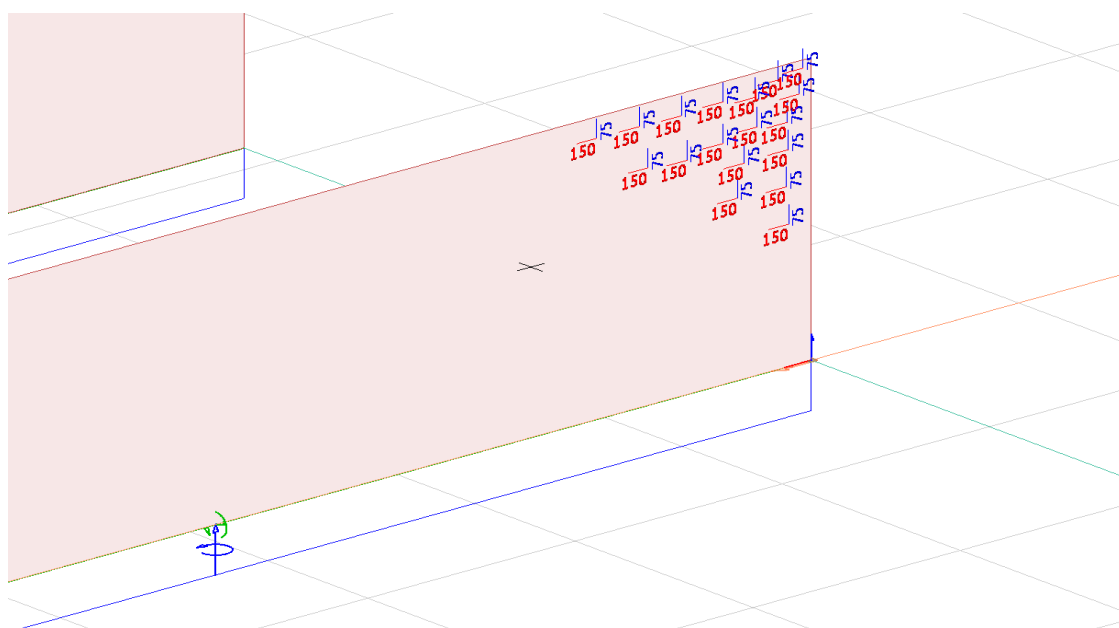


KUVA 4.9 Laatan yläpinnan vaadittu raudoitus automaattisella elementtiverkolla (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Seinien raudoitusta varten laskettiin alimman kerroksen 150 mm paksun ulkoseinän puristuskestävyys (LIITE 4). Tätä arvoa verrattiin FEM-Designista saatuun kyseiselle seinälle tulevaan maksimikuormaan (KUVA 4.10). Kuormaa seinälle tuli 301 kN/m ja seinän puristuskestävyydeksi saatiin 469 kN/m. Tästä sekä seinän vaadituista raudoitusaloista (KUVA 4.11) voitiin päätellä, että seiniin riittää pääasiassa pielterästys ja kutistumaraudoitus.

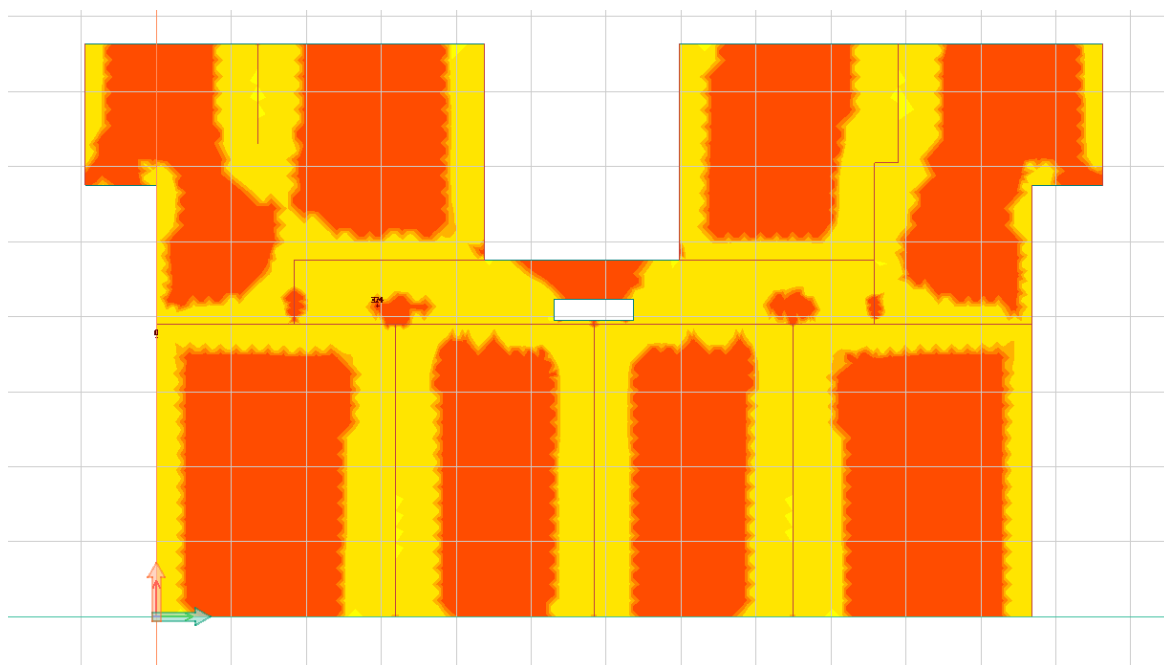


KUVA 4.10 Seinän maksimikuorman arvo (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)



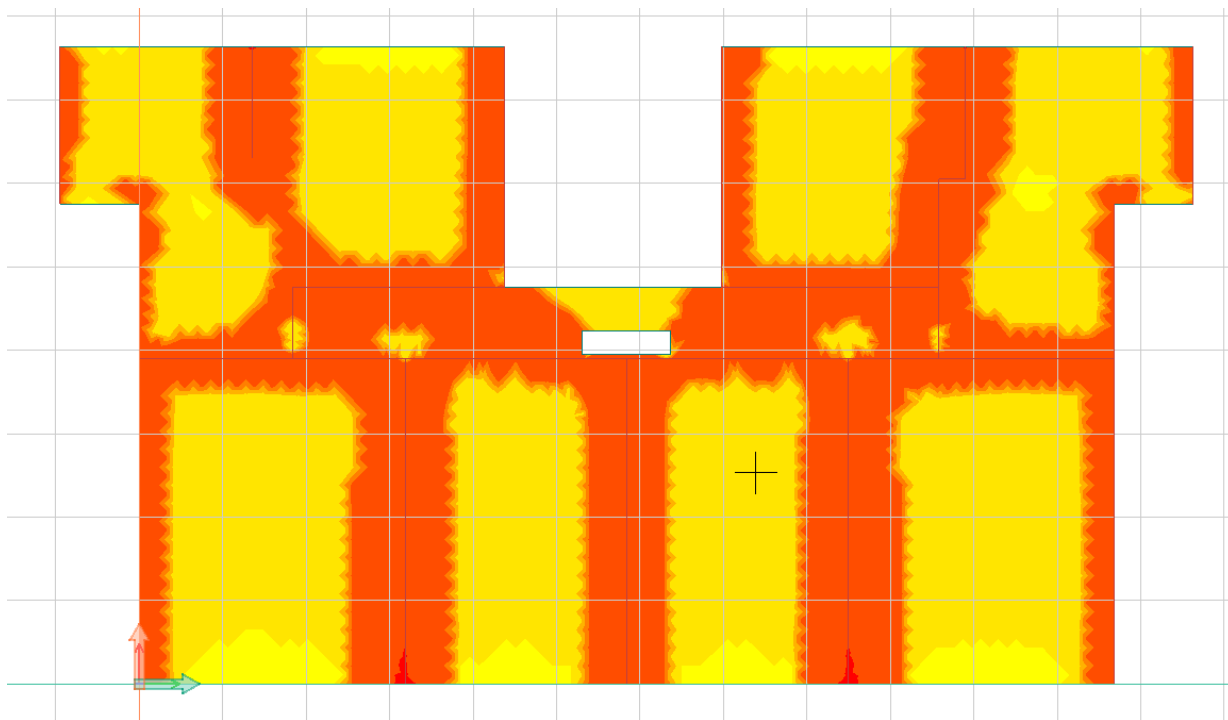
KUVA 4.11 Seinän vaaditut raudoitusalat (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Laattojen raudoitusta alettiin suunnitella siten, että tarkasteltiin sekä ylä- että alapinnan vaadittuja raudoitusaloja niin sanotun värikartan avulla. Kuvassa 4.12 näkyy alapinnan x-suuntainen vaadittu raudoitus. Kuvassa punaisella näkyvät alueet merkkavat sitä aluetta, mihin ohjelma vaatii raudoitusta eniten. Käytännössä siis seinien eli tukien lähistöllä alapinnassa ei raudoitusta vaadittu ja laattakenttien keskiosilla sitä vaadittiin.



KUVA 4.12 Alapinnan x-suuntainen vaadittu raudoitus (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Kuvassa 4.13 vastaavasti havainnollistetaan x-suuntaista yläpinnan raudoitusvaatimusta. Värit ovat käytännössä käänteiset verrattuna alapinnan raudoitukseen, mikä tarkoittaa, että yläpinnassa raudoitusta vaaditaan vain tukien kohdalle.



KUVA 4.13 Yläpinnan x-suuntainen vaadittu raudoitus (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Kuvien 4.12 ja 4.13 avulla voitiin syöttää vaaditut raudoitukset ylä- ja alapintaan. Ohjelmalla testattiin ensin käsin syötettyjä raudoituksia. Alapintaan asetettiin verkko Ø8k150 ja yläpintaan tukien kohdalle kuvan 4.14 mukaisesti Ø10k150 molempiin suuntiin. Ongelmaksi kuitenkin muodostui se, että FEM-Design ei laskenut käsin syötettyjä arvoja yläpinnasta. Kuvassa 4.9 näkyy, kuinka ohjelma vaatii yläpinnassa laatan keskialueille raudoitusta noin 10 mm²/m. Jos tälle alueille ei syötetty raudoitusta, ohjelma laski laatan yläpinnan raudoituksen käyttöasteeksi 1000 % (KUVA 4.14).

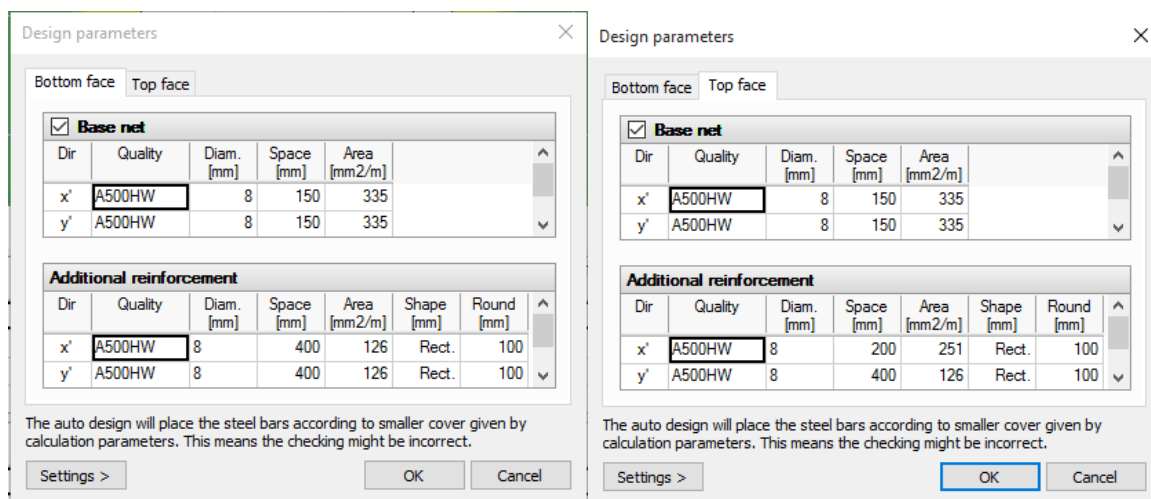
Group		Total weight [t]	Max. [%]	Min. [%]
⊖	P.4.1	-	1000	1000
⊖	P.3.1	-	1000	1000
⊖	P.2.1	-	1000	1000
⊖	P.1.1	3.009	1000	1000

Shell	Max. [%]	RBX [%]	RBX [%]	RTX [%]	RTY [%]	CWB [%]	CWT [%]
⊖ P.1.1	1000	97	93	1000	1000	0	0

KUVA 4.14 Laatan käyttöasteet. RB tarkoittaa alapinnan raudoitusta ja RT yläpinnan. X:t ja Y:t näiden perässä merkkavat raudoituksen suuntaa. (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Seinien kohdalla havaittiin sama ongelma kuin laatoissa. Vaikka ohjelman mukaan raudoitusta ei vaadittu kuin muutamissa kohdissa, ohjelma antoi kaikille seinille käyttöasteeksi 1000 %. Tästä johtuen raudoituskalkulaatiota päätettiin jatkaa FEM-Designin automaattisella raudoituskalkulla.

Automaattista raudoituslaskentaa varten määriteltiin ensin raudoituksen parametrit. Kuvassa 4.15 näkyvät laatan raudoitusta varten valitut parametrit. Alapintaan käytettiin samaa raudoitusta kuin käsin laskennassa, mutta yläpintaan raudoitusta muutettiin. Koska raudoitusta ei laatan keskialueilla vaadittu yläpinnassa paljon, mutta tukien alueella melko reilusti, optimaalisimmaksi raudoitukseksi katsottiin sama verkko kuin alapinnassakin. Verkon lisäksi yläpintaan lisäraudoitukseksi asetettiin x-suunnassa Ø8k200, jota FEM-Design lisäsi automaattisesti vaadittuihin kohtiin. Seinien raudoituksen parametreihin käytettiin oletusasetuksia.



KUVA 4.15 Laatan raudoitusparametrit. (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Kuvassa 4.16 näkyvät saman laatan saadut käyttöasteet kuin kuvassa 4.14. Edellä mainituilla parametreilla laattojen käyttöasteeksi saatiin 93 - 100 %. Laatat saatiin toisin sanoen näillä arvoilla kestämään. Seinien raudoitukseksi ohjelma muodosti x-suunnassa Ø8k150 molempiin pintoihin ja y-suunnassa 10k200 molempiin pintoihin. Tällöin seinien käyttöasteet vaihtelivat välillä 45 - 96 %.

Utilization

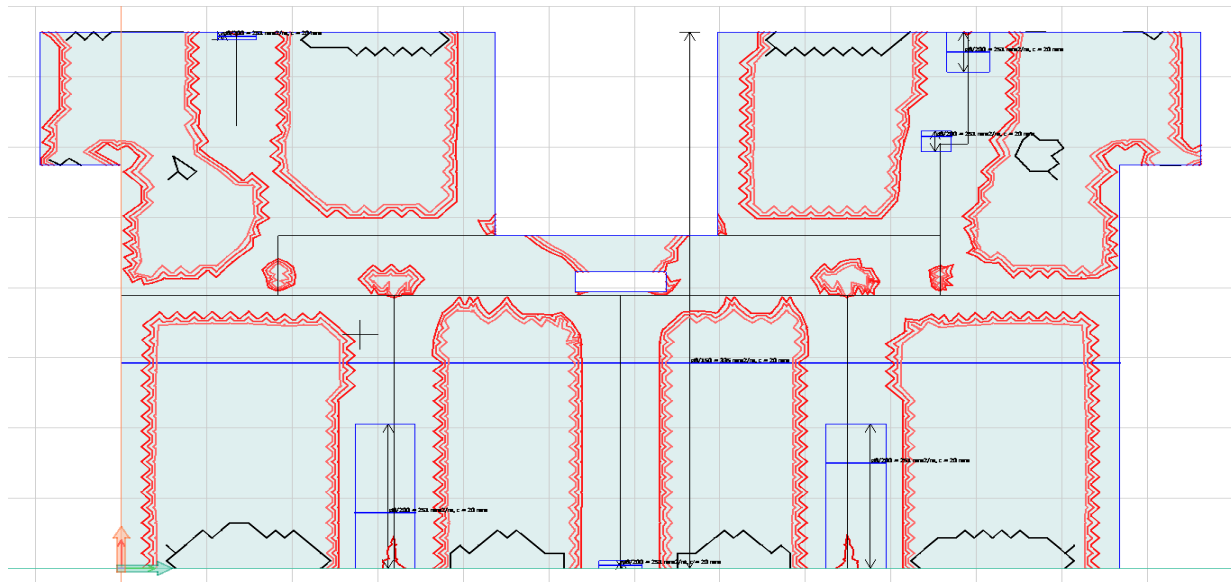
Group	Total weight [t]	Max. [%]	Min. [%]
✓ P.1.1	3.602	100	100
✓ P.3.1	3.593	99	99
✓ P.4.1	3.596	99	99
✓ P.2.1	3.593	99	99
✓ W.69.1	0.394	96	96

Shell	Max. [%]	RBX [%]	RBY [%]	RTX [%]	RTY [%]	CWB [%]	CWT [%]
✓ P.1.1	100	97	93	100	93	0	0

Check Delete < Hide details

KUVA 4.16 Automaattisella raudoituslaskennalla saadut laatan käyttöasteet. (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

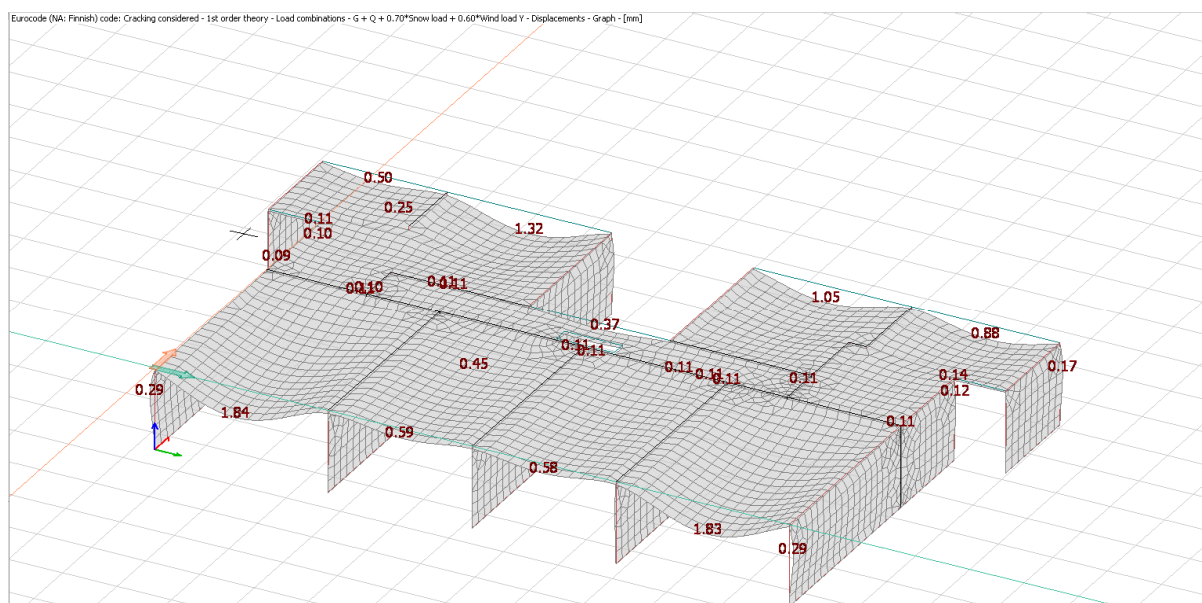
Kuvassa 4.17 on havainnollistettu FEM-Designin yläpinnan x-suuntaista raudoitusta. Sinisillä suorakaiteen muotoisilla alueilla näkyvät saadut lisäraudoitukset. Mustalla viivalla merkattu alue kuvaa osaa, jolla raudoitusta ei vaadittu ollenkaan. Vaaleimman punaisen alueella raudoitusta vaadittiin maksimissaan $97,4 \text{ mm}^2/\text{m}$. Mitä tummemman punaisella alue oli rajattu, sitä enemmän raudoitusta vaadittiin. Kaikista tummimman punaisen alueen sisällä raudoitusta vaadittiin maksimissaan $486,8 \text{ mm}^2/\text{m}$.



KUVA 4.17 Yläpinnan X-suuntainen raudoitus sekä vaaditut raudoitusalueet. (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

Ohjelmalla suoritettiin vielä lopuksi haljenneen tilan tarkastelu. Haljenneen tilan tarkastelussa mallissa ei vaadittujen raudoitusten suhteen tapahtunut merkittäviä muutoksia. Esimerkiksi kuvan 4.17 laatassa $486,8 \text{ mm}^2/\text{m}$ vaadittu maksimi raudoitusmäärä muuttui $507,5 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Laataston taipumat tarkastettiin käyttörajatilan mukaan myös haljenneessa tilassa. Kuvassa 4.18 on esitetty ensimmäisen kerroksen rungon maksimitaipumat eri kohdissa. Laatan maksimitaipumaksi saatiin $1,84 \text{ mm}$, joka jää alle sallitun arvon kyseisessä kohdassa (LIITE 3).



KUVA 4.18 Ensimmäisen kerroksen rakenteiden taipumat. (VÄÄRÄNEN 2015-10-20.)

4.5 Tulosten tarkastelu

Lopullisiksi raudoituksiksi ohjelmalla saatiin seuraavat:

Seinät:	Pystyyn	Ø10k200, molemmissa pinnoissa
	Vaakaan	Ø8k150, molemmissa pinnoissa
Laatat:	Alapintaan	Ø8k150, molempiin suuntiin
	Yläpintaan	Ø8k150, molempiin suuntiin + lisäraudoitus tarvittaessa Ø8k200, x-suunnassa

Seinien osalta tuloksia voidaan pitää merkittävästi ylläraudoitettuna verrattuna FEM-Designin omiin vaadittuihin raudoitusmääriin sekä käsin laskettuun seinän puristuskestävyyden arvoon. Käsin laskut edellyttäisivät tarkempia laskelmia, jotta niitä voitaisiin pitää vertailukelpoisina, mutta FEM-Designin laskelmien perusteella seinät voitaisiin toteuttaa käytännössä raudoittamattomina.

Laatan alapinnan raudoitus vastaa käsin laskettuja, ja se voitaisiin käytännössäkin toteuttaa sellaiseen. Yläpinnassa taas on ylläraudoitusta vertailtaessa käsin laskuihin ja FEM-Designin vaadittuihin raudoitusmääriin. Yläpinnan raudoitus voitaisiin toteuttaa käytännössä soveltaen vaadittujen raudoitusmäärien arvoja ja esimerkiksi kuvan 4.13 värikarttaa suunniteltaessa terästen katkaisupituuksia.

Ohjelmalla saaduista raudoituksista voitiin todeta, että ohjelma vaatii vielä lisäopiskelua niiden osalta. Tuloksista saatiin kuitenkin hyödyllistä tietoa suunnittelua varten. Esimerkiksi ohjelmasta saatavat vaaditut raudoitusalat ja niiden sijainnit todettiin hyödylliseksi raudoitusten suunnittelussa. Myös kuormien saaminen laskentamallista todettiin helpottavan suunnittelua. Pääasiassa ohjelmaa pidettiin käteväenä apuvälineenä betonirakenteiden suunnittelussa.

5 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tutustua ja oppia käyttämään FEM-Design -ohjelmaa rakennesuunnittelun ja tarkemmin betonirakentamisen työkaluna. Ohjelman peruskäyttö osoittautuikin alkukankeuden jälkeen melko helpoksi. Ongelmia aiheutti aluksi mallin geometrian luominen nopeasti ja tehokkaasti, mutta pienen opetteluun jälkeen se sujui jo hyvin.

Laskennallisesti toimivan mallin muodostaminen vaati enemmän aikaa. Käytännössä ongelmaksi muodostui järkevien raudoitustulosten saanti ohjelmasta. Ohjelmalla saatiin automaattisella raudoituslaskennalla toimiva malli aikaiseksi, mutta verrattuna vaadittuihin raudoitusmääriin olivat saadut raudoitustulokset selvästi yliraidoitettuja. Tästä huolimatta ohjelmalla saatuja tuloksia voidaan pitää arvokkaana apuvälineenä raudoitusta suunniteltaessa. Esimerkiksi ohjelmasta saatavia raudoitusvaatimuksia yhdistettynä visuaalisesti hyvin havainnollistaviin kuviin ja kaavioihin on hyvä hyödyntää raudoituksen suunnittelun tukena.

Ohjelmaa voi suositella rakennesuunnittelun avuksi. Sen käyttö kuitenkin edellyttää käyttäjältä aikaisempaa kokemusta rakennesuunnittelusta sekä kriittistä tulosten tarkastelua ja käsin laskennan hallitsemista ohjelman tueksi. Erityisen hyödylliseksi ohjelma todettiin, kun piti laskea rakennukselle tulevat kuormat eri kuormitusyhdistelmistä. Ohjelman raudoituslaskenta vaatii vielä lisäopiskelua ja siihen onkin hyvä panostaa tulevaisuudessa.

Oman osaamisen kehittyminen betonirakenteita suunniteltaessa oli huomattavaa. Perehtyminen betonin materiaaliominaisuuksiin ja raudoitukseen kehittyi, kun ohjelman tuloksia piti tulkita kriittisesti ja tehdä käsin laskentaa sen tueksi. Opinnäytetyötä voidaankin pitää onnistuneena, koska oma tietämys rakennesuunnittelusta kehittyi merkittävästi ja ohjelma voitiin todeta käytännön töissä hyödylliseksi.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELUOHJE: RIL 202-2011/by 61: Eurokoodit EN 1992-1-1 ja EN 1992-1-2. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

DHATT, Gouri, LEFRANÇOIS, Emmanuel ja TOUZOT, Gilbert 2012. Finite Element Method. Lontoo: ISTE Ltd.

LESKELÄ, Matti V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008: by 210. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.

SFS-KÄSIKIRJA 201 2011. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Rakennusteollisuus RT ry. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.

SFS-KÄSIKIRJA 202 2007. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Rakennusteollisuus RT ry. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.

strusoft.com [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-11-23] Saatavissa: <http://www.strusoft.com/>
Polku: Strusoft.com. Strusoft. About.

SUUNNITTELUPERUSTEET JA RAKENTEIDEN KUORMAT: RIL 201-1-2008: Eurokoodit EN 1991-1-2, EN 1991-1-5, EN 1991-1-6, EN 1991-1-7, EN 1991-3 ja EN 1991-4. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

USER MANUAL 2010. FEM-Design User Manual. Strusoft.

LIITE 1: VIRUMA

Betoni C30/37, RH = 70 %, Seinän paksuus = 200 mm ja korkeus = 3000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 30 \text{ MPa} + 8 \text{ MPa} = 38 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 * 3000 \text{ mm} * 200 \text{ mm}}{6400 \text{ mm}} = 187,5 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,7} = \left(\frac{35}{38}\right)^{0,7} = 0,94$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,2} = \left(\frac{35}{38}\right)^{0,2} = 0,98$$

$$\varphi_{RH} = \alpha_2 \left[1 + \alpha_1 \frac{1 - RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \right], \text{ kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = 0,98 \left[1 + 0,94 \frac{1 - \frac{70}{100}}{0,1 \sqrt[3]{187,5}} \right] = 1,46$$

$$t_0 = 14 \text{ vrk}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{38}} = 2,73$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}} = \frac{1}{0,1 + 14^{0,20}} = 0,56$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1,46 * 2,73 * 0,56 = 2,23$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5} = \left(\frac{35}{38}\right)^{0,5} = 0,96$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012RH)^{18})h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3, \text{ kun } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012 * 70)^{18})187,5 + 250 * 0,96 \leq 1500 * 0,96$$

$$\beta_H = 533 < 1440$$

$$\beta_C(t - t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} = \left[\frac{18250 - 14}{533 + 18250 - 14} \right]^{0,3} = 0,99$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_C(t - t_0) = 2,23 * 0,99 = 2,21$$

Betoni C30/37, RH = 70 %, Seinän paksuus = 150 mm ja korkeus = 3000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 * 3000 \text{ mm} * 150 \text{ mm}}{6300 \text{ mm}} = 142,9 \text{ mm}$$

$$\varphi_{RH} = 0,98 \left[1 + 0,94 \frac{1 - \frac{70}{100}}{0,1 \sqrt[3]{142,9}} \right] = 1,51$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1,51 * 2,73 * 0,56 = 2,31$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012 * 70)^{18})142,9 + 250 * 0,96 \leq 1500 * 0,96$$

$$\beta_H = 463 < 1440$$

$$\beta_C(t - t_0) = \left[\frac{18250 - 14}{463 + 18250 - 14} \right]^{0,3} = 0,99$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_C(t - t_0) = 2,31 * 0,99 = 2,29$$

Betoni C30/37, RH = 70 %, Laatan paksuus = 240 mm ja pituus = 1000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 * 1000 \text{ mm} * 240 \text{ mm}}{2480 \text{ mm}} = 193,5 \text{ mm}$$

$$\varphi_{RH} = 0,98 \left[1 + 0,94 \frac{1 - \frac{70}{100}}{0,1 \sqrt[3]{193,5}} \right] = 1,46$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1,46 * 2,73 * 0,56 = 2,23$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012 * 70)^{18})193,5 + 250 * 0,96 \leq 1500 * 0,96$$

$$\beta_H = 543 < 1440$$

$$\beta_C(t - t_0) = \left[\frac{18250 - 14}{543 + 18250 - 14} \right]^{0,3} = 0,99$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_C(t - t_0) = 2,23 * 0,99 = 2,21$$

LIITE 2: KUTISTUMA

Betoni C30/37, RH = 70 %, Seinän paksuus = 200 mm ja korkeus = 3000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk, $\alpha_{ds1} = 4$ ja $\alpha_{ds2} = 0,11$ ja $\alpha_{as} = 700$

$$\varepsilon_{cd,0}(f_{cm}) = [(220 + 110\alpha_{ds1})e^{-\alpha_{ds2}f_{cm}/10}] * 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cd,0}(f_{cm}) = [(220 + 110 * 4)e^{-0,11 * 38/10}] * 10^{-6} = 0,00043$$

$$\left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} * 99\% = \left(\frac{35}{38}\right)^{0,1} * 99\% = 98,2\% > RH$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 * \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right]$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 * \left[1 - \left(\frac{70}{100}\right)^3\right] = -1,02$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0}(f_{cm})\beta_{RH}(RH) = 0,00043 * -1,02 = -0,00044$$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{t - t_s}{0,035h_0^2 + t - t_s}}$$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{18250 - 14}{0,035 * 187,5^2 + 18250 - 14}} = 0,968$$

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \varepsilon_{cd,\infty}\beta_{ds} = -0,00044 * 0,968 = -0,000426$$

$$\varepsilon_{ca0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{\frac{f_{cm}}{10}}{6 + \frac{f_{cm}}{10}}\right)^{2,5} * 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{ca0}(f_{cm}) = -700 \left(\frac{\frac{38}{10}}{6 + \frac{38}{10}}\right)^{2,5} * 10^{-6} = -0,0005$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}} = 1 - e^{-0,2\sqrt{18250}} = 1$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = \varepsilon_{ca0}(f_{cm})\beta_{as}(t) = -0,0005 * 1 = -0,0005$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) = -0,000426 - 0,0005 = 0,926 \text{ promillea}$$

Betoni C30/37, RH = 70 %, Seinän paksuus = 150 mm ja korkeus = 3000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk, $\alpha_{ds1} = 4$ ja $\alpha_{ds2} = 0,11$ ja $\alpha_{as} = 700$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{t - t_s}{0,035h_0^2 + t - t_s}}$$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{18250 - 14}{0,035 * 142,9^2 + 18250 - 14}} = 0,981$$

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \varepsilon_{cd,\infty} \beta_{ds} = -0,00044 * 0,981 = -0,000432$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) = -0,000432 - 0,0005 = 0,932 \text{ promillea}$$

Betoni C30/37, RH = 70 %, Laatan paksuus = 240 mm ja korkeus = 3000 mm, t = 50 vuotta = 18250 vrk, $\alpha_{ds1} = 4$ ja $\alpha_{ds2} = 0,11$ ja $\alpha_{as} = 700$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{t - t_s}{0,035 h_0^2 + t - t_s}}$$

$$\beta_{ds} = \sqrt{\frac{18250 - 14}{0,035 * 193,5^2 + 18250 - 14}} = 0,966$$

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \varepsilon_{cd,\infty} \beta_{ds} = -0,00044 * 0,966 = -0,000425$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) = -0,000425 - 0,0005 = 0,925 \text{ promillea}$$

LIITE 3: LAATAN RAUDOITUS

Taulukkomenetelmä A:n mukaan. Kenttä 1. $L_x = 6,375$ m, $L_y = 7,795$. Kenttä kolmelta sivulta tuettu, tuentatapaus 7 (Rakentajain kalenteri). Sallittu taipuma $L/500 = 7795$ mm/250 = 15,6 mm.

$$g_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{k,laatta} = 25 \text{ kN/m}^2 * 0,24 \text{ m} = 6 \text{ kN/m}^2$$

$$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$P_d = 1,15G + 1,5Q = [1,15*(1,0+6) + 1,5*2] \text{ kN/m}^2 = 11 \text{ kN/m}^2$$

$$P_d L_x^2 = [11 * 6,375] \text{ kNm/m} = 447 \text{ kNm/m}$$

$$L_y / L_x = 1,22$$

$$\alpha_{yf} = 0,01998627$$

$$\alpha_{xf} = 0,03144549$$

$$\alpha_{xs} = 0,04482784$$

$$\alpha_{ys} = 0,03144549$$

$$m_{yf} = \alpha_{yf} * P_d L_x^2 = 8,93480156$$

$$m_{xf} = \alpha_{xf} * P_d L_x^2 = 14,0576081$$

$$m_{xs} = \alpha_{xs} * P_d L_x^2 = 20,0401472$$

$$m_{ys} = \alpha_{ys} * P_d L_x^2 = 14,0576081$$

Tukimomenttien maksimiarvot:

$$\text{Lyhyt sivu} = 1,80 * 20,04 \text{ kNm/m} = 36,1 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Pitkä sivu} = (1,9 - 0,25 * L_y / L_x) * 14,06 \text{ kNm/m} = 22,4 \text{ kNm/m}$$

Raudoitus:

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 240 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 17 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 0,151 \%$$

Yläpinnan x-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 206 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{36100000}{17 * 1000 * 206^2} = 0,05$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,05} = 0,0513$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 206 * \left(1 - \frac{0,0513}{2}\right) = 200,7$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{36100000}{200,7 * 435} = 413,5$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 206 = 311,1$$

Yläpinnan y-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 8 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 198 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{22400000}{17 * 1000 * 198^2} = 0,034$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,034} = 0,0346$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 198 * \left(1 - \frac{0,0346}{2}\right) = 194,6$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{22400000}{194,6 * 435} = 264,6$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 198 = 299,0$$

Alapinnan x-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 206 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{14100000}{17 * 1000 * 206^2} = 0,02$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,02} = 0,0202$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 206 * \left(1 - \frac{0,0202}{2}\right) = 204$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{14100000}{204 * 435} = 158,9$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 206 = 311,1$$

Alapinnan y-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 8 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 198 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{22400000}{17 * 1000 * 198^2} = 0,034$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,034} = 0,0346$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 198 * \left(1 - \frac{0,0346}{2}\right) = 194,6$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{22400000}{194,6 * 435} = 264,6$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 198 = 299,0$$

Kenttä 2. $L_x = 5,3 \text{ m}$, $L_y = 7,795$. Kenttä kolmelta sivulta tuettu, tuentatapaus 7 (Rakentajain kalenteri).

$$L_y / L_x = 1,47$$

$$\alpha_{yf} = 0,01857547$$

$$\alpha_{xf} = 0,03187075$$

$$\alpha_{xs} = 0,05176887$$

$$\alpha_{ys} = 0,03187075$$

$$m_{yf} = 5,739635$$

$$m_{xf} = 9,8477445$$

$$m_{xs} = 15,9960625$$

$$m_{ys} = 9,8477445$$

Tukimomenttien maksimiarvot:

$$\text{Lyhyt sivu} = 1,80 * 16,0 \text{ kNm/m} = 28,8 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Pitkä sivu} = (1,9 - 0,25 * L_y / L_x) * 9,85 \text{ kNm/m} = 15,1 \text{ kNm/m}$$

Yläpinnan x-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 206 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{28800000}{17 * 1000 * 206^2} = 0,0399$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,0399} = 0,0408$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 206 * \left(1 - \frac{0,0408}{2}\right) = 201,8$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{28800000}{20187 * 435} = 328,1$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 206 = 311,1$$

Yläpinnan y-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 8 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 198 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{15100000}{17 * 1000 * 198^2} = 0,0227$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,0227} = 0,0229$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 198 * \left(1 - \frac{0,0229}{2}\right) = 195,7$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{15100000}{195,7 * 435} = 177,3$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 198 = 299,0$$

Alapinnan x-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 206 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{9800000}{17 * 1000 * 206^2} = 0,0136$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,0136} = 0,0137$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 206 * \left(1 - \frac{0,0137}{2}\right) = 204,6$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{9800000}{204,6 * 435} = 110,1$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 206 = 311,1$$

Alapinnan y-suuntainen raudoitus:

$$d = 240 \text{ mm} - 20 \text{ mm} - 8 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 198 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} = \frac{5700000}{17 * 1000 * 198^2} = 0,009$$

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 * 0,009} = 0,009$$

$$z = d * \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 198 * \left(1 - \frac{0,009}{2}\right) = 197,1$$

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z * f_{yd}} = \frac{5700000}{197,1 * 435} = 66,5$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} b_t d = 0,00151 * 1000 * 198 = 299,0$$

LIITE 4: SEINÄN PURISTUSKESTÄVYYS

Seinän paksuus, $h = 150$ mm. Seinän korkeus, $l = 3000$ mm, $f_{cd} = 17$ N/mm²

Kuormat seinälle FEMistä:

$$N_{ed} = 301 \text{ kN/m} = 301 \text{ kN}$$

Viivakuorma tuulesta seinän päähän = 0,9 kN/m

$$M_{ed} = 1,5 * 0,9 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 4,05 \text{ kNm/m} = 4,05 \text{ kNm}$$

$$e_0 = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{4050}{301} = 13,5$$

$$e_i = \frac{l_0}{400} = \frac{3000}{400} = 7,5$$

$$e_{tot} = e_0 + e_i = 21$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{l_w}{3b}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{3000}{3 * 1000}\right)^2} = 0,5$$

$$\phi = 1,14 * \left(1 - \frac{2e_{tot}}{h_w}\right) - 0,02 * l_0/h_w \leq (1 - 2e_{tot}/h_w)$$

$$\phi = 1,14 * \left(1 - \frac{2 * 21}{150}\right) - 0,02 * \frac{3000}{150} \leq \left(1 - 2 * \frac{21}{150}\right) = 0,42 < 0,72$$

Seinän puristuskestävyys

$$N_{Rd} = \beta * h_w * f_{cd} * \phi = 0,5 * 150 * 17 * 0,42 = 536 \text{ kN/m}$$