

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka, Lappeenranta
Rakennustekniikka
Rakennesuunnittelu

Petri Huotari

AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - OHJELMISTON KÄYTTÖÖNOTTO SUUNNITTELU- TOIMISTOSSA

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

Petri Huotari

Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmiston käyttöönotto suunnittelutoimistossa, 44 sivua, 1 liite

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Tekniikka, Rakennustekniikka

Rakennesuunnittelu

Ohjaajat: DI Petri Himmi, Saimaan ammattikorkeakoulu, RI Tero Koikkalainen, Imatran Juva Oy

Lujuuslaskenta kuuluu rakennesuunnittelun perustehtäviin ja sen tavoitteena ratkaista rakenteen siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä annettujen kuormitusten ja tuentatavan perusteella. Lineaarisen lujuusopin tehtävien ratkaisut saadaan lineaarisen kimmoteorian perusyhtälöjärjestelmästä. Mutkikkaammassa tapauksissa joudutaan tyytymään likimääräiseen ratkaisuun, koska ratkaisu tavanomaisten matemaattisten funktioiden avulla on käytännössä mahdotonta. Tämän seurauksena likimääräisten numeeristen ratkaisumenetelmien kehitys on ollut viime aikoina hyvinkin voimakasta. Numeerisiä ratkaisumenetelmiä on kehitetty vuosien varrella monenlaisia ja suosituimmaksi niistä on osoittautunut elementtimenetelmä.

Elementtimenetelmän periaatteena on, että geometrisesti mutkikas kappale voidaan jakaa useisiin äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan yksinkertaisia alkuperäiseen verrattuna. Kaupallisten FEM-ohjelmistojen valikoimissa on paljon elementtityyppejä, jotka perustuvat elementtiä vastaavaan lujuusoppiin. Elementtityyppejä ovat: sauvaelementti, palkkielementti, 2D-solidielementti, laattaelementti, kuorielementti, 3D-solidielementti ja erityiselementti. Elementtityypin käyttö edellyttää lujuusopin teorian tuntemista ja elementtimenetelmän teorian tuntemista.

FEM-analyysi sisältää tulosten tarkastelun ja arvioinnin. FEM-ohjelmiston suuren numeerisen tietomäärän takia, tarvitaan tulosten havainnollistamiseksi myös jälkikäsitteilyohjelma, joka muuttaa tulokset graafiseen asuun. Ohjelmistojen graafiset esitykset ovat vakiintuneita, ja ne esitettävä samat lujuusopillisesti kiinnostavat asiat.

Koska ohjelmistoilla tehdyt rakennemallit ja laskentatulokset ovat aina enemmän tai vähemmän epätarkkoja, esiintyy laskennan tuloksissa usein myös epätarkkuutta, jotka rakennesuunnittelijan tulisi tulosten analysoinnin yhteydessä ottaa huomioon. Erityistä huomiota tulisi kiinnittää erilaisten rasiusten tulkintaan poikkeustapauksissa, mutta ohjelmisto on tässä suhteessa mitoituksen kannalta varmemmalla puolella ja käyttäjän vastuulle siirtyy tulosten mahdollinen pyörittäminen.

Rakennuksen suunnitteluvaihe usein elää voimakkaasti rakennustyyppin- ja kohteen mukaan ja myös rakennuksen elementtityyppeihin voi suunnittelun aikana tulla muutoksia erityisesti rakennesuunnitteluvaiheessa. Usein kuitenkin jo luonnosvaiheessa pyritään saamaan mahdollisimman kokonaisvaltainen käsitys suunniteltavan rakennuksen tyyppielementeistä.

ABSTRACT

Structural analysis is the structural design of the basic tasks and aims to solve the structure of the transitional state of the field, strain field and stress field of the loads and underpinning basis. Linear strength of material solutions to the tasks can be linear elastic system of basic equations. Complicated cases have to be settled for an approximate solution, since the solution of conventional mathematical functions makes it virtually impossible. As a result approximate numerical solution methods for development have been very strong recently. Numerical solution methods have been developed during the years. Finite element method has proven to be the most popular one.

Finite element method is a principle that a geometrically complex object can be divided into several finite elements, which are geometrically simple compared to the original. Commercial FEM software, the portfolio has a lot of element types, which are based on elements in the corresponding strength of the doctrine. Element types include rod element of the bar element, 2D solid element, a plate element, shell element, 3D solid element and the specific element. Element type requires knowledge at a strength of materials theory and understanding of the theory of finite element method.

FEM-analysis includes the results of the review and evaluation. FEM software includes a large amount of numerical data and to illustrate the results the post-processing program is needed to convert the results of a graphic ensemble. Software for graphical presentations is well established, and they produce the same interesting things of the strength of materials.

Since the software-based structural models and calculation results are always more or less inaccurate the designer should take this into consideration. Particular attention should be paid to the burden of different interpretation, in exceptional cases. The software is in this respect on more definitive side in dimensioning and the user moves the responsibility of the possible results of rounding.

Building design stage often changes heavily and also building element types may be subject to change during design, especially the structural design. Often, however, already the draft form seeks the most comprehensive understanding of the elements.

SISÄLTÖ

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO..... | 4 |
| 2 ELEMENTTIMENETELMÄ..... | 5 |
| 2.2 Elementtimenetelmän periaatteet..... | 6 |
| 2.2.1 Elementtiverkko..... | 6 |
| 2.2.2 Solmusuureet..... | 7 |
| 2.2.3 Ekvivalentit solmukuormitukset..... | 8 |
| 2.2.4 Solmusuureiden ratkaisu..... | 8 |
| 2.2.5 Ratkaisu elementin alueella..... | 10 |
| 2.3 Laskentamallit..... | 10 |
| 2.3.1 Elementtityypit..... | 10 |
| 2.3.2 Käytettävän mallin valinta..... | 12 |
| 2.3.3 FEM-laskennan tulokset..... | 14 |
| 3 RAKENTEEN MITOITUKSEN TEORIAA..... | 16 |
| 4 AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS..... | 18 |
| 4.1 Mallinnuksen teoriaa RSA:ssa..... | 18 |
| 4.1.1 Mallinnuksen aloitus..... | 18 |
| 4.1.2 Laskennan perusrutiinit..... | 19 |
| 4.1.3 Asetuksien määrittäminen..... | 19 |
| 4.1.4 Mallin yleisimmät virheet..... | 19 |
| 4.1.5 Tulosten käsittely..... | 20 |
| 5 POHDINTAA..... | 25 |
| LÄHTEET..... | 26 |

LIITTEET

| | |
|---|----|
| Liite 1 Autodesk Robot Structural Analysis 2010 –toimintamalliohje..... | 27 |
|---|----|

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä FEM-laskennan periaatteisiin ja helpottaa ohjelmiston käyttöönottoa käytännön suunnittelussa ja opetuksessa yksinkertaistetun toimintamalliohjeen avulla. Aiheen laajuuden vuoksi työtä rajattiin käsittelemään rakenteiden osalta ainoastaan tavanomaisia ja yksinkertaisia teräsbetonirakenteita (pilari, palkki, laatta ja antura) sekä ohjelmiston osalta Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmistoa.

Tilaaajan tavoitteena oli saada yksinkertainen toimintamalliohje (Liite 1) ohjelmiston käyttöön – ei siis varsinaista käyttöohjetta. Ohjeen avulla tilaaja halusi perehdyttää henkilöstöään uuden ohjelmiston käyttöön ja näin ottaa ohjelmisto avuksi päivittäistä suunnittelutyötä.

Tässä työssä esitetyt mielipiteet ja kommentit ovat työn tekijän henkilökohtaisia ja pohjautuvat työn pohjalta saatuun kokemukseen, havaintoihin ja saatuihin tutkimustuloksiin. Toimintamalliohjeen luonti edellytti aluksi huolellista perehtymistä itse ohjelmistoon, jotta työ onnistuisi parhaalla mahdollisella tavalla. Ohjelmisto oli käytettävissä ainoastaan tilaaajan puolelta, joka lisäsi haasteellisuutta ja työhön käytettävää aikaa.

Työn tavoitteena on perehtyä aluksi FEM-laskennan yksinkertaistettuun teoriaan, jonka jälkeen siirrytään mitoituksen yleiseen kulkuun ja lopuksi ohjelmiston suorittamien kriittisten tapausten tulosten analysointiin. Teoriaosio pohjautuu Lähteenmäen (2007) teokseen Elementtimenetelmän perusteet.

2 ELEMENTTIMENETELMÄ

Lujuuslaskenta kuuluu rakennesuunnittelun perustehtäviin ja sen tavoitteena ratkaista rakenteen siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä annettujen kuormitusten ja tuentatavan perusteella. Käytettävät ratkaisuyhtälöt perustuvat lujuusopin teoriaan. Lineaarisen lujuusopin jokaisen tehtävän ratkaisut saadaan lineaarisen kimmoteorian perusyhtälöjärjestelmästä. Käytännössä vain yksinkertaisen geometrian omaavien rakenteiden peruskuormitustapauksissa yleisen yhtälöjärjestelmän analyttinen ratkaisu on mahdollista. Mutkikkaammissa tapauksissa joudutaan tyytymään likimääräiseen ratkaisuun, koska ratkaisu tavanomaisten matemaattisten funktioiden avulla on käytännössä mahdotonta. Tämän seurauksena likimääräisten numeeristen ratkaisumenetelmien kehitys on ollut viime aikoina hyvinkin voimakasta. *(Lähteenmäki 2007.)*

Numeerisia ratkaisumenetelmiä on kehitetty vuosien varrella monenlaisia ja parhaaksi niistä on osoittautunut elementtimenetelmä, joka on nykyään lujuuslaskennassa ylivoimaisesti käytetyin tarkastelumenetelmä. Elementtimenetelmän käyttö levisi 1960-luvulla nopeasti kone- ja rakennustekniikan rakenteiden tarkastelussa, mutta menetelmää käytettiin alun perin Yhdysvalloissa lentokoneiteollisuudessa jo 1950-luvulla. Elementtimenetelmästä käytetään yleisesti lyhenteitä FEM (Finite Element Method) tai FEA (Finite Element Analysis). *(Lähteenmäki 2007.)*

Menetelmä kehittyi tietokoneiden mukana nopeasti 1960- ja 1970-luvuilla, sillä tietokoneet tekevät mahdolliseksi suurten numerolaskumäärien käsittelyn kohtuullisessa ajassa. Tuolloin kehitettiin paljon alkeellisia FEM-ohjelmistoja, jotka toimivat keskustietokoneissa ja olivat hankalia käyttää. FEM-ohjelmistoihin alettiin 1980-luvulla kehittää esi- ja jälkikäsitteilyohjelmistoja, joiden ansiosta niiden käyttäjäystävällisyys on parantunut. Mikrotietokoneiden laskentakapasiteetin kehittyminen on tuonut FEM-laskennan osaksi käytännön perussuunnittelua. *(Lähteenmäki 2007.)*

Elementtimenetelmän soveltuvuus lujuuslaskennan lisäksi muihinkin teknillisen laskennan alueisiin havaittiin jo menetelmän alkuvaiheessa. Elementtimenetelmää voidaan käyttää myös minkä tahansa osittaisdifferentiaaliyhtälöryhmän alkuja reuna-arvot tehtävän likimääräiseen ratkaisemiseen. Elementtimenetelmää käytetään paljon myös muilla tekniikan osa-alueilla kuin mekaniikan, kuten esimerkiksi sähkötekniikassa, lämmönsiirrossa, virtausopissa, maamekaniikassa, kalliomekaniikassa ja akustiikassa. Elementtimenetelmän matemaattinen tausta on tarkoin tutkittu sen sovellusarvon selvittyä. (Lähteenmäki 2007.)

Elementtimenetelmän perusyhtälöt johdetaan kaikille rakennetyypeille lujuusopin osittaisdifferentiaaliyhtälöillä tai näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista. Elementtien alueissa yhtälöt muodostetaan toteutettavan interpoloinnin avulla, jolloin saadaan yhtälölle likimääräinen ratkaisu. Interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa mahdollinen vaihtoehto kolmiulotteisille solidirakenteille ja pintarakenteille (levyt, laatat ja kuoret). Ristikko- ja kehärakenteille käytetään yksinkertaisempaa suoraa elementtimenetelmää, jolloin perusyhtälöt muodostetaan sauva- ja palkkiteoriaa käyttäen. Sauva- ja palkkiteorian ratkaisu on tarkka, sillä interpolointia ei käytetä. Tässä tarkastellaan aluksi suoraa elementtimenetelmää, mutta myöhemmin esitetään elementtimenetelmän yleinen interpolointiin perustuva teoria. (Lähteenmäki 2007.)

2.2 Elementtimenetelmän periaatteet

2.2.1 Elementtiverkko

Analyttinen perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttinen ratkaiseminen lujuusopin avulla onnistuu lähinnä vain yksinkertaisen geometrian, kuormituksen ja tuenan omaavissa perustapauksissa. Elementtimenetelmän periaatteena on, että geometrisesti mutkikas kappale voidaan jakaa useisiin äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan yksinkertaisia alkuperäiseen verrattuna. Näitä jaettuja osia kutsutaan elementeiksi. Kolmiulotteisien kappaleiden elementteinä käytetään tetraedri-, kiila- ja tiiliskivielementtejä. Neli- ja kolmisivuiset tasoelementit ovat

yleisiä pintarakenteiden mallinnuksessa ja näiden reunaviivat voivat olla joko suoria tai yksinkertaisia käyriä viivoja. Tasoelementit ovat nelikulmio- ja kolmioelementtejä. Janaelementit ovat yleisiä viivarakenteina, kuten sauva- ja palkkielementteinä. Lisäksi on käytössä suuri joukko harvinaisempia elementtejä, kuten kontaktielementtejä, liitoselementtejä, särön kärjen elementtejä ja puoliäärettömiä elementtejä. (Lähteenmäki 2007.)

Tarkasteltavasta ongelmatilanteesta riippuen voi elementtien koko vaihdella suuresti kappaleen eri osissa. Kappaleen elementtijaossa voidaan joutua käyttämään samanaikaisesti erityyppisiä ja -muotoisia sekä erilaiset geometriset ja materiaaliominaisuudet sisältäviä elementtejä. Kappale kuvataan elementtiverkko, jossa on eri määrä erikokoisia elementtejä. Elementtiverkko on usein vain likimääräinen esitysmuoto varsinkin pinta- ja solidirakenteilla, mikä aiheuttaa saataviin tuloksiin aina enemmän tai vähemmän epätarkkuutta. Tämä ei kuitenkaan lujuuslaskennassa ole kovin merkittävää, jos mallinnuksessa käytetään riittävän pieniä ja kaarevareunaisia elementtejä. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa solmupisteissä tai solmuissa, joiden tarkka mallintaminen todellista tilannetta vastaavaksi on todettu vaikeaksi ja se aiheuttaa mallinnukseen virheitä. Näiden virheiden tunnistaminen ja oikea tulkinta on tärkeää. (Lähteenmäki 2007.)

2.2.2 Solmusuureet

Elementtiverkon solmuihin liittyvät suureet jaetaan siirtymä- (translaatio ja rotaatio) ja voimasuureisiin. Voimasuureisiin kuuluvat jännitykset, poikkileikkauksen rasitukset ja pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet. Käytettävät solmusuureet riippuvat siis elementtityypistä. Elementtiverkon suuren solmu- ja elementtimäärän takia, tarvitaan solmusuureille looginen ja yksinkertainen merkintätekniikka. Solmusuureet järjestetään pystyvektoreiksi, koska elementtimenetelmässä käytetään matriisilaskentaa. Pystyvektorit kirjoitetaan poikkeuksellisesti rivinsuuntaisesti ja merkitään aaltosulkeisiin erotukseksi todellisista vaakavektoreista, jotka ovat hakasulkeissa. (Lähteenmäki 2007.)

2.2.3 Ekvivalentit solmukuormitukset

Rakenteeseen voi elementtiverkon solmuihin pistevoimina ja -momentteina vaikuttavien ulkoisten kuormitusten lisäksi kohdistua elementin alueella olevia kuormituksia eli elementtikuormituksia, jotka huomioidaan ekvivalenttisten solmukuormitusten avulla. Tämä tarkoittaa elementtikuormitusten muuttamista tietyn samanarvoisuusperiaatteen avulla solmuihin vaikuttaviksi pistekuormituksiksi. Sauva- ja palkkirakenteiden ekvivalenttisten solmukuormitusten ja elementtikuormitusten aiheuttamat solmusiirtymät ovat molemmilla samat. Kaikkiin tapauksiin soveltuva yleisempi periaate saadaan elementtikuormituksen mekaanisen työn avulla. (*Lähteenmäki 2007.*)

2.2.4 Solmusuureiden ratkaisu

Elementtimenetelmän ensimmäisenä tehtävänä on ratkaista solmusuureet, jonka jälkeen lasketaan elementtien alueilla tuntemattomat suureet tunnetuista solmuarvoista lähtien. Viivarakenteilla tulos saadaan tarkasti, mutta yleisemmissä tapauksissa joudutaan tyytymään interpoloituun likiratkaisuun. (*Lähteenmäki 2007.*)

Elementtimenetelmässä solmusuureiden ratkaiseminen on keskeisin tehtävä, johon on useita ratkaisumenetelmiä. Menetelmät eroavat toisistaan lähinnä vain ratkaisujärjestysten osalta, mutta tehokkaimmaksi ratkaisutavaksi on osoittautunut siirtymämenetelmä, jossa ensin ratkaistaan solmusiirtymät.

Siirtymämenetelmässä saadaan elementin solmusiirtymävektorin ja solmuvoimavektorin välille muotoa

$$[k]^e \{u\}^e = \{f\}^e \quad (2.1)$$

oleva lineaarinen yhteys, jossa $[k]^e$ on elementin jäykkyyismatriisi. Se muodostetaan elementin geometrinen ja materiaaliominaisuuksien perusteella. $[k]^e$ saadaan viivarakenteilla lujuusopin perusteorian avulla sekä yleisesti energiaperiaatetta ja interpolointia käyttäen.

Siirtymämenetelmällä voidaan jäykkyysmatriisin avulla saada elementin solmu-
 jen siirtymävektorin ja voimavektorin välille lineaarinen yhteys. Jäykkyysmatriisi
 muodostetaan elementin geometrinen ja materiaaliominaisuuksien perusteella,
 joka on usein yksilöllinen jokaiselle elementille. Jäykkyys sisältyy niin kutsuttuun
 elementin perusyhtälöön, jota käytetään solmuvoimavektorin ratkaisemiseen,
 kun solmusiirtymävektori tunnetaan. Siirtymämenetelmässä elementtiverkon
 solmusiirtymävektorin ja kokonaiskuormitusvektorin välille saadaan muotoa

$$[K]\{U\} = \{R\} \quad (2.2)$$

oleva lineaarinen yhtälöryhmä, jossa $[K]$ on elementtiverkon edelleen jäykkyys-
 matriisi eli kokonaisjäykkyysmatriisi, johon vaikuttaa elementtiverkon geometri-
 set- ja materiaaliset ominaisuudet. Elementtiverkon koostuminen elementeistä
 merkitsee, että kokonaisjäykkyysmatriisi koostuu elementtien jäykkyysmat-
 riiseista. $[K]$ muodostetaan elementtien jäykkyysmatriiseista matriisien yhteen-
 laskulla, jota kutsutaan sijoittelusummaukseksi ja merkitään

$$[K] = \sum_{e=1}^M [k]^e \quad (2.3)$$

jossa M on elementtien määrä ja $[k]^e$ jäykkyysmatriisi.

Edellistä yhtälöä kutsutaan elementtiverkon perusyhtälöksi ja tuntemattomina
 kaavassa ovat vapaat solmusiirtymät, jotka tunnettujen tukisiirtymien kanssa
 muodostavat yhdessä vektorin $\{U\}$ ja tukireaktiot, jotka tunnettujen ulkoisten
 solmu- ja elementtikuormitusten kanssa muodostavat kokonaiskuormitusvektori-
 nin $\{R\}$. Ryhmässä on saman verran tuntemattomia yhtäsuuruusmerkin molem-
 milla puolilla, joten ne voidaan ratkaista, mikäli laskentamalli ei sisällä jäykän
 kappaleen liikemahdollisuutta. Tästä seuraa, että ryhmää ei voi ratkaista kään-
 tämällä matriisi $[K]$, vaan siihen on käytettävä muita menetelmiä. Käytännössä
 ratkaisu vaatii tietokoneen käyttöä elementtiverkon perusyhtälöiden suuren
 määrän vuoksi.

Kun elementtiverkon solmusiirtymävektori $\{U\}$ on ratkaistu, voidaan siitä poimia kunkin elementin e solmusiirtymävektori $\{u\}^e$. Näistä voidaan laskea elementin perusyhtälöllä elementtien solmuvoimavektorit $\{f\}^e$, jotka ilmaisevat elementteihin kohdistuvat sisäiset voimasuureet solmujen kohdilla. (*Lähteenmäki 2007.*)

2.2.5 Ratkaisu elementin alueella

Solmusuureiden ratkaisun jälkeen tulee ratkaisu saada ulotetuksi myös elementtien alueelle, mikä onnistuu lujuusopin teoriaa käyttäen tarkasti. Palkkielementtien rasituskuvaajat voidaan esimerkiksi määrittää tunnettaessa elementin kuormitukset ja rasitusten arvot elementin päissä. Taipumaviivan laskenta palkkielementillä onnistuu tunnettaessa elementin kuormituksen ja taipuman lisäksi kiertymät elementin päissä. Pinta- ja solidirakenteilla ei solmusuureiden avulla saada tarkkaa ratkaisua elementin alueella, sillä siirtymät interpoloidaan solmuarvoista lähtien. Käytettäessä interpolointia, perustuvat elementin ekvivalenttien solmukuormitusten ja jäykkyysmatriisin lausekkeet siirtymien interpoloituihin lausekkeisiin ja ovat näin ollen likimääräisiä. Ratkaisun tarkkuus on riippuvainen valitusta interpolointimenetelmästä, joten siihen on elementtimenetelmässä kiinnitettävä huomiota. (*Lähteenmäki 2007.*)

2.3 Laskentamallit

2.3.1 Elementtityypit

FEM-ohjelmistojen valikoimissa on paljon elementtityyppejä, jotka perustuvat elementtiä vastaavaan lujuusoppiin. Ohjelmistojen elementtikirjastoissa on parhaimmillaan yli sata elementtityyppiä, joista suurimmaksi osaksi käytetään vain vakiintuneita peruselementtityyppejä, joita on parikymmentä. Samassa laskentamallissa käytetään usein erityyppisiä elementtejä, mikä mahdollistaa mutkikkaidenkin yhdistettyjen rakenteiden analysoinnin ja tekee elementtimenetelmää joustavan. (*Lähteenmäki 2007.*)

Lujuusopin teoriassa jaottelu tapahtuu rakennetyypeittäin, joten kannattaa ryhmitellä elementtityypit samalla tavoin. Tällä perusteella saadaan elementtityyppien ryhmittely:

1. Sauvaelementit soveltuvat ristikkorakenteiden analysointiin. Tavallisimmat elementit ovat tasoristikon ja avaruusristikon sauvaelementti, jotka ovat kaksisolmuisia ja tasapaksuja elementtejä.

2. Palkkielementit soveltuvat suorien ja käyrien palkkien ja kehärakenteiden tarkasteluun. Tavallisimmat elementit ovat tasokehän ja avaruuskehän palkkielementti. Ne ovat kaksisolmuisia ja tasapaksuja elementtejä, jotka tarvittaessa pystyvät ottamaan huomioon leikkausvoiman vaikutuksen. Muita elementtejä ovat arinan elementti ja laatan- ja kuoren jäykistepalkin elementti.

3. 2D-solidielementit on tarkoitettu tasojännitystilän, tasomuodonmuutostilan ja pyörähdyssymmetrisen solidirakenteiden käsittelyyn. Yleisimmät elementit ovat kolmisivuinen ja nelisivuinen tasoelementti ja vastaavat rengaselementit pyörähdyssymmetriselle solidille. Elementin reunat voivat olla suorat, jolloin elementti on lineaarinen. Kaarevareunaisista elementeistä tavallisin muoto on kvadraattinen, jolloin elementin reunat ovat paraabelin kaaria.

4. Laattaelementit ovat taivutuksen ja leikkauksen alaisten tasopintarakenteiden käsittelyyn suunniteltuja elementtejä. Ne ovat kolmi- ja nelisivuisia laatan keskitason elementtejä. Elementin paksuus on yleensä vakio. Käytettävissä on sekä ohuen että paksun laatan elementtejä, joista jälkimmäiset ottavat huomioon leikkausvoimien vaikutuksen laatan taipumaan. Muista laattaelementeistä mainittakoon kerroslaatan elementit, joissa voi paksuussuunnassa olla useita eri materiaalia olevia kerroksia.

5. Kuorielementit soveltuvat kaarevien pintarakenteiden tarkasteluun. Tavallisimmin käytetään kolmi- ja nelisivuisia tasapaksuja kuoren keskipinnan elementtejä, jotka voivat olla tasomaisia tai kaksoiskaarevia pintoja. Elementit ovat yleensä vakiopaksuisia. Käytettävissä on sekä ohuen että paksun kuoren elementtejä, joista jälkimmäiset ottavat huomioon leikkausvoimien vaikutuksen

kuoren siirtymiin. Pyörähdyssymmetrisen kuoren mallinnukseen on käytettävissä rengaselementtejä, joissa renkaan poikkileikkaus on viiva. Tavallisimmat viivan muodot ovat suora ja paraabelin kaari.

6. 3D-solidielementtejä käytetään kolmiulotteisten kappaleiden mallinnukseen. Ne ovat neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, joita sanotaan tetraedri-, kiila- ja tiilikivielementeiksi. Elementin reunapinnat voivat olla tasoja, jolloin elementti on lineaarinen, tai toisen asteen pintoja, jolloin se on kvadraattinen.

7. Erityiselementit ryhmään kuuluvat erityissovelluksiin suunnitellut elementit. Ne ovat hyödyllisiä omalla alueellaan, jossa tavallisilla peruselementeillä ei mallinnusta pystytä suorittamaan riittävän tarkasti tai tehokkaasti. Ohjelmistojen erityiselementtivalikoimat vaihtelevat, joten mitään yksikäsitteistä luetteloa näistä elementeistä ei voi antaa. Usein mukana olevia elementtejä ovat kosketuselementit, särön kärjen elementit ja puoliäärettömät solidielementit.

Elementtityypin käyttö edellyttää lujuusopin teorian tuntemista ja elementtimenetelmän teorian tuntemista. Elementtityypit sisältävät oletuksia ja rajoituksia, joiden tunteminen on välttämätöntä, jotta laskenta onnistuisi ja tulokset osattaisiin tulkita oikein. Ohjelmistosta riippuen niissä on mahdollista ottaa käyttöön yhä uusia elementtityyppejä, joiden teoriaan tulisi perehtyä ennen käyttöä. (*Lähteenmäki 2007.*)

2.3.2 Käytettävän mallin valinta

Laskentamallit jaetaan keskiviiva-, keskipinta- ja solidimalleihin. Keskiviivamallia eli 1D-mallia käytetään sauva- ja palkkirakenteina. Rakenteen geometrinen malli on poikkileikkauksen pintakeskiötä pitkin kulkeva viiva, jonka lisäksi määritellään tarvittavat rakenteen poikkileikkauksen pintasuureet. Keskipinta- eli 2D-mallia käytetään laatta-, levy- ja kuorirakenteina, joiden geometrinen malli on rakenteen keskipinta, jonka lisäksi määritellään ainepaksuudet. Solidi- eli 3D-malleja käytetään kolmiulotteiselle kappaleelle, jonka geometria ei salli 1D- tai 2D-mallinnusta. Yhdistettyjen mallien käyttö on myös mahdollista, jolloin raken-

teen eri osissa käytetään erityyppistä geometrian mallinnusta. (*Lähteenmäki 2007.*)

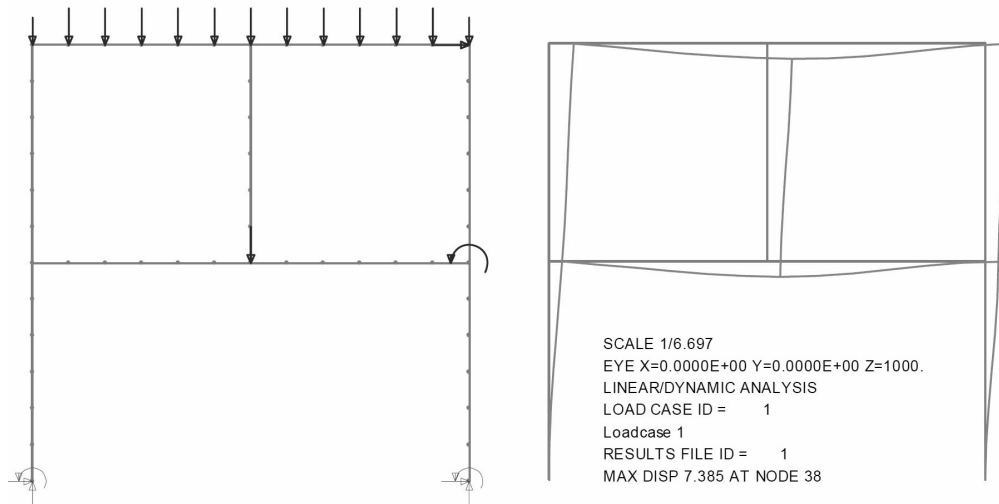
Laskennan alkuvaiheessa on laskentamallin valintaan ja käytettävään elementtityyppiin kiinnitettävä huomiota. Sopivan tyyppisten elementtien käyttö on perusedellytys riittävän tarkan tuloksen saamiselle. Tulosten tarkkuuteen vaikuttavat myös verkon riittävä tiheys rakenteen eri osissa ja tarpeeksi symmetristen kappaleiden käyttö. Kappaleen luonnissa FEM-ohjelmiston esikäsittelijällä ei siis ole kysymys vain kappaleen piirtämisestä, vaan geometrian avulla on pystyttävä toteuttamaan laskennan kannalta tehokas elementtiverkko. Voidaan siis helposti ajatella, että lujuusanalyysit voidaan tehdä rakenteen tarkan 3D-mallinnuksen avulla. Laajat 3D-mallit ovat kuitenkin erittäin raskaita käyttää varsinkin mikrotietokoneilla ja jo pelkästään tulostiedostot vaativat erittäin runsaasti tallennustilaa. Lujuuslaskenta voidaan usein tehdä helpommin ja riittävällä tarkkuudella yksinkertaisilla 1D- ja 2D-malleilla. Laskentamallien tulee elementtimenetelmässä olla siis sellaisia, että niiden laskenta voidaan suorittaa kohtuullisen tietokone-resurssin ja ajan puitteissa. (*Lähteenmäki 2007.*)

CAD-ohjelmistoista voidaan usein tuoda FEM-ohjelmistoon rakenteen geometriatietoja, mikä on huomattava hyöty suunnittelussa. CAD-ohjelmistosta tuotu geometria ei välttämättä kuitenkaan täytä tehokkaan elementtiverkon vaatimuksia tai se voi olla liian yksityiskohtainen väärässä paikassa. Geometriaa on siksi usein muokattava ennen laskentaa. Lujuuslaskentamallissa tarvitaan rakenteen muodon lisäksi tietoja elementtiverkosta, elementtityypistä, materiaaliominaisuuksista, tuennoista, kuormituksista, keskiviivaelementtien poikkipinnasta ja keskipintaelementtien paksuudesta. CAD-ohjelmistoihin on usein saatavana myös lujuusanalyysin tekeviä lisäohjelmia, jolloin siirtoa varsinaiseen FEM-ohjelmistoon ei tarvita. (*Lähteenmäki 2007.*)

2.3.3 FEM-laskennan tulokset

FEM-analyysi sisältää laskennan lisäksi yleensä myös tulosten tarkastelun ja arvioinnin. FEM-ohjelmiston suuren numeerisen tietomäärän takia, tarvitaan tulosten havainnollistamiseksi myös jälkikäsitteilyohjelma, joka muuttaa tulokset graafiseen asuun. Ohjelmistojen graafiset esitykset ovat vakiintuneita, ja ne esittävät samat lujuusopillisesti kiinnostavat asiat. (Lähteenmäki 2007.)

Kuvassa 2.1 on tasokehän elementtiverkko, kuormitus ja tuenta. Osapalkit on kukin jaettu kuuteen erilliseen elementtiin. Verkossa on 54 elementtiä, 53 solmua ja 159 vapausastetta, joista 6 on tuettuja ja loput 153 vapaita. Verkon jäykkymatriisi on 159x159-matriisi. Tasokehän elementtimenetelmäratkaisussa päästään taivutusteorian mukaiseen tarkkaan ratkaisuun sijoittamalla solmut vain nurkkiin ja tukipisteisiin. Tässä tapauksessa on käytetty enemmän solmuja, jotta taipumakuva olisi havainnollisempi. Kehän palkkielementit ovat viivaelementtejä, ja palkkeja kuvaavat viivat kulkevat poikkileikkauksen pintakeskiön kohdalla tai ovat yhdensuuntaisia pintakeskiöviivojen kanssa. (Lähteenmäki 2007.)



Kuva 2.1 Tasokehän kuormitus ja tuenta. Taipumakuva. (Lähteenmäki 2007.)

Tärkeimmät laskennan tulokset ristikko- ja palkkirakenteilla ovat solmukohtien siirtymät ja elementtien rasitukset. Jännitysjakautumaa ohjelmasta ei yleensä ohjelmasta saada joitakin standardipoikkileikkauksia lukuun ottamatta, joten ne on

laskettava rasituksista manuaalisesti. Pintarakenteiden osalta analyysin tuloksena saadaan solmujen siirtymät ja voimasuureista normaalivoima-, leikkausvoima-, vääntömomentti- ja taivutusmomenttitiheydet. Näistä saadaan ratkaistua jännityskomponentit kuoren keski- ja reunapinnoilla sekä vielä pääjännitykset ja vertailujännitykset eri hypoteesien mukaisesti. Kuorielementtiverkot ovat raskaita käsitellä suuren vapausasteiden määrän vuoksi, mutta usein se on ainoa vaihtoehto mallintamiseen. Kuorielementit ovat eräs käytetyimmistä elementtityypeistä, joten useiden kuorielementin lisäksi ohjelmistoissa on myös runsaasti tasomaisia kuorielementtejä. Tasoelementit vievät selvästi vähemmän laskentaresursseja kuin kaarevat elementit, joten niitä kannattaa hyödyntää. *(Lähteenmäki 2007.)*

3 RAKENTEEN MITOITUKSEN TEORIAA

Rakennuksen runkotyyppin valitsee usein tilaaja, jolla on käytettävää rakennusta silmällä pitäen erilaisia intressejä, joista yksi on kustannustehokkuus. Lopullisen runkotyyppin valintaan vaikuttavat eniten rakennuksen kustannukset, käyttötarkoitus, muoto ja jännevälit, käyttöikä sekä työmaatekninen toteutettavuus. Kantavan rungon lisäksi rakennus sisältää usein enemmän kantamattomia rakenteita, joiden osuutta materiaalien valinnoissa ei tule jättää huomioimatta. Usein rakennuksen taso- ja pystyrakenteet ovat eri materiaalia, minkä pääasiallisena syynä on rakennustuotteiden vaihteleva saatavuus ja soveltuvuus erityyppisinä rakenteina.

Rakennuksen suunnitteluvaihe elää usein voimakkaasti rakennuksesta riippuen ja rakennuksen rakennetyyppeihin voi suunnittelun aikana tulla muutoksia erityisesti rakennesuunnitteluvaiheessa. Usein kuitenkin jo luonnosvaiheessa pyritään saamaan mahdollisimman kokonaisvaltainen käsitys suunniteltavan rakennuksen runkorakenteista, joista nykyään ylivoimaisesti eniten käytetty rakenne taso- ja pystyrakenteissa ovat betonielementit.

Materiaalista riippuen on rakenteen toimivuudelle annettu erilaisia taipumaan, lujuteen, halkeiluun, kulutuskestävyyteen, sitkeyteen sekä palonkestoon liittyviä vaatimuksia, jotka tulee rakennetta mitoitettaessa ottaa huomioon.

Rakenteiden mitoitukselle on käytettävissä erilaisia mitoitusperusteita, joista yleisin on rajatilamenetelmä. Rajatilamenetelmässä käytetään kolmea rajatilaa: käyttörajatila (KRT), murtorajatila (MRT) ja onnettomuusrajatila (PLS). Rajatilamenetelmässä käytetään materiaali- ja kuormaosavarmuuskertoimia, joilla saadaan aikaiseksi mitoitukselle riittävä varmuus murtumista vastaan. Rajatilamenetelmän keskeisin periaate on eriyttää selvästi rakenteiden normaaliin ja poikkeukselliseen tilanteeseen liittyvät kestävyysvaatimukset. Käyttörajatilassa rakenne mitoitetaan yleensä taipumalle ja halkeilulle, joka on usein myös käyttöön liittyen kriittinen rakenteen vaatimusten kannalta. Murtorajatilassa taas tarkas-

tellaan tilanteita, joissa rakenne vaurioituu käyttökelvottomaan kuntoon tai sortuu.

Rakenteen mitoitus voidaan suorittaa esimerkiksi seuraavasti:

1. Geometrian määrittäminen
2. Rakennemallin luonti
3. Materiaalien valinta
4. Kuormien ja kuormitusyhdistelmien laskenta
5. Rakenteen kestävyyslaskenta määrävimpään kuormitustapaukseen perustuen ja valittua mitoitusmenetelmää käyttäen
6. Tulosten analysointi

Kuormitusyhdistelmiä käytetään kuormitusten suuruuksien määrittämiseen, kun tarkasteltavassa rajatilassa vaikuttaa erilaisia kuormia. Kuormitusyhdistelmää ei tulisi sekoittaa kuormitustapauksiin, jotka liittyvät muuttuvien kuormien järjestämiseen siten, että löydetään rakenteen kannalta kaikkein epäedullisin vaikutus.

Mitoituskuorman suuruus voidaan määrittää suoraan kertomalla se kuorman tyyppin osavarmuusluvulla, mikäli yhdistelmässä on vain yksi muuttuva kuorma, esimerkiksi hyötykuorma. Jos yhdistelmässä on useampi kuin yksi muuttuva kuorma, niin silloin on valittava määrävimpään muuttuva kuorma ja toissijaiseksi muut samanaikaisesti vaikuttavat kuormat. Toissijaisesti vaikuttavat samanaikaiset kuormat otetaan huomioon yhdistelyarvona.

Rakenteen tyypistä riippuen on SFS-EN-standardissa esitetty yksityiskohtaisesti eri rakenteiden mitoitusperusteet.

4 AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

Rakenteiden lujuusanalyysiin ja mitoitukseen on kehitelty vuosien varrella lukuisia eri laskenta- ja mitoitusohjelmistoja, joista nykyään ehkä tunnetuin on Autodesk-tuoteperheen Robot Structural Analysis (RSA). RSA tunnettiin aikaisemmin nimellä Robot Millennium, mutta Robobatin siirtyessä Autodeskin omistukseen sai ohjelmisto uuden ulkoasun lisäksi myös paremmin kuvaavan nimen.

RSA on rakennesuunnittelijalle tarkoitettu ohjelmistopaketti rakenteiden lujuusanalyysiin ja mitoitukseen. Ohjelmistolla voidaan käsitellä hyvinkin monipuolisia rakenteita kioskeista siltoihin, nostureista ydinvoimaloihin ja teollisuusrakennuksiin ja ohjelmisto on käytössä yli 60 maassa ja sitä on myyty yli 10 000 lisenssiä rakennesuunnittelutoimistoille. Robotilla voidaan analysoida mitä tahansa rakenteita tietyin varauksin ja käyttäjä voi itse määrittellä käytettäviä materiaaleja, mikäli niitä ei ole tietokannoissa.

4.1 Mallinnuksen teoriaa RSA:ssa

4.1.1 Mallinnuksen aloitus

Ohjelmistoa käytettäessä on tärkeää tiedostaa ohjelmistossa käytettävät merkkisäännöt. Robotissa käytetään positiivisen suunnan esittämiseksi oikean käden merkkisääntöä, joka on yleinen tapa esittää kyseinen suunta. Robottia käynnistettäessä valitaan ensimmäiseksi rakennetyyppi, joka vastaa suunniteltavaa rakennetta parhaiten (*liite 1, kohta 1.1*). Rakennetyypin lisäksi tulee määrittellä rakenteen vapausasteet.

Mikäli käytetään levyrakenteita, on levyn positiivinen suunta levyn "normaali"-suunta, eli paikallinen z-akseli on pääkoordinaatiston Z-akselin suuntainen. Sauvarakenteilla uuma on z-akselin suuntainen ja laipat x-y-tasossa. Sauvan ollessa pystyssä on z-akseli pääkoordinaatiston X-akselin suuntainen.

4.1.2 Laskennan perusrutiinit

Laskentamallissa käytetään perusrutiineja seuraavassa järjestyksessä:

1. Projektin aloitus (*liite 1, kohdat 1.1, 2.1, 3.1 ja 4.1*)
2. Geometrian luonti (*liite 1, kohdat 1.2, 2.2, 3.2 ja 4.2*)
3. Kuormien määrittäminen (*liite 1, kohdat 1.4, 2.3, 3.2 ja 4.5*)
4. Yleisten asetusten määrittäminen (*liite 1, kohdat 1.5-1.7, 2.4-2.6, 3.2 ja 4.6-4.9*)
5. Mallin virheiden tarkistus ja korjaus
6. Laskenta (*liite 1, kohdat 1.8, 2.7, 3.2 ja 4.10*)
7. Tulosten käsittely (*liite 1, kohdat 1.9, 2.8-2.9, 3.2 ja 4.11-4.12*)
8. Raportin luonti

4.1.3 Asetuksien määrittäminen

Ohjelmistoa käytettäessä tulee määrittää työskentely-ympäristön asetukset, joihin kuuluvat yleiset asetukset ja projektiasetukset. Yleisissä asetuksissa määritetään esimerkiksi kieleen, tallennukseen ja tulostusparametreihin liittyviä asetuksia.

Projektiasetuksissa määritetään itse rakenteen mitoittamiseen liittyvät asetukset, kuten mittayksiköt, materiaalit, tietokannat, normit ja oletuselementtiverkotukseen liittyvät parametrit, joista viimeksi mainittuun kannattaa kiinnittää huomiota, sillä elementtiverkkoa ei kannata valita turhaan liian tiheäksi.

4.1.4 Mallin yleisimmät virheet

Mallinnuksessa tapahtuu usein virheitä, joista yleisin on elementtiliitosten epäjatkuvuuskohdat. Tämän tyyppiset virheet tulevat vastaan erityisesti mallinnettaessa kolmiulotteisia rakenteita. Ohjelmistoon on kuitenkin kehitetty työkalu (*Correct*) tämän tyyppisten virheiden korjaukseen. Virheen tarkistus tulee suorittaa aina rakenteen geometrian luomisen jälkeen.

Muita ongelmia mallinnuksen virheiden osalta saattaa esiintyä puutteellisista määrittelyistä materiaaliominaisuuksien, poikkileikkauksien tai tukipisteiden osalta. Usein ongelmia tuottavat myös liian useat nivelet samassa solmussa tai liian useat vapautukset solmupisteissä. Lisäksi tulee kiinnittää yleisesti huomiota solmujen määrään, päällekkäisiin- ja irrallisiin rakenteisiin sekä mallinnettavan rakenteen tuentoihin.

4.1.5 Tulosten käsittely

Ohjelmisto tuottaa rakenteen statiikan osalta tuloksia tukireaktioista, solmusiirtymistä, taipumista, voimasuureista sekä jännityksistä.

Koska ohjelmistoilla tehdyt rakennemallit ja laskentatulokset ovat aina enemmän tai vähemmän epätarkkoja, esiintyy laskennan tuloksissa usein myös virheitä, jotka rakennesuunnittelijan tulisi tulosten analysoinnin yhteydessä ottaa huomioon. Tällaisten tulosten tunnistaminen oikeiden tulosten joukosta on ensiarvoisen tärkeää rakenteen oikean toiminnan ja kustannustehokkuuden kannalta.

Epätarkkoja tuloksia voi esiintyä esimerkiksi rakenteen sisäisten jännitysten suuruudessa erityisesti tuen läheisyydessä, jossa jännitykset ovat usein ylisuuria. Laatan reunatuella voi ohjelmiston ilmoittamat jännitykset poiketa jopa 10 % todellisesta. Tämä korostuu erityisesti nurkka-alueilla, aukkojen läheisyydessä ja keskituilla.

Kuvassa 4.1 on esitetty nurkastaan avoimen betonilaatan staattisista kuormista aiheutuneita rakenteen sisäisiä jännityksiä. Taulukossa on esitetty RSA:n laskemat teoreettiset laskenta-arvot (Robot) ja laboratorio tutkimuksissa saatu todellinen vertailuarvo (AFNOR), joiden perusteella voidaan todeta, että ohjelmiston laskemat rasitukset ovat usein mitoituksen kannalta varmallalla puolella rakenteen todelliseen rasitukseen verrattuna, eikä näin ollen rakenteen alimitoitus tule yleensä ongelmaksi. Tulkintaa ei kuitenkaan voida liikaa yleistää ja suunnittelijan tulee aina suhtautua kriittisesti ohjelmiston ilmoittamiin laskentatuloksiin ja järjellä pohtia, onko ohjelman antama tulos oikeassa suhteessa todellisiin

rasituksiin verrattuna ja tarvittaessa tarkastaa tuloksen oikeellisuus myös muilla ohjelmistoilla.

VERIFICATION EXAMPLE

Tension of perforated membrane - SSLP02/89

Name of the test:

SSLP02/89

Reference:

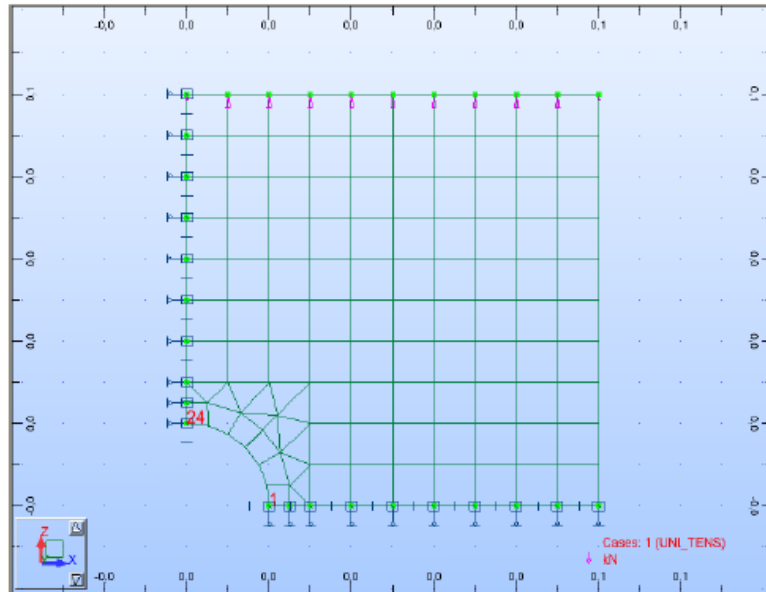
AFNOR

Specification:

Simple tension of perforated membrane.

GEOMETRY:

¼ of a model analyzed (due to symmetry) with a mesh 10x10



DATA FILE

SSLP02.str

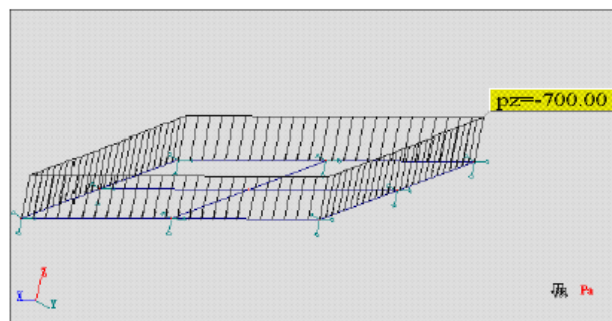
COMPARISON:

| Node | Compared result | Robot | AFNOR | Difference % |
|------|---|---------|-------|--------------|
| 1 | Stress $\sigma_{\theta\theta}$ (N/mm ²) | - 7.799 | - 7.5 | 3.987 |
| 24 | Stress $\sigma_{\theta\theta}$ (N/mm ²) | - 2.766 | - 2.5 | 10.640 |

Kuva 4.1. Laatan jännitykset nurkkatuella. (Autodesk 2008).

Kuvassa 4.2 on tarkasteltu tapausta, jossa laatalle kohdistuva staattinen kuormitus on normaaliakselin suuntainen. Tuloksissa on erityisesti huomioitavaa, että siirryttäessä pienestä laatan koosta suurempaan, häviää tuloksissa saatu ero lähes kokonaan. Tarkastellun rakenteen materiaaliominaisuudet vastaavat teräksen ominaisarvoja.

| VERIFICATION EXAMPLE | |
|--|--|
| TEST IC13 - skew plate normal pressure | |
| Name of the test: | IC13 |
| Reference: | NAFEMS LSB1 |
| Specification: | Linear static analysis of an elastic plate |
| GEOMETRY: Thickness = 0.01 m | |



DATA DEFINITION:

| | |
|----------------------|---|
| Loading: | Normal pressure -0.7 kPa in the vertical Z direction. |
| Boundary condition: | Simple supports (no z-displacement) for all edges. |
| Material properties: | Isotropic, E=210e3 MPa, ni=0.3 |
| Element type: | shell 8-node quadrilaterals |
| DATA FILE: | Nafems_IC13.rtd |

RESULTS COMPARISON:

| Mesh refinement | Maximum principal stress on the lower surface at the plate center | | |
|-----------------|---|--------|------------|
| | NAFEMS | Robot | Difference |
| 2x2 | 0.757 | 0.5253 | 34.50 % |
| 4x4 | 0.795 | 0.7214 | 10.04 % |
| 8x8 | --- | 0.7163 | 10.68 % |
| 16x16 | --- | 0.7678 | 4.26 % |
| 32x32 | --- | 0.7998 | 0.27 % |

TARGET: 0.802 MPa

Kuva 4.2. Geometrian suhde laskentaepätarkkuuteen normaaliakselin suuntaisesti kuormitetussa laatasta. (Autodesk 2008).

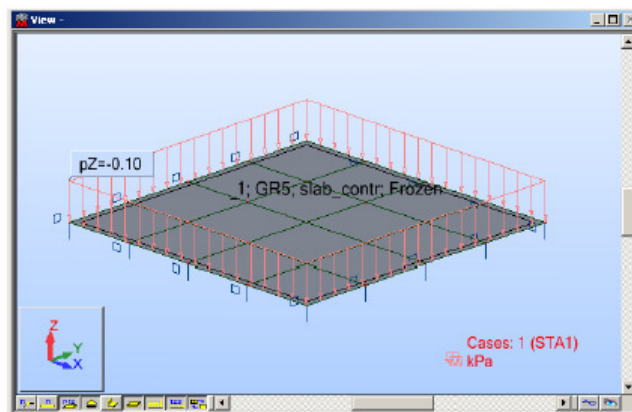
Dynaamisesti kuormitetuissa rakenteissa ovat laskennan epätarkkuudet suurempia, koska laskenta muuttuu kuormitustyyppistä johtuen huomattavasti monimutkaisemmaksi. Kuvassa 4.3 on esitetty dynaamisesti kuormitetun laatan lähtötietoja, jossa laattojen mitoiksi on valittu kolme eri vaihtoehtoa (4x4, 8x8 ja 16x16). Materiaaliominaisuudet vastaavat edelleen teräksen ominaisarvoja, jonka kimmoiset materiaaliominaisuudet tulee ottaa huomioon tuloksissa.

VERIFICATION EXAMPLE

TESTS No 13 - Vibrations of Simply Supported Thin Plate

Name of the test: 13, 13H, 13P, 13T
Reference: NAFEMS R0016
Specification: Dynamic analysis of an elastic plate

GEOMETRY: Length: $A = B = 10$ m
Thickness: $t = 0,05$ m



DATA DEFINITION:

Loading: Uniform planar load $F_0=100$ [N/m²] ($F_0=0,1$ [kN/m²])
Boundary condition: $X=Y=RZ=0$ (at all nodes - Plate)
 $Z=0$ (at all edges)
 $RX=0$ (along edges $X=0$ & $X=10$ m)
 $RY=0$ (along edges $Y=0$ & $Y=10$ m)
Material properties: $E=200 \times 10^9$ N/m²; $\nu=0,3$; $\rho=8000$ kg/m³
Element type: 4-node quadrilateral shell elements
(three models of mesh considered: 4x4, 8x8, and 16x16 elements).

RESULTS COMPARISON:

Kuva 4.3. Dynaamisesti kuormitetun laatan lähtötiedot.

Kuvassa 4.4 on esitetty edellisen kuormitustapauksen tulokset. Modesarakeeseen on lueteltu muutamia rakenteen ominaisvärähtelymuotoja, joita laatta-rakenteella on käytännössä ääretön määrä. On huomattavaa, että muuttuvilla värähtelytaajuuksilla laskentatulosten tarkkuus vaihtelee merkittävästi. Tulokset ovat RSA:ssa kuitenkin varmemmalla puolella, eikä näin ollen vaikuta merkittävästi mitoitettavan rakenteen kestävyteen.

Results of Modal Analysis (13)

| OUTPUT: Frequencies [Hz] | | | |
|--------------------------|--------|------------------------|------------|
| Modes | NAFEMS | Robot (meshing 4x4) | Difference |
| 1 | 2.377 | 2.512 | 5.68% |
| 2&3 | 5.942 | 7.071 | 19.00% |
| 4 | 9.507 | 11.738 | 23.47% |
| 5&6 | 11.884 | 16.559 | 39.34% |
| 7&8 | 15.449 | 21.311 | 37.94% |

| Modes | NAFEMS | Robot (meshing 8x8) | Difference |
|-------|--------|------------------------|------------|
| 1 | 2.377 | 2.410 | 1.39% |
| 2&3 | 5.942 | 6.216 | 4.61% |
| 4 | 9.507 | 10.047 | 5.68% |
| 5&6 | 11.884 | 13.201 | 11.08% |
| 7&8 | 15.449 | 17.073 | 10.51% |

| Modes | NAFEMS | Robot (meshing 16x16) | Difference |
|-------|--------|--------------------------|------------|
| 1 | 2.377 | 2.385 | 0.34% |
| 2&3 | 5.942 | 6.009 | 1.13% |
| 4 | 9.507 | 9.638 | 1.38% |
| 5&6 | 11.884 | 12.201 | 2.67% |
| 7&8 | 15.449 | 15.840 | 2.53% |

Kuva 4.4. Dynaamisesti kuormitetun laatan tulokset. (Autodesk 2008).

5 POHDINTAA

Tässä opinnäytetyössä on kerrottu yleisiä asioita rakennesuunnittelussa käytettävän elementtimenetelmän teoriasta ja elementtimenetelmän perusperiaatteet sekä esitelty erilaisia laskentamalleja menetelmään liittyen. Rakenteen mitoituksen kulkua on käsitelty hyvin yleisellä tasolla ja lukijan vastuulle on jätetty yksityiskohtaisempi perehtyminen rakenteen mitoituksen perusteisiin. Työhön liittyen tuotettiin ohjelmistoon liittyvä toimintamalliohje (liite 1) yleisimmin käytetyille yksittäisille rakenteille.

Mitoitusohjelmistot ovat tulossa yhä vahvemiksi osaksi rakennesuunnittelua. Suunnittelumarkkinoiden ja -aikataulujen kiristyessä pyrkivät suunnittelutoimistot hyödyntämään tehokkaita ja nopeasti tuloksia tuottavia ohjelmistoja vähintäänkin osana rakennushankkeen rakenneteknistä suunnittelua. Ohjelmistot ovat nykyään hyvin pitkälle suunniteltuja ja testattuja, joten tulosten oikeellisuus on vähintään hyvää luokkaa, eikä työhön liittyvissä rakenteiden suunnittelussa esiintynyt ongelmia ohjelman käytettävyydessä tai tulosten oikeellisuudessa.

Eriyisen tehokkaaksi työkaluksi mallinnusohjelmisto osoittautui monimutkaisten rakenteiden, kuten ristiin kantavan laatan sekä erilaisten liitosten mitoituksessa, jotka käsin laskettaessa ovat erityisen työläitä.

Eriyistä huomiota tulisi kiinnittää erilaisten rasiusten tulkintaan poikkeustapa-uksissa, mutta ohjelmisto on tässä suhteessa mitoituksen kannalta varmemmal- la puolella ja käyttäjän vastuulle siirtyy tulosten mahdollinen pyöristäminen.

LÄHTEET

Lähteenmäki, M. 2007. Elementtimenetelmän perusteet.

http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Autodesk. 2008. Autodesk Robot Structural Analysis 2010: Verification manual.

Liite 1:

**Autodesk Robot Structural Analysis 2010
- toimintamalliohje**

Sisällys


| | |
|---------------------------------------|----|
| JOHDANTO | 3 |
| 1 PALKKI | 3 |
| 1.1 Palkkityöympäristön valinta | 3 |
| 1.2 Mitat | 3 |
| 1.3 Reikä | 4 |
| 1.4 Kuormat | 4 |
| 1.5 Rakenteelliset vaatimukset | 5 |
| 1.6 Laskenta-asetukset | 5 |
| 1.7 Rauditusasetukset | 6 |
| 1.8 Laskenta | 6 |
| 1.9 Laskelmat | 6 |
| 1.10 Piirustukset | 7 |
| 2 PILARI | 7 |
| 2.1 Pilarityöympäristön valinta | 7 |
| 2.2 Mitat | 7 |
| 2.3 Kuormat | 8 |
| 2.4 Rakenteelliset vaatimukset | 9 |
| 2.5 Laskenta-asetukset | 9 |
| 2.6 Rauditusasetukset | 9 |
| 2.7 Laskenta | 10 |
| 2.8 Tulokset | 10 |
| 2.9 Laskelmat | 10 |
| 2.10 Piirustukset | 11 |
| 3 LAATTA | 11 |
| 3.1 Laattatyöympäristön valinta | 11 |
| 3.2 Slab Wizard | 11 |
| 4 ANTURA | 13 |
| 4.1 Anturatyöympäristön valinta | 13 |
| 4.2 Mitat | 13 |
| 4.3 Maaperä | 14 |
| 4.4 Toispuoleinen täyttö | 15 |
| 4.5 Kuormat | 15 |
| 4.6 Rakenteelliset vaatimukset | 16 |
| 4.7 Geotekniset vaatimukset | 16 |
| 4.8 Laskenta-asetukset | 16 |
| 4.9 Rauditusasetukset | 16 |
| 4.10 Laskenta | 17 |
| 4.11 Tulokset | 17 |
| 4.12 Laskelmat | 17 |
| 4.13 Piirustukset | 17 |


JOHDANTO

Tämän pikakäyttöohjeen tarkoitus on helpottaa Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmiston käyttöä suunnittelutoimistossa perusrakenteiden mitoituksessa ja perehdyttää käyttäjä mahdollisimman yksinkertaisesti ohjelmiston peruskäyttöön. Ohjeessa on käsitelty tavallisten teräsbetonirakenteiden (palkki, pilari, laatta ja antura) mitoitus.

1 PALKKI

1.1 Palkkityöympäristön valinta

Kun käynnistät ohjelman, aukeaa käynnistyksen jälkeen **Select project** -valikko. Valitse , jolloin pääset palkkityöympäristöön.

Jos olet jo valmiiksi ohjelmassa, pääset palkkityöympäristöön valitsemalla **File** → **New Project** → .

Valitse lopuksi vielä suunnittelumalli ylävalikosta **Layouts** → **Beam definition**.

1.2 Mitat

Palkkityöympäristöön aukeaa kolme palkin mittatietoihin liittyvää ikkunaa: **Beam view**, **Dimension Definiton** ja **Section Definiton**.

Beam-View

Beam-View-ikkuna näyttää palkin 3D-mallina päämittoineen. Näkymää voi liikuttaa hiirellä vaaka- ja pystysuunnassa pitämällä rullanäppäintä pohjassa.

Näkymää voi pyörittää kolmiulotteisena liikuttamalla hiirtä ja pitämällä Shift- ja hiiren rullanäppäintä pohjassa. Zoomaus tapahtuu hiiren rullaa pyörittämällä.

Dimension Definition

Beam Geometry -välilehdeltä voidaan määrittää palkin kokonaispituus, jännemäärät (*spans*) ja -välit sekä ulokkeet (*cantilever*).

Span Geometry -välilehdeltä voidaan muuttaa tietyn yksittäisen jänteen mittoja ja liitostapaa. Muutettava jänne tulee ensin valita **Beam-View** -ikkunasta punaiseksi.

Segments-välilehdeltä voidaan määrittää palkin muoto.



- *Dimension Definition* -ikkuna aukeaa painikkeella 

Section Definition

General parameters -välilehdeltä määritetään poikkileikkauksen muoto ja mitat.



- *Section Definition* -ikkuna aukeaa tarvittaessa *Cross - section type* -painikkeella

1.3 Reikä

Openings

Reikiä voidaan määrittää **Openings**-työkalulla. Määritä reiän muoto, koko ja sijainti x- ja z-akselin suhteen.

Consider during in calculations -valinta ottaa reiän huomioon laskennassa.

Mikäli reikiä on useita, voi halutun reiän valita << >> painikkeilla ja muokata jälkikäteen.



- *Openings*-ikkuna aukeaa painikkeella
- *Muista tarkistaa, että olet valinnut oikean jännevälän (Span number), jossa reikä sijaitsee.*

1.4 Kuormat

Loads definition

Palkkiin kohdistuvia kuormia voidaan määrittää **Loads definition** -työkalulla.

Rakenteen omapaino otetaan laskennassa automaattisesti huomioon, mikäli kohta **Calculation Options** → **Advanced Options** → **Self-weight taken into account** on valittu. Tällöin omapainoa ei tarvitse erikseen määrittää.

Kuormien määrittämisen vaiheet **Distributed loads** -ikkunassa:

1. Määritä kuorman järjestysnumero (*Case number*)
2. Valitse jänneväli tai -välit (*Spans*), johon kuormitus kohdistuu
3. Valitse kuorman luokitus (*Nature*)
4. Valitse kuorman tyyppi (*Load category*), esim. tasainen kuorma tai pistekuorma

- 5
 - a. Määritä, miten tasainen kuorma on jakautunut kuormitetulle alueelle ja määritä kuormien G ja Q suuruus
 - b. Määritä pistekuorman sijainti ($x1$ ja $x2$), mahdollinen kuormitusjako (n) ja kuormien G ja Q suuruus
6. Lisää kuorma valitsemalla **Add**

Lisättyjä kuormia voidaan tarkastella ja muuttaa **Foundation Load**-ikkunassa valitsemalla << >> painikkeilla haluttu kuormitustapaus, tekemällä haluttu muutos ja painamalla lopuksi **Modify**-painiketta.

Kuormia voidaan muokata myös taulukosta valitsemalla ylävalikosta **Layouts** → **Beam loads**. Vastaavat kuormat näkyvät **Beam-Load Pattern**-ikkunassa.



- Tarkista, että kuorman osavarmuusluku vastaa standardissa esitettyä arvoa.

1.5 Rakenteelliset vaatimukset

Story Parameters

Palkin rakenteellisia vaatimuksia voidaan määrittää **Story Parameters**-työkalulla:

- *Environment class* = rasitusluokka, SFS-EN 1992-1-1 taulukko 4.1 s. 48
- *Admissible cracking* = suurin sallittu halkeaman leveys, SFS-EN 1992-1-1, taulukko 7.1N s.118
- *Concrete age* = betonin käyttöikä. *SFS-EN 1990, taul. 2.1*
- *Concrete age (loading moment)* = betonin ikä kuormituksen alkaessa
- *Relative environment humidity* = ympäristön suhteellinen kosteus
- *Concrete creep coefficient* = betonin virumaluku. *SFS-EN 1992-1-1, kuva 3.1*
- *Structure class* = rakenteen vaatimusluokka. *SFS-EN 1992-1-1 kohta 4.4.1.2(5)*
- *Quality accuracy system* = mittapoikkeaman laadunvalvonta



- *Story parameters* -ikkuna aukeaa painkeella 

1.6 Laskenta-asetukset

Calculation options

Laskennassa käytettävien materiaalien lujuuksia ja mittatietoja voidaan määrittää **Calculation options** -työkalulla:

- **General**-välilehdellä määritetään yleiset mitoitus ehdot
- **Concrete**-välilehdellä määritetään betonin ominaisuudet
- **Longitudinal reinforcement** -välilehdellä määritetään pääterästen ominaisuudet
- **Transversal reinforcement** -välilehdellä määritetään hakojen ominaisuudet

1.7 Raudoitusasetukset

Reinforcement pattern

Raudoituksen tarkemmat asetukset määritetään **Reinforcement pattern** -työkalulla.

- **General**-välilehdellä määritetään raudoituksen yleiset asetukset, kuten: raudoituslohko, tankojen mitat, taivutukset, pääraudoituksen halkaisija, tankojen vapaavälit ja ankkurointi
- **Bottom reinforcement** -välilehdellä määritetään alapinnan terästen kerrosmäärä
- **Top reinforcement** -välilehdellä määritetään yläpinnan terästen kerrosmäärä
- **Transversal reinforcement** -välilehdellä määritetään hakojen etäisyydet ja haotustapa
- **Construction reinforcement** -välilehdellä määritetään työ- ja tartuntaterästen halkaisija, laatu, muoto ja ankkurointi.
- **Shapes**-välilehdellä määritetään terästen taivutukset



- Raudoituksia voi tarkastella ja tarvittaessa muokata jälkikäteen valitsemalla **Layouts** → **Reinforcement Table**

1.8 Laskenta


Aloita laskenta valitsemalla **Start calculations** → **Calculation Option Set** → **Calculations** 

1.9 Laskelmat

Calculation note

Mitoituksen tulokset saadaan näkyviin **Calculation note** -työkalulla. Valikosta voidaan valita laskelmassa esitetyt tiedot.


1.10 Piirustukset


Piirustukset on suositeltavaa kääntää .dxf-muotoon ja käsitellä ne erikseen AutoCAD-ohjelmalla. Valitse **Drawings**  tai **Final Drawings** yläreunan **Layout**-valikosta.

Kääntäminen tapahtuu valitsemalla **File** → **Save Drawing in a Different Format...**

2 PILARI

2.1 Pilarityöympäristön valinta

Kun käynnistät ohjelman, aukeaa käynnistyksen jälkeen **Select project** -valikko. Valitse **RC Column Design** , jolloin pääset pilarityöympäristöön.

Jos olet jo valmiiksi ohjelmassa, pääset pilarityöympäristöön valitsemalla **File** → **New Project** → **RC Column Design** .

Valitse lopuksi vielä suunnittelumalli ylävalikosta **Layouts** → **Column definition**.

2.2 Mitat

Pilarityöympäristöön aukeaa kolme pilarin mittatietoihin liittyvää ikkunaa: **Column-View**, **Column-Section** ja **Sections**.

Column-View

Column-View -ikkuna näyttää pilarin 3D-mallina päämittoineen. Näkymää voi liikuttaa hiirellä vaaka- ja pystysuunnassa pitämällä rullanäppäintä pohjassa.

Näkymää voi pyörittää kolmiulotteisena liikuttamalla hiirtä ja pitämällä Shift- ja hiiren rullanäppäintä pohjassa. Zoomaus tapahtuu hiiren rullaa pyörittämällä.


Column-Section

Column-Section -ikkuna näyttää pilarin poikkileikkauksen 2D-mallina. Zoomaus tapahtuu hiiren rullaa pyörittämällä.

Sections

Sections-ikkunasta määritetään poikkileikkauksen muoto ja mitat.



- *Sections-ikkuna aukeaa tarvittaessa Cross-section type -painikkeella* 

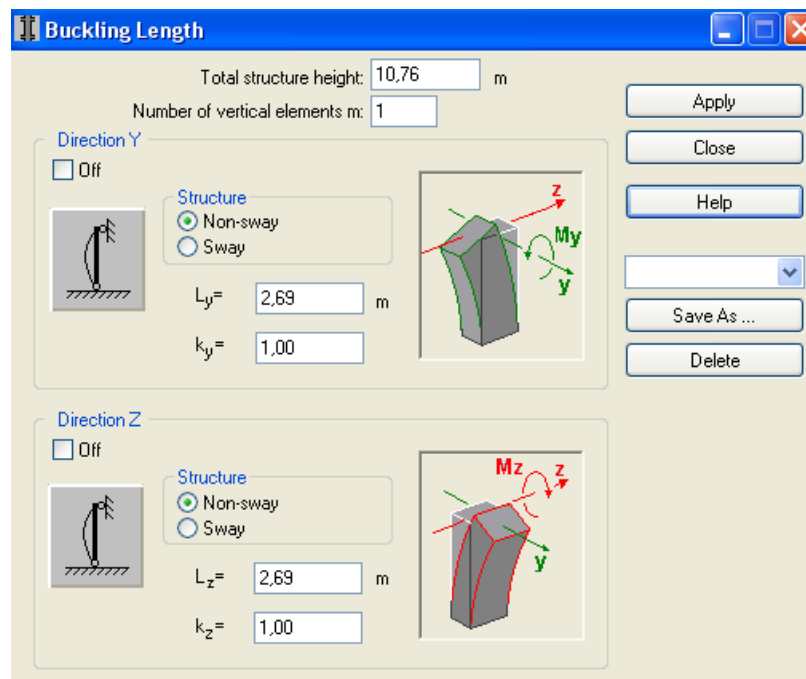
Elevation dimensions


Elevation dimensions -ikkunasta määritetään pilarin korkeudet.

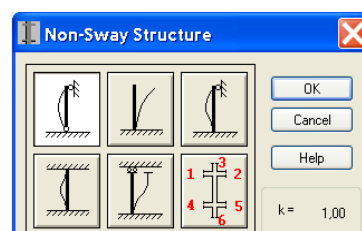
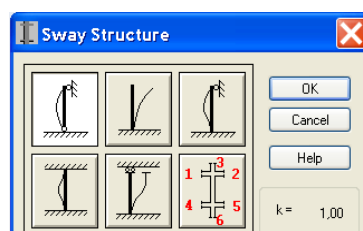
L = rakenteen kokonaiskorkeus
Hb = mitta palkin alapinnasta laatan yläpintaan
Hp = laatan paksuus


Buckling length

Nurjahduspituus ja pilarin yläpään kiinnitystapa määritetään **Buckling length** -ikkunasta.




Pilarin yläpään jäykistystapaa ja nurjahdusmuotoa voi muuttaa painamalla Buckling Length -ikkunan vasemmasta laidasta kuvaketta, jolloin aukeaa Sway Structure/Non-Sway Structure -ikkuna 



Kaksoispainalluksella painiketta  voidaan määrittää mitoitettavan pilarin tuenta muihin ympäröiviin rakenteisiin.



- *Buckling length* -ikkuna aukeaa painikkeella 
- *Nurjahduskertoimen k voi syöttää suoraan kenttään, mikäli se on tiedossa.*

2.3 Kuormat

Loads definition

Pilariin kohdistuvia kuormia voidaan määrittää **Loads definition** -työkalulla.

| | | |
|-----|---|--|
| N | = | pilariin kohdistuva normaalivoima [kN] |
| MyA | = | momentti pilarin yläpäässä [kN*m] |
| MyB | = | momentti pilarin alapäässä [kN*m] |
| MyC | = | momentti pilarin keskellä [kN*m] |



- *Tarkista, että kuorman osavarmuusluku vastaa standardissa esitettyä arvoa.*

2.4 Rakenteelliset vaatimukset

Story Parameters

Pilarin rakenteellisia vaatimuksia voidaan määrittää **Story Parameters** -työkalulla, ks. kohta 2.5.

2.5 Laskenta-asetukset

Calculation options

Laskennassa käytettävien materiaalien lujuuksia ja mittatietoja voidaan määrittää **Calculation options** -työkalulla, ks. kohta 2.6.

2.6 Rauditusasetukset

Reinforcement pattern

Raudituksen tarkemmat asetukset määritetään **Reinforcement pattern** -työkalulla.

Longitudinal Bars -välilehdellä määritetään pääraudoituksen yleiset asetukset:

- kulmaterästen halkaisija ja kerrosmäärä (*Corner bars*)
- väliterästen halkaisija ja kerrosmäärä (*Intermediate bars*)
- työterästen halkaisijat ja haotus (*Constructional bars*)
- raudoituksen yleinen haotus (*All tied*)
- terästankojen vapaavälit (*Spacing limit*)

Transversal Bars -välilehdellä määritetään hakaterästen asetukset:

- hakavälit ja asettelu (*Elevation*)
- haotustyyppi (*Section*)

Dowel Bars -välilehdellä määritetään pilarin yläpinnan tartunnan asetukset:

- minimitartuntapituus ja haotus
- ylempään pilariin liitettävät teräksiset (*Connection to the upper column*)
- taivutettujen tartuntaterästen asetukset (*Bent bars*)

Shapes-välilehdellä määritetään terästen taivutukset





- Tarkista, että **Shapes**-välilehdellä pilarin poikkileikkaus vastaa mitoittavaa pilaria



2.7 Laskenta

Aloita laskenta valitsemalla **Start calculations**  → **Calculation Option Set** → **Calculations**

2.8 Tulokset

Valitse **Layouts** → **Column results**, jolloin aukeaa **N–M interaction diagram** -ikkuna , eli normaalivoiman ja momentin vuorovaikutuskäyrä. Nuolen tulee pysyä käyrän oikealla puolella, jolloin pilarin kapasiteetti staattisille rasituksille on riittävä.


My–Mz interaction diagram  on My–Mz-vuorovaikutus-käyrä. Nuolten tulee pysytellä punaisen ympyrän sisäpuolella, jolloin pilarin kapasiteetti staattiselle rasitukselle on riittävä.

3D-näkymää voi pyörittää viemällä hiiren osoitin mallin päälle, jolloin ilmestyy  -ikoni ja liikuttamalla hiirtä pitäen samalla Shift+hiiren vasenta näppäintä pohjassa. Zoomaus tapahtuu viemällä hiiren osoitin taustan päälle, jolloin ilmestyy  -ikoni ja liikuttamalla hiirtä pitäen samalla Shift+hiiren vasenta näppäintä pohjassa.

Mallin tarkasteltavaa kapasiteetin leikkaustasoa voidaan säätää oikean puoleisesta leikkauskuvasta liikuttamalla hiirtä ja pitämällä samalla hiiren vasenta näppäintä pohjassa. Nuolten kärjet näkyvät leikkauskuvassa rasteina, kun leikkaustaso on niiden kanssa samassa tasossa.

2.9 Laskelmat

Calculation note


Mitoituksen tulokset saadaan näkyviin **Calculation note**  -työkalulla. Valikosta voidaan valita laskelmassa esitetyt tiedot.


2.10 Piirustukset

Piirustukset on suositeltavaa kääntää .dxf-muotoon ja käsitellä ne erikseen AutoCAD-ohjelmalla, ks. kohta 2.10.

3 LAATTA

3.1 Laattatyöympäristön valinta

Kun käynnistät ohjelman, aukeaa käynnistyksen jälkeen **Select project** -valikko. Valitse **RC Slab Design** , jolloin pääset laattatyöympäristöön.

Jos olet jo valmiiksi ohjelmassa, pääset laattatyöympäristöön valitsemalla **File** → **New Project** → .

3.2 Slab Wizard





Slab Wizard -työkalulla on tarkoitettu yksinkertaisen laatan luontiin. Helpointa työkalulla on tehdä nelikulmainen laatta, mutta vaihtoehtona on myös monikulmainen työkalu.

Geometry-välilehdellä määritetään laatan päämitat:


- Shape-valikosta valitaan joko nelikulmainen (*Rectangle*) tai vapaamuotoinen vaihtoehto (*User*).

Valitsemalla *Rectangle*, määritetään laatan paksuus (*Thickness*) ja sivujen pituudet (*Lx ja Ly*).

Valitsemalla *User*, muuttuu valikko taulukoksi, johon määritetään laatan solmupisteet x- ja y-koordinaatistossa. Laatan paksuus määritetään kohtaan (*Thickness*).

-  Mittaverkosto päällä/pois
-  Muuttaa koordinaatiston origon paikkaa
-  Mittaverkoston asetukset
-  Solmupisteet voidaan määrittää hiirellä suoraan mittaverkostoon

Openings-välilehdellä määritetään laatan reiät merkitsemällä taulukkoon reiän mitat ja koordinaatit tai määrittämällä reikä suoraan mittaverkostoon.


-  Määritetään reiän vasen alanurkkapiste suoraan mittaverkostoon. Reiän mitat ja koordinaatit ovat muokattavissa jälkeinpäin taulukosta.


Support-välilehdellä määritetään laatan tuenta.

Valitsemalla *Floor slab* käsitellään laattaa kerrostasolaattana, joka on sivuilta tuettu.

Walls-välilehdeltä määritetään laattaa tukevat seinät joko suoraan koordinaatistoon tai mittaverkostoon. Taulukkoon määritetään myös seinän paksuus (*Width*) sekä laatan ja seinän välinen kiinnitystapa (*Type*).

Columns-välilehdeltä määritetään laattaa tukevat pilarit joko suoraan koordinaatistoon tai mittaverkostoon. Taulukkoon määritetään myös pilarin mitat, muoto (*Section*) sekä laatan ja seinän välinen kiinnitystapa (*Type*).

-  Määritetään pilarin keskipiste suoraan mittaverkostoon. Pilarin asetukset on muokattavissa jälkeinpäin taulukosta.

-  Määritetään seinän alku- ja loppupisteet suoraan mittaverkostoon. Seinälinjojen asetukset on muokattavissa jälkeinpäin taulukosta.

Valitsemalla *Raft foundation* käsitellään laattaa maanvaraisena laattana, jolloin tulee määrittää maan kimmokerroin K [kN/m³]. Kimmokertoimen voi laskea valitsemalla *Calculation of elasticity coefficient*.

Loads-välilehdellä määritetään laatalle kohdistuvat kuormat:

Planar = tasokuorma
Linear = viivakuorma

Nodal = pistekuorma
Uniform = tasainen kuorma koko laattalla
Contour = tasainen kuorma tietyllä osalla laattaa
osoitettu nurkkapisteillä

Kuormat voidaan määrittää joko käsin taulukkoon tai hiirellä suoraan mittataulukkoon. Kuormat ovat muokattavissa jälkepäin taulukosta.



- *Take self-weight into account* -valinta ottaa mitoituksessa huomioon rakenteen oman painon.


Calculation parameters -välilehdellä määritetään laatan materiaali- ja raudoitusasetukset.

Luo laatta valitsemalla lopuksi **Generate**.

Kun laatta on luotu, mitoita laatta valitsemalla **Calculate** tai **Calculations**.

4 ANTURA

4.1 Anturatyöympäristön valinta


Kun käynnistät ohjelman, aukeaa käynnistyksen jälkeen Select project -valikko. Valitse *Shallow Foundation Design* , jolloin pääset antura-työympäristöön.

Jos olet jo valmiiksi ohjelmassa, pääset anturatyöympäristöön valitsemalla **File** → **New Project** → 

Valitse lopuksi vielä suunnittelumalli ylävalikosta **Layouts** → **Foundation-definition**.

4.2 Mitat Antura-työympäristöön ensimmäiseksi aukeaa *Dimensions*-ikkuna, jossa määritellään anturan geometria.



- *Dimensions*-ikkuna aukeaa tarvittaessa *Item dimensions* -painikkeella 

General-välilehdeltä määritellään anturan tyyppi (Foundation type), poikkileikkaustyyppi (Geometry type), perusmitat (Basic dimensions).



- *Ohjelma optimoi anturan mitat automaattisesti. Mikäli haluat määrittellä mitat itse, valitse "Fixed" ja syötä haluttu mitta.*

Pier-välilehdeltä määritellään anturan kiinnitystapa peruspilariin tai -muuriin.

| | |
|----------|--|
| Plain | Sisäinen suljettu rauditus, jossa antura ja perusmuuri/-pilari ovat paikallavalettuja. |
| Doweled | Tappiliitos, joka on ankkuroitu anturan alapintaan. Perusmuuri/-pilari ovat |
| Bolted | Pulttiliitos, jossa pilarielementti kiinnitetään anturaan jälkeinpäin. |
| Socketed | Istukkaliitos, jossa pilarielementille jätetään varaus anturan yläpintaan. |

Optimization-välilehdeltä määritellään anturan optimointiperusteet.

Shape selection option -valikoista määritellään anturan muodon valintaperusteet.

| | |
|---------------------------------------|--|
| Without limits | Rajoittamaton |
| Square footing | Neliö |
| Fixed ratio of footing | Anturan sivumittojen A ja B |
| Sides | Keskinäinen suhde |
| Homothetic footing | Anturan sivumitat ovat riippuvaisia pilarin sivumitoista |
| Equal offsets | Keskitetty anturan sijoitus pilariin nähden |
| Minimize stresses during optimization | Minimoi rasitukset anturan mittoja valittaessa |
| Optimization step | Mittaporrastus optimoinnissa (esim. 1M=100 mm) |

Limited by adjacent footing -valikoista määritellään pilarin vähimmäisetäisyys seinän sisäpinnasta x- ja y-suunnassa (esim. reuna-/nurkkapilari).

| | |
|---------------------------------------|---|
| Moment transferred to the ground beam | Pilarista suoraan maahan siirtyvän momentin osuus x- ja y-suunnassa |
|---------------------------------------|---|

4.3 Maaperä

Soils-työkalulla määritellään maaperään liittyvät asetukset:

| | |
|-------------------------|---|
| Backfill heights | N1 = täyttömaan korkeus |
| Pier level | Na = anturan ja pilarin välisen liitoksen korkeus |
| Minimum reference level | Nf = alin viittaustaso |
| Water level | Max. = pohjaveden pinnan ylin korkeus Min. = pohjaveden pinnan alin korkeus |
| Stress | Calculated = sallittu pohjapaine laskettu maa-parametrien perusteella Allowable = sallittu pohjapaine määritetään käsin (esim. pohjatutkimusten perusteella) |

Soil → Edit database Käytössä olevien maalajien tietokanta

4.4 Toispuoleinen täyttö


Site Definition

Site Definition -ikkunasta valitaan täytön todellista epätasaisuutta vastaava kuormitustapaus.

Määritä täyttöjen korkeudet N_1 ja N_2 Soils-ikkunasta.


N1 = täyttömaan ylempi korkeus
N2 = täyttömaan alempi korkeus



- Site Definition -ikkuna aukeaa tarvittaessa painikkeella 


4.5 Kuormat

Loads definton

Anturaan kohdistuvia kuormia voidaan määrittää painamalla **Loads defintion** -painiketta  , jolloin aukeaa **Foundations Loads** -ikkuna.

Rakenteen omapaino otetaan laskennassa automaattisesti huomioon, mikäli **Calculation Options** → **Advanced Options** → **Self-weight taken into account** on valittu. Tällöin rakenteen omapainoa ei tarvitse erikseen määrittää kuormitustapauksiin.

Kuormien määrittelyn vaiheet *Foundation Load* -ikkunassa:

1. Määritä kuormitusyhdistelmän nimi (*Case*)
2. Valitse kuorman luokitus (*Nature*)
3. Valitse kuorman kategoria (*Load category*) ja määritä ryhmän järjestysnumero (*Group*)
4. Valitse kuormitustapaus 
5. Määritä rasiusten suuruudet (*Value*)
6. Lisää kuorma valitsemalla **Add**

Lisättyjä kuormia voidaan tarkastella ja muokata **Foundation Load** -ikkunassa valitsemalla << >> painikkeilla haluttu kuormitustapaus, tekemällä haluttu muutos ja painamalla lopuksi **Modify**-painiketta.

Kuormitustapauksia voidaan tarkastella myös **Foundation-Loads** -taulukosta valitsemalla **Layouts** → **Foundation – load**.

4.6 Rakenteelliset vaatimukset

Story Parameters

Anturan rakenteellisia vaatimuksia voidaan määrittää **Story Parameters** -asetuksilla, ks. kohta 2.5.

4.7 Geotekniset asetukset

Geotechnical Options

Geoteknisen mitoituksen asetuksia voidaan määrittää **Geotechnical Options** -työkalulla.

Mitoituksessa käytetään esistandardia ENV 1997-1:1994.

General-välilehdellä määritetään geoteknisen mitoituksen yleiset ehdot.

Cases-välilehdellä määritetään rajatilamitoituksen asetukset.

4.8 Laskenta-asetukset

Calculation options

Laskennassa käytettävien materiaalien lujuuksia ja mittatietoja voidaan määrittää **Calculation options** -työkalulla, ks. kohta 2.6.

4.9 Raudoitusasetukset

Reinforcement Pattern

Raudoituksen tarkemmat asetukset **määritetään Reinforcement pattern** -työkalulla.

Footing-välilehdellä määritetään anturan raudoitustasojen yleiset asetukset:

- raudoitustankojen vapaavälit (*Bar spacing*)
- käytettävä halkaisija (*Diameter*)
- raudoitustapa (*Reinforcement type*)
- yläpinnan teräkset valitsemalla **Advanced**

Pier-välilehdellä määritetään peruspilarin raudoituksen yleiset asetukset:

- raudoitustapa (*Reinforcement type*)
- anturatyypin (*Elevation*)
- terästen halkaisijat
- hakavälit

Dowel Bars -välilehdellä määritetään tartuntaan liittyvät asetukset:


- liitos pilariin/seinään (*Connection to column/walls*)
- ankkurointipituus (*Lenght*)
- tartuntaterästen halkaisija (*Diameter*)
- teräsmäärä (*Number of dowel bars*)
- haotus (*Stirrup*)

Shapes-välilehdellä määritetään terästen taivutukset

4.10 Laskenta


Aloita laskenta valitsemalla **Start calculations**  → **Calculation Option Set** → **Calculations**

4.11 Tulokset


Diagram Set  -työkalulla voidaan tarkastella laskennassa käytettyjä eri kuormitustapauksia ja niiden käyttöasteita. Valitse **Results**-ikkunan **Design combinations** -taulukosta haluttu murto- tai käyttö-

rajatilan kuormitustapaus. Mitoittava kuormitustapaus on merkitty violetilla värillä.

4.12 Laskelmat

Mitoituksen tulokset saadaan näkyviin **Calculation note** -työkalulla  . Valikosta voidaan valita laskelmassa esitetyt tiedot

4.13 Piirustukset

Piirustukset on suositeltavaa kääntää .dxf-muotoon ja käsitellä ne erikseen AutoCAD-ohjelmalla. Valitse **Drawings**  -työkalu tai **Final Drawings** -layout.

Kääntäminen tapahtuu valitsemalla **File** → **Save Drawing in a Different Format...**