

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Ville Kantelinen

TERÄSBETONILAATAN MITOITUS AUTODESK ROBOT STRUCTURAL
ANALYSIS PROFESSIONAL 2015 -OHJELMALLA

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2015



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
(013) 260 6800

Tekijä
Ville Kantelinen

Nimeke
Teräsbetoni laatan mitoitus Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 -ohjelmalla

Toimeksiantaja
Insinööritoimisto Kantelinen Oy ja Karelia -ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä eurokoodin mukaiseen teräsbetoni laatan mitoitusprosessiin Autodesk Robot Structural Analysis 2015 FEM-menetelmällä toimivalta ohjelmalla ja luoda toimenpiteestä käyttöohje Insinööritoimisto Kantelinen Oy:lle sekä Karelia-ammattikorkeakoululle. Tarkoituksena oli suorittaa vertailulaskelmia myös muiden ratkaisumenetelmien kanssa ja siten tarkastella Robotilla saatujen tulosten luotettavuutta.

Työn alussa koulutusta ja konsultointia Robotin käyttöön tilattiin ohjelman asiantuntijalta, Insinööritoimisto HM-suunnittelu Oy:n Markku Jolkkoselta. Myös Autodeskin verkko-opetusmateriaalia ja verkko-tukea käytettiin hyväksi. Kun ohjelman käytöstä oli saavutettu riittävät valmiudet, aloitettiin ohjeen kirjoitus. Ohjeen laatimisen lisäksi suoritettiin vertailulaskelmia Robotin, TASSU-ohjelman sekä erilaisten käsin laskettavien ratkaisumenetelmien välillä, kuten Massiva Betongplattor. Lisäksi vertailtiin myös eurokoodin ja vanhan RakMk:n B-sarjan välisiä eroja laskennallisen raudoituksen osalta.

Pääasiassa vertailusta saadut tulokset eri ratkaisumenetelmien välillä tukivat toisiaan ja osoittivat Robotilla tehdyn mitoituksen paikkansapitävyyden. Merkittävä ero muihin ratkaisumenetelmiin nähden oli Robotin kyky huomioida laattojen vapaasti tuettujen nurkkien nousu ja siitä aiheutuva vääntömomentti, joka aiheutti huomattavia eroja mm. vaadittavan raudoituksen määrässä etenkin kolmelta sivulta tuettujen laattojen tapauksissa. Eurokoodin ja RakMk:n välisen mitoituksen tuottama ero raudoituksessa osoittautui marginaaliseksi. Robot-ohjelma on otettu toimistossa käyttöön keväällä 2015 ja sen tuottamia tuloksia tullaan seuraamaan tarkasti. Tulevaisuudessa laatassa vaikuttavaan vääntöön tullaan kiinnittämään enemmän huomioita mitoitusta suoritettaessa.

Kieli

Sivuja 91

suomi

Asiasanat

Robot, teräsbetoni laatta, eurokoodit, FEM, elementtimenetelmä



THESIS
June 2015
Degree Programme in Civil Engineering

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
FINLAND
(013) 260 6800

Author
Ville Kantelinen

Title
Calculation of Reinforced Concrete Slabs Using Autodesk Robot Structural Analysis 2015
Commissioned by
Insinööritoimisto Kantelinen Oy and Karelia University of Applied Sciences

Abstract

The topic of this thesis was to explore calculation of reinforced concrete slabs using Eurocode compatible Autodesk Robot Structural Analysis 2015 FEM-analysis software and produce an instruction manual of the process for Insinööritoimisto Kantelinen Oy and Karelia University of Applied Sciences. The goal was to carry out comparative calculations between Robot and other methods, to be able to evaluate the reliability of the results.

The process was started with acquiring training and consulting from a Robot software professional Markku Jolkkonen from Insinööritoimisto HM-suunnittelu Oy. Autodesk software support and educational material on the web were also utilized. The writing of the instruction manual was initiated when sufficient knowledge with the software was achieved. After the manual was finished, several comparative calculations were implemented between Robot, TASSU-software and several manual calculation methods, such as Massiva Betongplattor -method. In addition, the differences between Eurocode and the old Finnish RakMk -standard in slabs were investigated.

The results between different solution methods essentially supported each other and thus advocated the validity of results received from Robot analysis. There was however a significant difference compared to other methods how Robot took into account the twisting moments caused by the uplift in corners of the slabs which were linearly pin supported. This effect caused significantly noticeable divergence in results with slabs which were supported from only three sides. The difference between the calculations concerning the required reinforcement done by Eurocode and RakMk -standard appeared to be very marginal. Robot software has been taken into active use in Insinööritoimisto Kantelinen Oy in spring 2015 and its results will be monitored carefully. In the future, additional attention will be paid to twisting moments affecting reinforced concrete slabs.

Language
Finnish

Pages 91

Keywords

Robot, reinforced concrete slab, Eurocode, FEM, finite element method

Sisältö

1	Johdanto	9
2	FEM-analyysi rakennesuunnittelun apuna	11
2.1	FEM-menetelmän perusteet	11
2.2	Uuteen mitoitusohjelmaan siirtyminen	12
2.3	Uuden mitoitusohjelman käyttöönoton haasteet	12
2.4	Uuden mitoitusohjelman käyttöönoton mahdollisuudet	13
3	Teräsbetonilaatan mallinnus Robotilla	15
3.1	Perusteet ja käyttöliittymä	15
3.2	Työprosessi	19
3.3	Projektin aloitus ja projektiasetusten määrittäminen	20
3.3.1	Projektin valinta (Design type)	20
3.3.2	Projektiasetukset (Job preferences)	21
3.4	Rakennemallin luonti	23
3.4.1	Referenssikuvan tuonti (DXF and DWG Backgrounds)	23
3.4.2	Moduuliverkon luonti (Structural Axis)	25
3.4.3	Näkyvyysasetukset (Display)	27
3.4.4	Laatan geometrian piirto (Floor)	28
3.4.5	Reikien lisäys (Objects)	32
3.4.6	Tukien määrittäminen (Supports)	33
3.5	Kuormat	35
3.5.1	Alkeiskuormat (Load Types)	36
3.5.2	Kuormien määrittäminen (Load Definition)	37
3.5.3	Automaattiset kuormitusyhdistelyt (Automatic Load Combinations) ..	38
3.5.4	Manuaaliset kuormitusyhdistelyt (Manual Load Combinations)	41
3.6	Analyysin parametrit ja laskenta	42
3.6.1	Ohjeita elementointiin	42
3.6.2	Elementoinnin määrittäminen (Meshing Options)	45
3.6.3	Elementoinnin luonti ja muokkaus	47
3.6.4	Laskenta (Calculations)	50
3.7	Staattisen analyysin tulokset ja vaadittu raudoitus	51
3.7.1	Jännitykset, voimasuureet ja momentit (Maps)	51
3.7.2	Raudoituksen parametrit (Reinforcement Parameters)	53
3.7.3	Raudoitus (Slab – Required Reinforcement)	56
3.7.4	Taipuman tarkastus	59
4	Tulosten vertailu	61
4.1	Analyysimenetelmät	61
4.1.1	Robot-ohjelma	62
4.1.2	TASSU-ohjelma	63
4.1.3	MBP-menetelmä	63
4.1.4	Raudoituksen mitoitus	64
4.1.5	Standardien eroavaisuudet	65
4.2	Vertailutapaukset ja tulokset	67
4.2.1	Lähtötiedot	67
4.2.2	Vähimmäisraudoitus	69

4.2.3	Laatta 1.....	70
4.2.4	Laatta 2.....	71
4.2.5	Laatta 3.....	73
4.2.6	Laatta 4a.....	74
4.2.7	Laatta 4b.....	78
4.2.8	Laatta 4c.....	79
4.2.9	Laatta 5a.....	81
4.2.10	Laatta 5b.....	83
4.2.11	Laatta 6a.....	86
4.2.12	Laatta 6b.....	87
4.3	Tulosten analyysi ja yhteenveto.....	89
5	Pohdinta.....	90
	Lähteet.....	91

Lyhenteet

μ	suhteellinen momentti
μ_d	normaaliraudoitettun rakenteen suhteellisen momentin yläraja-arvo 0,324
2D	kaksiulotteinen (2-dimensional)
3D	kolmiulotteinen (3-dimensional)
A_c	betonin poikkileikkauspinta-ala
ACC	Accidental limit state, onnettomuusrajatila
A_s	raudoituksen poikkileikkauspinta-ala
$A_{s,min}$	vähimmäisraudoituksen poikkileikkauspinta-ala
b	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys
BIM	Building Information Model, rakennuksen tietomalli
b_s	tuen toimiva leveys
CAD	Computer-aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CC	Consequence Class, seuraamusluokka
d	poikkileikkauksen tehollinen korkeus
DI	diplomi-insinööri
DOS	Disk Operating System, levynkäyttöjärjestelmä
DWG	CAD-ohjelmien tiedostomuoto
DXF	CAD-ohjelmien tiedostomuoto
EQU	rakenteen staattisen tasapainon rajatilamitoitus

f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
f_{ck}	betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
$f_{ck,cube}$	betonin kuutiolujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
f_{ctk}	betonin vetolujuuden ominaisarvo
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
f_{yd}	betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
g_d	kantavan rakenneosan omasta painosta aiheutuvan tasaisesti jakautuneen kuorman mitoitusarvo pinta-alayksikköä kohti
GEO	geoteknisen kantavuuden rajatilamitoitus
g_k	kantavan rakenneosan omasta painosta aiheutuvan tasaisesti jakautuneen kuorman ominaisarvo pinta-alayksikköä kohti
h	tarkasteltavan poikkileikkauksen korkeus
k_3	käyttörajatilassa betoniteräksen myötölujuutta pienentävä kerroin
KRT	käyttörajatila
L_x	laatan lyhyemmän sivun jännemitta
L_y	laatan pidemmän sivun jännemitta
m_{ed}	laatan taivutusmomentin mitoitusarvo
m_{max}	laatan taivutusmomentin itseisarvo tuen keskellä
MRT	murtorajatila
p_d	tasaisesti jakautuneen kokonaiskuorman mitoitusarvo pinta-alayksikköä kohti

p_k	tasaisesti jakautuneen kokonaiskuorman ominaisarvo pinta-alayksikköä kohti
q_d	tasaisesti jakautuneen hyötykuorman mitoitusarvo pinta-alayksikköä kohti
q_k	tasaisesti jakautuneen hyötykuorman ominaisarvo pinta-alayksikköä kohti
RC	Reinforced Concrete, teräsbetoni
SLS	Serviceability Limit State, käyttörajatila
SLS:CHR	Serviceability Limit State: Characteristic, käyttörajatilan ominaisyhdistelmä
SLS:FRE	Serviceability Limit State: Frequent, käyttörajatilan tavallinen yhdistelmä
SLS:QPR	Serviceability Limit State: Quasi-permanent, käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmä
STR	rakenteen kestävyys- tai siirtymätilan rajatilamitoitus
ULS	Ultimate Limit State, murtorajatila
V_{min}	itseisarvoltaan pienempi tuen keskellä vaikuttavista leikkausvoimista
z	laatan sisäinen momenttivarsi
α	Massiva Betongplattor -menetelmän mukainen momenttikerroin
γ_c	betonin materiaaliosavarmuusluku
γ_s	betoniteräksen materiaaliosavarmuusluku

1 Johdanto

Rakennusteollisuus on jatkuvaa ja nopeaa kehitystä elävä ala. On perusteltua väittää, että suunnittelutyön käytännöt ovat edenneet tietotekniikan kehityksen myötä kahden viime vuosikymmenen aikana suurin harppauksin. Tietomallinnus, 3D-suunnittelu ja FEM-menetelmä alkavat olla termeinä tuttuja monessa nykyaikaisessa suunnittelutoimistossa. Lisäksi omat muutoksensa ovat tuoneet syyskuussa vuonna 2014 rakennusmääräyskokoelman korvanneet uudet eurooppalaiset suunnittelustandardit, eli eurokoodit. Yksi rakennesuunnittelutoimistojen suurimmista haasteista on pysyä alati kehittyvien mitoitus- ja mallinnohjelmistojen sekä uusien suunnittelustandardien tuomien muutosten mukana. Uusien tietokoneohjelmien valjastaminen tehokkaaseen käyttöön suunnittelun apuna vaatii varsinkin pienemmiltä toimistoilta merkittävää taloudellista sekä ennen kaikkea ajallista panostusta työntekijöiden perehdyttämisen ja koulutuksen muodossa.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi yhden alalla parhaiten tunnetun FEM-mallintavan rakennesuunnitteluohjelman käyttöä teräsbetoni-laatan mitoituksessa. Aiemmin Robot Millenniumina tunnettu, mutta myöhemmin Autodeskin omistukseen siirtynyt Autodesk Robot Structural Analysis Professional on FEM-analyysia hyödyntävä eurokoodien mukainen rakenteiden mitoitusohjelma. Ohjelmaan voidaan tuoda rakenteiden geometriaa koskevaa informaatiota muista nykyaikaisista BIM-ohjelmistoista sekä myös perinteisistä CAD-kuvista. Ohjelma mahdollistaa niin yksinkertaisten kuin monimutkaistenkin rakenteiden tarkan mitoituksen, mutta sen tehokas hallitseminen vaatii aluksi huomattavan koulutusvaiheen sekä jatkuvaa opiskelua käyttäjän kohdatessa uudenlaisia tilanteita. Ohjelmasta ei ole saatavilla tällä hetkellä suomenkielistä maksutonta opetusmateriaalia, maahantuojat tarjoavat kuitenkin maksullisia koulutuksia ohjelman käytön tueksi.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tarjota selkeä ja käytännönläheinen ohjeistus Robot-ohjelman perusteista ja ennen kaikkea teräsbetoni-laatan mitoituksesta sen avulla niin toimeksiantajan suunnittelutoimistossa kuin Karelia ammattikor-

keakoulussa. Opinnäytetyössä käydään läpi mitoitusprosessin lisäksi läpi vertailu toisen vanhemman FEM-ohjelman ja käsinlaskennan kesken sekä loppuanalyysi, jossa tarkastellaan, voidaanko ohjelman antamia tuloksia pitää luotettavina tätä ohjetta noudatettaessa. Tässä opinnäytetyössä ei ole tarkoitus avata elementtimenetelmän matemaattista ratkaisuteoriaa yksityiskohtaisesti. FEM-laskennan matemaattisesta esityksestä löytyy valtava määrä informatiivista kirjallisuutta ja lukuisia laadukkaita verkkojulkaisuja, joihin pääsee nopeasti tutustumaan kuka tahansa hakukonetta käyttämällä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Insinööritoimisto Kantelinen Oy ja työ toteutettiin yhteistyössä Karelia ammattikorkeakoulun kanssa. Opinnäytetyöprosessin ohjaajana ja ohjelman asiantuntijana toimi Insinööritoimisto HMsuunnittelu Oy:n Markku Jolkkonen, jolle on kertynyt henkilökohtaista kokemusta Robot-ohjelmasta jo vuodesta 2003 alkaen.

2 FEM-analyysi rakennesuunnittelun apuna

2.1 FEM-menetelmän perusteet

Elementtimenetelmä eli FEM (Finite Element Method) on useiden tietokoneohjelmien käyttämä ratkaisumenetelmä selvitettäessä monimutkaisten, staattisesti määräämättömien rakenteiden voimasuureita, jännitystiloja, taivutusmomenteja, taipumia ja siirtymiä. Elementtimenetelmää joudutaan käyttämään, kun vastausta ei voida saada suoralla analyttisellä ratkaisulla, kuten voimien ja momentin tasapainoyhtälöillä, jotka soveltuvat yksinkertaisten rakenteiden ratkaisuun. Elementtimenetelmä on ollut käytössä tietokoneavusteisen suunnittelun mukaan tulosta saakka ja sen hyödyllisyys perustuu tietokoneen mahdollistamaan nopeaan ratkaisuun suuriakin differentiaaliyhtälöryhmiä tarkasteltaessa. Menetelmän katsotaan syntyneen Yhdysvalloissa 1950-luvulla lentokoneeteollisuuden parissa ja sen soveltaminen on levinnyt rakennus- ja konetekniikan lisäksi useille muillekin tieteen aloille. [1.]

Elementtimenetelmä tarkoittaa toimintamallia, jossa tietokoneelle mallinnettu geometria jaetaan rajalliseen määrään pienempiä osia, elementtejä, jotka yhdistyvät toisiinsa solmupisteiden kautta. Tätä toimintaa kutsutaan elementoinniksi. Nämä kokonaisuutensa yksinkertaisemmat osat ovat näin tietokoneen ratkaistavissa numeerisin menetelmin lujuusopista johdetuilla kaavoilla. Elementtien solmupisteiden kautta voimasuureet ja siirtymät jakautuvat vierekkäisiin elementteihin. Tietokoneen FEM-mallista antama vastaus syntyy siis numeerisesta analyysistä, jossa käytetään suoria ja iteratiivisia menetelmiä, jolloin vastaus on aina likimääräinen. On rakennesuunnittelijan vastuulla luoda sellainen tietokone-mallinnus, jonka rakenteet, kuormitukset, tuennat, elementtiverkko ja muut laskennan parametrit vastaavat todellista kohdetta ja josta saadaan todellista rakennetta mukailevat tulokset. Rakennesuunnittelijan tulee sitten tulkita näitä tuloksia soveltaen ymmärrystään lujuusopista sekä rakennesuunnittelusta ja punnita mallista saamiensa tulosten oikeellisuutta. [1.]

2.2 Uuteen mitoitusohjelmaan siirtyminen

Eräs 1990-luvulla suomalaisissa rakennesuunnittelutoimistoissa tunnetuksi tullut tehokas mitoitusohjelma oli DI Toivo Palosaaren kehittämä DOS-pohjainen FEM-menetelmää hyödyntävä TASSU. Vaikka FEM-menetelmä on ollut rakennesuunnittelijoiden apuna tietokoneiden mukaan tulosta saakka, ovat mitoitusohjelmat ottaneet suuria kehitysaskelia parin viime vuosikymmenen aikana. Uudet eurooppalaiset mitoitusnormit, eli eurokoodit, ovat astuneet voimaan myös Suomessa rakennesuunnittelun ensisijaisina mitoituskäytäntöinä ja mitoitusohjelmat ovat joutuneet uudistumaan niiden mukana. Eurokoodi pyrkii ottamaan huomioon viimeisimmän tutkimustiedon rakentamisesta sekä tilastomatematiikasta uusien osavarmuuslukujen muodossa ja se käsittelee rakenteiden yksityiskohtien mitoitusta laajemmin, kuin on totuttu vanhassa kansallisessa normissa. Osa rakenteiden mitoituskäytännöistä on kokenut suuriakin muutoksia, eivätkä useimmiten yksinkertaisempaan suuntaan. Mitä teräsbetonin mitoitukseen tulee, lähes kaikki mitoituslujuudet ovat muuttuneet, vaikkakaan kovin suurista käytäntöön vaikuttavista eroista ei voida puhua.

Toimeksiantaja on joutunut ottamaan käyttöön uuden mitoitusohjelman, joka vastaa uusimpia eurooppalaisia rakennesuunnittelun standardeja. Uudeksi suunnitteluohjelmaksi toimeksiantaja on valinnut yleisesti hyvin tunnetun Autodesk Robot Structural Analysis Professional -ohjelman. Kyseisen ohjelman käyttöönoton vaatima opiskeluvaihe tiedettiin vaativaksi, mutta ohjelman tarjoama potentiaali suunnittelun apuvälineenä oli myös tiedossa. Ohjelman hyvä tunnettavuus ja kyky ratkaista lähes millaisia mitoitustehtäviä tahansa olivat syitä, miksi toimeksiantaja päätyi tähän ohjelmaan.

2.3 Uuden mitoitusohjelman käyttöönoton haasteet

Autodesk Robot Structural Analysis Professional on pienemmälle toimistolle iso sijoitus, sillä kuten muutkin Autodeskin tuotteet, Robotin lisenssi on arvokas. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä Suomessa toimiviin Robot-ohjelman jälleenmyyjiin kuuluivat ainakin ArkSystems Oy, Cad-Quality Finland Oy sekä COMPAREX Finland Oy. Lisenssin ohjeellinen alkuhankintahinta oli opinnäytetyön kirjoitushetkellä 6 500 € (ALV 0 %), jonka lisäksi tuli 890 €:n (ALV 0 %) ylläpito kirjau-

tumismaksu, johon kuuluivat vuoden aikana ilmestyvät ohjelmistopäivitykset ja mahdollisuus asentaa ohjelma saman käyttäjän toiselle työpisteelle. Lisähintansa summaan tuo se tosiasia, että uuden ohjelman omaksuminen vie huomattavasti aikaa. Työntekijät tarvitsevat laadukasta koulutusta uuden haastavan työkalun käyttöönotossa, mikä taas on poisjäävää aikaa suoraan tuottavasta työstä. Aluksi työ on hidasta ja epävarmaa uuden ohjelman parissa. Jos työntekijä käyttää ohjelmaa harvemmin ja työrutiinia ei ehdi muodostua, voi ote ohjelman käyttöön heikentyä ja työmotivaatio laskea, jolloin ohjelma koetaan liian haastavaksi ja epäkäytännölliseksi. Tosiasia on, että uudet asiat ovat alussa usein haastavia. Tämän opinnäytetyön sisällään pitämän ohjeen on tarkoitus laskea Robot-ohjelman käyttöönoton kynnyksiä ja tarjota käyttäjälle ohje, jota voi hyödyntää myöhemmin referenssinä myös henkilö, joka on aiemmin mitoitannut ohjelmalla teräsbetoni-laattoja ja haluaa palauttaa mieleen jonkin unohtumaan päässeeseen työvaiheeseen.

2.4 Uuden mitoitusohjelman käyttöönoton mahdollisuudet

Autodesk Robot Structural Analysis Professional mahdollistaa helposti hallittavan kolmiulotteisen mallinnusympäristön rakennesuunnittelun avuksi. Ohjelmalla voi käsitellä suuria rakennekokonaisuuksia vapaasti hallittavassa kolmiulotteisessa tilassa, jossa malli voi koostua lukuisista eri geometrioista, kuten seinistä, laatoista, palkeista ja pilareista. Sovellus mahdollistaa teoriassa koko rakennuksen kaikkien rakenneosien rajatilojen tarkistuksen samalla mallilla. Tämä mahdollisuus voi selkeyttää ja nopeuttaa suunnitteluprosessia, kun kaikki tarvittavat mitoituksen osat löytyvät yhden tiedoston takaa ja ne tukevat toisiaan. Esimerkiksi, kun rakennesuunnittelija mallintaa ohjelmaan ristiin kantavan teräsbetoni-laatan selvittääkseen laatasta esiintyvän taipuman ja tarvittavan raudituksen määrän, hän mallintaa ohjelmaan seinät ja laatan. Samasta mallista selviää seinille jakautuvat viivakuormat ja samaan malliin luotuja rakenteita voidaan myöhemmin käyttää esimerkiksi stabiliteetin tai anturoiden mitoituksessa.

Kolmiulotteisen mallin käyttö helpottaa rakenteen hahmottamista ja jäsentämistä. Robotiin on mahdollista tuoda geometriatietoja myös muista suosituista formateista, kuten muista Autodeskin tuotteista, esim. Autocad- ja Revit-ohjelmistoista sekä myös hyvin maailmallakin tunnetusta suomalaisesta BIM-

ohjelmista, Tekla Structuresista. Robotiin voidaan tuoda dwg- tai dxf-tiedosto ”import” -komennon avulla, jolloin esim. rakennesuunnittelijan piirtämää tasokuvaa voidaan käyttää referenssinä mallinnettaessa rakennetta Robotiin. Nämä toiminnot nopeuttavat työskentelyä, kun erilliset ohjelmat ymmärtävät toisiaan, eikä samoja rakenteita tarvitse piirtää useaan kertaan alusta alkaen.

Uudet eurokoodit vaativat lukuisten eri rakenneosien yksityiskohtaista laskemista ja tilastomatematiikasta johdettujen kuormitusyhdistelmien tarkastelua. Robot pitää sisällään nämä kaikissa EU-maissa olevat yhtenäiset suunnittelunormit ja eri maiden niitä tarkentavat kansalliset liitteet. Myös uusimmat eurokoodiyhteensopivat materiaalitietokannat betonista, teräksestä ja puusta ovat käytävissä ja helposti hallittavissa. Vaikka ohjelman käyttö edellyttää rakennesuunnittelijalta uuden suunnittelustandardin ymmärtämistä, mahdollistaa se niiden käyttöönoton kohtuullisen vaivattomasti. Robot osaa laskea kaikkien malliin syötettyjen kuormien edellyttämät lukuisat kuormitusyhdistelyt automatisoidusti. Kuormitusyhdistelyitä voidaan halutessa määrittää myös manuaalisesti.

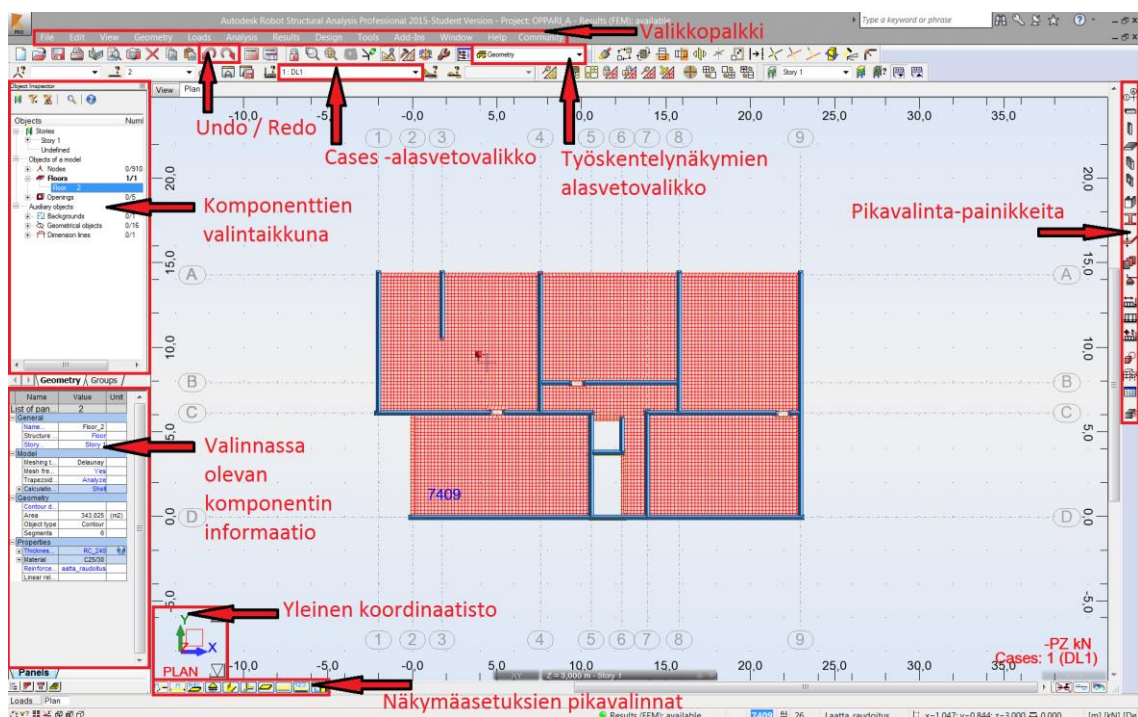
Yksi Robotin merkittävämpiä vahvuuksia mitoitushjelmana on sen käyttäjilleen tarjoama vahva tukiverkko, jonka mahdollistaa ohjelman hyvä tunnettavuus ja laaja käyttäjäkunta. Kaikille ohjelman tilaajille on tarjolla Autodeskin ylläpitämä kansainvälinen tukipalvelu, jossa käyttäjät voivat esittää ohjelmaan liittyviä kysymyksiä tai kehitysideoita, joihin vastaavat Autodeskin tukipalvelun ammattilaiset, sekä ohjelman muut käyttäjät. Opinnäytetyön aikana tukifoorumille esitettiin kaksi kysymystä, joihin Autodeskin tukihenkilö vastasi vuorokauden kuluttua kuvallisten ohjeiden kanssa. Lisäksi ohjelmasta löytyy kattava englanninkielinen selainpohjainen ohjekirja, jonka uusin versio ilmestyy joka vuosi uuden ohjelmistopäivityksen mukana. Yksittäiset opiskelijat eri oppilaitoksissa, esimerkiksi Karelia-ammattikorkeakoulussa, saavat ohjelman käyttöönsä oppilaitoksensa välityksellä. Oppilaitokset tekevät Autodeskin kanssa sopimuksen, joka mahdollistaa yksittäisille opiskelijoille tutustumisen Robotin käyttöön maksutta lataamalla Autodeskin sivuilta ilmainen ja täysin rajoittamaton versio uusimmasta ohjelmistosta mille tahansa työasemalle. Ohjelma pitää sisällään opiskelijalicenssileiman ja sitä ei saa käyttää kaupalliseen tarkoitukseen.

3 Teräsbetonilaatan mallinnus Robotilla

Tämä ohje käsittelee teräsbetonilaatan mitoitusta Autodesk Robot Structural Analysis Professional rakenteiden mitoitusohjelman 2015-versiolla, joka on opinnäytetyön kirjoitushetkellä ohjelman uusin versio ja johon viitataan tässä ohjeessa yksinkertaistetusti nimellä ”Robot”. Ohjeessa esitetty toimintamalli ei ole ainoa tapa mitoittaa teräsbetonilaattaa ohjelmalla, vaan se on teoksen kirjoittajan näkemys asiasta. Rakennesuunnittelija käyttää ohjelmaa tätä ohjetta noudattaen omalla vastuullaan.

3.1 Perusteet ja käyttöliittymä

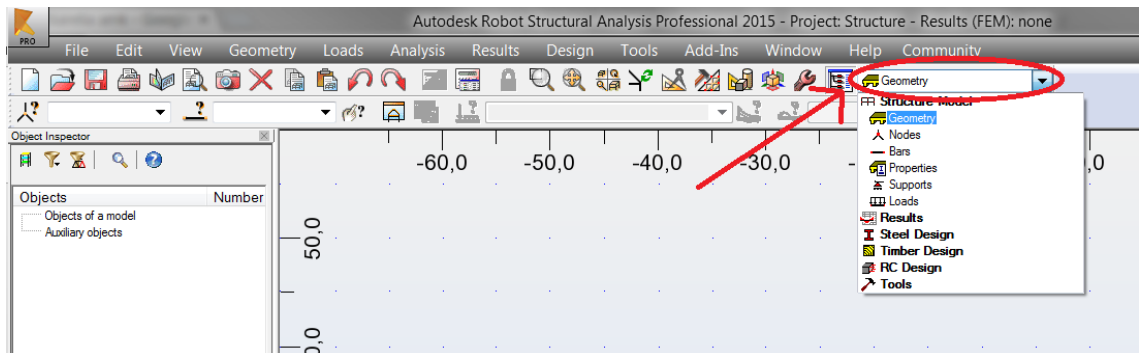
Ennen kuin työskentely aloitetaan uuden ohjelman parissa, on syytä tuntea joi-takin Robotin perustoimintaperiaatteita.



Kuva 1: Tavallinen työskentelynäkymä ja sen olennaisimmat osat.

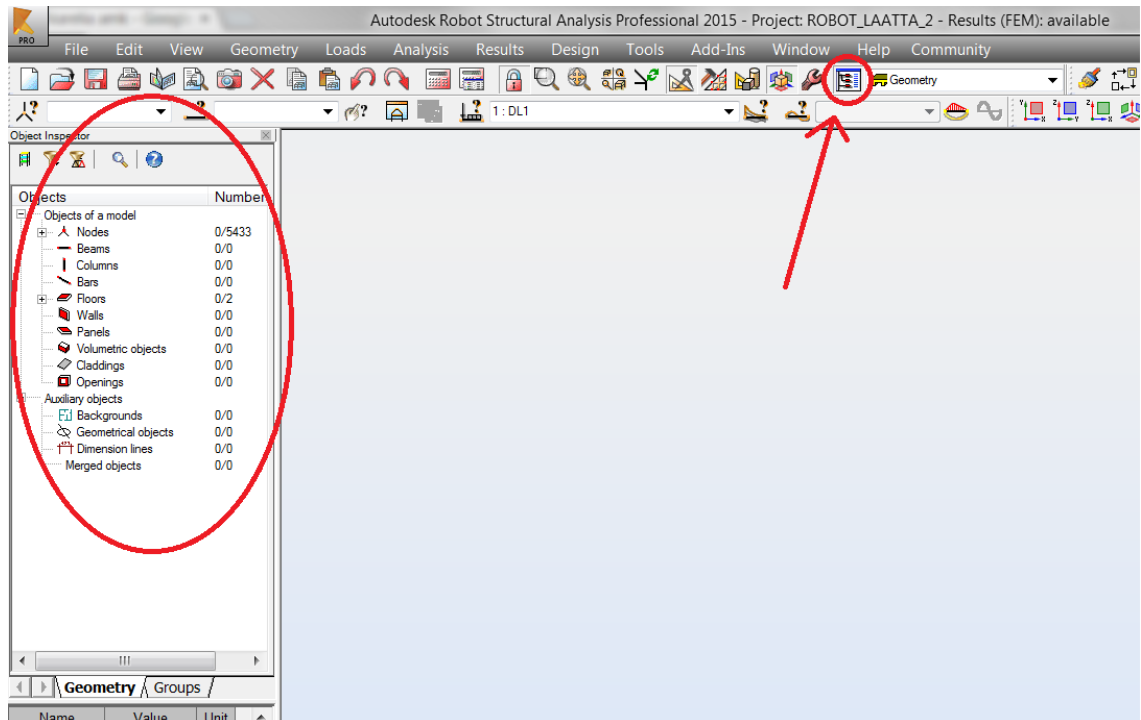
Robotissa ei ole erillistä komentoriviä kuten esim. Autocadissa, vaan kaikki toiminnot valitaan erillisten graafisten dialogi-ikkunoiden painikkeista. Kaikkiin ohjelman dialogi-ikkunoihin voidaan päästä käsiksi ruudun yläreunassa olevan harmaan värisen valikkopalkin kautta (File, Edit, View, Geometry, jne.), mutta

useimmat dialogi-ikkunoista aukeavat myös pikavalintapainikkeiden kautta. Robotilla työskennellessä yhden tehtävän suorittaminen voidaan useimmiten toteuttaa monella eri tavalla.




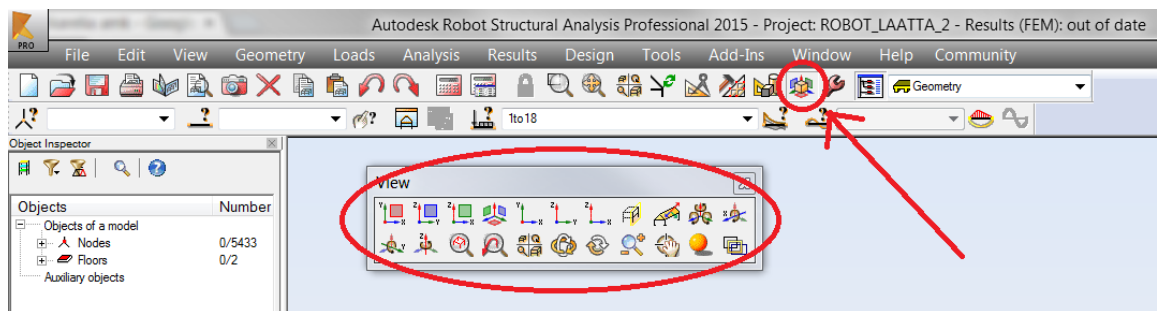
Kuva 2: Työskentelynäkyjen alasetoalikko.

Työskentelynäkyjä voidaan vaihtaa ruudun yläreunassa sijaitsevasta alasetoalikkosta sen mukaan, mitä asioita mallissa halutaan työstää (kuva 2). Työskentelynäkyt ovat kyseiseen tehtävään räätälöityjä ympäristöjä, esim. Structure Model - Geometry -tila on oletusnäky, josta mallin rakenteen luominen aloitetaan, Structure Model - Loads -tilasta löytyy valmiina useita kuormien määritykseen liittyviä työkalupaletteja, kun taas raudoituksen laskenta onnistuu vain RC Design -tilassa.






Kuva 3: Object inspector -ikkuna.

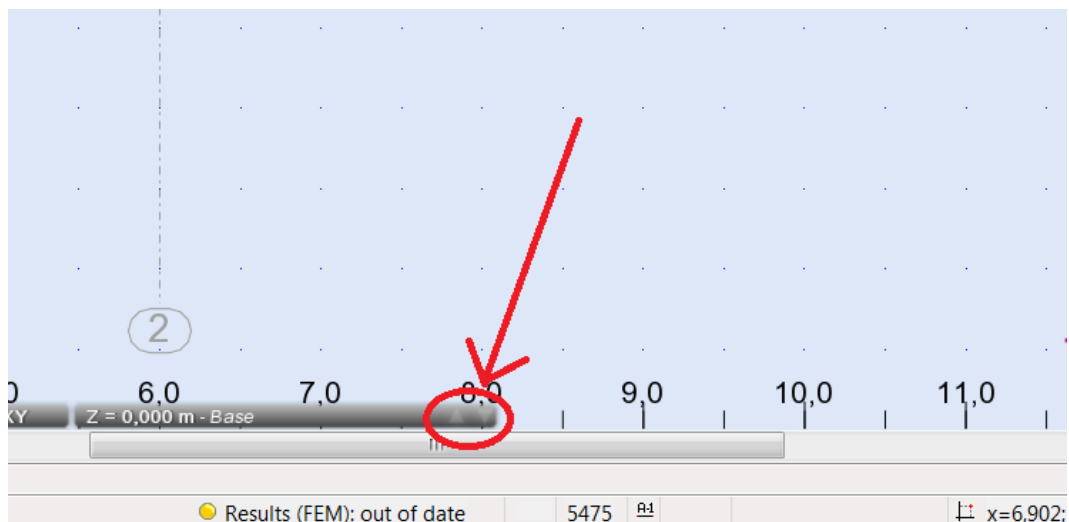
Ruudun vasemmassa laidassa olevasta Object Inspector -valikosta voidaan tarkastella mallin kaikkia yksittäisiä komponentteja (kuva 3). Mallin jokaisella komponentilla on oma yksilöllinen numerotunniste, jonka avulla komponentit voidaan erotella toisistaan, olipa kyseessä sitten sauva, solmupiste, tai laatta. Kaikissa työskentelynäkymissä tämä valikko ei ole oletuksena näkyvässä, mutta se saadaan auki  -pikavalintapainikkeesta



Kuva 4: Katselunäkymien pikavalintapainikkeet

Valmiita katselunäkymiä saadaan valittua  -pikavalintapainikkeen takaa (kuva 4). 2D-projektionäkymäpainikkeista  luodaan 2D-leikkaus valittua tasoa kohtisuoraan, jossa näkymän reunoilla esitetään mittalinjasto. 3D-projektionäkymäpainikkeista  luodaan näkymä, jossa mittaviivastoa ei

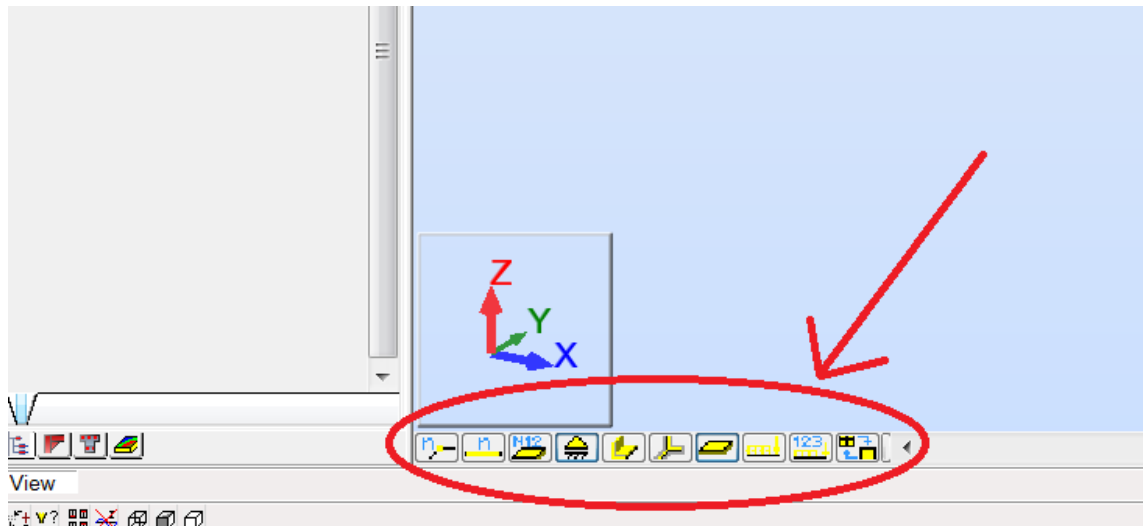
esitetä, mutta kaikki katselutason edessä ja takana sijaitsevat osat ovat näkyvissä. Tarkasteltavan näkymätason korkoa voidaan muuttaa ruudun alareunassa sijaitsevan harmaan valintapalkin nuolipainikkeista (kuva 5).



Kuva 5: Tarkastelutason koron valintapainikkeet




Mallin tarkasteluetaisyttä muutetaan hiiren rullaa pyörittämällä. Tarkasteluetaisyys voidaan palauttaa 🌐-pikavalintapainikkeesta. Näkymää voidaan vierittää painamalla hiiren rulla pohjaan ja liikuttamalla hiirtä. Näkymää voidaan pyörittää ruudun oikeassa yläkulmassa olevasta kuutiosta tai painamalla Shift-näppäin sekä hiiren rulla pohjaan ja liikuttamalla hiirtä.

Mallin vasemmassa alanurkassa on näkyvillä yleinen (global) x-y-z-koordinaatisto, mutta Robot luo malliin piirretyille sauvoille ja paneeleille erikseen automaattisesti omat paikalliset (local) x-y-z-koordinaatistot.



Kuva 6: näkymien pikavalintapainikkeet

Ruudun vasemmassa alareunassa sijaitsevista pikavalintapainikkeista voidaan määrittää, mitä asioita mallin grafiikassa esitetään (kuva 6).

Malli tallennetaan File > Save (Ctrl+S), tai Save As -valinnoilla. Ruudun yläreunassa sijaitsevista pikanäppäinpainikkeista on saatavilla Undo (kumoa)  (Ctrl+z) ja Redo (palauta)  (Ctrl+y) -toiminnot. Englanninkieliset ohjeet on saatavilla verkosta oikeassa ylänurkassa sijaitsevasta  -painikkeesta.

3.2 Työprosessi

Sujuva työskentely edellyttää toimivaa ja tehokasta työvaiheiden jäsentämistä. Työprosessin jäsentäminen osiin mahdollistaa jouhevan työskentelyn monimutkaistenkin kohteiden parissa, kun työskentelyyn pystyy rutiinin kautta kehittämään mahdollisimman tehokas toimintamalli. Tässä ohjeessa käydään läpi teräsbetoni-laatan mitoitus, joka on perustyövaiheiltaan sovellettavissa myös muunkinlaisten rakenteiden mitoitustehtäviin. Työvaiheet voidaan jakaa osiin seuraavasti:

1. projektin aloitus ja projektiasetusten määrittäminen
2. rakennemallin luonti
3. kuormat
4. analyysin parametrit ja laskenta
5. tulosten graafinen esitys

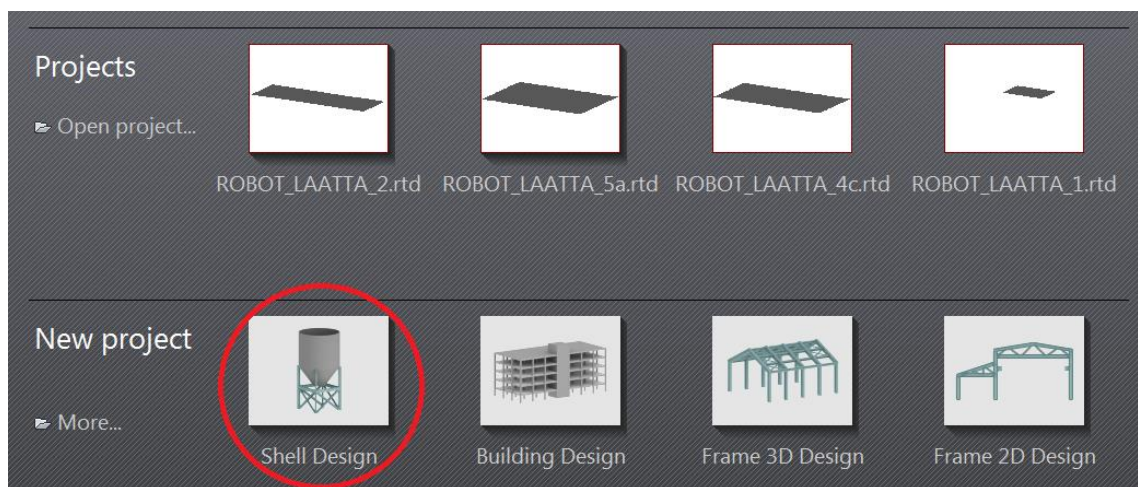
6. tulosten raportointi ja dokumentointi.

3.3 Projektin aloitus ja projektiasetusten määrittäminen

Työskentely aloitetaan projektin valinnalla ja projektiasetusten määrittämisellä.

3.3.1 Projektin valinta (Design type)

Ohjelman käynnistyttyä aukeaa näkymä aloitussivusta, jossa valitaan, halutaanko avata aiemmin tallennettu projekti vai luoda kokonaan uusi.



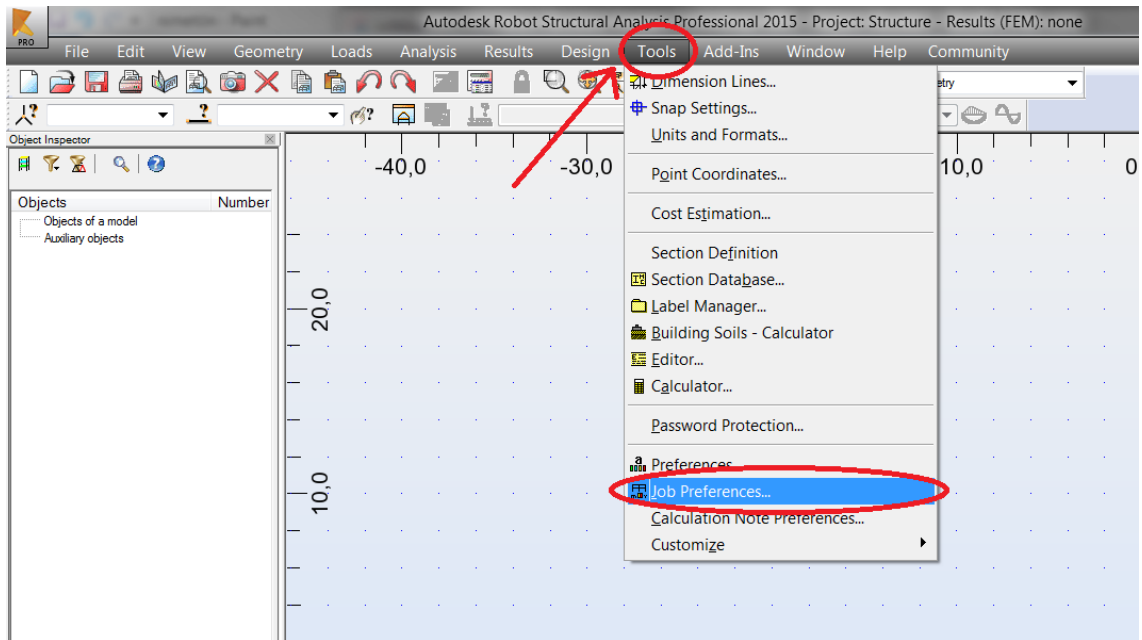
Kuva 7: Design-tyypin valinta

Aluksi valitaan minkä tyyppinen suunnitelma (design) halutaan luoda. ”More...” -painikkeesta saadaan auki lisää vaihtoehtoja. Vaihtoehtoja ovat mm. building-, frame 3D-, shell-, plate- tai RC-elements design -projektit. Näillä vaihtoehdoilla vaikuttaa siihen millaisia työkaluja projektissa on käytössä sekä työskenteläkäänkö mallissa kaksiulotteisessa tasossa vai kolmiulotteisessa avaruudessa. Tässä kohtaa on siis tarkoitus valita, minkä tyyppinen työympäristö ohjelmassa palvelee parhaiten kyseessä olevaa mallinnettavaa rakennetta. Shell design -projekti on suositeltu vaihtoehto, sillä siinä voidaan luoda periaatteessa millainen rakenne tahansa. Valittua design-tyyppiä voidaan muuttaa myös jälkikäteen valikkopalkin Geometry > Structure Type -kohdasta.

- Aloitusruudusta valitaan **New Project > Shell design**

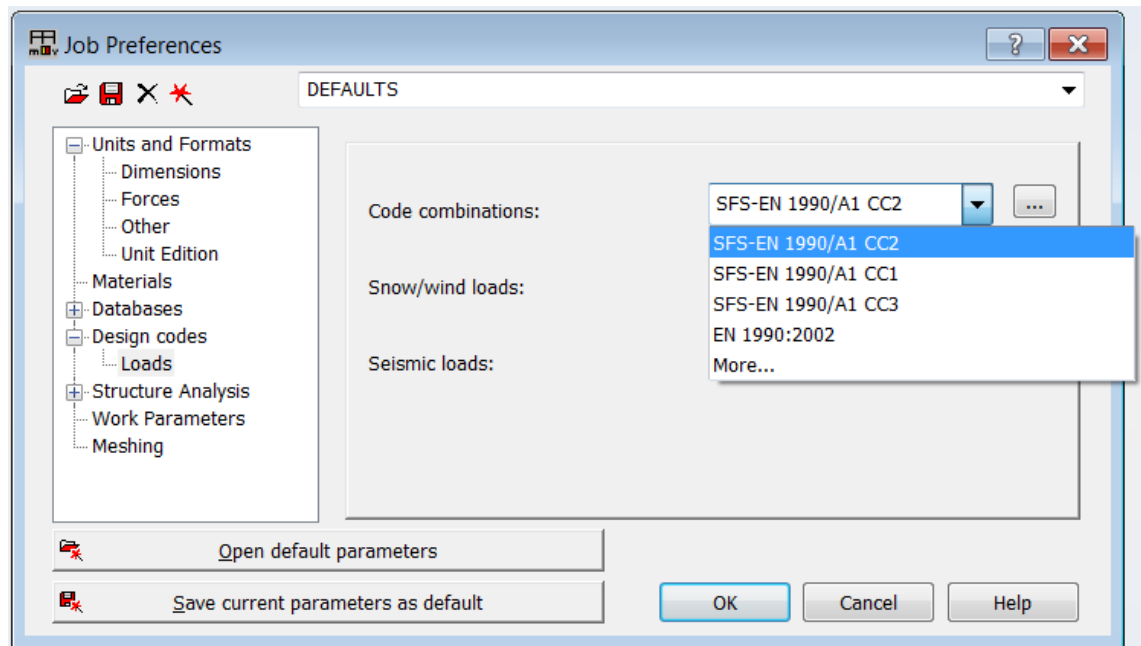
3.3.2 Projektiasetukset (Job preferences)

Seuraavaksi määritetään projektiasetukset, jonne päästään valikkopalkin Tools-välilehdeltä kohdasta Job Preferences (kuva 8). Job Preferences -ikkunassa voidaan säätää lukuisia työskentelyn parametrejä, kuten projektissa käytettäviä mittayksiköitä, materiaalitietokantoja, suunnittelunormeja sekä laskennan asetuksia.




Kuva 8: Projektiasetukset

”Units and Formats” -kohdasta tulee valita projektissa käytettävät yksiköt ja desimaalien tarkkuustaso. Robot muodostaa neliökuorman yksikön ”Structure dimensions” ja ”Force” -kentän yksiköistä. Jos ”Structure dimensions” on valittu metriksi ja ”Forces” on valittu kilonewtoniksi, esitetään neliökuormat yksikössä kN/m^2 . ”Materials” -kohdasta valitaan projektissa esiintyvien rakenteiden olemusmateriaalit, mutta niihin voidaan vaikuttaa myöhemmin myös tapauskohtaisesti. ”Databases” -kohdassa käyttäjä voi hallita projektissa käytössä olevien rakenneosien tietokantoja.







Kuva 9: Kuormitusyhdistelysäännöt

”Design codes” -kohdassa tulee tarkastaa, että projektissa käytettävät suunnittelunormit vastaavat haluttuja määräyksiä. ”Loads” -kohdasta löytyy ”code combinations” -alasvetovalikko, josta haluttu kuormitusnormi valitaan. Code combinations rivin lopussa olevasta  -painikkeesta saadaan auki kuormitusyhdistelytaulukko, jossa ohjelman käyttämiä kuormitusyhdistelyjä voidaan tarkastella ja muuttaa. Valittavissa on Suomessa voimassaoleva eurokoodien mukainen mitoitusstandardi SFS-EN 1990/A1. Tämä viittaa suomenkieliseen hyväksytyyn eurokoodiin EN1990: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Kyseinen eurokoodi ja muut vastaavat ovat ostettavissa Suomen standardisoimisliiton SFS ry:n verkkosivuilta ja normia tarkentava kansallinen liite on ladattavissa veloituksetta ympäristöministeriön verkkosivuilta. Eurokoodien mukainen kuormitusyhdistely voidaan suorittaa Robotissa automaattisesti B-sarjan kuormitusyhdistelysääntöjen mukaisesti kolmessa eri seuraamusluokassa (CC1, CC2 ja CC3).

B-sarjaa sovelletaan yleisesti rakenneosien mitoituksessa (STR- ja GEO-tarkastelu). A-sarjaa tulisi käyttää rakennuksen tai rakenteen staattisen tasapainon selvityksessä (EQU-tarkastelu) ja C-sarjaa geoteknisessä mitoituksessa luiskien ja kokonaisvakavuuden selvityksessä (GEO-tarkastelu). [2, 37–39] A-sarjan ja C-sarjan kuormitusyhdistelyt eivät ole automaattisesti saatavilla Robo-

tissa, vaan käyttäjän on niitä tarvitessaan luotava ne itse Robotin kuormitusyhdistely -editorilla, jonka käyttöön ei tässä ohjeessa tarkemmin perehdytä.

Rakenneanalyysin (Structure Analysis) asetukset voidaan tässä kohtaa säilyttää oletusarvoilla. Projektiasetukset-vaihe on tarpeellinen käydä läpi silloin, kun Robot käynnistetään uudella asennuksella ensimmäistä kertaa, tai jos halutaan muuttaa projektissa käytettäviä asetuksia. Tässä vaiheessa määritetyt asetukset voidaan tallentaa oletusarvoiksi ”Save current parameters as default” -painikkeesta, jotta asetukset pysyvät automaattisesti vastaavanlaisina, kun Robot käynnistetään uudelleen. Työasetuksia voidaan myös tallentaa nimellä ja ladata uudessa projektissa    -työkalurivia käyttämällä.

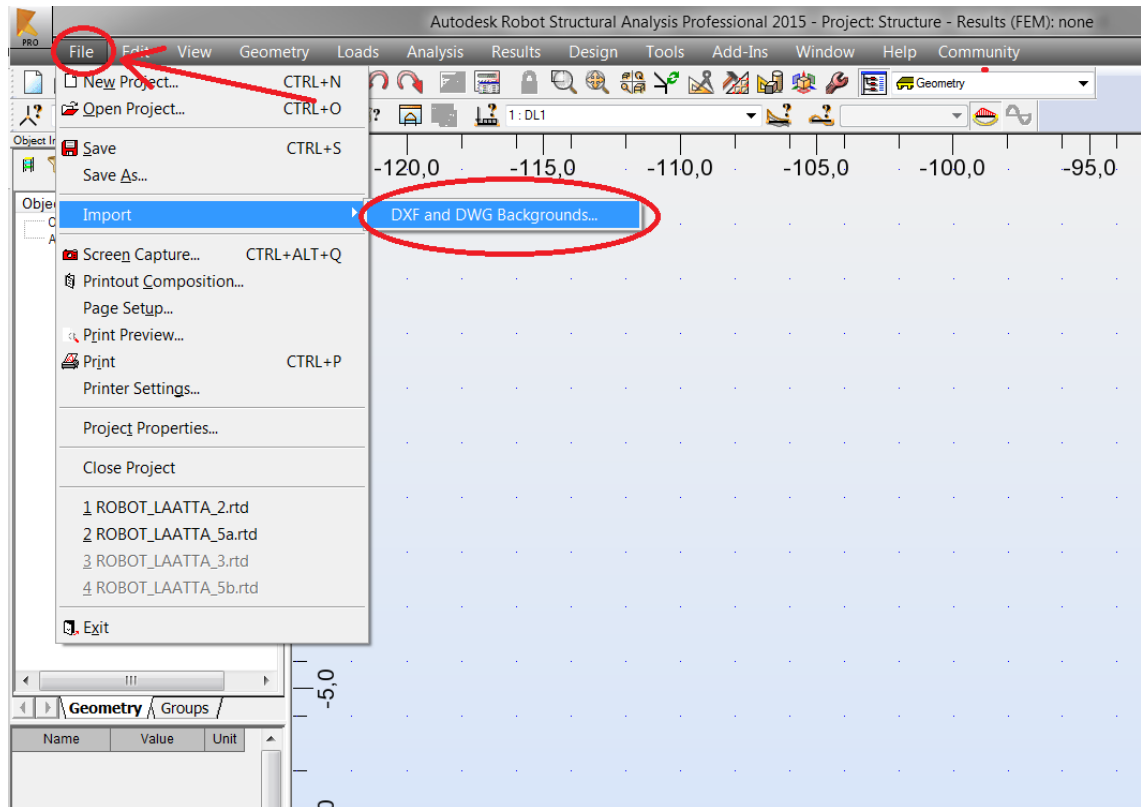
- Valikkopalkista valitaan **Tools > Job Preferences** 
 - ”Units and Formats” -kohdasta valitaan mitä yksiköjä ja desimaalitarkkuuksia ohjelmassa halutaan käyttää
 - ”Materials” -kohdasta valitaan projektissa käytettävät oletusmateriaalit
 - ”Design codes” > ”Loads” -kohdasta valitaan kuormitusnormi ”Code combinations” -valikosta (Suomessa: SFS-EN 1990/A1)
 - Halutessa tallennetaan tehdyt muutokset oletusasetuksiksi ”Save current parameters as default” -valinnalla ja hyväksytään ”OK” -painikkeella

3.4 Rakennemallin luonti

Kun projektin design-tyyppi ja projektiasetukset on valittu, voidaan aloittaa rakennemallin määrittäminen. Tämä tapahtuu helposti Structure Model – Geometry -työskentelynäkyvässä, joka on oletuksena auki uutta projektia aloitettaessa.

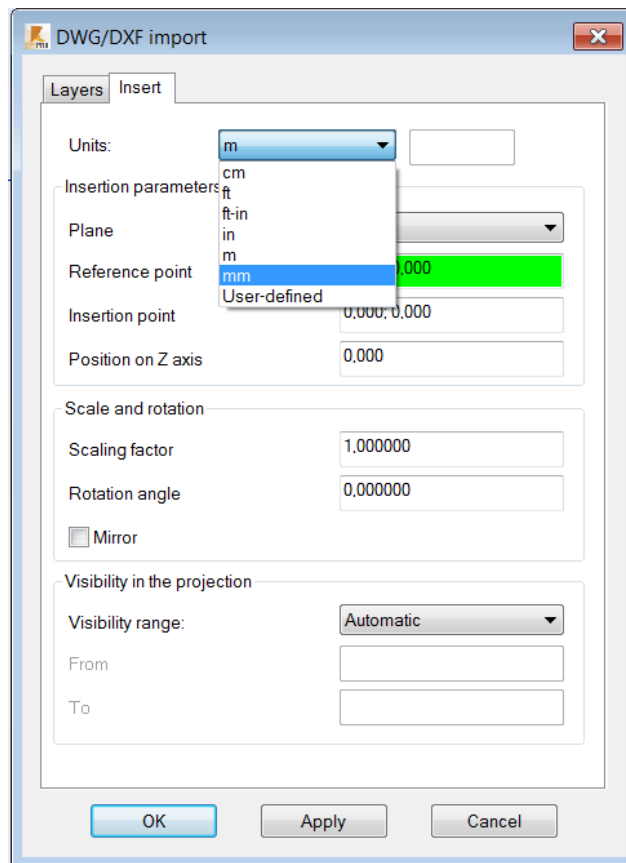
3.4.1 Referenssikuvan tuonti (DXF and DWG Backgrounds)

Työskentelyn nopeuttamiseksi voidaan taustalle tuoda referenssikuva dwg-, tai dxf -muodossa, jonka geometriaa voidaan käyttää apuna ”snap” toimintoa hyväksikäyttäen. Referenssikuvan tuonti tapahtuu ”Import”-painikkeesta, joka löytyy valikkopalkista File-välilehdeltä (kuva 10).



Kuva 10: Referenssikuvan tuonti

Kun haluttu tiedosto on valittu, aukeaa käyttäjälle ”DWG/DXF import” -ikkuna. ”Units” -valikosta käyttäjän tulee syöttää alkuperäisessä dwg- tai dxf-tiedostossa käytetty yksikkö. Rakennekuvat ovat usein piirretty siten, että yksi yksikkö vastaa yhtä millimetriä. Tällöin ”Units” -valikosta tulee valita ”mm”, jolloin toiminto skaalaa kuvan automaattisesti samaan mittakaavaan vastaamaan Robotissa käytettyä yksikköä (kuva 11). Muilla asetuksilla voidaan määrittää import-tiedoston asemoitumista Robot-työympäristöön. Layers-välilehdeltä voidaan määrittää, mitkä dwg- tai dxf-kuvan tasot ovat näkyvillä Robotin työympäristössä. Käyttäjän kannattaa sammuttaa kaikki tasot, joita ei tarvita rakennemallin luomisessa. Kuvasta on lähtökohtaisesti suositeltavaa jättää näkyviin kaikki kantavat rakenteet ja moduuliverkko.

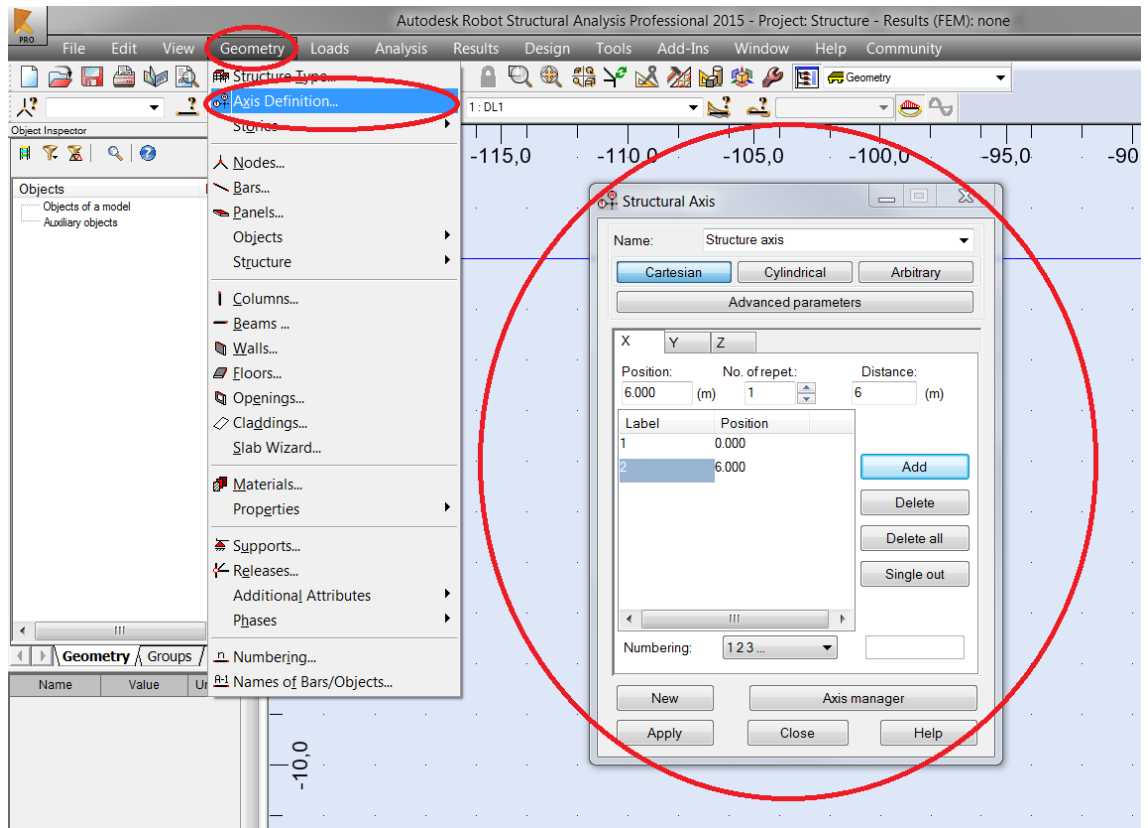


Kuva 11: Referenssikuvan skaalaus

- *Valikkopalkista valitaan **File > Import > DXF and DWG backgrounds***
 - *Valitaan haluttu tiedosto > "Open"*
 - *"Insert" -välilehdeltä valitaan "Units" > "mm"*
 - *Hyväksytään "OK" -painikkeella*

3.4.2 Moduuliverkon luonti (Structural Axis)

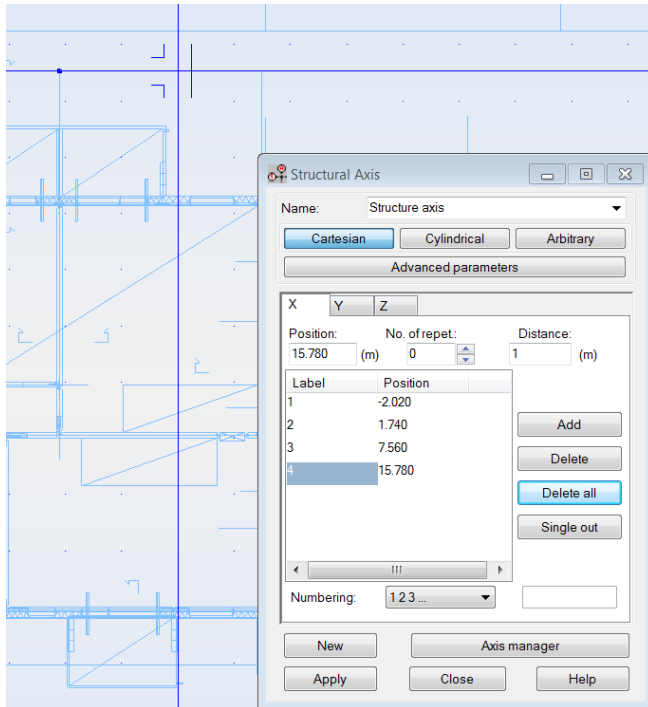
Moduuliverkko helpottaa geometrian luontia sekä mallin hahmottamista. Moduuliverkko saadaan lisättyä malliin "Structural Axis" -ikkunasta, joka löytyy valikkopalkista "Geometry" -valikosta "Axis Definition" -painikkeesta.



Kuva 12: Moduuliverkon määrittäminen


Moduuliverkotus määritetään erikseen x-, y- ja tarvittaessa myös z-suunnassa. "Numbering" -alavetovalikosta saadaan määritettyä kyseisen moduuliverkon tunnistetyyppi (esim. numerointi, kirjaimisto). "Position" määrittää moduuliverkon aseman, "Distance" määrittää matkan seuraavaan moduuliin ja "No. of repet" kentällä voidaan määrittää kuinka monta moduuliverkkoa kopioituu annetulla etäisyydellä toisistaan. Näitä parametreja muokkaamalla voidaan "Add" -painikkeella luoda halutut moduuliverkkoasetukset.

Helpoin tapa määrittää moduuliverkko on klikata hiiren vasemmalla painikkeella jokaista referenssikuvasta näkyvää moduuliverkkoa paikkaa järjestyksessä, jolloin ohjelma määrittää itse moduuliverkkojen asemoinnin (kuva 13). On tärkeää klikata moduuliverkkojen sijainnit järjestyksessä läpi, jotta niiden asemat määrittyvät oikein. Apply -toiminto luo määritellyn moduuliverkon ja "Delete" tai "Delete all" poistaa määritetyt moduuliverkkojen sijainnit, jos syöttö on epäonnistunut.



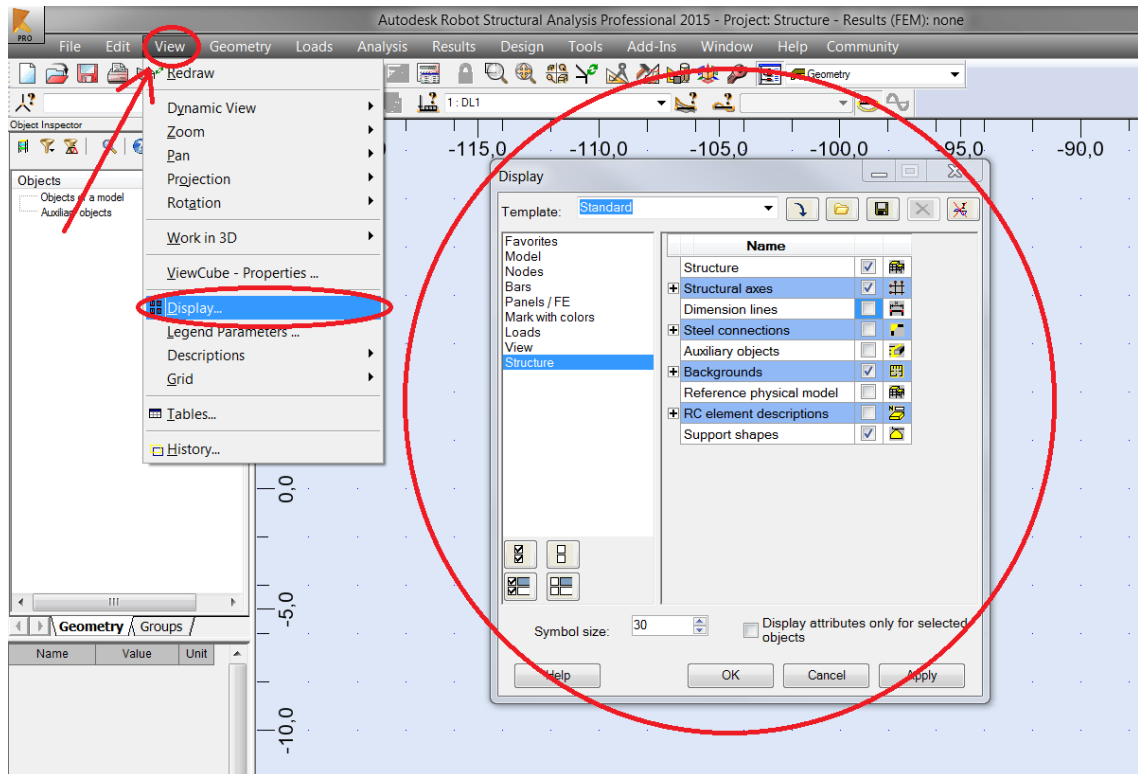
Kuva 13: Moduuliverkon määrittäminen referenssikuvaa apuna käyttäen

Jos x- ja y-suunnan moduulien syöttämisen jälkeen moduuliverkko ei tule näkyviin 3D-näkymässä, täytyy katselusuuntaa todennäköisesti muuttaa, riippuen siitä, mikä suunnitelmatyyppi (design type) alussa valittiin. Esimerkiksi Shell design -projektissa oletuskatselusuunta on x-z tasoa kohtisuoraan, jolloin x-y -tasoon piirretty moduuliverkko ei ole näkyvä katsojalle. Katselusuunta voidaan muuttaa mm. valikkopalkin kautta View > Projection valinnoilla, jossa haluttua katseluprojektia pystytään vaihtamaan.

- Valikkopalkista valitaan **Geometry > Axis Definition** 
 - Klikataan moduulilinjojen sijainnit Import -kuvan läpi x- ja y-suunnassa ja valitaan niiden nimeäminen "Numbering" -valikosta
 - Hyväksytään valinnat "Apply" -painikkeesta



3.4.3 Näkyvyysasetukset (Display)

Erilaisten objektien ja informaatioiden näkyvyyttä mallin grafiikassa hallitaan ruudun alareunan pikavalintapainikkeiden lisäksi erillisessä Display-ikkunassa. Display-ikkunaan päästään valikkopalkista View > Display-valinnalla (kuva 14).



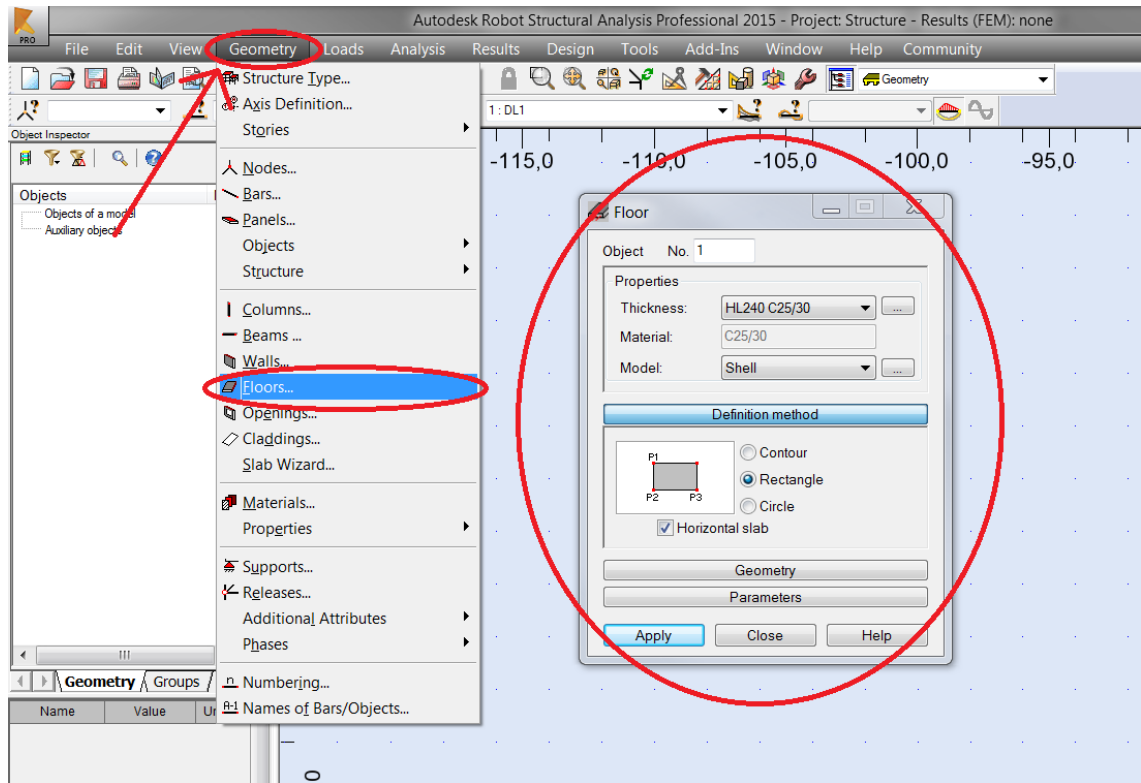
Kuva 14: Display-ikkuna

Display-ikkuna on tärkeä ja hyödyllinen työkalu, jolla käyttäjä valitsee mitä asioita ja ominaisuuksia mallin grafiikassa esitetään. Jos käyttäjä luo malliin sisältöä, mutta se ei ilmesty näkyviin, on syytä aina tarkistaa Display -asetukset.


- Valikkopalkista valitaan **View > Display** .
- Varmistetaan onko moduulilinjojen näkyvyys aktivoitu, katso "Structure" > "Structural axis"
- Halutessa tehdään asetukseen muutoksia ja tallennetaan oletusasetukseksi  -painikkeesta
- Hyväksytään valinnat "OK" -painikkeesta

3.4.4 Laatan geometrian piirto (Floor)

Valikkopalkin Geometry-välilehdeltä käyttäjälle aukeaa monien erilaisten rakennosien piirtotyökaluja. Teräsbetonista laattaa mallintaessa valitaan Floors-työkalu.



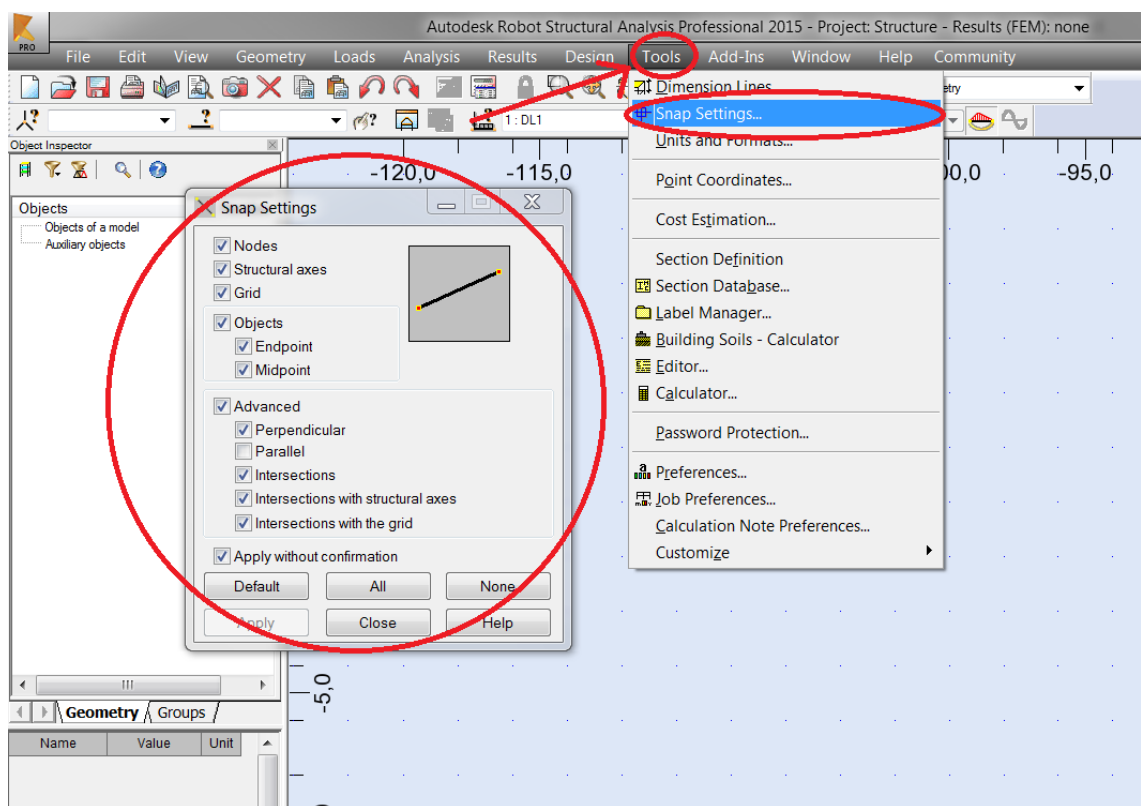
Kuva 15: Floor-ikkuna

Floor-ikkunassa käyttäjä valitsee piirrettävän laatan ominaisuudet. ”Thickness” -valikosta on valittavissa käyttäjän luomasta tyyppikirjastosta aiemmin tehty laattatyyppi. Jos haluttua laattatyyppiä ei ole vielä määritetty, luodaan sen ominaisuudet klikkaamalla ”Thickness” valikon vieressä olevaa  -painiketta.

Käyttäjälle avautuu New Thickness -ikkuna. ”Label” -kenttään tulee kirjoittaa uuden laatan nimi, esim ”HL240 C25/30”. ”Th” -kenttään kirjoitetaan laatan paksuus millimetreinä. ”Material” -alasetoivalikosta valitaan laatan eurokoodien mukainen betoniluokka. ”Add” -painike lisää laatan valitut ominaisuudet tyyppikirjastoon. New Thickness -ikkunasta on laatan parametreja muuttamalla mahdollista luoda myös viistetty laatta tai TT-laatta.

Kun laatan tyyppi on määritetty Floor-ikkunassa, tulee valita ”Model” -valikosta minkälainen laskentamalli laatasta muodostetaan. Tämä vaikuttaa siihen halutaanko malli elementoida, millaiset vapausasteet laatan sisäiset solmupisteet saavat sekä kuinka rakenne siirtää kuormia vierekkäisiin rakenneseisiin. Laatan raudoitusta laskettaessa tulee valita Model-valikosta ”Shell” -vaihtoehto, joka mahdollistaa laatan elementoinnin.

Kun laatan ominaisuudet on saatu määritettyä, tulee piirtää laatan geometria. Tämä onnistuu helposti Definition Method: Contour -oletusasetuksella. Mallista tulee klikata hiiren vasemmalla painikkeella laatan kaikki nurkkapisteet läpi, päättäen valinta ensimmäiseksi valittuun nurkkaan, jolloin rajattu alue sulkeutuessaan luo malliin laatan edellä mainituilla parametreilla. Nurkkapisteitä valittaessa kannattaa käyttää hyväksi Insert-toiminnolla tuotua dwg-referenssikuvaa tai aiemmin luotuja moduulilinjouja ja ohjelman snap-asetuksia. Robotin snap-asetuksiin päästään käsiksi valikkopalkista Tools > Snap Settings -valintojen kautta (kuva 16).



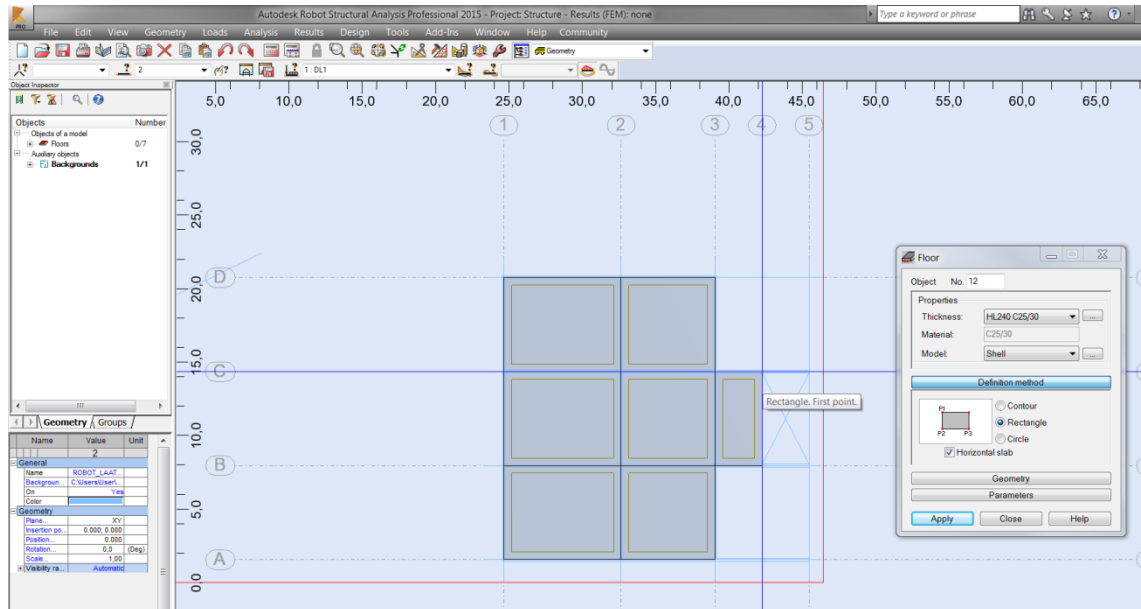
Kuva 16: Snap-asetukset

Jokainen laatastion tukien erottama kenttä olisi suositeltavaa piirtää omana laattanaan (kuva 17) seuraavista syistä johtuen:



1. Elastisen taipuma-analyysin tulokset ovat luotettavampia, kun jokainen tukien erottama alue on mallinnettu omana laattanaan (kappale 3.7.4)
2. Pääraudoitussuunnat voidaan määrittää kenttäkohtaisesti
3. Yhtenäisen ja johdonmukaisen FEM-laskentaverkon luominen on helppompaa, kun laatasto on jaettu pienempiin rakennekokonaisuuksiin

4. Shakkilautakuormitusten määrittäminen on helpommin hallittavissa.

Toisiaan vasten piirretyt laatat toimivat rakenteellisesti monoliittisenä laattana, eli laatastonsiinä jakaminen ei vaikuta staattisen analyysin antamiin tuloksiin, kun vierekkäiset laatat jakavat reunoiltaan samat solmupisteet.

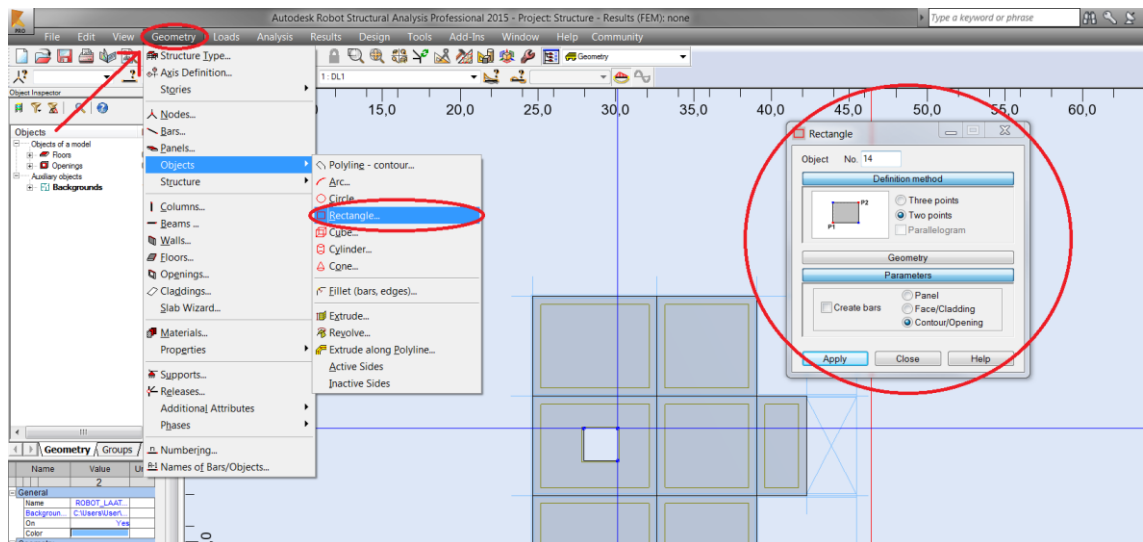


Kuva 17: Ristiin kantavan laatastonsiinä jokainen kenttä määritetty omana laattana

- Valikkopalkista valitaan **Geometry > Floors** 
- Luodaan uusi laattatyyppi klikkaamalla "Thickness" -riviltä  -painiketta
- Annetaan laatalle nimi "Label" -kenttään
- Annetaan laatalle paksuus "Th" -kenttään
- Annetaan laatalle betoniluokka "Material" -valikosta
- Lisätään tyyppi "Add" -painikkeesta tyyppikirjastoon ja suljetaan ikkuna "Close" -painikkeesta
- Valitaan "Model" -valikosta vaihtoehto "Shell"
- Määritetään laatan ääriajat "Contour" -toiminnolla käyttäen hyväksi referenssikuvaa. Klikataan laatan nurkkapisteet kenttäkohtaisesti läpi siten, että viimeinen valinta päättyy ensimmäiseksi valittuun nurkkaan siten, että kuvio sulkeutuu ja näytölle ilmestyy laatan grafiikka
- Suljetaan ikkuna lopuksi "Close" -painikkeella

3.4.5 Reikien lisäys (Objects)

Reikien lisäys tapahtuu laatan geometriaa muokkaamalla. Kun laattaaan halutaan lisätä suorakaiteen muotoisia reikiä, Geometry -välilehdeltä valitaan Objects > Rectangle (kuva 18). Pyöreiden reikien tapauksessa valitaan Circle.



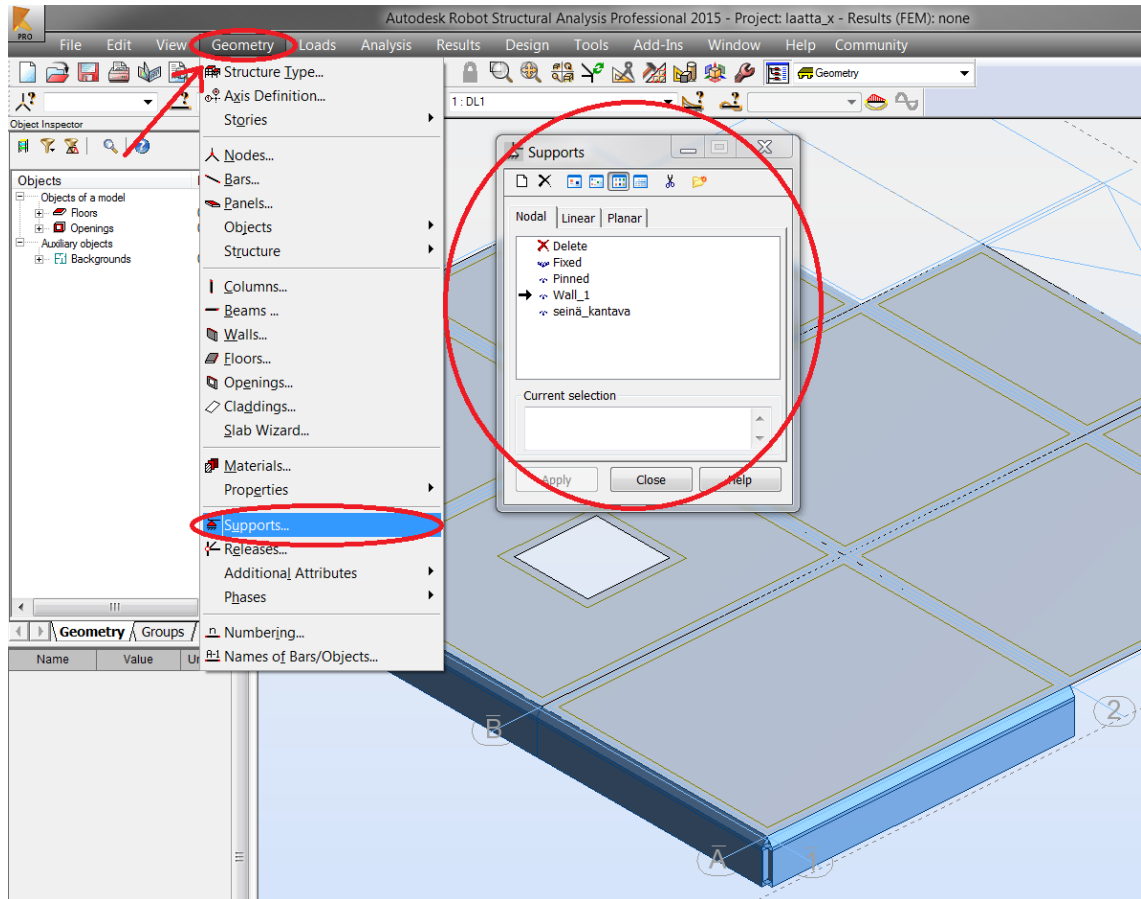
Kuva 18: Reikien lisääminen

Rectangle-ikkunassa "Definition method" -kohdassa määritetään suorakaiteen syöttötapa. Two points -menetelmällä käyttäjän tulee syöttää suorakaiteen vasemman alanurkan ja oikean ylänurkan pisteet, jolloin ohjelma osaa luoda reiän näiden pisteiden rajaamalle alueelle. Valinta on helppo klikata referenssikuvaa apuna käyttäen. Jos käyttäjä haluaa mieluummin määrittää reiän sijainnin koordinaattien avulla, se onnistuu myös helposti. Insert-toiminnolla tuodulla referenssikuvalla ja Robotiin luodulla laatalle tulisi olla sama koordinaatistokenttä nollapisteen suhteen. Tällöin reikien alkuperäiset koordinaattiasemat voidaan katsoa nopeasti dwg-kuvasta, jolloin reiät asemoituvat Robot-malliin täsmälleen oikeaan kohtaan.

- Jos laatussa on suorakaiteen muotoisia reikiä, valikkopalkista valitaan **Geometry > Objects > Rectangle**
- Definition method -kohtaan valitaan "Two points"
- Klikataan mallista reiän vasen alanurkka ja oikea ylänurkka käyttäen hyväksi referenssikuvaa ja toistetaan sama laatan kaikille rei'ille
- Suljetaan ikkuna "Close" -painikkeesta

3.4.6 Tukien määrittäminen (Supports)

Tuet voidaan määrittää Supports-ikkunan kautta, joka aukeaa yläreunan valikkopalkin Geometry-välilehdeltä.



Kuva 19: Tukien määrittäminen



Tuen tyyppi voidaan määrittää kolmen eri välilehden kautta: "Nodal" lisää tuen yhteen solmupisteeseen, "Linear" määrittää viivamaisen tuen yhdelle linjalle ja "Planar" lisää tuen kokonaiselle tasolle. Valmiita tukityyppejä ovat Fixed (jäykkä tuki) ja Pinned (niveltuki). Delete-valinnalla voidaan poistaa olemassa olevia tukia. Uusi tyyppi voidaan määrittää Support definition -ikkunassa, joka aukeaa "New support definition" -painikkeesta tai kaksoisklikkaamalla jotain olemassa olevaa tuen nimeä.

Uudelle tukityypille tulee valita uusi tunniste "Label" -kenttään, sillä oletustukien päälle tallentaminen ei ole mahdollista. "Fixed directions" -valinnoilla määritetään tuen vapausasteet. UX, UY ja UZ -valinnat sitovat rakenteen siirtymän kyseisissä koordinaatiston suunnissa, kun RX, RY ja RZ -valinnat taas estävät

rakenteen rotaation kyseisten koordinaatistoakseleiden ympäri. Tukien määrityksellä on suuri vaikutus saatuihin tuloksiin ja on rakennesuunnittelijan vastuulla mallintaa rakenteelle sellainen tuenta, joka vastaa mahdollisimman tarkasti rakenteen todellista liitosta. Tyypillisesti teräsbetoniseinät, palkit ja pilarit ovat syytä mallintaa niveltukina, jolloin kentän momenttiratkaisu tulee olemaan varmallalla puolella. Todellisuudessa reunatuille aiheutuu teräsbetonirakenteissa aina kiinnitysmomenttia, jotka rakennesuunnittelijan tulee ottaa huomioon.

”Advanced...” -painikkeesta päästään valintoihin, joilla on mahdollista määrittää tuelle leveys ja materiaali. Jos seinälle leveydelle annetaan arvo joka on >0 , pienentää Robot tuella vaikuttavaa suunnittelumomenttia jos ”Reduction of forces” -valinta on aktivoitu ”Plate and Shell Reinforcement” -ikkunassa (katso kappale 3.7.3). Vähennyksen suuruuteen vaikuttaa käytännössä tukea ympäröivien elementtien koko (kappale 3.6.1) [3; 4]. Tuen materiaalivalinnalla on vaikutusta vain ”provided reinforcement” -työskentelymoduulissa, jota ei tässä ohjeessa käytetä, joten tätä ohjetta noudatettaessa valinnalla ei ole merkitystä [5].

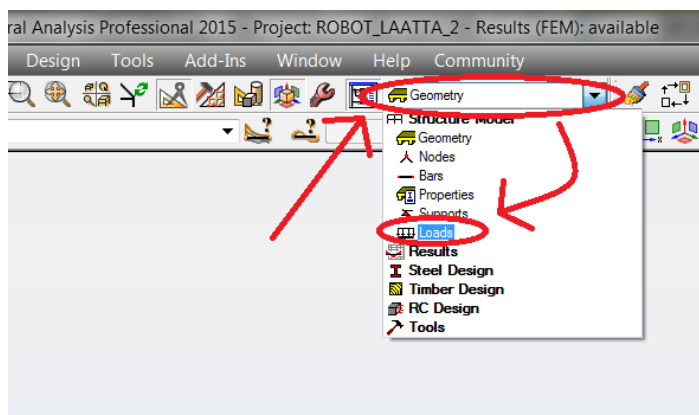
Kun uuden tukityypin määrittäminen on valmis, lisätään se tyyppikirjastoon ”Add” -painikkeesta. Robotissa tuki on ominaisuus, joka voidaan määrätä vain jollekin olemassa olevalle geometrialle, kuten laatan reunalle. Laattojen keskialueilla kulkevia tukia varten tulee piirtää apuviivat. Tämä tapahtuu Polyline - Contour -toiminnolla, jonne päästään taas valikkopalkin Geometry-välilehdeltä Objects-kohdasta. Viivojen piirroksessa kannattaa käyttää hyväksi referenssikuvaa ja Robotin Snap-asetuksia. Toisiaan leikkaavat apuviivat eivät aiheuta ongelmia. Tukityyppi asetetaan rakenneosalle klikkaamalla sitä.

- *Jos laatussa on reunatukien lisäksi jatkuvia tukia keskellä kenttää, määritetään niiden sijainti apuviivoilla. Valikkopalkista valitaan **Geometry > Objects > Polyline - contour...*** 
 - *Definition method -kohtaan valitaan ”Line”*
 - *Klikataan mallista viivapiirroksella jatkuvien tukien linjat*
 - *Suljetaan ikkuna ”Close” -painikkeesta*
- *Valikkopalkista valitaan Geometry > Supports* 

- ”Linear” -välilehdeltä kaksoisklikataan ”Pinned” -tukea, tai klikataan Supports-ikkunan vasemmasta ylänurkasta □ -painiketta
- Kirjoitetaan ”Label” -kenttään uudelle tuelle haluttu nimitunniste, esim. seinä_160mm
- ”Fixed directions” -laatikoihin hyväksytään UX, UY ja UZ-valinnat, mutta RX, RY ja RZ jätetään tyhjiksi (niveltuki)
- Klikataan ”Advanced” -painikkeesta
- Valitaan ”wall” -valinta ja alavetovalikosta ”masonry” tai ”concrete”
- Kirjoitetaan ”b” -kenttään tuen leveys millimetreissä
- Hyväksytään ”OK” -painikkeesta
- Lisätään uusi tukityyppi kirjastoon ”Add” -painikkeesta ja suljetaan sitten ikkuna ”Close” -painikkeesta
- Klikataan mallista niitä komponentteja, joihin tuki halutaan määrittää (laatan reunat ja apuviivat)
- Jos tukia halutaan poistaa, klikataan Supports -ikkunasta ✕ Delete -painiketta ja klikataan mallista poistettavaa tukea
- Suljetaan Supports -ikkuna ”Close” -painikkeesta

3.5 Kuormat

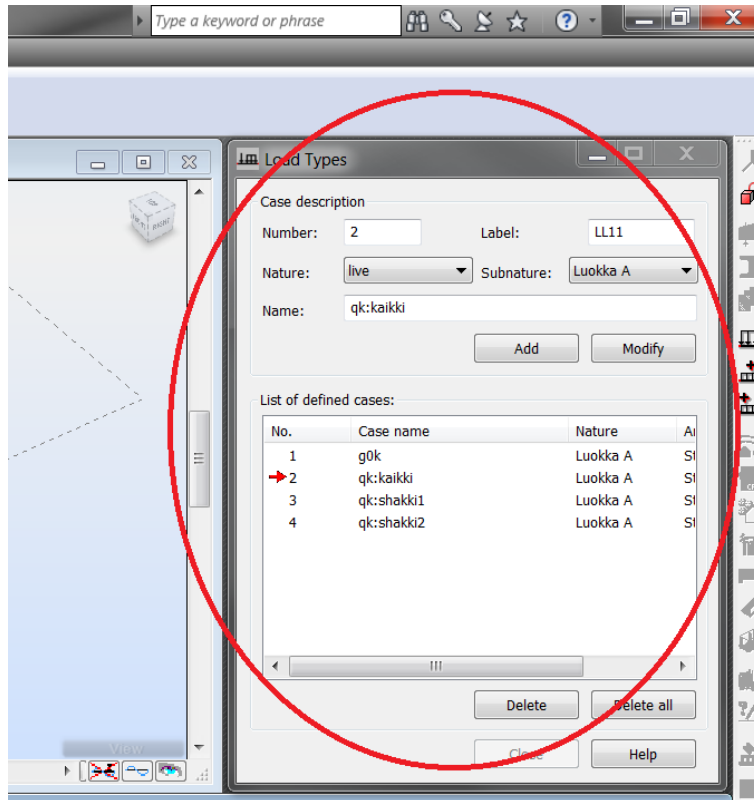
Kuormien vaikutusten mallintaminen rakenteeseen koostuu kolmesta vaiheesta; alkeiskuormien luomisesta, kuormien vaikutusalueen ja suuruuden määrittämisestä sekä kuormitusyhdistelyiden muodostamisesta. Kuormien hallinta onnistuu helpoiten Loads-työskentelynäkymässä (kuva 20).



Kuva 20: Loads-työskentelynäkymän valinta


3.5.1 Alkeiskuormat (Load Types)

Load Types -ikkunan kautta malliin luodaan kaikki rakennetta rasittavat kuormitukset (kuva 21).



Kuva 21: Load Types -ikkuna

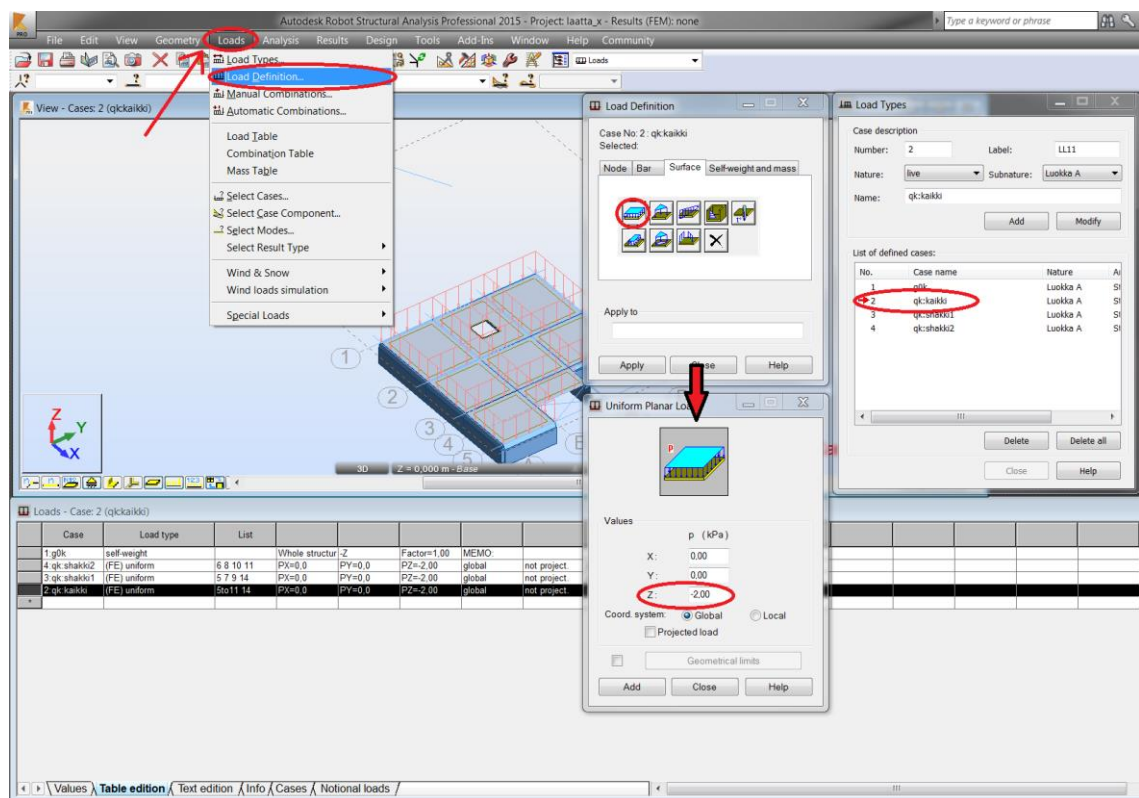
”Number” -kenttään syötetään kuorman numero ja ”Label” -kenttään kuorman kirjaintunniste. ”Nature” -alasvetovalikosta valitaan kuorman tyyppi ja ”Subnature” -valikosta kuorman luokka. ”Name” -kentässä kuorma nimetään. Ristikäiset tunnisteet, nimet tai kuormien numerot aiheuttavat ongelmia laskennassa. ”Add” -painike lisää valitun kuormatyyppin malliin. Kun ”Add” -painiketta klikataan ensimmäistä kertaa ”Nature: dead” -valinnalla, Robot muodostaa siitä mallin jokaisen rakenneosan oman painon kuorman. Tämän jälkeen lisätään kaikki muut mallissa esiintyvät pysyvät ja muuttuvat kuormat.

- Työskentelynäkymien alasvetovalikosta valitaan **Loads**
 - **Load Types**  -ikkunassa klikataan ”Add” -painiketta, jolloin ohjelma lisää oman painon vaikutuksen rakenteeseen
 - Muut rakenteessa esiintyvät kuormat nimetään sekä luokitellaan ja lisätään malliin ”Add” -painikkeesta (esim. hyötykuorma asuinkerrostalossa;

Number: 2, Label: LL1, Nature: live, Subnature: Luokka A, Name: LL2, > "Add")

3.5.2 Kuormien määrittäminen (Load Definition)






Kun alkeiskuormat on luotu ja nimetty, tulee seuraavaksi määrittää niiden suuruus ja vaikutusalue Load Definition -ikkunassa, joka aukeaa valikkopalkin Loads-välilehdeltä (kuva 22).



Kuva 22: Alkeiskuorman määrittäminen

"Node" -toiminto lisää kuorman vaikutuksen yhteen solmuun, "Bar" lisää kuorman sauvalle ja "Surface" rakenteen tason pinnalle. Työstettävä kuorma valitaan ruudun yläreunassa olevasta Cases-alasvetovalikosta. Robot muodostaa ensimmäisestä pysyvästä kuormasta (DL1) automaattisesti kaikkien rakennosien oman painon kuorman, joten sitä ei tarvitse määrittää erikseen. Kun jokin muu laattaa kuormittava tasokuorma on valittu alasvetovalikosta, valitaan "Surface" -kohdasta "Uniform Planar Load" -kuormitus. "Values" -kohdassa määritetään tasokuorman vaikutussuunta jonkin koordinaattiakseliston suuntaisesti. Pystysuuntainen tasokuorma valitaan z-akselille vaikuttavaksi negatiivisena ar-

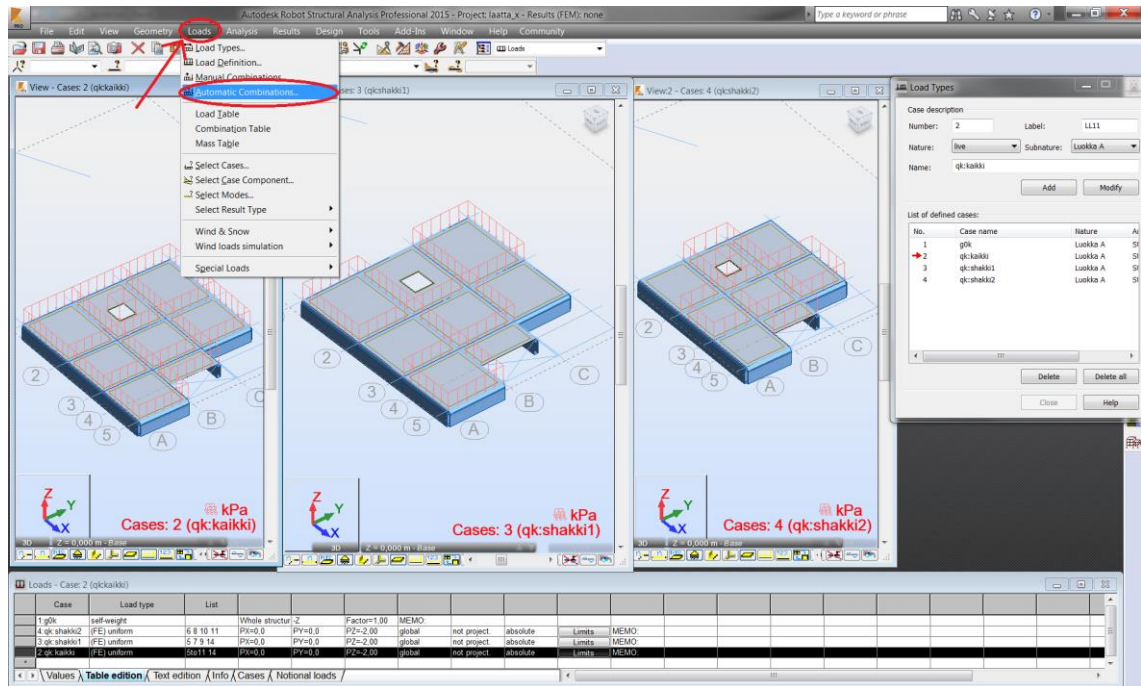
vona, jolloin kyseessä on painovoiman suuntainen kuormitus. "Add" -painike mahdollistaa kuorman lisäyksen valittuun rakenneosaan klikkaamalla mallin grafiikkaa tai syöttämällä rakenneosan numerotunniste "Apply to" -kenttään ja hyväksymällä tämän jälkeen valinta "Apply" -painikkeesta. Jos kuorma ei ilmesty tämän jälkeen näkyviin, tulee tarkastaa, onko "Load Symbols" -näkyvä aktivoitu ruudun vasemmassa alakulmassa olevista näkymien pikavalintapainikkeista.

- Valikkopalkista valitaan **Loads > Load Definition** 
- Aktiivinen työstettävä kuorma valitaan valikkopalkin alapuolella olevasta Cases  1:DL1 –alasvetovalikosta. Työstettävä kuorma lukee **Load Definition**  ikkunassa "Case No: xx.." -kohdassa
- Tasokuorman tapauksessa valitaan "Surface" > "Uniform Planar Load"  ja asetetaan pystykuormat z-kenttään negatiivisena arvona pyydettyssä paineen yksikössä
- Hyväksytään kuormitus "Add" -painikkeesta, jonka jälkeen klikataan mallista kappaletta, johon kuormitus halutaan lisätä
- Suljetaan **Load Definition**  -ikkuna "Close" -painikkeesta

Lopuksi täytyy määrittää kuormitusyhdistelyt. Kuormitusyhdistelyt voidaan suorittaa joko manuaalisesti määrittämällä tai antamalla Robotin tehdä yhdistelyt automaattisesti jonkin valmiiksi ohjelmoidun suunnittelukoodin mukaisesti. Jos käytetään valmista eurokoodien mukaista kuormitusyhdistelyä, on tärkeää, että valitaan kyseiseen mitoitustehtävään soveltuva kuormitusyhdistelysarja A, B tai C (kappale 3.3.2).

3.5.3 Automaattiset kuormitusyhdistelyt (Automatic Load Combinations)

Automaattiseen kuormitusyhdistelyjen määrittämiseen päästään valikkopalkin Loads-välilehdeltä kohdasta Automatic Combinations (kuva 23).




Kuva 23: Automaattiset kuormitusyhdistelyt. Kuvassa shakkilautakuormitus.

Load Case Code Combinations -ikkunan avauduttua valitaan käytettävä kuormitusyhdistelysarja "Combinations according to code:" -alasetovalikosta. Rakenteosien kestävyyttä tai geoteknistä kantavuutta mitoitettaessa valitaan vaihtoehto "SFS-EN 1990/A1 CC2", mikäli kohde kuuluu seuraamusluokkaan kaksi. Jos haluttaisiin tutkia esim. rakenteiden staattista tasapainoa, tulee A-yhdistelysarjan säännöt luoda ensin kuormitusyhdistelyjen editorilla tai käyttää manuaalisia kuormitusyhdistelyjä. Kun yhdistelysarja on valittu, valitaan missä laajuudessa automatiikka suorittaa kuormitusyhdistelyn. "None/Delete" -valinta poistaa mahdollisesti aiemmin suoritettuja yhdistelyjä. "Full automatic combinations" -valinta suorittaa kaikki mahdolliset erilaiset yhdistelytapaukset. "Simplified automatic combinations" -valinta suorittaa vain sellaiset yhdistelytapaukset, jotka tuottavat valittujen voima- tai momenttisuureiden ääriarvot. "Manual combinations – generate" -valinta luo kaikki valitun kuormitusnormin mukaiset mahdolliset yhdistelytapaukset erillisten manuaalisesti määritettyjen yhdistelyjen lisäksi. "More >" -painikkeesta päästään määrittämään tarkemmin automatiikan suorittamien yhdistelyiden parametreja.

"More >" -painiketta painamalla avautuu uusi ikkuna, jossa voidaan muodostaa alkeiskuormista koostuvia omia ryhmiä ja vaikuttaa niiden välisiin suhteisiin. "Cases" -välilehdellä on nähtävissä kaikki mallissa vaikuttavat alkeiskuormat ja


niiden tyypit. Tässä vaiheessa voidaan "Edit parameters" -painiketta klikkaamalla muokata alkeiskuormien arvoja suurempaan tai pienempään, mikäli niiden arvoa halutaan muuttaa jonkin vapaavalintaisen lisäkertoimen vaikutuksesta. "Combinations" -välilehdellä valitaan, mitkä yhdistelytapaukset tarkistetaan tai jätetään tarkistamatta. "Groups" välilehdellä voidaan alkeiskuormista luoda omia ryhmiä. Operator -otsikon alla olevilla vaihtoehdoilla määritetään, millä yhdistelyperiaatteella ryhmän sisäiset alkeiskuormat voivat vaikuttaa mallissa. "And" -valinta tarkastaa kuormien yhtäaikaisen vaikutuksen. "Or (incl)" -valinta tarkastaa kuormien yhtäaikaisen ja eriaikaisen vaikutuksen. "Or (excl)" -valinta tarkastaa vain kuormien eriaikaisen vaikutuksen, kuten shakkilautakuormituksen tapauksessa (kuva 23). Ryhmien luonti onnistuu valitsemalla halutut alkeiskuormat ja tuomalla ne oikeanpuoleiseen laatikkoon ikkunan keskellä olevia nuolipainikkeita käyttämällä, jonka jälkeen painetaan "Create a group from cases" -painiketta. "Relations" -välilehti toimii samalla periaatteella kuin "Groups", mutta tässä kohdassa säädetään ryhmien välistä suhdetta alkeiskuormien sijaan. Toimintaperiaate on kuitenkin sama. Kun tämä vaihe on saatu valmiiksi, vahvistetaan kuormitusyhdistelyt ikkunan oikeassa alareunassa olevasta "Generate" -painikkeesta.


- *Jos halutaan tehdä automaattinen kuormitusyhdistely*
 - *Valikkopalkista valitaan **Loads > Automatic Combinations*** 
 - *Alasvetovalikosta valitaan haluttu kuormitusnormi*
 - *Valitaan "Full automatic combinations" -valinta ja klikataan "more >" -painikkeesta*
 - *"Cases" välilehdellä vaikutetaan halutessa alkeiskuormiin vapaavalintaisilla lisäkertoimilla "Edit parameters" -painikkeesta*
 - *"Combinations" välilehdellä valitaan halutut kuormitusyhdistelyt*
 - *"Groups" välilehdellä muodostetaan halutessa alkeiskuormista ryhmiä ja asetetaan niissä vaikuttavien alkeiskuormien väliset suhteet "Operator" -valinnoilla*
 - *"Relations" -välilehdeltä asetetaan ryhmien väliset suhteet "Operator" -valinnoilla*
 - *Hyväksytään kuormitusyhdistelyiden määriykset "Generate" -painikkeesta*

3.5.4 Manuaaliset kuormitusyhdistelyt (Manual Load Combinations)

Manuaalisesti kuormitusyhdistelyt voidaan halutessa määrittää valikkopalkin Loads-välilehdeltä aukeavasta Manual Combinations -ikkunasta. Kun valintaa klikataan ensimmäistä kertaa projektissa, aukeaa Combination Definition/Modification -ikkuna, jonne tulee syöttää ensimmäinen kuormitusyhdistely. Yhdistelylle valitaan tunnisteluku "Combination number" -kenttään. Koska kuormitusyhdistelyt ja alkeiskuormat luetteloidaan samaan kirjastoon, on syytä tehdä selkeä erottelu näiden numeroinnin välille. Jos alkeiskuormat on numeroitu 1, 2, 3, jne. on suositeltavaa numeroida kuormitusyhdistelyt esim. 100, 110, 120, jne. "Combination type" -alasetoalistasta valitaan rajatilan tyyppi; ULS tarkoittaa murtorajatilaa, SLS käyttörajatilaa ja ACC onnettomuustilaa. Käyttörajatilat ovat jaettu asianmukaisesti eurokoodissa käytettyihin alaluokkiin; ominaisyhdistelmä (SLS:CHR), tavallinen yhdistelmä (SLS:FRE) ja pitkäaikainen yhdistelmä (SLS:QPR). "Combination name" -kenttään annetaan yhdistelylle nimi ja valinta hyväksytään "OK" -painikkeesta. Tämän jälkeen aukeaa Combinations -ikkuna.

Varsinaisessa Combinations-ikkunassa valitaan "Combinations" -alasetoalistasta mitä yhdistelyä halutaan työstää. "Nature" -alasetoalistikon valinta toimii suodattimena vasemmassa listassa esitetyille kuormille. Halutut kuormat klikataan aktiiviseksi (shift+click ja ctrl+click toimivat myös) ja tuodaan kuormitustapaukseen ikkunan keskellä sijaitsevilla nuolipainikkeilla. Nuolipainike siirtää valitun kuorman yhdistelylistaan ja kaksoisnuolipainike siirtää kaikki vasemman listan kuormat yhdistelylistaan. "Factor" -kenttään syötetään kuorman osavarmuusluvun arvo, jolla valitut kuormat kerrotaan kuormitusyhdistelyssä. "Apply" -painikkeella vahvistetaan kuormitusyhdistelmän luonti ja "New" -painikkeesta päästään muokkaamaan uutta kuormitusyhdistelmää.

- *Jos halutaan tehdä manuaalinen kuormitusyhdistely*
 - Valikkopalkista valitaan **Loads > Manual Combinations** 
 - Annetaan ensimmäiselle kuormitusyhdistelylle numerotunniste, tyyppi ja nimi (esim. Combination number: 100, Combination type: ULS, Combination name: MRT)
 - Hyväksytään kuormitusyhdistely "OK" -painikkeesta

- *Määritetään yhdistelyssä vaikuttavat kuormat valitsemalla ne vasemmanpuoleisesta listasta aktiiviseksi, antamalla niille "Factor" -kentässä osavarmuuskerroin ja siirtämällä ne  -painikkeella oikeanpuoleiseen listaan*
Hyväksytään kuormitusyhdistely "Apply" -painikkeesta ja luodaan uusi kuormitusyhdistely "New" -painikkeesta, tai poistutaan ikkunasta "Close" -painikkeesta

3.6 Analyysin parametrit ja laskenta

Ennen kuin mallin staattinen analyysi on suositeltavaa aloittaa, tulee ohjelmalle kertoa, kuinka rakenne halutaan elementoida. Jos mallin elementointiin ei puututa ennen staattisen analyysin käynnistämistä, suorittaa ohjelma mallin elementoinnin itsenäisesti oletuselementointiasetusten mukaisesti. Tämä johtaa usein ei-toivotun elementtiverkon syntyymiseen, etenkin monimutkaisempien mallien tapauksissa.

3.6.1 Ohjeita elementointiin

Elementointi tapahtuu Robotissa kahta eri pääasiallista ratkaisumenetelmää käyttäen. Coonsin menetelmä soveltuu kolmiulotteisten pintojen elementointiin, kun taas Delaunayn menetelmä käy vain kaksiulotteisten pintojen elementointiin ja sen rinnalla voidaan halutessa käyttää Kangin ratkaisumenetelmää. Käytetyllä elementointimenetelmällä on merkitystä siihen, millaista algoritmia ohjelma käyttää elementtiverkon luonnissa ja millaisilla parametreilla elementointiin voidaan vaikuttaa. Näistä parametreista riippuu, rakentaako ohjelma mallin elementoinnin neliön, kolmion vai nelikulmioiden muotoisista elementeistä ja millaisia alueita ne muodostavat. Laattoja mallintaessa hyödynnetään aina Delaunayn menetelmää ja sen eri variaatioita.

Erimuotoisia elementtejä joudutaan usein hyödyntämään, jotta geometrisesti haastavat epäsäännölliset pinnat saadaan elementoitua virheettömästi. Vierekkäisten elementtien tulisi jakaa sama solmupiste, mutta epätarkkojen mallien parissa tämä saattaa olla joskus haastavaa saavuttaa, etenkin jos referenssikuvana käytetty malli ei noudata tasaluvullisia mittoja. Ohjelmassa on toiminto ni-

meltään ”Kinematic Constraints”, jonka avulla malli pystytään ratkaisemaan interpolointia käyttämällä. Tällöin vierekkäisten elementtien solmupisteiden ei tarvitse kohdata toisiaan samassa pisteessä, mutta tämän toiminnon käyttöä tulisi välttää sen aiheuttaman mahdollisen virheen vuoksi.

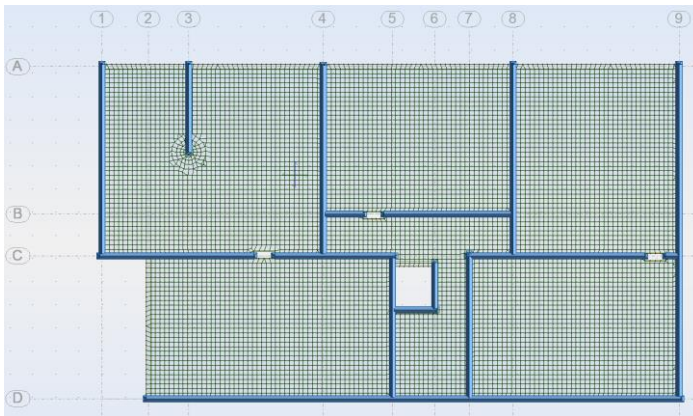
Elementoinnissa on suositeltua käyttää pääasiallisesti tasasivuisia neliön muotoisia elementtejä, kun tulokset laatan vaaditusta rauditusmäärästä halutaan katsoa ”required reinforcement” -moduulista. Tulokset ilmoitetaan elementtien keskipisteistä. Tasasivuisista neliöistä muodostuvasta symmetrisestä laskentaverkosta (kuva 24) tulosten haarukoiminen ja raudoitettavien alueiden tarkempi rajaaminen on käytännöllisempää, kuin laskentaverkosta, jonka elementit ovat epäsäännöllisen kokoisia ja muotoisia (kuva 25). Edellä mainittu seikka ei olisi ongelma, jos käytettäisiin Robotin omaa sisäänrakennettua rauditustyökälyä ”provided reinforcement”, jossa raudituskentät valitaan ohjelman sisällä. Tässä työssä ei kuitenkaan nähty tätä toimintoa hyödylliseksi käyttää sen kömpelyyden vuoksi verrattuna siitä saatuihin etuihin. Tässä ohjeessa käydään läpi, kuinka ohjelmalla saadaan esitykset laatan vaadituista teräsmäärästä sen eri laskentapisteissä. Varsinaisen jakoraudituksen valinta suoritetaan suunnittelijan toimesta näitä tuloksia tulkitsemalla. Tämän vuoksi tasamittaisten symmetristen elementtien käyttö on suositeltua.

Delaunayn menetelmällä voidaan hyödyntää myös ”Regular Mesh” -toimintoa, joka luo laatan reuna-alueille kolmion mallisia elementtejä. Toiminto saattaa joissain tapauksissa mahdollistaa virheettömämmän laskentaverkon, joskin voimakas kolmiointi voi tietynlaisilla geometrioilla aiheuttaa etenkin sisänurkissa epäsäännöllisen elementoinnin syntymisen.

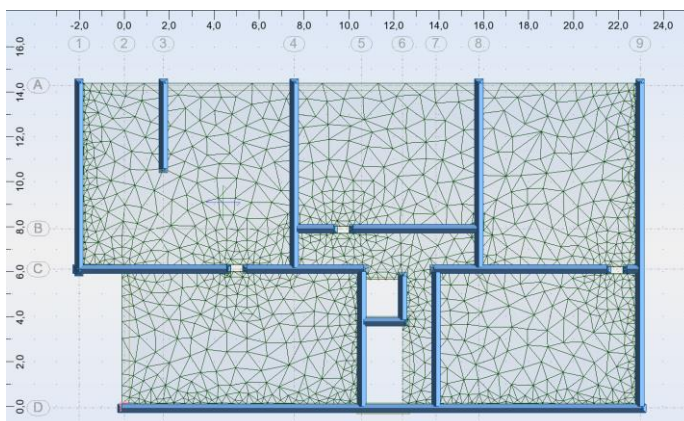
E erityisen tärkeää on käyttää riittävän pientä solmutiheyttä, jos laskentamallissa halutaan hyödyntää voimien pienennystä tukien alueilla. ”Reduction of forces (above columns and walls)” on toiminto, joka aktivoidaan halutessa raudituksen laskemisen yhteydessä (kappale 3.7.3.). Toiminnossa tuella vaikuttavien solmupisteiden reaktiot pyöristetään viereisten elementtien kesken, jotta etenkin pistemäisten tukien, kuten pilareiden yhteydessä elementtimenetelmälle tyypillisiltä epärealistisen suurilta momenttihuipuilta vältytään. Autodeskin tuki suosittelee, että toimintoa käytettäessä tukien läheisten elementtien kooksi on syytä valita arvo, joka on noin 0,5 – 1,0 kertaa tuen leveys, mutta ei koskaan suurem-

pi kuin tuen leveys [4]. Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää esimerkiksi 100 mm:n kokoista elementointia, mikäli mallissa esiintyy 160–200 mm paksuja kantavia seinätukia. Mitä suurempia ovat tuella ja sen välittömässä läheisyydessä olevat elementit, sitä suurempi on tuen momentin vähennys pyörityksen tapahtuessa tukea kauempana olevien laskentapisteiden suhteen.

Delaunayn menetelmää käyttämällä voidaan elementointia tarkentaa Kangin menetelmällä valittujen emitter-pisteiden lähetyviltä niin, että kolmio- ja nelikulmioelementit muodostavat ympyrän muotoa mukailevan tihennetyn verkon solmun ympärille. Opinnäytetyön aikana havaittiin emitter-pisteiden käytöllä olevan taivutusmomentin arvoja nostava vaikutus jatkuvien tukien päätepisteissä, jotka päättyivät keskelle laatan kenttää (kuva 24).



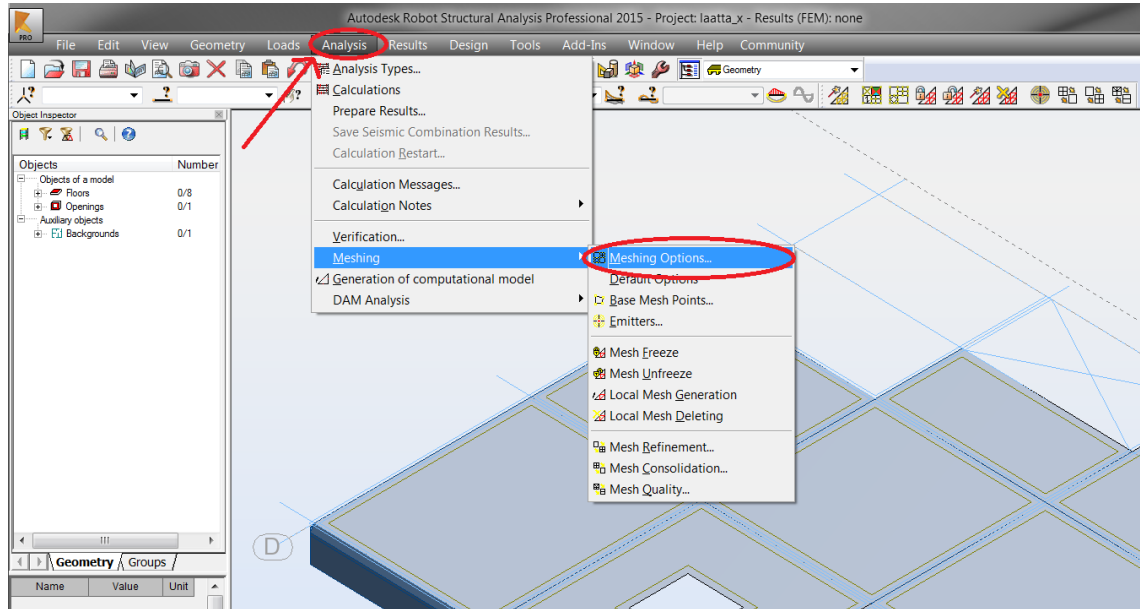
Kuva 24: Esimerkki käytännöllisestä laskentaverkosta. Käytetty menetelmä on Delaunayn ja Kangin yhdistelmä, jossa kentän keskelle päättyvän tuen viimeiseen solmuun on lisätty emitter-piste.



Kuva 25: Esimerkki laskentaverkosta, josta taivutusmomenttien vaatimat rauditusalueet ovat vaikea rajata tarkasti

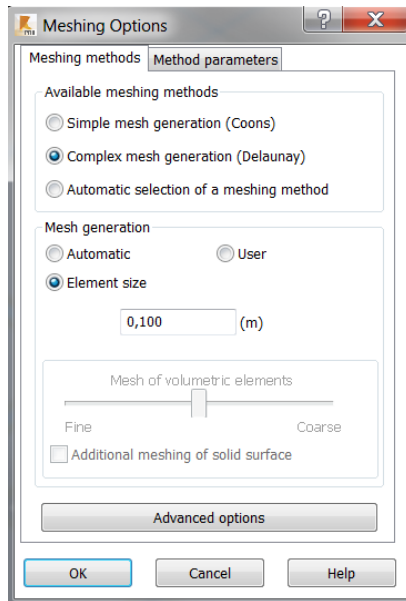
3.6.2 Elementoinnin määrittäminen (Meshing Options)

Elementoinnin määrittäminen tapahtuu Meshing Options -ikkunasta, jonne päästään valikkopalkin Analysis-välilehdeltä kohdasta Meshing (kuva 26).



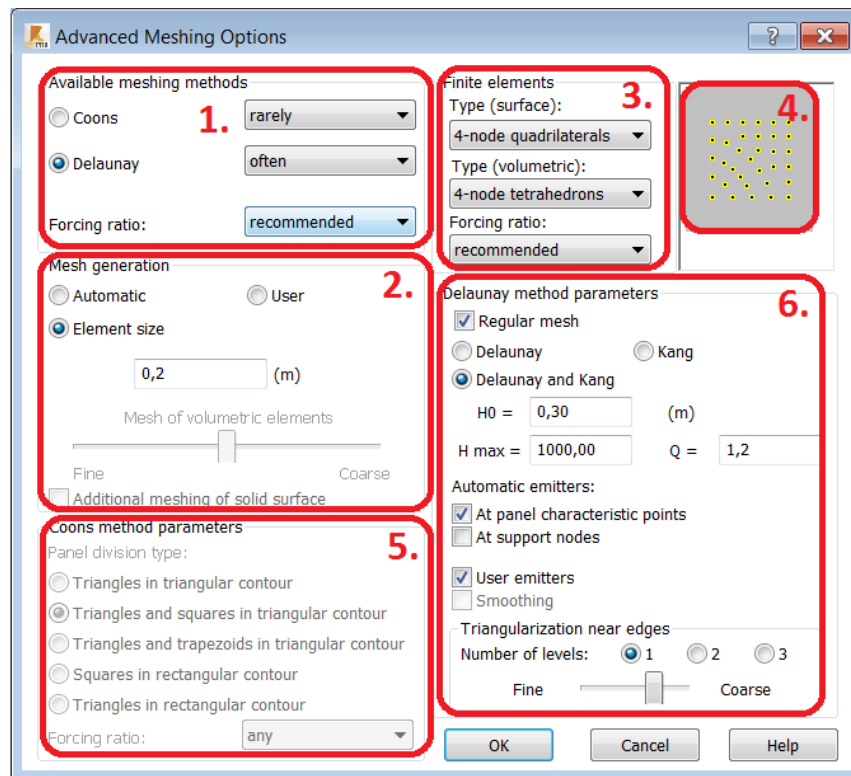
Kuva 26: elementointiasetusten manuaalinen määrittäminen

”Available meshing methods” -valinnoilla määritetään pakotetaanko ohjelma painottamaan elementtiverkon luonnissa Coonsin tai Delaunayn menetelmää, vai annetaanko ohjelman itse päättää tapauskohtaisesti kumpaa menetelmää käytetään. ”Mesh generation” -kohdassa käyttäjä valitsee solmupisteiden tiheyden määrityksen. ”Automatic” -valinta antaa ohjelman itse päättää laskentaverkon tiheyden. ”User” -valinnalla verkko voidaan jakaa pakotettuun määrään osia ja ”Element Size” -valinnalla voidaan määrittää yhden elementin sivun mitta.



Kuva 27: Meshing Options -ikkuna

”Advanced options” -painiketta klikatessa aukeaa Advanced Meshing Options -ikkuna, jossa voidaan vaikuttaa elementoinnin muodostukseen tarkemmin, kuten elementtien muotoihin tai jommankumman elementointimenetelmän parametreihin (kuva 28). ”Finite elements” -otsikon alla valitaan pääasiallisesti käytettävien elementtien solmujen lukumäärä. Suoran teräsbetoni-laatan tapauksessa pintaelementiksi (surface) valitaan joko kolmisolmuiset kolmiot tai nelisolmuiset nelikulmiot. ”Coons method parameters” -kohdassa valitaan miten elementit jakautuvat erilaisilla pinnoilla Coonsin menetelmää käytettäessä. ”Delaunay method parameters” -kohdassa olevat valinnat vaikuttavat vain Delaunayn menetelmään. ”Regular mesh” -valinta painottaa reuna-alueille kolmion muotoisten elementtien luontia. Tässä kohdassa voidaan myös valita käyttääkö Delaunayn menetelmän kanssa Kangin menetelmää ja säätää emitteripisteiden parametrejä. ”Triangularization near edges” -kohdassa ”number of levels” -valinnalla voidaan päättää montako riviä kolmioita luodaan reuna-alueille. Liukuvalinnasta voidaan säätää kolmioinnin tiheyttä.

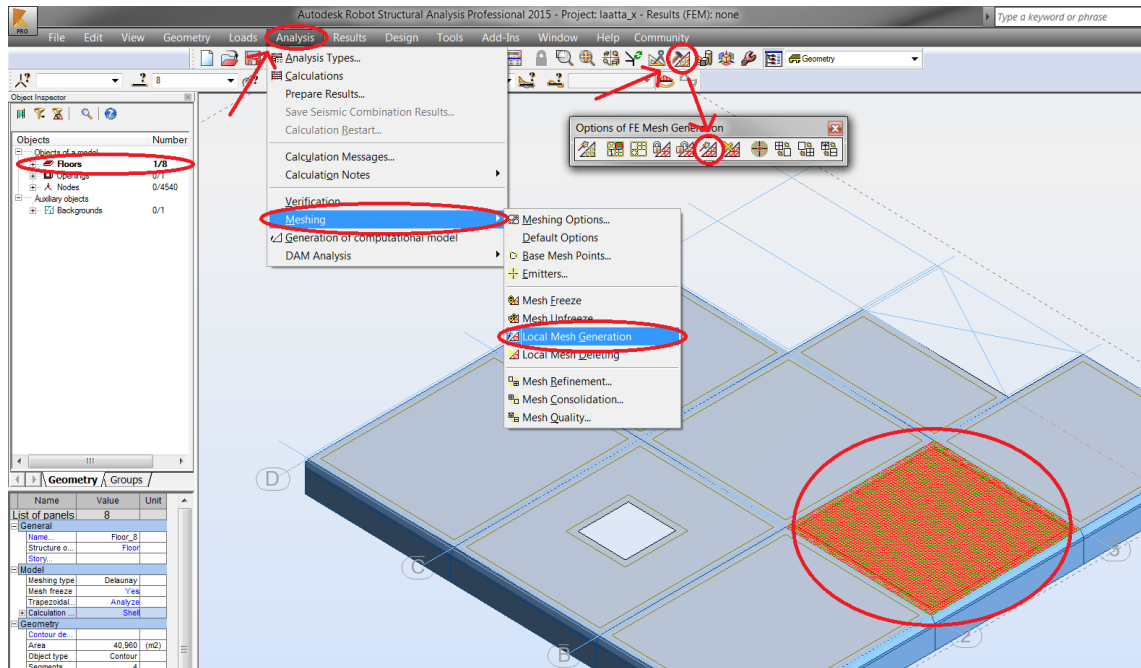


Kuva 28: Advanced Meshing Options

1. elementointimenetelmän valinta
2. elementtiverkon tiheyden määrittäminen
3. elementtityypin valinta
4. aktiivisen valinnan visuaalinen esitys
5. Coonsin menetelmän parametrit
6. Delaunayn ja Kangin menetelmän parametrit.

3.6.3 Elementoinnin luonti ja muokkaus

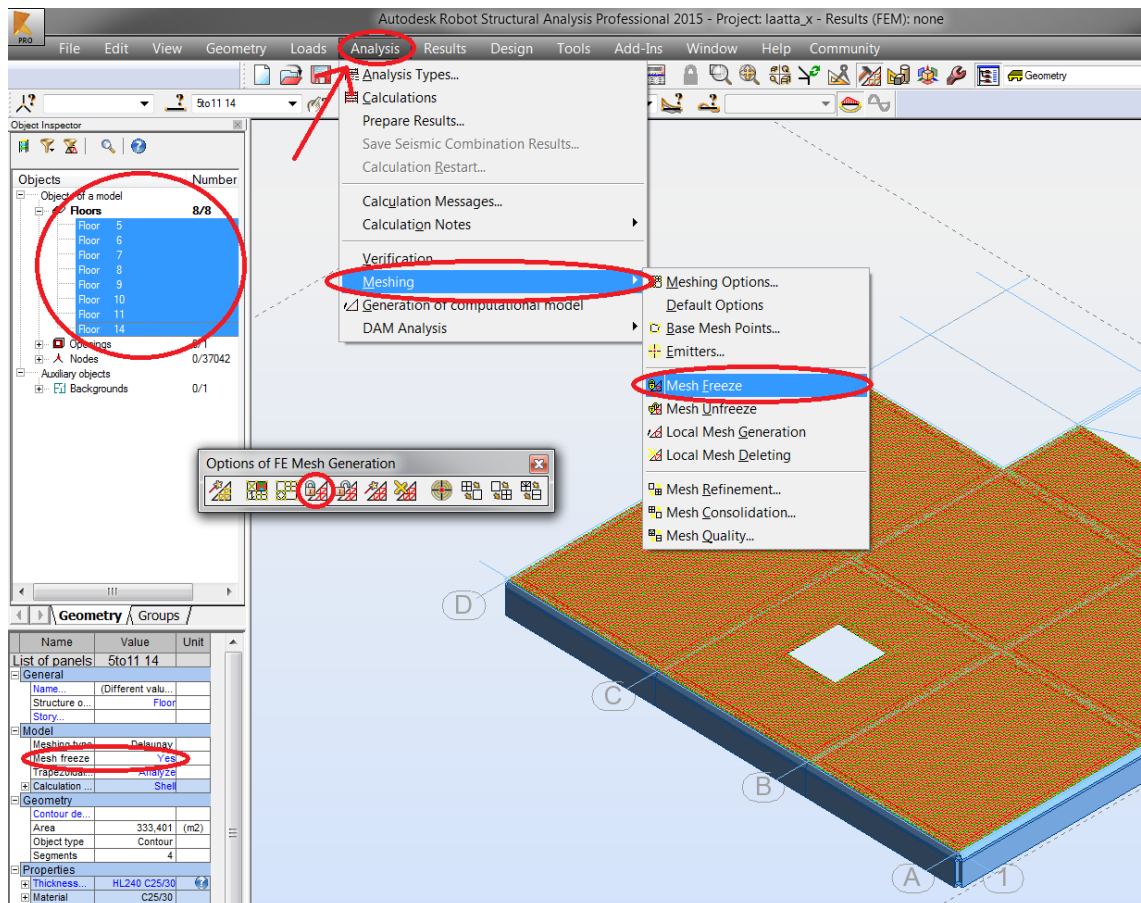
Jos Kangin menetelmä hyväksyttiin käyttöön, voidaan tässä vaiheessa lisätä emitter-pisteitä haluttuihin solmuihin valitsemalla valikkopalkin Analysis-välilehdeltä kohta Meshing ja Emitters. Valikkopalkin Analysis -välilehdeltä löytyvä "Generation of calculation model" -valinta muodostaa asetettujen parametrien mukaisen elementoinnin koko rakenteelle. Mikäli elementoinnissa ilmenee virheitä, on suositeltavaa poistaa häiriöalueen sisältämän kentän elementointi ja suorittaa elementointi uudestaan kenttäkohtaisesti käyttämällä "local mesh generation" -toimintoa (kuva 29). Tällöin eri rakenneosien solmupisteet saadaan todennäköisesti kohtaamaan ja päästään virheettömään lopputulokseen.







Kuva 29: Local Mesh Generation -toiminto

Elementtiverkon tulisi olla mahdollisimman yhdenmukainen ja hallittu tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi. Jos elementtiverkosta muodostuu sirpaleinen ja epäjohdonmukainen, eikä virhealueen uudelleen elementointi korjaa ongelmaa, on elementoinnin parametrejä muutettava. Muuttamalla verkon tiheyden asetuksia, saattavat solmupisteet löytää toisensa paremmin. Toinen tapa välttää virheitä on vaikuttaa Delaunayn reuna-alueiden kolmiointiin tai kytkeä se kokonaan pois päältä. Joissain tapauksissa myös Kangin menetelmän käyttö tukien alueilla saattaa mahdollistaa virheettömämmän lopputuloksen elementoinnissa.

Jos edellä mainittuja toimenpiteitä noudattamalla ei onnistuta luomaan virheetöntä elementointia, on mallin geometria todennäköisesti virheellinen. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi, että jotkin rakenneosat saattavat leikata toisiaan. Tällöin on syytä tarkastaa mallin geometria, tai käyttää mallin korjaustoimintoa. Mallissa esiintyviä virheitä voidaan korjata valitsemalla valikkopalkista Edit-välilehdeltä Detailed Correct -valinta. Detailed Correct -ikkunassa valitaan "Adjust type" -kohdassa "to structure axis" -valinta ja "Range" -kohdassa "Whole structure" -valinta. Korjaustoimenpide käynnistetään "Apply" painikkeesta. Kun mallin laskentaverkkoa ei haluta enää muuttaa, kannattaa elementointi lukita "mesh freeze" -toiminnolla (kuva 30).



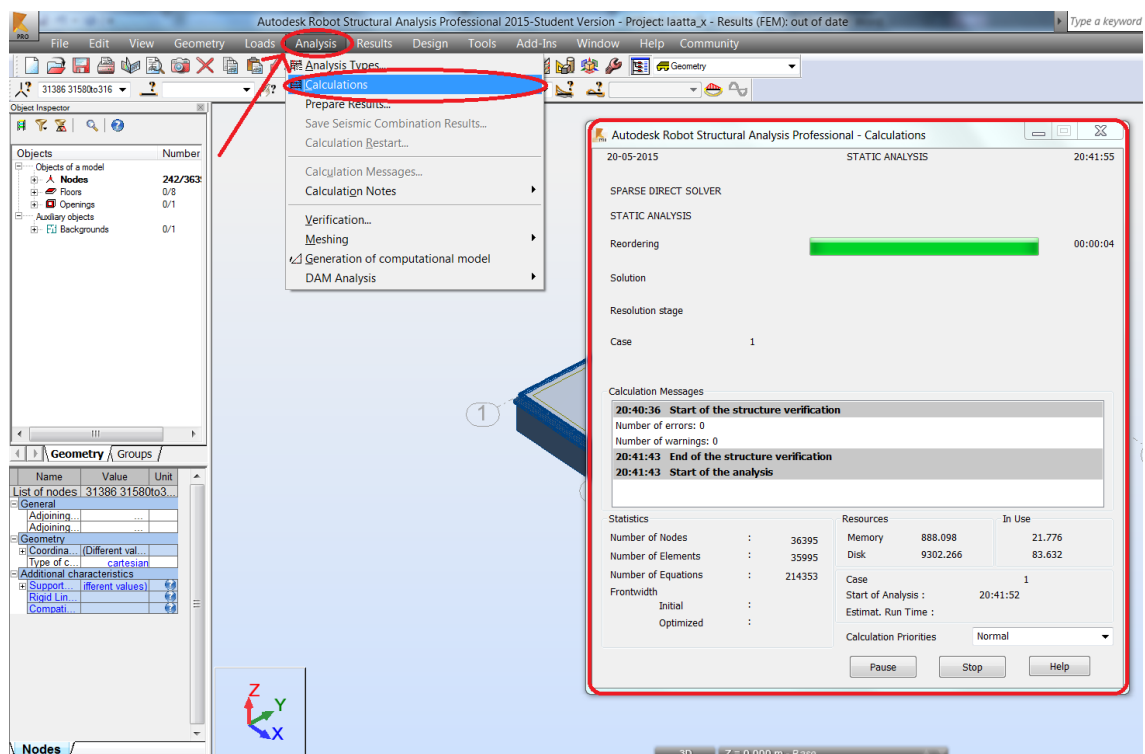
Kuva 30: Elementoinnin lukitus "Mesh Freeze" -toiminnolla

- Valikkopalkista valitaan **Analysis > Meshing > Meshing Options** 
 - Valitaan "Available meshing methods" -kohdasta "Complex mesh generation (Delaunay)" -valinta
 - Valitaan "Mesh generation" -kohdasta "Element size" -valinta ja kirjoitetaan kenttään yhden elementin leveys, esim. 0,1 m.
 - Hyväksytään "OK" -painikkeella
- Rakenne elementoidaan **Analysis > Generation of computational model**  -valinnalla
 - Jos laskentaverkosta tulee epäjohdonmukainen, voidaan:
 - Poistaa häiriöalueen elementointi **Analysis > Meshing > Local mesh deleting**  -valinnalla ja elementoida kyseinen laatta uudelleen käyttäen **Analysis > Meshing > Local mesh generation**  -toimintoa

- Muuttaa "Element size" -kentän arvoa pienemmäksi tai suuremmaksi
- Kytkeä Meshing options -ikkunan "Method parameters" -välilehdeltä "Delaunay method parameters" -kohdasta "Regular mesh" -valinta pois päältä.
- Tarvittaessa korjata mallin geometriassa esiintyviä mallinnusvirheitä valitsemalla Edit > Detailed correct -valinta.

3.6.4 Laskenta (Calculations)

Tässä vaiheessa mallin tulisi olla staattista analyysia vaille valmis. Laskenta-analyysi käynnistetään valikkopalkin Analysis-välilehden Calculations-painikkeesta (kuva 31).





Kuva 31: Mallin staattinen analyysi

Kun laskenta-analyysi on suoritettu ja tulokset ovat ajan tasalla, ilmestyy ruudun yläreunaan teksti "Results (FEM); available". Tämä tarkoittaa, että tulokset ovat valmiita tarkasteltaviksi.

- Valikkopalkista valitaan **Analysis > Calculations** 

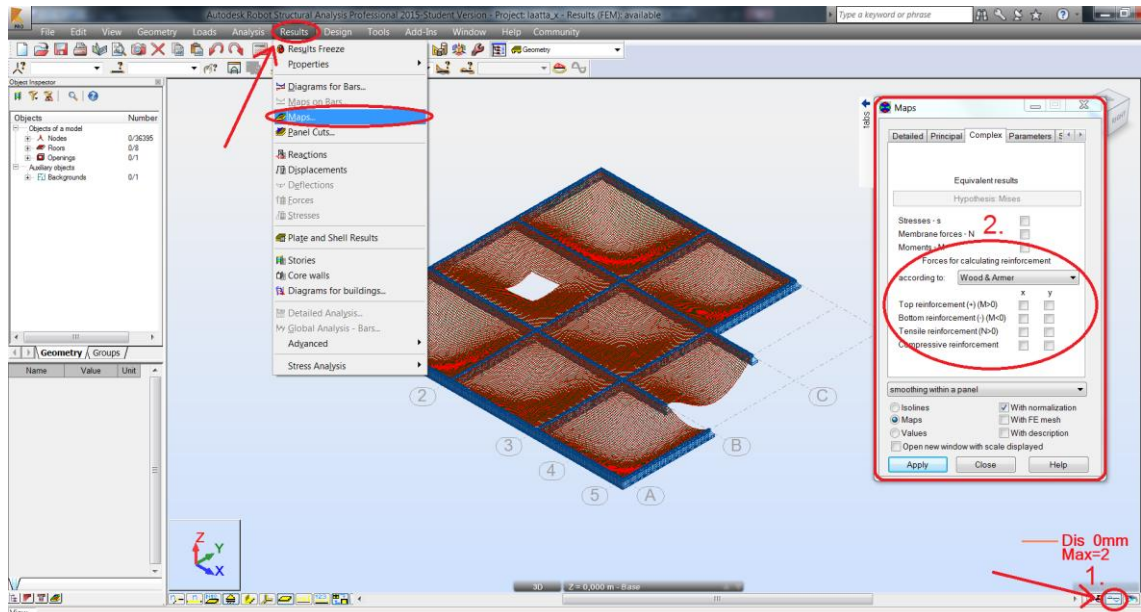
- *Jos laskenta ilmoittaa virheitä, tarkastetaan tuet ja elementointi*

3.7 Staattisen analyysin tulokset ja vaadittu raudoitus

Laskenta-analyysin jälkeen selvitetään laatan vaaditun raudoituksen pinta-ala käyttämällä Robotin sisäistä teräsbetonirakenteiden suunnitteluun tarkoitettua RC-Design -moduulia. Ennen tätä on syytä tarkastaa laskenta-analyysin tulokset. Mallin tulokset voidaan ensisijaisesti arvioida rakenteen muodonmuutoskentän graafisen esityksen perusteella. Muodonmuutoskenttää voidaan tarkastella klikkaamalla ruudun oikeassa alareunassa olevaa  -pikavalintapainiketta, kun elementtiverkon näkyvyys  -painike on aktivoitu (kuva 32, kohta 1). Muodonmuutoskentän graafisesta esityksestä nähdään kuinka rakenne käyttäytyy valinnassa olevan kuormituksen tai kuormitusyhdistelyn alaisena. Graafisesta esityksestä voidaan päätellä onko rakenteen mallinnus onnistunut oikein. Muodonmuutoskentästä ei saada rakenteen varsinaista taipuman arvoa tai muita täsmällisiä suureita. Kuormien aiheuttamista voimista, jännityksistä, taivutusmomenteista ja taipumista on mahdollista luoda graafiset tulosesitykset Results-ikkunan kautta. Taivutusmomenttien arvot on suositeltua tarkistaa.


3.7.1 Jännitykset, voimasuureet ja momentit (Maps)



Laatassa vaikuttavista voimista, jännitysrasituksista ja momenteista saadaan tuotua malliin graafinen esitys Maps-ikkunasta, joka aukeaa valikkopalkin Results-välilehdeltä (kuva 32). Kerrallaan voidaan tarkastella yhden rasiustyyppin graafista esitystä yhdessä koordinaatiston suunnassa. Tulosesitys tuodaan näkymään asettamalla rasti halutun valinnan kohtaan ja hyväksymällä "Apply" -painiketta klikkaamalla. Valitun akseliston mukainen tarkastelusuunta tarkoittaa rakenteen paikallisen koordinaatiston mukaista suuntaa, ellei tätä muuteta "Automatic Direction" -painikkeesta.




Kuva 32: tulosten tarkastus

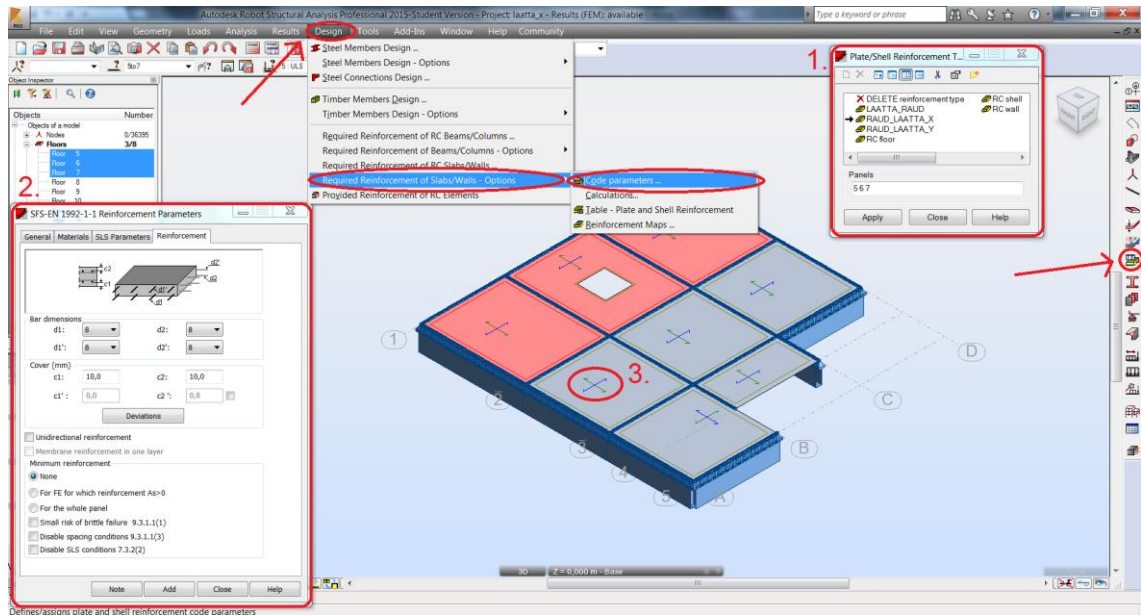
Raudoituksen mitoituksessa käytettäviä suunnittelumomentteja voidaan tarkastella Maps-ikkunan "Complex" -välilehdeltä. Kerralla voidaan valita suunnittelumomenttien esitys ylä- tai alapinnan raudoitukselle x- tai y-suunnassa (kuva 32 kohta 2). "Parameters" -välilehdeltä voidaan aktivoida "Reduction of forces above columns and walls" -valinta, jolloin tukien suunnittelumomenttien arvot ovat pienennettyjä arvoja. "Complex" -välilehdellä määritetään millainen graafinen esitys tuloksista luodaan. "With FE mesh" -valinta esittää elementtiverkotuksen tulosgraafikan yhteydessä. "With description" -valinta tuo grafiikkaan tulosten tarkat lukuarvot ja lisää ikkunaan "Description positions" -alavetovalikon, josta valitaan kuinka tulokset esitetään. "Finite element centers" esittää tulosten arvot jokaisen elementin keskipisteestä, kun taas "Characteristic points" -valinta esittää vain paikallisten alueiden ääriarvot. Tulokset ovat esitys kuormitustapauksesta, joka on sillä hetkellä valittuna valikkopalkin alapuolella sijaitsevasta Cases-alavetovalikosta. Tässä vaiheessa on suositeltavaa tarkistaa taivutusmomenttien suuruusluokka, jotta mahdolliset mallinnusvirheet kävisivät ilmi, ennen kuin raudoituksen laskenta aloitetaan.

- Valikkopalkista valitaan **Results > Maps** 
- Tarkasteltava kuormitustapaus valitaan valikkopalkin alapuolisesta Cases-alavetovalikosta

- Tarkastetaan mallin muodonmuutoskentän käyttäytyminen ruudun oikeassa alareunassa sijaitsevasta  -painikkeesta
- **Maps**-ikkunan "Complex" -välilehdeltä tarkastetaan positiiviset ja negatiiviset taivutusmomentit x- ja y-suunnassa
 - Valitaan "smoothing within a panel"
 - Valitaan "Maps"
 - Hyväksytään vaihtoehdot "With normalization" ja "With description"
 - "Description positions" -alavetovälisestä valitaan joko "Finite element centers" tai "Characteristic points" -valinta
 - Esitys hyväksytään "Apply" -painikkeesta
- Kuvaajat suljetaan ruudun oikeassa alanurkassa sijaitsevasta  -pikavalintapainikkeesta

3.7.2 Raudoituksen parametrit (Reinforcement Parameters)

Raudoituksen parametrit tulee osoittaa erikseen jokaiselle mallissa esiintyvälle laatalle, tai Robot käyttää niiden laskennassa oletusraudoitustyyppiä, joka harvoin tuottaa haluttuja tuloksia. Raudoituksen määrittäminen tapahtuu Plate/Shell Reinforcement type -ikkunan kautta. Valikkopalkista valitaan Design > Required Reinforcement of Slabs/Walls - Options > Code parameters. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ruudun oikeassa reunassa sijaitsevaa  -pikavalintapainiketta (kuva 33).



Kuva 33: Raudoituksen määrittäminen


Plate/Shell Reinforcement -ikkunassa näkyvät valmiit oletusraudoitustyyppit (kuva 33 kohta 1). Omia tyyppiä voidaan luoda klikkaamalla "Definition of the new reinforcement type" -painiketta tai muokata jotain olemassa olevaa tyyppiä klikkaamalla sitä. "General" -välilehdellä uusi raudoitusparametri tulee nimetä uudella nimellä "Name" -kentässä. "Type" -valikosta valitaan mitä rasituksia vastaan laatta mitoitetaan; "Simple bending" -valinta mitoitaa laatan taivutusmomentin mukaan ja "compression/tension" -valinta raudoittaa laatan veto- ja puristusvoimien mukaisesti. "Main reinforcement direction" -valinta määrittää pääraudoitussuunnan valitun global-koordinaattiakselin mukaan. "Materials" -välilehdeltä valitaan teräksen ja sementin laatu. "SLS Parameters" -välilehdeltä määritetään pyritäänkö raudoituksella rajoittamaan halkeilua tai taipumaa, valitaan ympäristöluokka rakenteen kummallekin pinnalle ja asetetaan laatan ikä kuormitettaessa.

Lopuksi "Reinforcement" -välilehdeltä valitaan "Bar dimensions" -kohdasta tankojen paksuudet rakenteen ylä- ja alapinnassa pää- ja poikittaisraudoitussuunnassa (kuva 33 kohta 2). Tässä kohtaa on syytä huomioida eurokoodin mukaiset tankojen vähimmäisjakovälin määräykset. Esimerkiksi, jos laatta valitaan raudoitettavan T10-harjaterästangoilla, on toteutettava raudoitus paikallisten momenttien ääriarvojen kohdalla vähintään $314 \text{ mm}^2/\text{m}$, koska tankojen vähimmäisjakovälisääntö pakottaa jakamaan teräkset maksimimomenttien alueilla


enintään 250 mm:n välein (T10 K250 = 314 mm²/m). Tämän vuoksi on suositeltavaa asettaa "Bar dimensions" -kohtaan pienin tankopakkuus, jota rakenteessa halutaan käyttää, yleensä T8. Toinen vaihtoehto on hyväksyä "Disable spacing conditions" -valinta, jolloin Robot ei huomioi vähimmäisjakovälisääntöä ja ehdon toteutuminen on suunnittelijan vastuulla.

"Cover (mm)" -kenttiin syötetään laatan ylä- ja alapinnan betonipeitepaksuuksien c_{min} -arvot ja "Deviations" -painikkeesta lisätään erikseen sallitun mittapoikkeaman Δc_{dev} -arvo. Edellä mainittujen summa muodostaa betonipeitteen kokonaispaksuuden c_{nom} -arvon.

"Minimum reinforcement" -otsikon alla määritetään, kuinka laskennallinen minimiraudoitus otetaan huomioon tuloksissa. Jos valitaan "For FE for which reinforcement $A_s > 0$ " tai "For the whole panel" -vaihtoehto, esitetään raudoituksen tuloksissa vähimmäisraudoituksen määrä, mikäli $A_{s,min}$ on suurempi, kuin rajatilamitoituksen vaatima A_s . Tällöin tuloksista on mahdotonta kertoa, mikä on rajatilan vaatima vetorausituksen määrä. Tämän vuoksi voi olla suositeltavaa valita esitykseksi "None", jolloin Robot kyllä laskee vähimmäisraudoituksen määrän, mutta tulokset eritellään rajatilamitoituksen antamista vastauksista erikseen. Tällöin vähimmäisraudoituksen määrä on tarkastettavissa Reinforcement-tulosikkunasta erikseen kohdasta "Minimum reinforcement" (kappale 3.7.3) "Add" -painike lisää määritellyn raudoituksen parametrin tyyppikirjastoon ja "Apply" painike kuittaa valinnan "Panels" -kentässä syötettyyn laattaan.

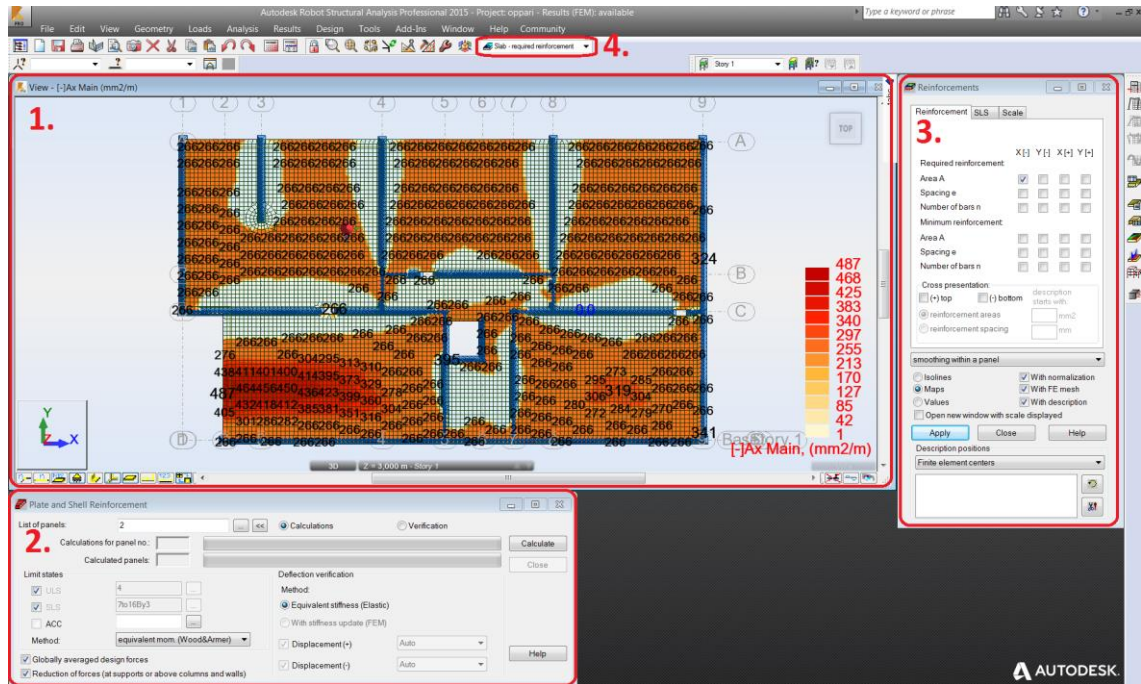
Kun laatan raudoitustyyppi on osoitettu, ilmestyvät mallin grafiikkaan suuntanuolet, jotka ilmaisevat laatan raudoitussuunnat (kuva 33 kohta 3). Sininen suuntanuoli tarkoittaa pääraudoitussuuntaa ja vihreä suuntanuoli poikittaisraudoitussuuntaa. Ruudun vasemmassa alanurkassa olevista näkymien pikavalinnoista voidaan aktivoida rakenteiden raudoitustyyppien esitys  -painikkeesta.

- Valikkopalkista valitaan **Design > Required Reinforcement of Slabs/Walls –Options > Code parameters...** 

- Klikataan  -"definition of the new reinforcement type" -painiketta tai kaksoisklikataan jotain olemassa olevaa raudoitustyyppiä
- Annetaan tyypille uusi nimi "Name" -kenttään
- Annetaan tyypille "Type" -alasvetovalikosta raudoituksen laskenta määritelmäksi "simple bending"
- Valitaan "Main reinforcement direction" -kohtaan joko "Along X axis" tai "Along Y axis" riippuen siitä, missä suunnassa laatan pääraudoitussuunta on globaalien koordinaattiakseliston suhteen
- Valitaan "Materials" -välilehdeltä käytetty sementti ja teräslaatu
- Valitaan "SLS parameters" -välilehdeltä sallittu taipuman raja, betonin ympäristöluokka rakenteen ylä- ja alapinnassa sekä betonin kuormitusikä (suositus: 28d)
- Valitaan "Reinforcement" -välilehdeltä, mitä tankopaksuutta Robot käyttää rakenteen raudoittamisessa (suositus: T8)
- "Minimum reinforcement" -kohdassa valitaan vähimmäisraudoituksen laskentasäännöt (suositus: None)
- Lisätään luotu parametri tyyppikirjastoon "Add" -painikkeesta
- Valitaan "Panels" -kenttään laatta, johon uusi raudoituksen parametri halutaan osoittaa, joko klikkaamalla mallista kyseistä laattaa, tai kirjoittamalla laatan tunnistenumero "Panels" -kenttään. Tämän jälkeen klikataan "Apply" -painiketta
- Tallennetaan projekti **File > Save As** -valinnalla

3.7.3 Raudoitus (Slab – Required Reinforcement)

Laatan vaatima raudoitus ja laatan taipuma selviävät Slab -required reinforcement -työskentelytilassa, jonne päästään näkymien alasvetovalikosta RC-design -kohdasta. Tässä näkymässä rakenteen raudoituksen määrittelyä hallitaan kolmen dialogi-ikkunan kautta (kuva 34).



Kuva 34: RC-Design -moduuli

1. graafinen näkymä
2. raudoituksen laskennan hallintaikkuna
3. tulosten esityksen hallintaikkuna
4. Työskentelynäkymien alasvetovalikko, josta valittuna RC Design - Slab - required reinforcement -moduuli.

Vasemmalla alanurkassa on Plate and Shell Reinforcement -ikkuna (kuva 34 kohta 2), jossa suoritetaan raudoituksen määrityksen vaatima laskentaprosessi. "List of panels" -kenttään syötetään mitkä rakenteet halutaan raudoittaa ja "Limit states" -kenttiin syötetään mitä kuormitusyhdistelyjä käytetään murto-, käyttö- ja onnettomuusrajatilatarkastelussa. "Method" -kentässä valitaan mitä ratkaisumenetelmää raudoituksen määrityksessä käytetään.

Raudoituksen laskentaan on valittavissa kolme eri ratkaisumenetelmää; "equivalent moments (NEN)", "equivalent moments (Wood&Armer)", sekä "analytical" -valinta. Edellä mainituista menetelmistä ensimmäinen on nopein, mutta epätarkin, kun taas viimeinen, eli analytical on tarkin, mutta hitain menetelmästä. Autodesk Help -sivuston mukaan tarkimman ja epätarkimman menetelmän välillä ei ole esiintynyt testeissä yli 5 % eroavaisuuksia raudoituksen pinta-aloissa, epätarkimman menetelmän antaessa suurempia tuloksia. "Wood&Armer" -

analyysi on kompromissi näiden kahden menetelmän välillä ja on Autodesk Help -sivuston mukaan suositeltu käytettäväksi ratkaisumenetelmäksi.





”Globally averaged design forces” -valinta pyöristää kaikkien vierekkäisten elementtien, jotka jakavat saman solmupisteen, voimasuureet toistensa kesken. Valinta voidaan hyväksyä, jos tarkoituksena on laskea raudoitus vain osalle mallin laatoista ja niiden vierekkäisille laatoille jakautuva voimien vaikutus halutaan ottaa huomioon. Jos valintaa ei hyväksytä, tehdään pyöristys vain niiden elementtien kesken, joille raudoitus on valittu laskettavaksi. Tätä valintaa ei tule pitää aktiivisena, jos mallissa esiintyy rakenneosia kahdessa eri tasossa, esim. laattoja ja seiniä. Jos tuet on mallinnettu Geometry > Supports reittiä pitkin ja mallissa esiintyy rakenteita pelkästään horisontaalisesti, voidaan valintaa halutessa pitää päällä, joskaan sillä ei ole vaikutusta mallissa, jonka kaikki rakenneosat raudoitetaan.

”Reduction of forces” -valinta sallii voimien ja momenttien pyöristyksen tukien läheisten elementtien kesken. Valinta pienentää tukien alueiden raudoitusta ja sitä olisi suositeltavaa hyödyntää, jotta liialliselta raudoitukselta vältyttäisiin. Tätä toimintoa käyttäessä on kuitenkin tärkeää ymmärtää, että mitä suurempaa elementtiä käytetään, sitä suurempi on tuen momentin pienennys. Toimintoa ei tulisi käyttää, jos laskentaverkon elementtien koko on tukien läheisyydessä suurempi, kuin tuen todellinen leveys.

”Calculate” -painike suorittaa raudoituksen laskutoimenpiteen. Jos kuormitusyhdistelyt luotiin manuaalisesti, ohjelma saattaa antaa varoitusviestin tulosten mahdollisesta virheestä, mikäli käyttörajatiloja ei ole jaoteltu käytetyn teräsbetoninormin kanssa yhteensopiviin käyttörajatilojen alaluokkiin (katso kappale 3.5.4). Tämä viesti ei välttämättä tarkoita, että tulokset olisivat vääriä. Automaattisia kuormitusyhdistelyitä käytettäessä virheilmoitusta ei tulisi ilmaantua.

Laskennan jälkeen on mahdollista tuoda Reinforcements-ikkunasta (kuva 34 kohta 3) raudoitustulosten graafinen esitys View-ikkunaan (kuva 34 kohta 1). Reinforcement-välilehdellä voidaan valita tarkasteltavaksi raudoituksen vaadittua pinta-alaa, tankojen jakoväliä tai tankojen lukumäärää laatan ylä- tai alapinnan x- tai y -suunnassa. X-suunta viittaa aina laatan pääraudoitussuuntaan ja y-suunta poikittaisraudoitussuuntaan. Valinnoilla määritetään millainen graafinen

esitys View-ikkunaan tuloksista muodostetaan samalla periaatteella, kuten aikaisemmassa Maps-ikkunassa (kappale 3.7.1).


- Työskentelynäkymien alavetovalikosta valitaan **RC Design**  > **Slab - required reinforcement** 
- **Plate and Shell Reinforcement**  -ikkunassa:
 - Valitaan raudoitettavat rakenteet "List of panels" -kentässä
 - Valitaan tarkistettavat kuormitusyhdistelyt "Limit states" -kohdassa
 - Method-alavetovalikosta valitaan "equivalent mom. (Wood&Armer)" -valinta
 - Valitaan "Reduction of forces" -valinta, mikäli tukien läheiset elementit ovat kooltaan \leq kuin $0,8 \cdot$ tuen leveys
 - Käynnistetään laskenta "Calculate" -painikkeesta
- Luodaan tuloksista graafinen esitys **Reinforcements**  -ikkunassa
 - Tarkastetaan vaadittu raudoituspinta-ala "Reinforcement" -välilehdellä "Area A" -kohdan x- ja y-suunnassa ylä- [+] ja alapinnoissa [-]. X-tarkastelusuunta vastaa aina laatalle määrättyä pääraudoitussuuntaa.
 - Valitaan "smoothing within a panel"
 - Valitaan "Maps"
 - Hyväksytään vaihtoehdot "With normalization" ja "With description". Halutessa hyväksytään "With FE mesh"
 - "Description positions" -alavetovalikosta valitaan joko "Finite element centers" tai "Characteristic points" -valinta
 - Esitys hyväksytään "Apply" -painikkeesta

3.7.4 Taipuman tarkastus

Laatan taipuma voidaan selvittää Robotissa kahta eri menetelmää käyttämällä, joista ensisijainen menetelmä ohjelmassa on nimeltään "Equivalent stiffness (Elastic)". Taipuma tarkastetaan alustavasti tällä menetelmällä, kun raudoituksen laskenta käynnistetään "Plate and Shell Reinforcement" -ikkunassa ensi

kertaa. Algoritmi, jota tämä menetelmä hyödyntää taipumaa laskettaessa, perustuu olettamukseen, että laatta koostuu isotrooppisesta (jäykkyysominaisuudet kaikissa suunnissa samanlaiset) ja elastisesti käyttäytyvästä materiaalista. Elementtien jäykkyydet x- ja y-suunnassa arvioidaan murto-, käyttö- ja onnettomuusrajatila-analyysistä saatujen vaadittujen rauditusmäärien ja laatasta esiintyvän halkeilun perusteella. Tämän jälkeen x- ja y-suunnan elementtikohteisista jäykkyyksistä lasketaan yhtenäinen keskiarvo, joka on painotettu elementissä esiintyvän kummankin suunnan momentin mukaisesti. Menetelmä tarkastaa mallin jokaisen laatan erikseen. On tärkeää, että rakenteen jokainen tukevien rakenneosien erottama kenttä, jossa taipuman paikallisia ääriarvoja esiintyy, on mallinnettu omana laattanaan. Muulloin jäykkyyksien keskiarvoon pyöristäminen voi vääristää tuloksia [6]. "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmästä saatu tulos on teoriassa varmalla puolella oleva hypoteesi, mutta riittävän tarkka sillä edellytyksellä, että laataston jokainen paikallisen ääriarvon sisältämä kenttä on mallinnettu omana laattanaan. Jos laatta ei ole puhtaasti ristiin-, eikä yhteen suuntaan kantava, tai elastisen analyysin ilmoittama taipuma-arvo ylittää sallitun rajan, on taipuma suositeltavaa tarkastaa Robotin toisella tarkemmalla ratkaisumenetelmällä.

Toinen menetelmä on nimeltään "With stiffness update (FEM)" ja se voidaan käynnistää vasta ensisijaisen "Plate and Shell reinforcement" -analyysin jälkeen "Verification" -valinnasta. Tässä menetelmässä käytetty algoritmi on muuten samanlainen elastisen menetelmän kanssa, mutta jäykkyydet lasketaan erikseen x- ja y-suunnassa elementtikohtaisesti, ilman keskiarvoon pyöristystä. Tätä menetelmää käytettäessä laatta toimii siis anisotrooppisesti (jäykkyysominaisuudet eri suunnissa poikkeavat) ja sille saadaan vaihtelevia jäykkyyden arvoja. Tällä menetelmällä saatu taipuman arvo on teoriassa tarkka arvo, mutta menetelmä voidaan käynnistää kerralla ala- ja yläpuolen taipumalle vain yhdellä kuormitusyhdistelyllä ja se vaatii enemmän laskenta-aikaa, kuin "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmä. Opinnäytetyö prosessin aikana huomattiin, että taipuma kannattaa tarkistaa "With stiffness update (FEM)" -menetelmällä tapauksissa, joissa laatta ei ole kaikilta sivuiltaan viivamaisesti tuettu, tai jos sallitun taipuman arvo ylittyy "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmällä.

- Luodaan "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmän *taipumasta graafinen esitys Reinforcements* -ikkunassa
 - Tarkastetaan taipuma "SLS" -välilehdellä "Deflection u" -kohdasta X[-] ja Y[-].

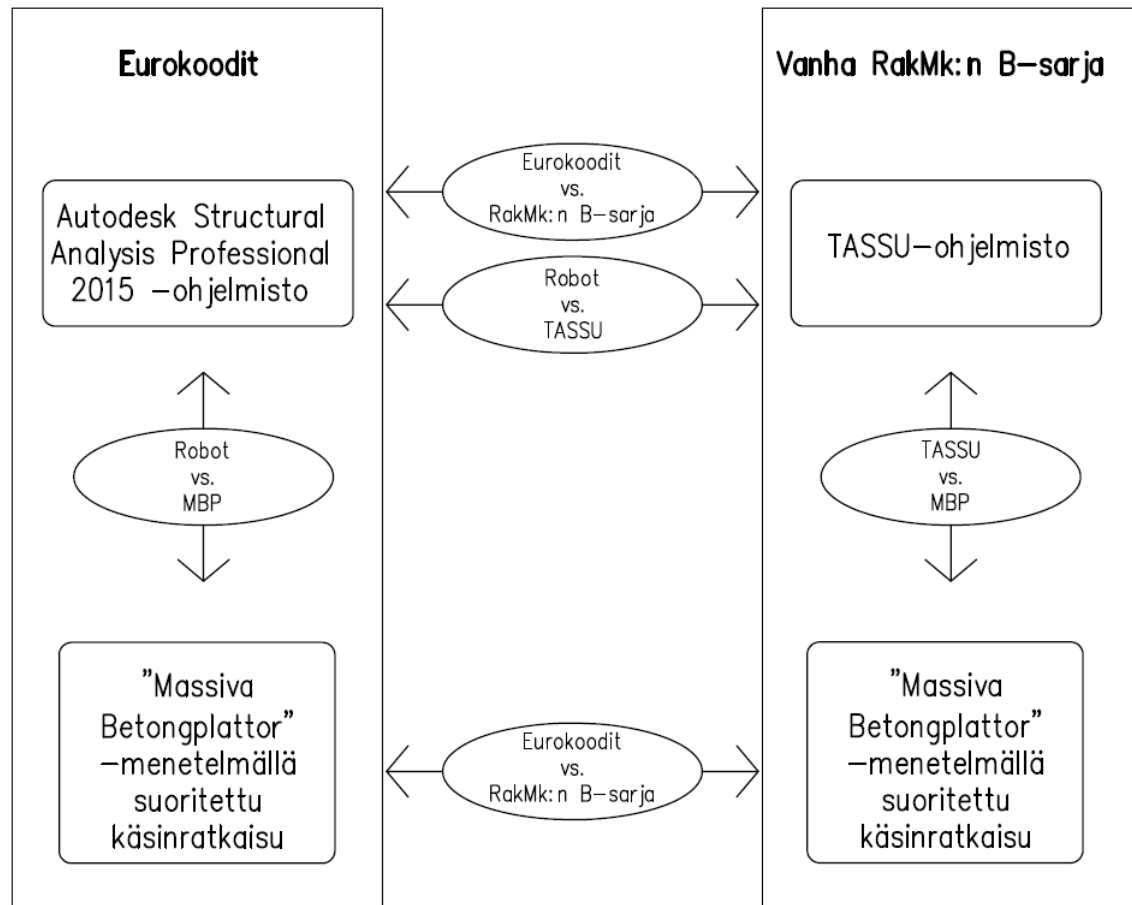
4 Tulosten vertailu

Ennen kuin uusi mitoitusohjelma voitiin ottaa käyttöön osaksi suunnittelutyötä, oli toimeksiantajalle osoitettava, että tässä opinnäytetyössä esitetty Robotilla suoritettava mitoitusmenetelmä tuottaa oikeita tuloksia luotettavasti. Tämän vuoksi opinnäytetyössä suoritettiin lukuisia vertailulaskelmia erilaisten ratkaisumenetelmien kesken.

4.1 Analyysimenetelmät

Vertailulaskelmia suoritettiin kahden eri FEM-ohjelman, Robotin ja TASSU:n sekä käsin laskettavien ratkaisujen kesken. Käsin laskettaessa sovellettiin ristiin kantavien laattojen tapauksessa ruotsalaista "Massiva Betongplattor" (MBP) -menetelmää. Yhteen suuntaan kantavat laatat ratkaistiin palkkien ratkaisuun soveltuvien momenttiyhtälöiden avulla. FEM-ohjelmilla suoritettu mitoitus tapahtui niihin ohjelmoitujen suunnittelunormien mukaisesti, eli Robotilla suoritettu analyysi tehtiin uutta euronormia noudattaen ja TASSU:lla laatat mitoitettiin RakMK:n B-sarjan mukaisesti. Käsinratkaisu suoritettiin sekä uusilla että vanhoilla normeilla. Täten vertailua tapahtui sekä eri ratkaisumenetelmien että uusien ja vanhojen standardien välillä. Tuloksia vertailtiin taivutusmomenttien, vaadittujen rauditusmäärien sekä taipumien osalta. Kuvassa 35 on esitetty tulosten vertailupolku.

Tulosten vertailukartta



Kuva 35: Tulosten vertailupolku.

4.1.1 Robot-ohjelma

Robotilla suoritettut analyysit tehtiin tässä opinnäytetyössä esitetyn ohjeen mukaisesti. Laskelmat noudattivat eurokoodien SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1992 standardien ohjeita. Elementointi suoritettiin kaikissa tapauksissa Delaunayn menetelmällä, joka rakentui kokonaan neliön mallisista elementeistä. Elementin kokona käytettiin 0,1 m. Tuet mallinnettiin lineaarisina niveltukina, tai lineaarisina jäykkinä tukina tapauksesta riippuen ja tukien leveyden arvoksi asetettiin 160 mm Support definition > Advanced-valikosta. Tukien momenttien vähennykseen vaikuttavaa "Reduction of forces" -toimintoa käytettiin kaikkien mallien kohdalla, ellei toisin ole mainittu.

4.1.2 TASSU-ohjelma

TASSU-ohjelmalla suoritettavat laskelmat noudattavat vanhaa RakMk:n B-sarjan mukaista suomalaista standardia, missä mm. kuormiin ja materiaaleihin vaikuttavat osavarmuuskertoimet ovat erilaiset, kuin eurokoodissa esitetyt. Nämä parametrit eivät ole käyttäjän muutettavissa. TASSU:lla suoritetuissa mitoituksissa käytettiin vanhojen normien mukaista pienempää hyötykuorman arvoa 1,5 kN/m². Euronormien mukaisessa kansallisessa liitteessä arvo on 2,0 kN/m². Laatat piirrettiin alkamaan tukien ulkoreunoilta ja tuet piirrettiin 160 mm leveinä seininä.

4.1.3 MBP-menetelmä

MBP-menetelmällä viitataan Suomessa laajalti tunnettuun ruotsalaiseen taulukojen käyttöön perustuvaan ”Massiva Betongplattor” tai ”massiivilaatta”-menetelmään. Myös ”ruotsalainen menetelmä” on usein kuultu nimitys tästä ratkaisumenetelmästä. Aihetta on käsitelty laajasti vuoden 1982 By 202 osa 2 - kirjassa, mutta sen perusteet käydään läpi myös uudessa vuoden 2015 alussa ilmestyneessä kirjassa By 211 Betonirakenteiden Suunnittelun Oppikirja - osa 2. Menetelmä soveltuu suorakaiteen muotoisille laatoille, jotka voivat olla neljältä tai kolmelta sivulta tuettuja joko nivelellisesti tai jäykästi. Tuentatapauksesta ja kentän sivujen mittasuhteista riippuu, minkälaisen momenttikerroimen arvon α taulukot osoittavat. Mitoittava momentti m_d lasketaan kaavan 1 mukaisesti [7, 304–305; 8, 15–16]:

$$m_d = \alpha * p_d * L_x^2 \quad (1)$$

missä α on momenttikerroin

p_d on tasaisesti jakautuneen kokonaiskuorman laskenta-arvo pinta-alayksikkö kohti

L_x on kentän lyhyempi jännemitta

Mitoitusmomentiksi saadaan lineaarisen kimmoteorian mukainen momenttiarvo. Tukien kohdalla laskumenetelmä antaa keskimääräisen tukimomentin arvon, joka soveltuu tasaisesti jaetulle yläpinnan raudoitukselle. Näiden keskimääräis-

ten momenttiarvojen mukainen raudoittaminen murtorajatilassa on turvallista, sillä maksimiarvojen katsotaan tasoittuvan keskiarvon mukaisesti betonin plastisoitumisen ja halkeilun vaikutuksesta. Tämä tulee ottaa huomioon tehdessä vertailua FEM -menetelmillä saatuihin arvoihin, jotka antavat tuloksiksi elementtikohtaiset paikalliset maksimiarvot. Jos MBP-menetelmällä halutaan selvittää paikalliset momenttien maksimiarvot, tulee edellä esitetystä kaavasta 1 saadut arvot kertoa vielä lisäkertoimilla [7, 310] (taulukko 1).

Taulukko 1: Tukimomentin maksimiarvon suhde keskimääräiseen tukimomenttiin [7,310]

	Lyhyt sivu	Pitkä sivu
Viereiset sivut vapaasti tuettu	1,50	1,70-0,20 L_y/L_x
Toinen viereisistä sivuista vapaasti tuettu, toinen täysin kiinnitetty	1,65	1,90-0,25 L_y/L_x
Viereiset sivut täysin kiinnitetyt.	1,80	2,05-0,25 L_y/L_x

MBP-menetelmässä jatkuville tuille saadaan erisuuruiset tukimomentit silloin, kun vierekkäisten kenttien mittasuhteet eroavat toisistaan. Nämä tukimomentit tasoittuvat toistensa suhteen, mikä aiheuttaa muutoksia myös kenttämomenteissa. MBP-menetelmässä tukimomenttien tasauksen vaikutukset voidaan ottaa huomioon kolmella eri tarkkuustasolla; A- B- tai C-menetelmällä, missä A-menetelmä on likimääräisin ja C-menetelmä tarkin, mutta myös työläin. Yksinkertaistuksen vuoksi vertailulaskelmiin valittiin laatastoja, joiden kenttien mitat olivat yhtä suuria. Tällöin A-menetelmää voitiin käyttää riittävän tarkkuuden saavuttamiseen ja raskaalta käsinlaskennalta välttyttiin. A-menetelmä ottaa huomioon liikkuvasta kuormasta aiheutuvan shakkilautakuormituksen vaikutuksen lisäämällä kenttämomenteihin ns. hyötykuormalisän. MBP-menetelmällä laskelmat suoritettiin sekä eurokoodeilla että vanhoilla RakMk-normeilla.

4.1.4 Raudoituksen mitoitus

Tukien kohdalla momentin pienennys huomioitiin vähentämällä alustavaa laskennallista momenttia m_d kaavan 2 mukaisesti [7, 268–269]:

$$m_d = m_{max} - V_{min} * \frac{b_s}{2} \quad (2)$$

missä	m_{max}	on taivutusmomentin itseisarvo tuen keskellä
	V_{min}	on itseisarvoltaan pienempi tuella vaikuttavista leikkausvoimista
	b_s	on tuen toimiva leveys

Mitoittavan momentin M_d laskemisen jälkeen voitiin laskea suhteellinen momentti μ . Suhteellinen momentti saadaan kaavasta 3:

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \leq \mu_d \quad (3)$$

missä

b	on tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys, laattoja tarkasteltaessa 1000 mm
d	on laatan tehollinen korkeus
f_{cd}	on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
μ_d	on normaaliraudoitettujen rakenteiden suhteellisen momentin yläraja-arvo

Suhteellisen momentin ratkaisun jälkeen pystyttiin selvittämään laatan sisäinen momenttivarsi z , joka saadaan kaavasta 4:

$$z = \frac{d}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}) \quad (4)$$

Vaaditun raudoituksen poikkileikkauspinta-ala A_s laskettiin kaavasta 5:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad (5)$$

missä f_{yd} on raudoituksen vetolujuuden mitoitusarvo

4.1.5 Standardien eroavaisuudet

Teräsbetonilaattaa mitoitettaessa merkittävimmät eroavaisuudet uusien ja vanhojen mitoitusnormien välillä ovat muutokset kuormissa, kuormien osavarmuus-

kertoimissa sekä materiaalien mitoituslujuuksissa. Vanhojen normien mukainen hyötykuorma asuinrakennuksessa on $1,5 \text{ kN/m}^2$, kun uuden eurokoodin kansallisen liitteen mukaan tulee käyttää arvoa $2,0 \text{ kN/m}^2$. Käytännössä vanhoja ja uusia kuormituksia ja laskentanormeja ei tule koskaan sekoittaa keskenään.

Eurokoodin 1992-1-1 kappaleessa 7.2 on esitetty, että ulkonäön kannalta haitalliselta taipumalta ja halkeilulta voidaan katsoa välttävän rajoittamalla raudoituksessa esiintyviä jännityksiä ominaiskuormilla laskettaessa [9, 117]. Suunnittelijan tulisi ohjeen mukaan soveltaa käyttörajatilatarkastelussa teräkselle pienennettyä myötölujuuden f_{yk} arvoa. Eurokoodissa ohjeistetaan käyttämään pienennyskertoimelle k_3 arvoa 0,8, mutta Suomen kansallisessa liitteessä arvoksi on valittu 0,6 [10, 8]. Pienennyskerroimen arvoksi on valittu 0,8 lähes kaikissa muissa Euroopan maissa. Kun teräksen myötölujuus tiputetaan ominaiskuormilla laskettaessa 60 %:iin teräksen nimellislujuudesta, tulee käyttörajatilasta raudoituksen poikkileikkauspinta-alan mitoittava tekijä. Tämä aiheuttaa huomattavan eron vanhalla RakMk B-sarjalla ja eurokoodeilla laskettujen rauditusmäärien välille. Vertailu Robot-ohjelmalla muiden maiden teräsbetonin mitoitusta koskevien kansallisten liitteiden kanssa osoitti, että Suomen lisäksi vain Hollannin teräsbetoni-eurokoodit mitoittavat yhtä paljon terästä, kun teräksen myötölujuuden pienennyskerroimen arvona käytetään 0,6. Tulkittavissa on, että eurokoodin 1992-1-1 kohdan 7.2 (5) pienennyskerrointa k_3 ei ole välttämätöntä noudattaa, jos rakenteen taipuma ja halkeilu voidaan osoittaa pysyvän sallituissa rajoissa muilla keinoin, kuten FEM-analyysia hyödyntävällä tietokoneohjelmalla. Robotissa kerroin on kuitenkin oletuksena käytössä, mutta sen arvoa voidaan halutessa muuttaa projektiasetuksista kohdasta design codes > RC structures.

Pienennyskerroimen käyttö arvolla 0,6 lisää laskennallista teräsmäärää, mutta sen vaikutus pienentää laatassa esiintyvää taipumaa ja halkeilua pienissä määrin. Samalla se lisää järjestelmällisesti teräksen menekkiä ja usein syyttä. Lisäksi sen käytöllä ei todellisuudessa voida kaikissa tapauksissa taata, että käyttörajatilakriteerit eivät ylittyisi, sillä käytännössä teräsmäärän kasvattaminen rajoittaa taipumaa ja halkeilua vain tiettyyn rajaan asti. Jos taipuma ja halkeilu tarkistetaan FEM-menetelmää käyttäen aina rakennekohtaisesti, ei teräksen myötölujuuden pienennyskerroimenä ole perusteltua käyttää niin pientä arvoa kuin 0,6, sillä teoriassa se on vain ylimääräistä varmuutta jo olemassa olevan

varmuuden päälle. Vertailulaskelmissa k_3 kertoimen arvona käytettiin 0,8, jolloin raudoituksen vaadittu poikkileikkauspinta-ala määräytyi aina murtorajatilatarkastelun perusteella, mutta rakenteen halkeilu ja taipuma tarkistettiin tapauskohtaisesti eurokoodin edellyttämässä käyttörajatiloissa.

4.2 Vertailutapaukset ja tulokset

Vertailukohteiksi valittiin yksinkertaisia yhteen suuntaan kantavia sekä ristiin kantavia laattoja erilaisilla tuentatapauksilla ja jänneväleillä. Laatat 1-3 olivat yhteen suuntaan kantavia laattoja, 4a-4c kolmelta sivulta tuettuja ristiin kantavia laattoja ja laatat 5a-6b neljältä sivulta tuettuja ristiin kantavia laattoja.

4.2.1 Lähtötiedot

Vertailutapausten laattojen ominaisuudet ja kuormitukset olivat yhtenäiset kaikissa tapauksissa seuraavien ominaisuuksien osalta:

- laatan paksuus: 240 mm
- betonipeitteen paksuus: 20 mm
- betoniluokka: C25/30
- harjateräksen nimellislujuus: 500 N/mm²
- kuormitus: oma paino + hyötykuorma 2,0 kN/m² tai 1,5 kN/m² (riippuen käytetystä normista), liikkuvan hyötykuorman osuus vertailulaskelmissa 100 %
- seuraamusluokka: CC2 / rakenneluokka: 2.

Taulukko 2: Mitoitusstandardien eroavaisuudet

	Eurokoodit (Seuraamusluokka: 2)	RakMk B-sarja (Rakenneluokka: 2)
Mitoittava MRT	$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ $g_k = 6,0 \text{ kN/m}^2$ $P_d = 1,15g_k + 1,5q_k$ $P_d = 9,9 \text{ kN/m}^2$	$q_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ $g_k = 6,0 \text{ kN/m}^2$ $P_d = 1,2g_k + 1,6q_k$ $P_d = 9,6 \text{ kN/m}^2$
Mitoittava KRT	$q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ $g_k = 6,0 \text{ kN/m}^2$ $P_k = 1,0g_k + 1,0q_k$ $P_d = 8,0 \text{ kN/m}^2$	$q_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ $g_k = 6,0 \text{ kN/m}^2$ $P_k = 1,0g_k + 1,0q_k$ $P_d = 7,5 \text{ kN/m}^2$
f_{cd} = Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo C25/30 -betonilla MRT:ssa	$\alpha_{cc} = 0,85$ $\gamma_C = 1,5$ $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ $f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_C}$ $f_{cd} = 14,16 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_C = 1,5$ $f_{ck,cube} = 30 \text{ N/mm}^2$ $f_{cd} = 0,7 * \frac{f_{ck,cube}}{\gamma_C}$ $f_{cd} = 14,00 \text{ N/mm}^2$
f_{yd} = Teräksen vetolujuuden mitoitusarvo B500B harjateräksellä MRT:ssa	$\gamma_S = 1,15$ $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$ $f_{yd} = 434 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_S = 1,2$ $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$ $f_{yd} = 416 \text{ N/mm}^2$
f_{yd} = Teräksen vetolujuuden mitoitusarvo B500B harjateräksellä KRT:ssa	$\gamma_S = 1,0$ $f_{yk} = 0,6 * 500 \text{ N/mm}^2$ $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$ $f_{yd} = 300 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_S = 1,0$ $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$ $f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2$

Rajatilojen mitoituskuormia ja materiaalien mitoituslujuuksia vertailemalla voidaan havaita, että erot vanhojen ja uusien normien välillä ovat marginaalisia, mikäli teräksen myötölujuuden pienennystä käyttörajatilassa eurokoodeilla laskettaessa ei huomioida (taulukko 2).

4.2.2 Vähimmäisraudoitus

Vähimmäisraudoituksen määrä on lisääntynyt uusien normien myötä (taulukko 3). Eurokoodien mukainen mitoituskaava antaa vertailutapauksien mukaiselle laatalle noin $60 \text{ mm}^2/\text{m}$ enemmän vähimmäisraudoitusta kuin vanhat RakMk-normit.

Taulukko 3: Laatan laskennallinen vähimmäisraudoitus

	Eurokoodit	RakMk B-sarja
$A_{s,min} =$ Vähimmäisraudoitus- vaatimus laatoille	$f_{ctm} = 2,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (C25/30)}$ $d = 216 \text{ mm (HL = 240mm)}$ $b_t = 1000 \text{ mm}$ $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2 \text{ (B500B)}$	$A_c = 240000 \text{ mm}^2/\text{m (HL = 240mm)}$ $f_{ctk} = 1,93 \text{ N/mm}^2 \text{ (C25/30)}$ $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2 \text{ (B500B)}$
	$A_{s,min} = \frac{0,26 * f_{ctm} * b_t * d}{f_{yk}}$	$A_{s,min} = \frac{0,25 * f_{ctk} * A_c}{f_{yk}}$
	$A_{s,min} = 292 \text{ mm}^2/\text{m} \rightarrow T8 \text{ K150}$	$A_{s,min} = 231,6 \text{ mm}^2/\text{m} \rightarrow T8 \text{ K200}$
	<i>Huom! $A_{s,min}$ arvona voidaan käyttää myös $1,2 * MRT: n$ vaatima A_s jos haurasmurtuman riski voidaan osoittaa pieneksi</i> (Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa)	<i>Huom! $A_{s,min}$ arvona voidaan käyttää myös $1,2 * MRT: n$ vaatima A_s</i>

Huomioitavaa kuitenkin on, että laatan paksuuden määräytyessä ääneneristävyyksivaatimusten perusteella, eikä niinkään taipuman, voi vähimmäisraudoituksen edellä esitetty kaava antaa turhan suuria arvoja [8,80]. Tämä voidaan ottaa huomioon vähimmäisraudoitusta määritettäessä, jolloin ensisijaisen laskennallisen kaavan sijaan määräävänä vähimmäisraudoituksena käytetään vähintään 1,2 kertaista murtorajatilan edellyttämää laskennallista teräspinta-alaa, mikäli haurasmurtuman riski rakenteessa voidaan osoittaa pieneksi. Tätä asiaa on tarkennettu kansallisessa liitteessä kohdassa 5.10.1, jossa sanotaan, että haurasmurtumalta vältytään, mikäli:

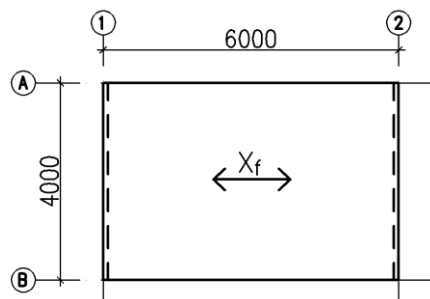
Varmistetaan, että jos murtuminen tapahtuu joko kuorman kasvaessa tai jännevoiman pienentyessä tavallisen kuormayhdistelmän vaikuttaessa, rakenneosa halkeilee ennen murtokestävyyden saavuttamista, kun otetaan huomioon halkeilun aiheuttama momenttien uudelleen jakautuminen [10,7].

Robot mitoitti kaikkien vertailutapauksien laatoille edellä esitettyä eurokoodien mukaista kaavaa vastaavaan vähimmäisraudoitusmäärän. TASSU ei laske

vaadittua vähimmäisraudoitusta, vaan ilmoittaa raudoituksen poikkileikkauspinta-alan vain mitoittavan kuormitusyhdistelyn aiheuttaman taivutusmomentin perusteella. Vertailulaskelmissa raudoitusta tarkasteltiin vain rajatilatarkastelun aiheuttaman mitoituksen perusteella.

4.2.3 Laatta 1

Ensimmäisenä vertailukohteena toimi yksinkertainen yhteen suuntaan kantava laatta, joka oli päistään nivelellisesti tuettu (kuva 36). Vertailulaskelmat suoritettiin käsin laskettavalla ratkaisumenetelmällä palkkiteorian mukaista momenttiyhdistelöä soveltaen sekä TASSU:n ja Robotin kesken.



Kuva 36: Laatta 1

Tulokset murtorajatilassa maksimimomenttien ja vaaditun raudoituksen puitteissa olivat varsin yhtenäiset kaikilla ratkaisumenetelmillä, kuten näin yksinkertaisen rakenteen tapauksessa oli odotettavissa. Vanhat normit mitoittivat vain marginaalisesti enemmän terästä verrattuna eurokoodiin (taulukko 4).

Taulukko 4: Laatta 1, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d_{max}}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	44,6	491,5
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	43,2	497,0
x_f TASSU, RakMk B-sarja	45,6	527,9
x_f ROBOT, Eurokoodi	45,0	500,6

Taipumatarkastelussa suuremman tuloksen taipumasta antoi Robot (taulukko 5). Tulos on selitettävissä sillä, että Robot on ainoa ratkaisumenetelmä, joka huomioi laatan halkeilun aiheuttaman taivutusjäykkyyttä pienentävän vaikutuk-

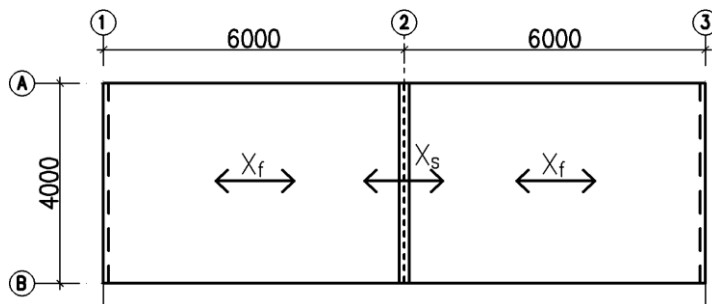
sen. Ohjelma ilmoitti halkeamaleveyden laatan alapinnassa olevan keskellä jännettä 0,2 mm. Eroa Robotin "With stiffness update (FEM)" -menetelmän ja TASSU:n välillä oli 3,3 mm.

Taulukko 5: Laatta 1, taipuma.

	maks. taipuma	
ROBOT	20,7	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	18,8	mm "With stiffness update (FEM)"
TASSU	15,5	mm

4.2.4 Laatta 2

Toisessa vertailutapauksessa tarkasteltiin kaksiaukkoista yhteen suuntaan kantavaa nivelellisesti tuettua symmetristä laattaa (kuva 37). Hyötykuorman osuudesta 100 % mallinnettiin liikkuvana kuormana kuormitustapauksia luodessa.



Kuva 37: Laatta 2.

Kentän momenttien ja vaadittujen raudoitusmäärien tulokset murtorajatilassa olivat yhtenäiset kaikilla ratkaisumenetelmillä (taulukko 6). Toisin kuin ensimmäisen vertailutapauksen yhteen suuntaan kantavassa laatasta, tämän mallin kohdalla eurokoodit mitoittivat marginaalisesti enemmän terästä verrattuna RakMk:n normeihin. Tämä johtuu siitä, että tässä mallissa hyötykuorman osuudella on suurempi vaikutus mitoittukseen. Kenttämomentin mitoittava kuormitustapaus on tilanne, jossa toisessa kentässä vaikuttaa 100 % hyötykuormasta ja toisessa 0 %. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että shakkilautakuormitusten mallinnus asuinkerrostaloissa moniaukkoisten laatastojen tapauksissa tuottaa eurokoodeilla jonkin verran merkittävämpiä vaikutuksia RakMk:n normeihin verrattuna, sillä hyötykuorman ominaisarvo on eurokoodissa suurempi.

Taulukko 6: Laatta 2, tulokset.

MRT -tarkastelu	Md_{max} [kNm/m]	As [mm ² /m]
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	27,8	302,0
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	26,4	300,0
x_f TASSU, RakMk B-sarja	27,0	306,8
x_f ROBOT, Eurokoodi	28,1	306,0

Tukien kohdalla tulokset vaihtelivat sen mukaan, otettiin momentin pienennys huomioon vai ei (taulukko 7). Robotissa tukien kohdalla vaikuttavan momentin pienennys on vapaasti valittavissa oleva toiminto, mutta TASSU suorittaa sen tukien kohdalla automaattisesti.

Taulukko 7: Laatta 2, tulokset tuella.

MRT -tarkastelu tukimomenttia pienennetty	Md_{max} [kNm/m]	As [mm ² /m]
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	42,2	464,4
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	40,9	469,6
x_s TASSU, RakMk B-sarja	42,4	487,8
x_s ROBOT, Eurokoodi	42,5	459,0

MRT -tarkastelu tukimomenttia ei pienennetty	Md_{max} [kNm/m]	As [mm ² /m]
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	44,6	491,5
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	43,2	497,0
x_s ROBOT, Eurokoodi	46,1	508,0

Ratkaisumenetelmien tulokset olivat varsin lähellä toisiaan (taulukko 7). Robotilla mitoitettaessa on huomioitava, että tukimomentin pienennystä käytettäessä elementtien koko on suoraan verrannollinen tukimomentin vähennyksen suuruuteen. Tämän esimerkin kohdalla vertailtiin tuen momentin pienennyksen vaikutusta eri ratkaisumenetelmien välillä. Tuen leveys oli 0,16 m ja Robotissa käytetty elementin koko 0,1 m. Verrattaessa betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan osan 2 (1982) mukaista tukimomentin pienennystä Robotin ”Reduction of forces” -toiminnon tekemään vähennykseen, huomataan niiden tuottavan samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia, kun käytetään edellä mainittua tuen ja elementin leveyden suhdetta. Laskelman voidaan katsoa pysyvän riittävällä

varmuusalueella 0,1 m elementointia käyttämällä, jos mallissa ei esiinny alle 0,16 m leveitä tukia, joissa momentin pienennystä käytettäisiin. Jos mallissa käytettäisiin suurempaa elementointia, kasvaisi vastaavasti momentin pienennyksen suuruus tukien alueilla.

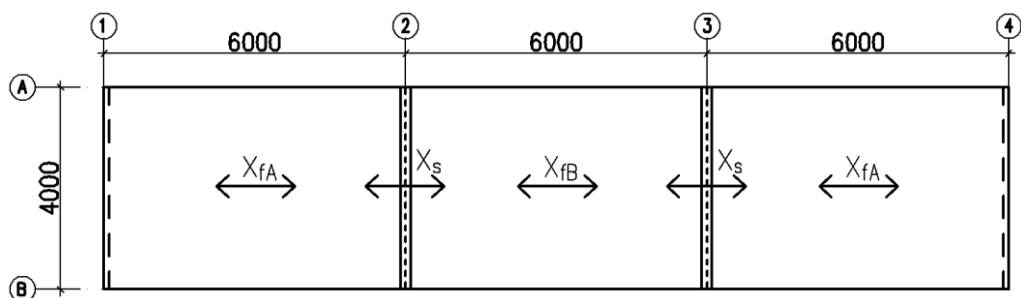
Taipumavertailussa Robotin ensisijainen ”Equivalent stiffness (Elastic)” -menetelmä antoi yli kaksinkertaisen taipuman teoriassa tarkkaan ”With stiffness update (FEM)” -menetelmään verrattuna. TASSU:n laskema taipuma jäi näiden kahden arvon väliin, eron ollessa 2,7 mm Robotin tarkkaan menetelmään verrattuna (taulukko 8).

Taulukko 8: Laatta 2, taipuma.

	maks. taipuma	
ROBOT	9,0	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	4,0	mm "With stiffness update (FEM)"
TASSU	6,7	mm

4.2.5 Laatta 3

Kolmannessa vertailutapauksessa tarkasteltiin kolmiaukkoista yhteen suuntaan kantavaa nivelellisesti tuettua symmetristä laattaa (kuva 38). Hyötykuorman osuudesta 100 % mallinnettiin liikkuvana kuormana kuormitustapauksia luodessa.



Kuva 38: Laatta 3.

Eri ratkaisumenetelmiä käyttämällä saadut tulokset täsmäsivät tarkasti toistensa kanssa, yhtä pientä poikkeusta lukuun ottamatta. TASSU mitoitti keskikentän alapintaan noin 75 mm²/m enemmän terästä, kuin muut ratkaisut, vaikka taivu-

tusmomentit olivat samaa suurusluokkaa. Tuelle lasketut raudoitukset olivat lähes identtiset kaikkien menetelmien kesken (taulukko 9).

Taulukko 9: Laatta 3, tulokset

MRT -tarkastelu	Md_{max} [kNm/m]	As [mm ² /m]
x_{fA} Käsin ratkaisu, Eurokoodi	30,8	335,8
x_{fA} Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	29,5	335,1
x_{fA} TASSU, RakMk B-sarja	29,5	335,5
x_{fA} ROBOT, Eurokoodi	31,2	340,9
x_{fB} Käsin ratkaisu, Eurokoodi	14,3	154,1
x_{fB} Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	13,0	145,5
x_{fB} TASSU, RakMk B-sarja	13,6	231,4
x_{fB} ROBOT, Eurokoodi	14,5	156,0
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	35,1	384,2
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	33,7	384,9
x_s TASSU, RakMk B-sarja	33,9	386,6
x_s ROBOT, Eurokoodi	36,6	393,9

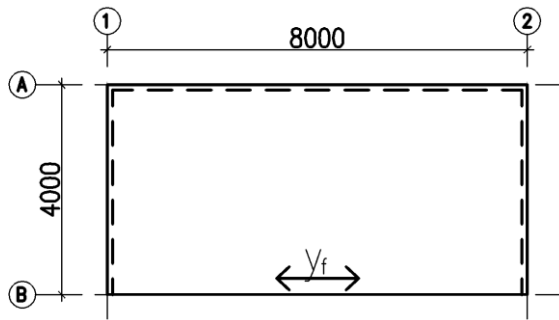
Suurin laskennallinen taipuma esiintyi reunimmaisella kentällä. Suurin taipuman arvo 8,5 mm saatiin TASSU:sta. Robotin kummatkin taipumanlaskentamenetelmät antoivat saman tuloksen; 4,9 mm. Eroa suurimman ja pienimmän taipuman välillä oli 3,6 mm (taulukko 10).

Taulukko 10: Laatta 3, taipuma.

	maks. taipuma	
ROBOT	4,9	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	4,9	mm "With stiffness update (FEM)"
TASSU	8,5	mm

4.2.6 Laatta 4a

Neljännän vertailumallin a-tapaus oli kolmelta sivulta nivelellisesti tuettu laatta, jonka neljäs sivu oli täysin vapaa (kuva 39). Tämän mallin kohdalla esiintyi selviä eroavaisuuksia ratkaisumenetelmästä riippuen.

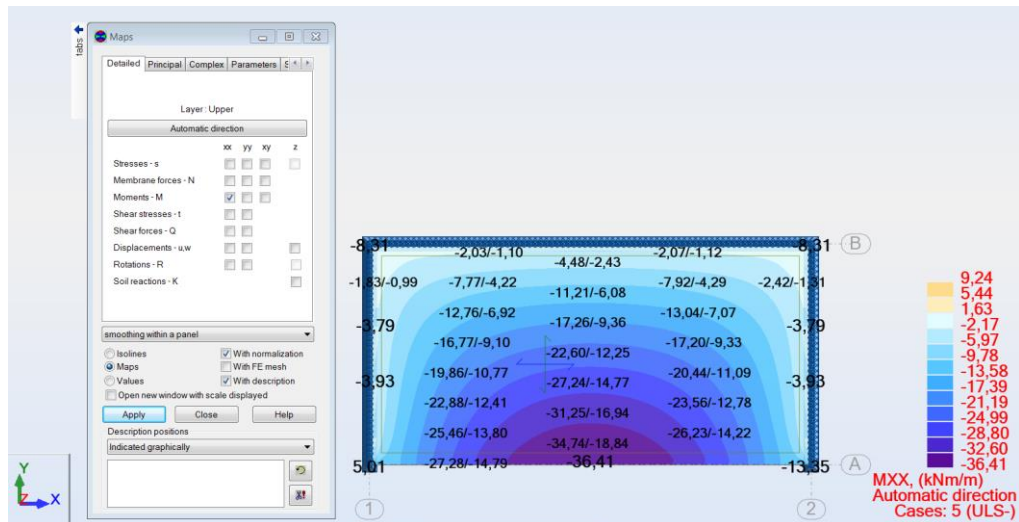


Kuva 39: Laatta 4a.

Käsinlaskenta tapahtui kolmelta sivulta tuettuihin laattoihin soveltuvilla taulukoiduilla momenttikertoimilla, joista saadaan vapaalla reunalla vaikuttavan kenttämomentin teoreettinen maksimiarvo. Menetelmä käydään läpi kirjassa Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005 by 210 kappaleessa 6.2.1. TASSU-ohjelmalla saadut tulokset olivat käsinlaskennan kanssa vastaavaa suuruusluokkaa, maksimimomentin sijaitessa laatan vapaan reunan keskivälissä. Robot antoi edellä mainittuja ratkaisuja selvästi suuremmat momentit ja vaaditut raudoitukset (taulukko 11).

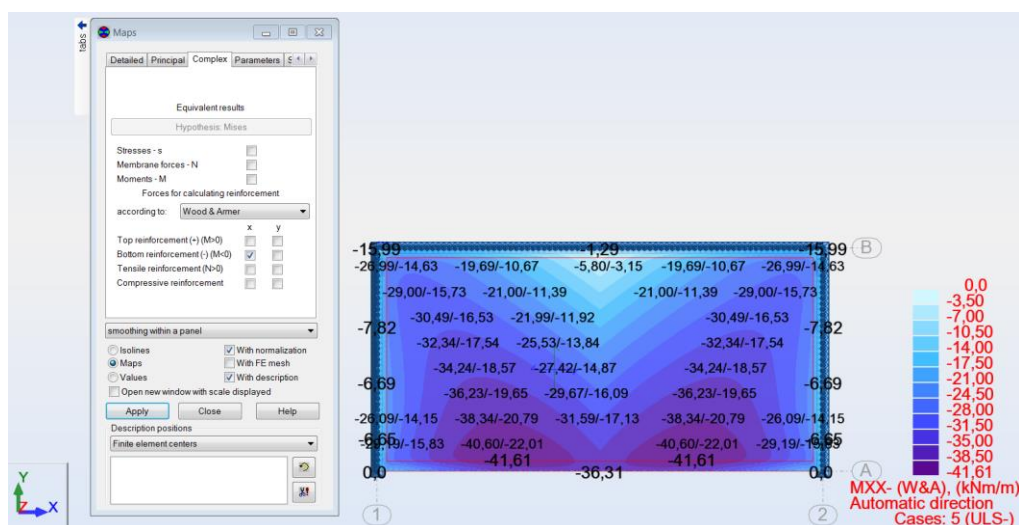
Taulukko 11: Laatta 4a, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d_{max}}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	32,4	353,8
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	31,4	357,8
x_f TASSU, RakMk B-sarja	32,3	368,6
x_f ROBOT, Eurokoodi	41,6	458,0



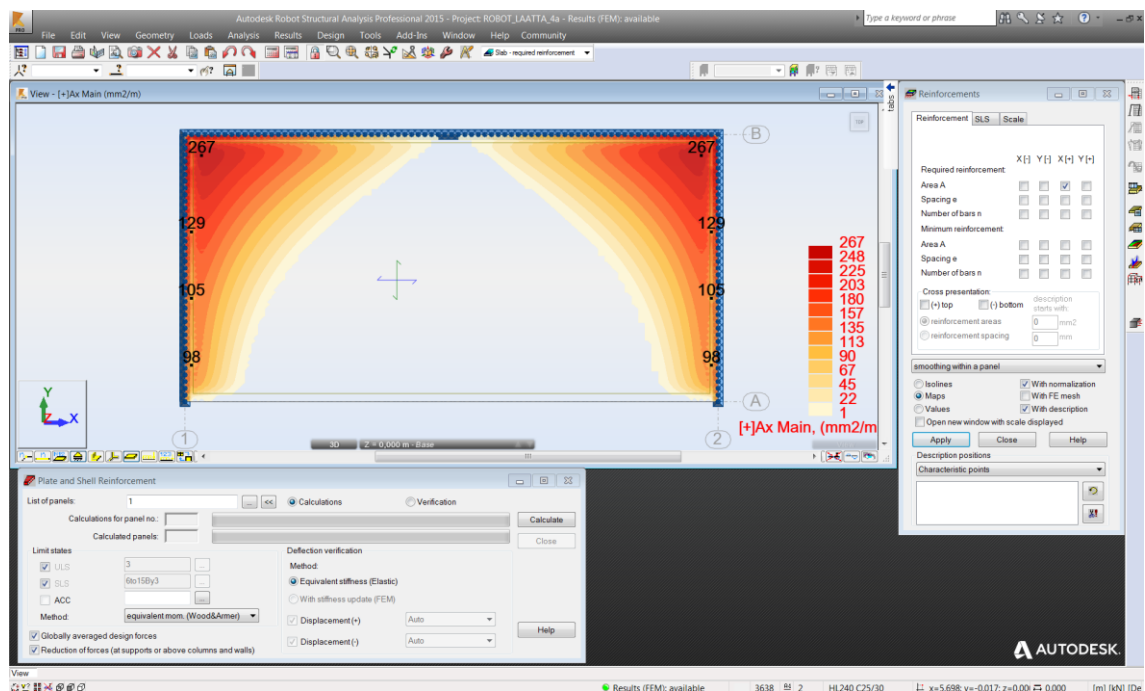
Kuva 40: Laatta 4a, elementtimenetelmän tuottama pääkantosuunnan kenttämomentin ratkaisu

Robotin ensisijaisen staattisen analyysin tuottama momenttiratkaisu elementtimenetelmällä vastasi lähestulkoon käsinlaskennan ja TASSU:n tuottamia tuloksia, mutta momentin maksimi arvo oli Robotissa noin 4 kNm/m suurempi (kuva 40). Sen sijaan Wood & Armer -ratkaisumenetelmän mukainen maksimimomentti sijaitsi laatan vapaan reunan keskipisteen sijaan reunan ja keskipisteen puolivälissä, taivutusmomenttien ollessa huomattavasti suurempia käsinlasketun ratkaisun ja TASSU:n tuloksiin verrattuna. Taivutusmomentti kasvaa laatan nurkkapisteiden lävistäjien suuntaisesti (kuva 41).



Kuva 41: Laatta 4a, Wood & Armer -menetelmän tuottama pääkantosuunnan kenttämomentin ratkaisu

Vapaasti tuettua laattaa kuormitettaessa aiheutuu laatan sivujen vääntömomenteista voima, joka pyrkii nostamaan laatan nurkkaa ylöspäin. Kun nurkan nousu on estetty, aiheutuu laatan yläpintaan vetoa. [11, 402.] Ratkaisumenetelmistä Robot on kuitenkin ainoa, joka pystyy huomioimaan nurkassa esiintyvän vääntön vaikutuksen laatan momenttiratkaisussa. Tämän vuoksi Robot erosi muista ratkaisumenetelmistä niissä malleissa, joissa laattojen nurkat olivat nivelellisesti tuettuja. Kuvassa 42 havainnollistuu laatan nurkkien nousun aiheuttama raudituksen tarve laatan yläpinnassa.



Kuva 42: Laatta 4b, yläpinnan rauditus vaakasuunnassa

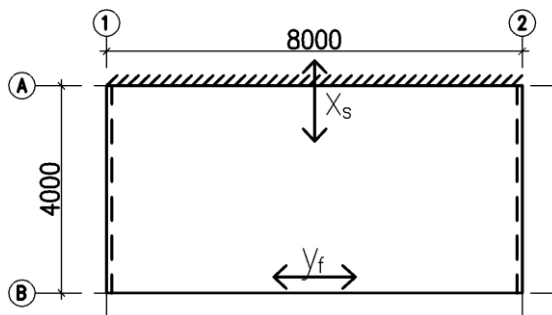
Ensisijainen taipumatarkastelu Robotilla ”Equivalent stiffness (Elastic)” -menetelmää käyttäen ilmoitti yli 30 mm taipuman laatan vapaalla reunalla. TASSU:lla laskettu taipuma oli 19,9 mm (taulukko 12). Tarkempi analyysi taipumasta Robotilla selvitettiin ”Verification” -toiminnon ”With stiffness update (FEM)” -menetelmällä, joka antoi tulokseksi huomattavasti pienemmän 14,6 mm. Eroa kahden ohjelman laskennallisen taipuman välille jäi 4,8 mm. Tuloksista huomattiin, että ”Equivalent stiffness (Elastic)” -menetelmä tuottaa liian suuria taipuman arvoja kolmelta sivulta tuettujen laattojen tapauksissa.

Taulukko 12: Laatta 4a, taipuma.

	maks. taipuma	
ROBOT	33,0	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	15,1	mm "With stiffness update (FEM)"
TASSU	19,9	mm

4.2.7 Laatta 4b

Neljännän vertailumallin b-tapaus oli kahdelta sivulta nivelellisesti ja yhdeltä sivulta jäykästi tuettu laatta, jonka neljäs sivu oli täysin vapaa (kuva 43). TASSU:lla laskiessa kaikki tuet käsitellään nivelellisenä. Tästä syystä tätä sekä muita malleja, joissa jäykkiä tukia esiintyi, ei laskettu TASSU:lla. Tätä mallia vertailtiin käsinlasketun ja Robotin tuottaman ratkaisun kesken.



Kuva 43: Laatta 4b.

Kuten aiemmassa kolmelta sivulta tuetussa laatasta, myös tässä tapauksessa kentän vapaalla reunalla esiintyvän momentin arvot poikkesivat ratkaisumenetelmien välillä, Robotin antaessa käsinlaskettua ratkaisua selvästi suuremman taivutusmomentin (taulukko 13). Robotin Wood & Armer -menetelmän momenttiratkaisun tulos oli vastaava laatan 4a kanssa, taivutusmomentin maksimin sijaitessa vapaan reunan keskipisteen ja reunan puolivälissä. Myös jäykällä tuella esiintyvän momentin ja raudoituksen suhteen Robot antoi hieman suuremman tuloksen.

Taulukko 13: Laatta 4b, tulokset.

MRT -tarkastelu	Md_{max} [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	16,3	175,9
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	15,8	177,9
x_s ROBOT, Eurokoodi	24,0	260,7
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	46,5	513,3
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	45,0	519,0
y_f ROBOT, Eurokoodi	49,0	565,9

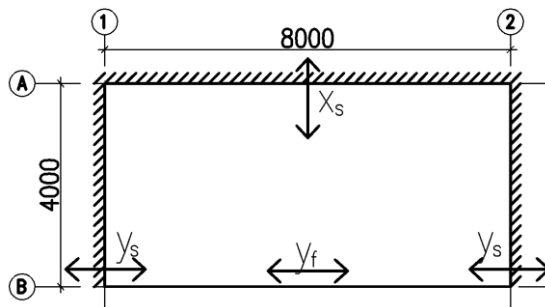
Ensisijainen taipuma-analyysi "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmästä saatiin 18,0 mm taipuma, jonka lisäksi tulos tarkastettiin "Verification" -kohdan "With stiffness update (FEM)" -menetelmällä, josta taipumaksi saatiin huomattavasti pienempi 8 mm (taulukko 14). Laatan taipuma oli jäykästä tuesta johtuen lähes puolta pienempi laatan 4a taipumaan verrattuna.

Taulukko 14: Laatta 4b, taipuma.

maks. taipuma	
ROBOT	18,1 mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	8,1 mm "With stiffness update (FEM)"

4.2.8 Laatta 4c

Neljännän vertailumallin c-tapaus oli kolmelta sivulta jäykästi tuettu ja yhdeltä sivulta vapaa laatta (kuva 44). Vertailu suoritettiin käsinlaskennalla momenttikertoimia käyttäen ja Robotin välillä.

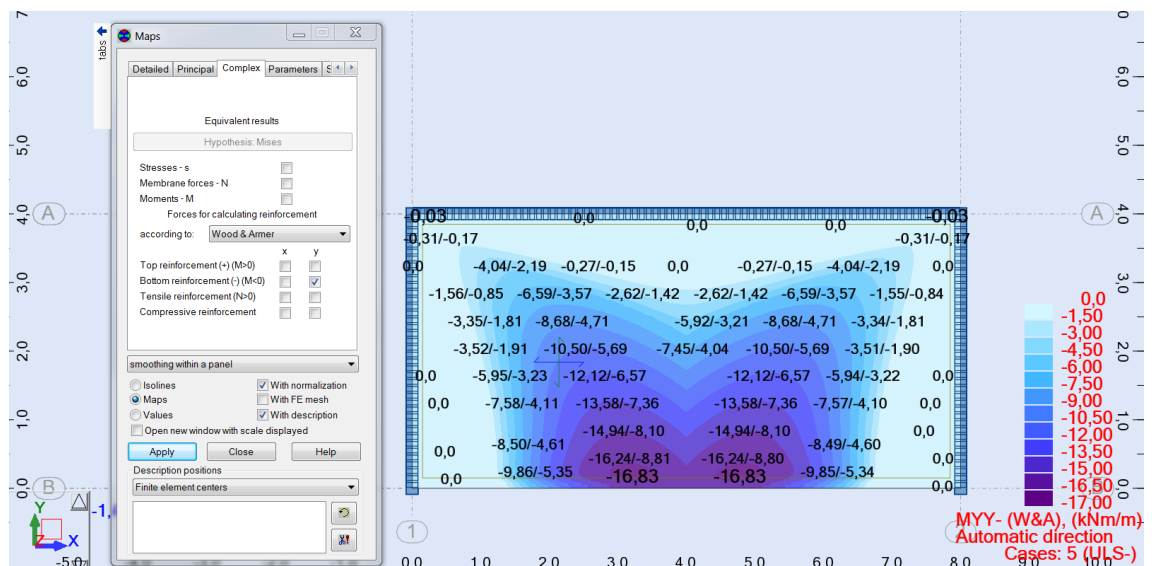


Kuva 44: Laatta 4c.

Toisin kuin kahdessa aikaisemmassa mallissa, tässä kolmelta sivulta jäykästi tuetussa laatasta käsinlaskennan ja Robotin tulokset vastasivat toisiaan (taulukko 15). Jäykän tuennan ansiosta laatta käyttäytyi eritavalla kuin vastaavat nivelellisesti tuetut tapaukset. Wood & Armer -momenttiratkaisun maksimiarvo sijaitsi aikaisempiin kolmelta sivulta tuettuihin laattoihin verrattuna lähempänä keskilinjaa (kuva 45).

Taulukko 15: Laatta 4c, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d,max}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	14,9	160,3
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	14,4	162,2
y_f ROBOT	16,8	181,6
y_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	46,2	510,2
y_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	44,8	515,9
y_s ROBOT, Eurokoodi	47,4	523,7
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	32,1	350,9
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	31,2	354,9
x_s ROBOT, Eurokoodi	32,3	367,3



Kuva 45: Wood & Armer -menetelmän tuottama pääkantosuunnan kenttämomentin ratkaisu.

Ensisijaisesta taipuma-analysistä "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmällä saatiin 9,2 mm, mutta "Verification" -kohdan tarkalla "With stiffness update

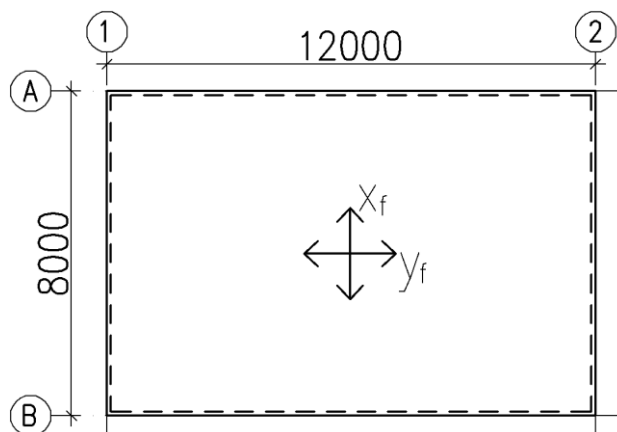
(FEM)” analyysillä taipumaksi saatiin vain 4 mm (taulukko 16). Laatan taipuman huomataan pienentyvän huomattavasti useamman tuen toimiessa momenttijäykästä.

Taulukko 16: Laatta 4c, taipuma.

		maks. taipuma	
ROBOT	9,2	mm	"Equivalent stiffness (Elastic)"
	4,0	mm	"With stiffness update (FEM)"

4.2.9 Laatta 5a

Viidennen vertailumallin a-tapauksessa tarkasteltiin ristiin kantavaa kaikilta sivuilta nivelellisesti tuettua laattaa (kuva 46). Vertailulaskelmat suoritettiin MBP -käsinelaskennan sekä TASSU:n ja Robotin kesken.



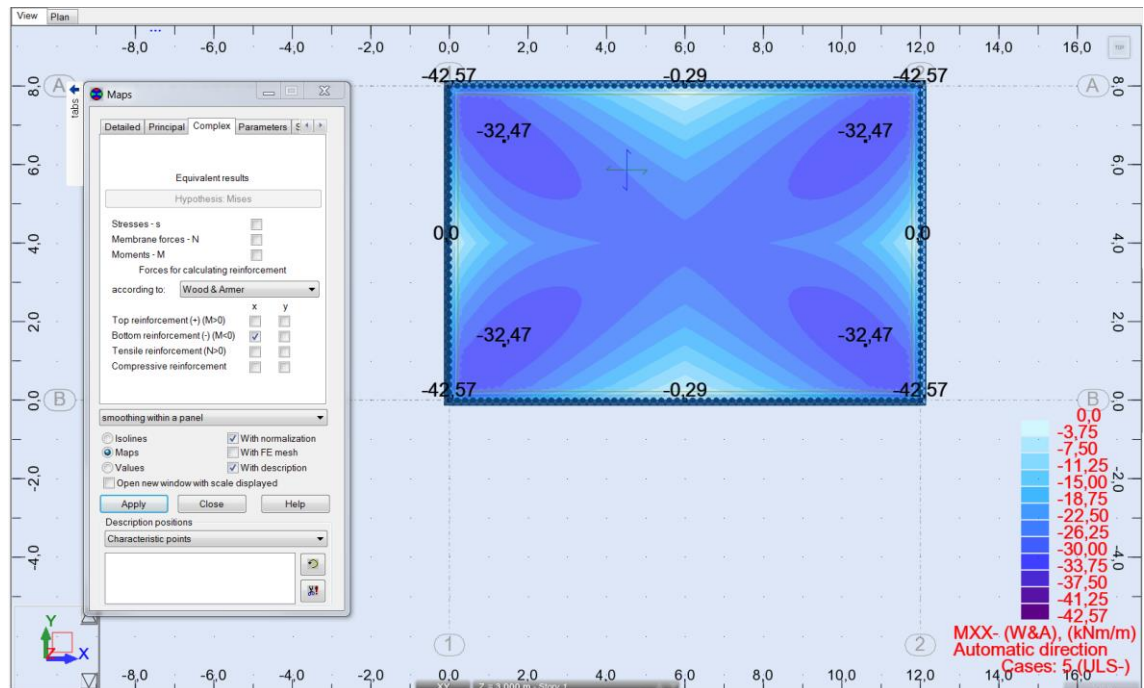
Kuva 46: Laatta 5a

Suurin ero tuloksissa saatiin pidemmän jännevälin suunnan kenttämomenteissa, jossa TASSU ilmoitti muita ratkaisumenetelmiä selvästi pienemmän taivutusmomentin ja teräsmäärän, erotuksen kahteen muuhun ratkaisumenetelmään ollessa 160 mm²/m. Laatan pääkantosuunnassa MBP-menetelmä erosi Robotin ja TASSU:n tuloksista siten, että MBP:llä laskettuna saatiin noin 50 mm²/m enemmän terästä (taulukko 17).

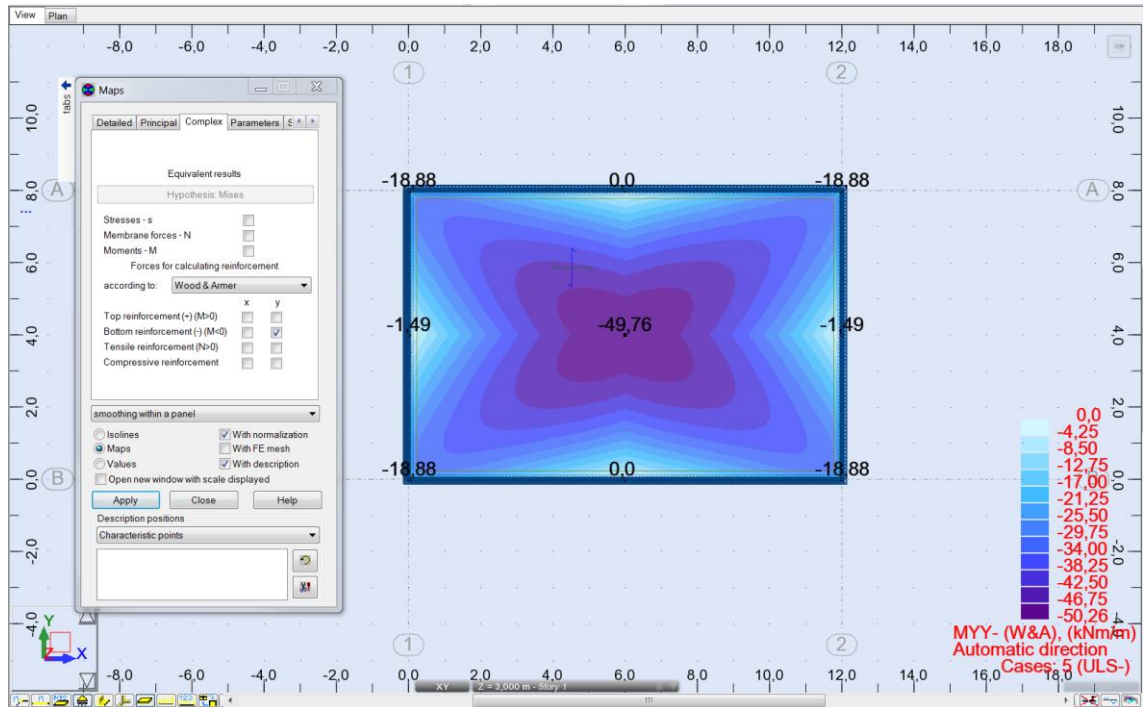
Taulukko 17: Laatta 5a, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d,max}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	33,3	364,3
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	32,3	368,4
y_f TASSU, RakMk B-sarja	18,5	208,6
y_f ROBOT, Eurokoodi	32,7	368,1
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	54,1	601,9
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	52,5	608,5
x_f TASSU, RakMk B-sarja	45,8	549,7
x_f ROBOT, Eurokoodi	49,8	554,5

Robotin Wood & Armer -menetelmä huomioi nivelellisesti tuetun laatan nurkkien nousun ja sen vaikutuksen laatan momenttiratkaisussa. Vaikutus havaitaan Robotin tuottaman momenttikuvaajan grafiikasta. Pidemmän jännevälin suunnan kenttämomenttien suurimmat arvot sijaitsevat nurkka-alueilla ristiin kantavassa nivelellisesti tuetussa laatussa (kuva 47). Lyhyemmän jännevälin suunnan kenttämomentin maksimiarvo sijaitsee laatan keskialueella, mutta kuvaaja näyttää taivutusmomenttien kasvavan nurkkien lävistäjien suuntaisesti (kuva 48).



Kuva 47: Robotin Wood & Armer -menetelmän mukainen pidemmän jännevälin suunnan kenttämomentin ratkaisu nivelellisesti tuetussa laatussa.



Kuva 48: Robotin Wood & Armer –menetelmän mukainen lyhyemmän jännevälän suunnan kenttämomentin ratkaisu nivelellisesti tuetussa laattassa.

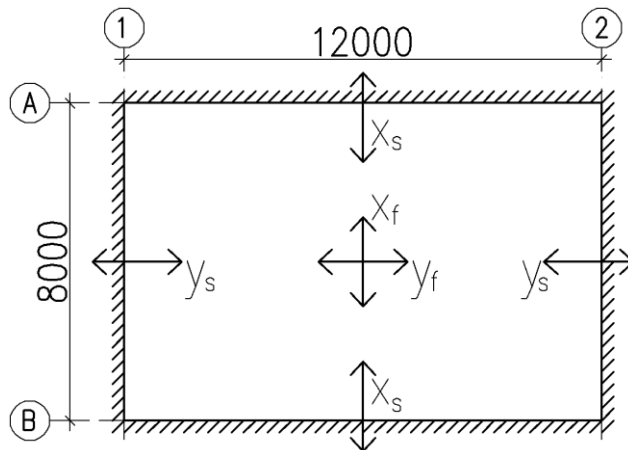
Taipuman osalta tulokset Robotin ja TASSU:n välillä vastasivat toisiaan. TASSU:n ja Robotin ”With stiffness update (FEM)” -menetelmän välillä oli eroa vain 2,9 mm (taulukko 18).

Taulukko 18: Laatta 5a, taipuma.

	maks. taipuma		
ROBOT	30,9	mm	"Equivalent stiffness (Elastic)"
	24,7	mm	"With stiffness update (FEM)"
TASSU	27,6	mm	

4.2.10 Laatta 5b

Viidennen vertailumallin b-tapaus oli a-tapauksen kanssa muuten identtinen, paitsi tässä mallissa tuet olivat momenttijäykkiä (kuva 49). Vertailulaskelmat suoritettiin MBP -käsineläskennän ja Robotin kesken.



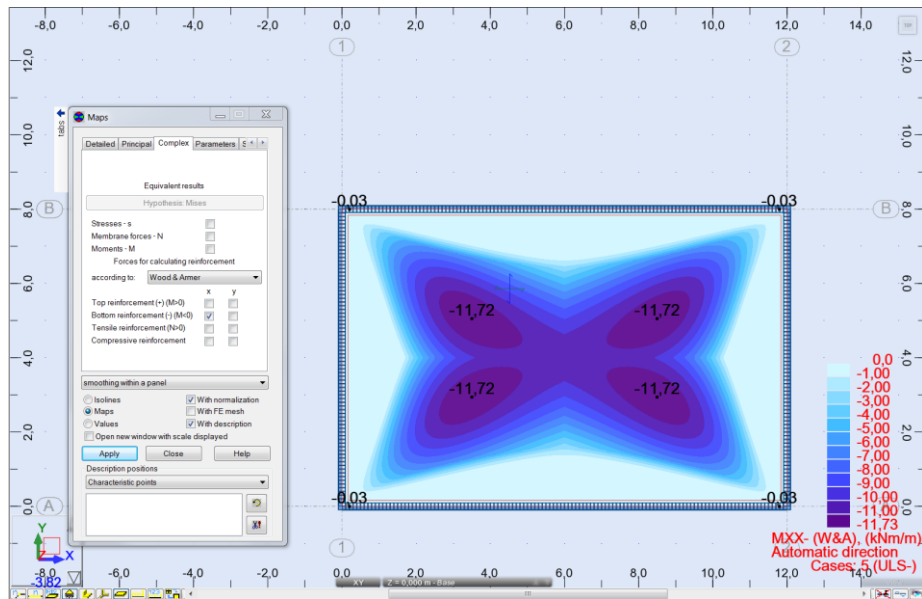
Kuva 49: Laatta 5b.

Tulokset kahden ratkaisumenetelmän välillä olivat pääasiassa yhdenmukaiset. Robot antoi pääkantosuunnan tuelle noin $30 \text{ mm}^2/\text{m}$ vähemmän terästä ja kenttään se mitoitti noin $65 \text{ mm}^2/\text{m}$ enemmän terästä MBP-menetelmään verrattuna (taulukko 19). Robot otti huomioon pääkantosuunnan tuella tapahtuvan halkeilun, jonka suuruudeksi saatiin $0,2 \text{ mm}$. Halkeilu aiheuttaa tuen alueen taivutusjäykkyyden pienentymistä, minkä vuoksi kentälle jakaantuu enemmän momenttirasitusta verrattuna halkeilemattomaan tilaan [11, 98]. MBP-ratkaisumenetelmä ei ota laatan halkeilua huomioon, minkä vuoksi sillä saatu tulos erosi Robotilla saadusta tuloksesta.

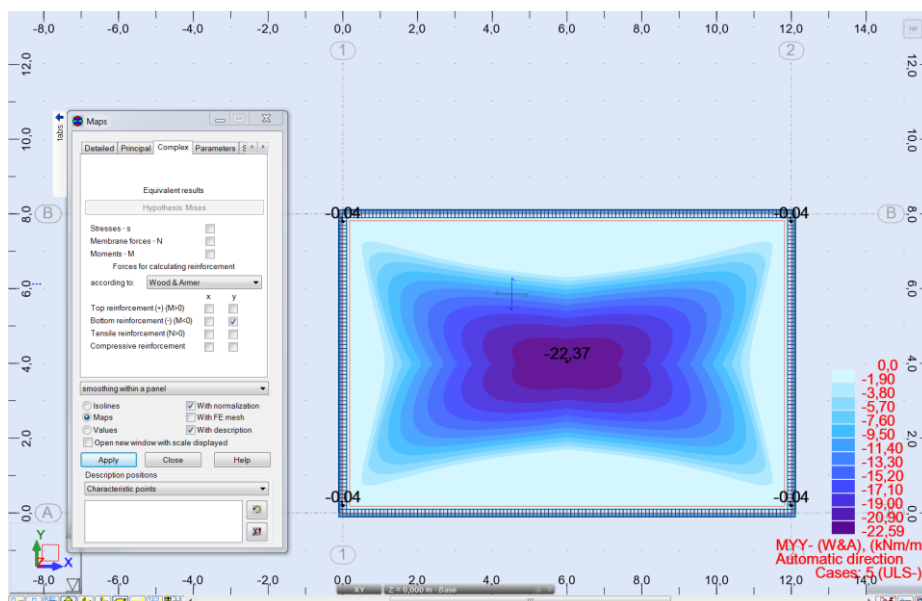
Taulukko 19: Laatta 5b, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d_{\max}}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	10,1	108,8
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	9,8	110,1
y_f ROBOT, Eurokoodi	11,7	130,1
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	16,4	177,0
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	15,9	179,0
x_f ROBOT, Eurokoodi	22,4	242,4
y_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	35,3	386,5
y_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	34,2	390,5
y_s ROBOT, Eurokoodi	35,7	407,3
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	49,9	553,1
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	48,4	559,3
x_s ROBOT, Eurokoodi	47,3	522,9

Robotin Wood & Armer -menetelmän mukainen pidemmän jännevälin suunnan momenttiratkaisu erosi edellisen mallin 5a nivelellisesti tuetusta laatasta. Jäykästi tuetun laatan momenttiratkaisun maksimiavrot sijaitsivat lähempänä laatan keskipistettä (kuva 50) kuin nivelellisesti tuetussa laatasta. Pääkantosuunnan maksimimomentti sijaitsi keskellä laattaa, mutta kuvaaja näytti taivutusmomenttien kasvavan nurkkien lävistäjien suuntaisesti (kuva 51).



Kuva 50: Robotin Wood & Armer -menetelmän mukainen pidemmän jännevälin suunnan momenttiratkaisu jäykästi tuetussa laatasta.



Kuva 51: Wood & Armer -menetelmän mukainen lyhyemmän jännevälin suunnan momenttiratkaisu jäykästi tuetussa laatasta.

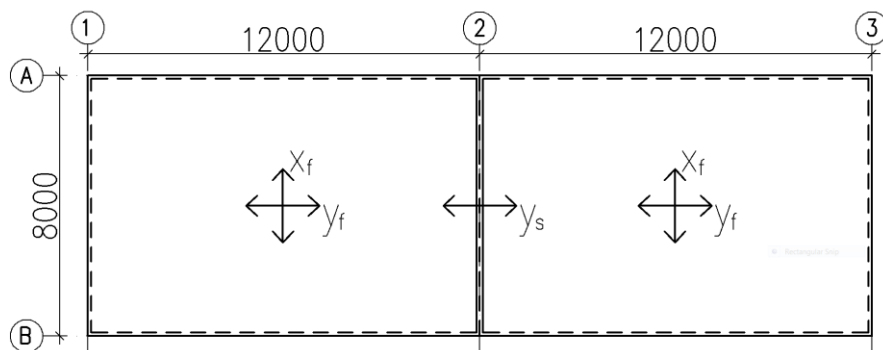
Alustavan taipuma-analyysin tulos "Equivalent stiffness (Elastic)" -menetelmällä oli 11,1 mm. "Verification" -kohdan "With stiffness update (FEM)" -analyysillä taipuman arvo oli 5,3 mm (taulukko 20).

Taulukko 20: Laatta 5b, taipuma.

		taipuma (mm)	
ROBOT		11,2	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
		5,3	mm "With stiffness update (FEM)"

4.2.11 Laatta 6a

Viimeisen vertailumallin a-tapaus oli nivelellisesti tuettu ristiin kantava laatasto, joka koostui kahdesta vierekkäisestä kentästä (kuva 52). Vertailulaskelmat suoritettiin MBP-ratkaisumenetelmän sekä TASSU:n ja Robot-ohjelman välillä.



Kuva 52: Laatta 6a

TASSU:lla lasketun pidemmän jänteen suunnan kenttämomentin maksimiarvo oli noin 30 % pienempi muista ratkaisumenetelmistä saatuihin tuloksiin verrattuna (taulukko 21). Robotin ja MBP-menetelmän tulokset olivat samaa suuruusluokkaa. Myös tämän mallin kohdalla tapahtui tuella halkeilua, minkä vuoksi Robot mitoitti MBP-menetelmään verrattuna hieman enemmän terästä kenttään.

Taulukko 21: Laatta 6a, tulokset

MRT -tarkastelu	$M_{d,max}$ [kNm/m]	As [mm ² /m]
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	29,7	323,9
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	28,8	327,6
y_f TASSU, RakMk B-sarja	19,8	222,9
y_f ROBOT, Eurokoodi	31,3	354,0
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	41,8	459,9
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	40,3	462,9
x_f TASSU, RakMk B-sarja	39,0	465,1
x_f ROBOT, Eurokoodi	43,6	480,0
y_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	69,9	789,1
y_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	67,8	797,5
y_s TASSU, RakMk B-sarja	64,5	756,6
y_s ROBOT, Eurokoodi	65,5	767,0

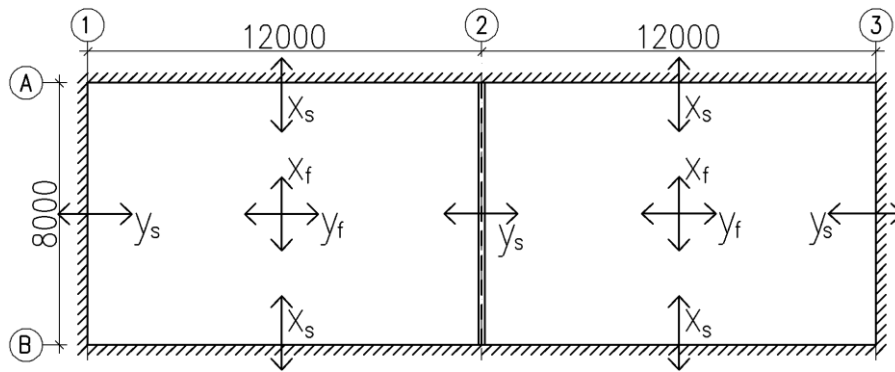
Taipumatarkastelussa Robotin ensisijainen "Equivalent stiffness (Elastic)" menetelmä mitoitti 32 mm taipuman, joka ylittää sallitun rajan. Tarkempi analyysi "With stiffness update (FEM)" -menetelmällä antoi maksimitaipuman arvoksi 18,0 mm. TASSU:n laskema taipuma 23,4 mm jäi suuruudeltaan kahden edellä mainitun arvon väliin (taulukko 22). Erotus Robotin tarkan analyysin ja TASSU:n taipumatuloksen välillä oli 5,4 mm. Taipuma-analyysistä saatujen tulosten perusteella holviin tulisi tehdä esikorotus.

Taulukko 22: Laatta 6a, taipuma.

	maks. taipuma	
ROBOT	32,0	mm "Equivalent stiffness (Elastic)"
	18,0	mm "With stiffness update (FEM)"
TASSU	23,4	mm

4.2.12 Laatta 6b

Viimeisen vertailumallin b-tapaus oli jäykästi tuettu ristiin kantavan laatasto, joka oli mitoiltaan identtinen a-tapauksen kanssa (kuva 53). Vertailulaskelmat suoritettiin MBP-käsinlaskennan ja Robot-ohjelman välillä.



Kuva 53: Laatta 6b

Tulokset MBP-menetelmän ja Robotin välillä olivat lähellä toisiaan. Kuten edellisissä malleissa, myös tässä tapauksessa Robot mitoitti tuen halkeilusta johtuen hieman enemmän terästä kenttään muiden ratkaisumenetelmien tuloksiin verrattuna (taulukko 23). Tuen ja kentän maksimialueille saadun teräksen yhteismäärä oli eri ratkaisumenetelmien välillä kuitenkin samaa suurusluokkaa.

Taulukko 23: Laatta 6b, tulokset.

MRT -tarkastelu	$M_{d_{max}}$ [kNm/m]	A_s [mm ² /m]
y_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	11,5	123,8
y_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	10,9	122,5
y_f ROBOT, Eurokoodi	11,7	131,0
x_f Käsin ratkaisu, Eurokoodi	20,1	217,1
x_f Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	18,8	212,5
x_f ROBOT, Eurokoodi	22,4	242,0
y_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	32,2	351,5
y_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	31,2	355,5
y_s ROBOT, Eurokoodi	32,3	367,0
x_s Käsin ratkaisu, Eurokoodi	46,7	516,3
x_s Käsin ratkaisu, RakMk B-sarja	45,3	522,1
x_s ROBOT, Eurokoodi	43,8	483,0

Taipumatarkastelussa Robotin ensisijainen "Equivalent stiffness (Elastic)" menetelmä mitoitti 11,0 mm taipuman, mutta tarkempi analyysi "With stiffness update (FEM)" -menetelmällä antoi maksimitaipuman arvoksi 5,0 mm (taulukko 24). Vaikka kentät olivat suuria, ei laatta juuri taipunut momenttijäykän tuennan ansiosta.

Taulukko 24: Laatta 6b, taipuma.

		maks. taipuma	
ROBOT	11,0	mm	"Equivalent stiffness (Elastic)"
	5,0	mm	"With stiffness update (FEM)"

4.3 Tulosten analyysi ja yhteenveto

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että opinnäytetyön mukaista ohjetta seuraamalla on Robot-ohjelmalla mahdollista mitoittaa luotettavasti sekä yhteen suuntaan että ristiin kantavia teräsbetonilaattoja. Robotilla lasketut maksimimomenttien mukaiset raudoitukset olivat samaa suuruusluokkaa Massiva Betongplattor -ratkaisumenetelmällä ja TASSU-ohjelmalla saatujen tulosten kanssa. Eroavaisuuksia ilmeni tutkittaessa ristiin kantavien laattojen pidemmän jännevälin suuntaa, jolloin TASSU-ohjelmasta saatiin kahta muuta ratkaisumenetelmää (Robot ja MBP-menetelmä) pienempiä taivutusmomenteja. Tälle eroavaisuudelle ei löydetty tarkkaa selitystä, sillä ohjelmistotukea jo ennen internetin yleistymistä ilmestyneelle TASSU-ohjelmalle ei ollut saatavilla. Toisaalta tämän opinnäytetyön päätavoite oli tutkia Robot-ohjelman toimintaa.

Selviä eroja syntyi myös kolmelta sivulta nivelellisesti tuettujen laattojen tapaus-ten kesken: Robotilla saadut tulokset erosivat TASSU:n ja käsinlaskennan tuloksista merkittävästi. Robotin huomioi laatan sisäisen väännön vaikutuksen ja mitoitti näiden mallien kohdalla muihin ratkaisumenetelmiin verrattuna huomattavasti suurempia taivutusmomenteja.

Vertailulaskelmat osoittivat, että mitoitettaessa vetoraudoitusta laatassa esiintyvää taivutusmomenttia vastaan, ei eurokoodin ja vanhan RakMk:n B-sarjan suunnittelustandardin tulosten välillä ollut merkittäviä eroja. Tulokset erosivat pääasiassa käytetystä ratkaisumenetelmästä riippuen, eivät niinkään käytetyistä laskentanormeista johtuen. Robotin ja MBP-menetelmän analyysistä saatujen raudoitusten poikkileikkauspinta-alojen kokonaismäärät vastasivat pääasiassa toisiaan. Joissakin tapauksissa raudoitus jakautui tuen ja kentän välillä eri tavalla, koska Robot huomioi rakenteen halkeilun jälkeisen jäykkyyden pienentymisen vaikutuksesta tapahtuvan momenttien uudelleen jakautumisen laatassa.

Eri ratkaisumenetelmien tuloksia vertailtaessa on huomioitava poikkeamien todellinen vaikutus käytäntöön: Joidenkin kymmenien neliömillimetrien erot raudoituksen laskennallisessa poikkileikkauspinta-alassa eivät todennäköisesti tule määrittämään sitä, tuleeko rakenteen murtorajatila ylittymään sen käyttöhistorian aikana vai ei. Usein toimivaa raudoitusta on laatassa laskennallista vähimmäismäärää enemmän, kun käytetään valmiita teollisia raudoitustuotteita, joissa työtehokkuus ohittaa raudoituksen tarkan määrällisen porrastuksen tuoman taloudellisen edun.

5 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa työn toimeksiantajalle, Insinööri-toimisto Kantelinen Oy:lle, selkeä ja käytännönläheinen ohjeistus Robot-ohjelman käyttämiseksi teräsbetoni-laatan mitoituksessa. Raportin loppusanoja kirjoitettaessa on Robot-ohjelma otettu insinööri-toimistossa aktiiviseen käyttöön suunnittelutyön apuna tämän opinnäytetyön osana laadittua ohjetta noudattaen. Koska opinnäyteraportti on verkossa vapaasti saatavilla, ohjeistus on myös muiden tahojen hyödynnettävissä.

Uuden mitoitusyökalun tuottamien tulosten seuraamista tullaan jatkamaan tarkasti. Ohjelman käyttötehokkuus on noussut sitä mukaa, mitä enemmän sitä on käytetty. Tämä opinnäytetyö saavutti tavoitteensa ja teräsbetoni-laatan mallinnuksessa onnistuttiin, mutta oppimistaival Robotin FEM-analyysin kanssa on silti vasta alussa. Seuraavaksi tavoitteena on yhdistää laattaan pilarin, palkin ja seinien mitoitus kaikki saman mallin yhteyteen. Tämä tulee vaatimaan jatkossa lisää uusia vertailulaskelmia eri ratkaisumenetelmien välillä sekä useita tunteja opiskelua ohjelman parissa. Ohjelman opiskelua helpottaa se, että tulevaisuudessa herääviin kysymyksiin on saatavilla apua milloin tahansa ohjelman kehittäjiltä Autodeskin tukifoorumin kautta. Työskentelyä ja taitojen syventämistä ohjelman parissa tullaan jatkamaan. Erytishuomiota tullaan jatkossa kiinnittämään laatassa esiintyvän väännön aiheuttamaan taivutusmomenttiin ja väännön vaikutuksiin laatassa tullaan perehtymään tulevaisuudessa tarkemmin.

Lähteet

1. Lähteenmäki M. FES01: Elementtimenetelmän perusteet. VirtuaaliAMK – DIGMA. 27.5.2009.
www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5G0jJ/FES01.pdf. 27.4.2015.
2. RIL 201-1-2011. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011.
3. Autodesk Inc. 2014. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 HELP - Reduction of values near supports. Autodesk Inc. help.autodesk.com/view/RSAPRO/2015/ENU/?guid=GUID-E4E8BE33-DCD2-4343-824C-447A1AB5ECA0. 27.4.2015.
4. Kosakowski A. reduction of value near supporte. Autodesk Inc. 2013 forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis/reduction-of-value-near-supporte/m-p/4699379. 27.4.2015.
5. Autodesk Inc. 2014. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 HELP - Support definition - advanced. Autodesk Inc. help.autodesk.com/view/RSAPRO/2015/ENU/?guid=GUID-F2BB8C3F-062C-46D3-B3E3-DD30F06A6E8B. 27.4.2015.
6. Autodesk Inc. 2014. Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 HELP - Plate and Shell Deflections - Calculations. Autodesk Inc. help.autodesk.com/view/RSAPRO/2015/ENU/?guid=GUID-5825DF36-A541-4D2D-B521-A53ABB80760E. 27.4.2015.
7. Suomen Betoniyhdistys ry 1983 Betonirakenteiden suunnittelun op-pikirja osa 2. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys ry.
8. Suomen Betoniyhdistys ry. 2015 Betonirakenteiden suunnittelun op-pikirja osa 2. Helsinki: BY – Koulutus Oy.
9. SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2005.
10. NA-SFS-EN 1992-1-1. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa. Helsinki: Ympäristöministeriö. 2007.
11. Leskelä, M. Suomen Betoniyhdistys ry. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy. 2006.