

Jere Martikainen

BETONI- JA TERÄSRAKENTEIDEN FEM-OHJELMIEN TEKNINEN VER- TAILU

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Jere Martikainen
Työn nimi	Betoni- ja teräsrakenteiden FEM-ohjelmien tekninen vertailu
Toimeksiantaja	Fimpec Engineering Oy
Vuosi	tammikuu 2022
Sivut	42 sivua
Työn ohjaaja(t)	Jani Pitkänen, Juha Karvonen Antti Lahtinen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia tekninen vertailu Dlubal RFEM ja Strusoft FEM-Design- mitoitus- ja analysointiohjelmien kesken. Opinnäytetyössä laadittiin tietomalli Tekla Structures -ohjelmalla, joka vietiin molempiin ohjelmiin laskentamallin muokkausta ja laskentaa varten. Lopuksi suoritettiin vertailu ohjelmien käyttökokemuksen perusteella.

Opinnäytetyön apuna käytettiin aihetta käsittelevää kirjallisuutta, ohjelmien käyttöohjeita sekä tuotetukea ja ohjelmien koulutusmateriaalia. Opinnäytetyö koostui yleisestä teoriaosuudesta tietomallintamisesta ja FEM-suunnittelusta. Teoriaosuudessa tutustutaan ensin FEM-suunnitteluun ja sen historiaan, jonka jälkeen käsitellään tietomallinnusta. Tutkimusosuudessa syvennyttään analyysimallin tekoon ja sen jälkeen FEM-ohjelmien käyttöön ja raportointiin. Lopuksi tuloksia ja johtopäätöksiä on vertailtu keskenään ja laadittu tuloksista yhteenveto. Tulosten perusteella voidaan todeta, että molemmat FEM-ohjelmat soveltuvat hyvin tukemaan rakennesuunnittelua.

Tutkimusvaiheessa ohjelmien vertailu aloitettiin puhtaalta pöydältä ilman tekijän aikaisempaa käyttökokemusta. Tutkimuksen alkumetreillä ohjelmien käyttökokemuksen perusteella selvisi kummankin ohjelman tuomat haasteet valikojen selkeydessä, mikä pakotti käyttäjän perehtymään ohjelmien käyttöohjeisiin. Tuloksina pystyttiin toteamaan, että kummatkin ohjelmat suoriutuivat testistä hyvin ja molemmat ohjelmat soveltuvat hyvin rakennesuunnittelun eri osa-alueille.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin yksityiskohtaisia vertailukohtia molempien ohjelmistojen käyttökokemuksen perusteella. Johtopäätöksinä voidaan todeta, että RFEM on enemmänkin kokeneeseen ammattikäyttöön soveltuva ohjelmisto. Laajojen valikoiden takia RFEM on monimutkaisempi ohjelmistona verrattuna FEM-Designiin, kun taas FEM-Design soveltuu myös aloittelevan rakennesuunnittelijan käyttöön sen yksinkertaisimpien valikoiden johdosta.

Asiasanat: RFEM, FEM-Design, mitoitus, tekninen vertailu

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Jere Martikainen
Thesis title	Technical Comparison of FEM Software for Concrete and Steel Structures
Commissioned by	Fimpec Engineering Oy
Time	January 2022
Pages	42 pages
Supervisor	Jani Pitkänen, Juha Karvonen Antti Lahtinen

ABSTRACT

The objective of the thesis was to make a technical comparison between Dlubal RFEM and Strusoft FEM-Design, a sizing, and analysis software. In the thesis, a structural model was made using Tekla Structures, which was exported to both software for modification and calculation of the calculation model. Finally, a comparison was made based on the user experience of using the software.

The theoretical framework is based on literature found on the Internet, instructions for using the software as well as product support and training materials for the software. The thesis consisted of a general theoretical part for information modeling and FEM design. In the theoretical part, FEM design and its history were first introduced, followed by information modeling. The research part delved into the development of the analysis model and after that the use and reporting of FEM programs was started. Finally, the calculation results obtained were compared with each other and the results obtained were summarized. Based on the results, the FEM software is well suited to support structural design.

In the research phase, the comparison of the software was started from a completely clean slate with no previous user experience of either software. In the early stages of the study, based on user-experience, both software's challenges regarding clearness of the menus were identified. This required a meticulous study of the instructions of the software. As a result, it was found that both software passed the test well and the software is well suited for different areas of structural design.

The results provided calculation results for both software and detailed comparisons in terms of user experience. It can be concluded that the RFEM software is suitable for more experienced professional use. Due to the extensive menus, RFEM is clearly more complex than FEM-Design, while FEM-Design is also suitable for a novice structural designer due to its simpler menus.

Keywords: RFEM, FEM-Design, design, technical comparison

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	FEM- SUUNNITTELU.....	7
2.1	Historia.....	7
2.2	Yleistä.....	7
2.3	Elementtimenetelmä.....	10
2.3.1	Elementtimenetelmä verrattuna käsin laskentaan.....	10
2.3.2	Elementtiverkko.....	11
3	TEKLA STRUCTURES.....	13
3.1	Tietomalli.....	13
3.2	Analyysimalli.....	14
4	OHJELMIEN VERTAILU.....	14
4.1	Analyysimalli.....	15
4.2	Dlubal RFEM 5.26.....	17
4.2.1	Käyttöliittymä.....	17
4.2.2	Tietomallin vienti laskentaohjelmaan.....	18
4.2.3	Laskentamallin muokkaus.....	19
4.2.4	Laskenta.....	24
4.2.5	Mitoitus.....	24
4.2.6	Liitosmitoitus.....	24
4.2.7	Export.....	26
4.2.8	Tulostusraportti.....	27
4.3	Strusoft FEM-Design 2020.....	27
4.3.1	Käyttöliittymä.....	28
4.3.2	Tietomallin vienti laskentaohjelmaan.....	29
4.3.3	Laskentamallin muokkaus.....	30
4.3.4	Laskenta.....	32
4.3.5	Mitoitus.....	33

4.3.6	Liitosmitoitus	33
4.3.7	Export	33
4.3.8	Tulostusraportti	34
5	TULOKSET.....	35
5.1	Dlubal RFEM 5.26	35
5.2	Strusoft FEM-Design	36
5.3	Vertailu	36
6	POHDINTA.....	40
	LÄHTEET.....	42

1 JOHDANTO

Tietokoneavusteiset elementtimenetelmään perustuvat ohjelmistot ovat keskeisessä asemassa tavanomaisissa sekä vaativissa rakennesuunnittelun kohteissa. Monimutkaisien rakennekokonaisuuksien laskenta on vaikeaa tavanomaisilla laskentamenetelmillä, joten tietokoneavusteiset laskentaohjelmat ovat keskeisessä asemassa rakennesuunnittelussa.

Tämä opinnäytetyö käsittelee kahden rakennesuunnittelussa käytettävän FEM-analysointiohjelman teknistä vertailua. Tässä keskitytään käyttöliittymän vertailun lisäksi ulkoisesta tietomallinnusohjelman sisäänajosta laskentaohjelmien laskentaraportin asetuksiin. Ohjelmoina käytettiin *Dlubal Software*n kehittämää *RFEM 5.26* -ohjelmaa sekä *Strusoft FEM-Design 2020* -ohjelmaa. Opinnäytetyön tilaajana on Kouvolassa sijaitseva suunnittelu- ja konsulttitoimisto Fimpec Engineering Oy. Suunnittelualueina yrityksellä ovat prosessisuunnittelu, laitossuunnittelu, automaatio suunnittelu, sähkösuunnittelu, rakennesuunnittelu, hvac-suunnittelu sekä kone- ja laitesuunnittelu. Yritys työllistää yli 260 ammattilaista viidessä eri Suomen kaupungissa, Ruotsissa, Virossa ja Chilessä.

Tarkastelun kohteena oleva tietomalli laadittiin *Tekla structures* -mallinnusohjelmaa apuna käyttäen, jonka jälkeen tietomalli vietiin molempiin FEM-ohjelmistoihin laskentaa ja mitoitusta varten. Tutkimuskohteena oleva rakennus oli perustettu yhdeksälle teräsputkipaalulle, jotka tukeutuivat kuuteen paaluanturaan ja yhteen nauha-anturaan. Perustuksien päällä oli kuusi teräsbetonipilaria ja yksi teräsbetoniseinä, joiden päällä oli teräsbetonilaatta sekä teräspilareista ja teräspalkeista koostuva kattorakenne.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kahden rakennesuunnittelussa käytettävän FEM-ohjelman ominaisuuksia yrityksen käyttötarpeisiin. Tarkoituksena oli vertailla molempien ohjelmien käyttökokemusta laskentamallin tuonnista laskentaraportin asetuksiin ja laatia ohjelmakohtainen pisteytys. Työn tuloksia on tarkoitus käyttää tilaajayrityksen valitessa työkaluja erilaisten kohteiden rakennesuunnitteluun.

2 FEM- SUUNNITTELU

2.1 Historia

Numeerisen ratkaisumenetelmän periaatetta alettiin käyttämään Yhdysvalloissa 1950-luvulla, ja sieltä se levisi nopeasti rakennesuunnittelun eri osa-alueille sekä konetekniikkaan. Lujuuslaskennassa käytettävä elementtimenetelmä perustuu tietokoneavusteiseen likimääräiseen laskentaan. Tietokoneiden komponenttien nopea kehitys ja sen kautta laskentatehon lisääntyminen edesauttoi FEM -laskentaa nopeasti jo 1960- ja 1970-luvuilla, jolloin syntyi useita statiikan ja dynamiikan ohjelmistoja. Vasta 1980-luvulla FEM -ohjelmistoihin saatiin esi- ja jälkikäsitteilyominaisuuksia (Lähtenmäki 2018, 1).

1960-luvun lopussa ja 1970-luvulla saavutettiin suurta edistystä äärellisessä elementtianalyyseissä. Tietokoneiden nopean kehityksen sekä laskentamuistikapasiteetin kasvaessa kyseiset edistykset tehostivat tietokoneavusteisen laskentamenetelmän kehitystä. Suunnittelualalla rakenteiden mekaniikka keskittyi ensimmäisenä koneiden jännitystilän ja rasituksen ongelmanratkaisuihin. Kyseistä menetelmää on jälkeenpäin hyödynnetty analysoimaan kolmiulotteisia ongelmia, rakenteiden vakautta, värinän aiheuttamia ongelmia sekä epälineaarista analyysiä (Bhavikatti 2004, 19).

2.2 Yleistä

Rakenteiden lujuuslaskentatehtävissä on tarkoituksena ratkaista laskennallisesti rakenteiden siirtymät, muodonmuutokset ja jännitystilat. Lujuuslaskenta perustuu suurimmaksi osaksi lujuusfysiikan ja statiikan teoriaan. Monimutkaisemmissa rakenteissa, kuten suljetussa muodossa, tavanomainen käsin laskenta ei onnistu tai on erittäin työlästä. Tämän takia on käytettävä likimääräistä numeerista ratkaisumenetelmää (Lähtenmäki 2018, 9).

Lujuusopin teorian mukaan elementit voidaan jakaa soveltuvuuksien takia seitsemään eri ryhmään: (Lähtenmäki 2018, 9-10).

1. Sauvaelementit soveltuvat ristikkorakenteiden analysointiin. Sauvaelementit ovat usein kaksisolmuisia, vakiopoikkileikkauksisia objekteja. Tavallisimmat elementit ovat kaksisolmuisia ja tasapaksuja tasoristikon ja avaruusristikon muotoisia sauvaelementtejä.

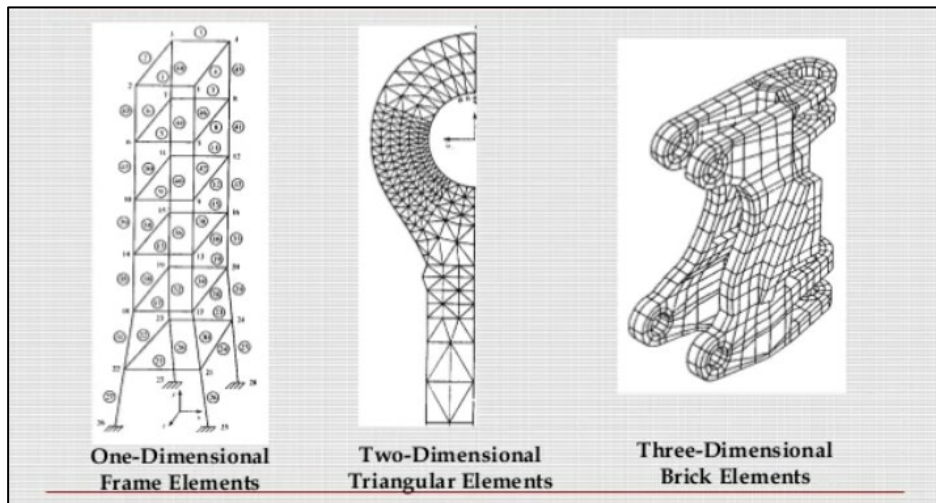
2. Palkkielementit soveltuvat palkistojen ja kehärakenteiden analysointiin. Palkkielementit voivat olla suoria tai käyriä objekteja, joiden analysoinnissa voidaan ottaa huomioon myös leikkausvoiman vaikutukset. Muita elementtejä ovat arinapalkkielementti ja laatan- ja kuoren jäykistepalkin elementti.
3. 2D-solidielementit soveltuvat tasojännitystilän, tasomuodonmuutostilan ja pyörähdyssymmetristen solidirakenteiden käsittelyyn. Yleensä niitä käytetään kolmisivuisten ja nelisivuisten tasoelementtien kanssa. Elementin reunat voivat olla suorat, jolloin elementti on lineaarinen. Kaarevareunaisista elementeistä tavallisin muoto on kvadraattinen, jolloin elementin reunat ovat paraabelin kaaren muotoisia.
4. Laattaelementit soveltuvat tasopintarakenteiden analysointiin. Laattaelementit ovat taivutuksen ja leikkauksen vaikutuksen alaisia tasopintarakenteeseen käsittelyyn suunniteltuja elementtejä. Ne voivat olla kolmisivuisia tai nelisivuisia elementtejä, joiden keskitaso kulkee laatan keskellä ja elementin paksuus on sama koko elementin alalla.
5. Kuorielementit soveltuvat kaarevien pintarakenteiden analysointiin. Yleensä käytetään kolmisivuisia tai nelisivuisia tasapaksuja kuoren keskipinnan elementtejä, jotka ovat yleensä poikkileikkaukseltaan tasapaksuja koko elementin matkalta. On olemassa ohuita sekä paksun kuoren omaavia elementtejä. Paksun kuoren omaavat elementit ottavat leikkausvoiman huomioon, mikä vaikuttaa kuoren siirtymiin.
6. 3D-solidielementit soveltuvat kolmiulotteisten kappaleiden mallinnukseen. Ne koostuvat neli-, viisi- ja kuusitahokkaista eli monikulmioista. Elementin reunapinnat voivat olla tasoja, jolloin elementti on lineaarinen, tai toisen asteen pintoja, jolloin se on neliömäinen.
7. Erityiselementtejä ovat kontaktielementit, särön kärjen elementit ja puoliäärettömät solidielementit. Erityiselementit soveltuvat erityissovelluksiin, joten ne ovat hyödyllisiä vain omalla spesifillä alueellaan, jossa tavallisilla peruselementeillä ei mallinnusta pystytä suorittamaan riittävän tarkasti tai tehokkaasti. Ohjelmistokohtaisesti erityiselementtivalikot vaihtelevat suuresti (Lähteenmäki 2018, 9-10).

FEM-laskentamallit jaetaan kuvan 1 mukaisesti kolmeen eri malliryhmään: (Lähteenmäki 2018, 11).

1. Keskiviivamallit, jotka ovat yksiulotteisia sauva- tai palkkirakenteita, joiden geometrinen malli koostuu poikkileikkauksien pintakeskiössä olevien viivojen mukaan. 1D-laskentamalleja käytetään yleensä yksinkertaisten sauva- ja palkkielementtien analysointiin.

2. Keskipintamallit, jotka kuvastavat 2D-mallia, joita käytetään levymäisten elementtien kanssa. Näihin lukeutuvat levyrakenteet, laattarakenteet sekä kuorirakenteet. Yksiulotteiseen malliin verrattuna kaksiulotteiseen malliin voidaan määrittää ainepaksuudet. Tämän takia 2D-mallit soveltuvat laattamaisten rakenteiden analysointiin, kuten rakennusten lattia- ja seinärakenteisiin.

3. Kolmiulotteiset solidimallit, joita käytetään vaativampien rakennusten tai rakennusten osien geometrioiden analysointiin ja joihin tavanomaiset 1D- ja 2D-mallit eivät sovellu. 3D-laskentamallien geometriatiedot tuodaan yleensä ulkoisesta CAD-ohjelmasta analysointiohjelmaan. 3D-laskentamalleja käytetään yleensä suurien rakennekokonaisuuksien analysointiin, joihin lukeutuvat kokonaiset rakennukset (Lähtenmäki 2018, 11).



Kuva 1. Laskentamallit (Dr.G.Paulraj 2019)

FEM-laskennalla tarkoitetaan elementtimenetelmällä suoritettavaa laskentaa. FEA-laskenta on numeerinen laskentamenetelmä, joka voidaan suorittaa lineaarisesti tai epälineaaraisesti. FEA-laskentamenetelmää käytetään rakenteiden muodon ja materiaalien optimointiin (Vertex 2017. Tuotedokumentaatio).

Rakennemallille määritetään projektikoordinaatisto jo tietomallinnusvaiheessa käytettävässä ohjelmassa. Varsinaisessa rakenteen analysointiohjelmassa voidaan koordinaatistoa muuttaa niin, että analyysimalli sijaitsee origon vieressä positiivisessa koordinaatistossa. Analyysimallin sijoittamista kunnalliseen koordinaatistoon ei suositella ohjelmistojen suorituskyvyn ja käytettävyyden vuoksi. Tästä poikkeuksena on analyysimallin korkeussuunta, joka täytyy mallintaa juuri tässä koordinaatistossa. Mittayksiköinä käytetään yleisimmin

millimetrejä, ja kiertokulma ilmoitetaan aina vähintään kahden desimaalin tarkkuudella (YTV 2012, 7).

Rakennemallin suunnittelussa on käytettävä erityistä huomiota ohjelmistojen materiaalikomponenttien ja työkalujen kanssa, sillä jokaisella komponentilla on oma tarkoituksensa analysoitavassa analyysimallissa. Rakennemallin kohdistuspisteet määrittävät analysointimalliin tulevat keskilinjat ja solmupisteiden sijainnit, minkä takia oikean työkalun käyttö on tärkeää. Esimerkiksi rakennuksen seinät on mallinnettava seinätyökaluilla, jotka tunnetaan Teklassa nimellä *panel* ja *wall layout*. Laatat (slab) mallinnetaan laattatyökaluilla, palkit (beam) mallinnetaan palkkityökaluilla, sekä pilarit (column) mallinnetaan pilarityökaluilla. Rakenteet, joille ei löydy omaa työkalua tai komponenttia, mallinnetaan soveltaen jo olemassa olevia työkaluja ja komponentteja. Tällöin käytetty mallinnustapa on raportoitava tietomalliselostukseen (YTV 2012, 8).

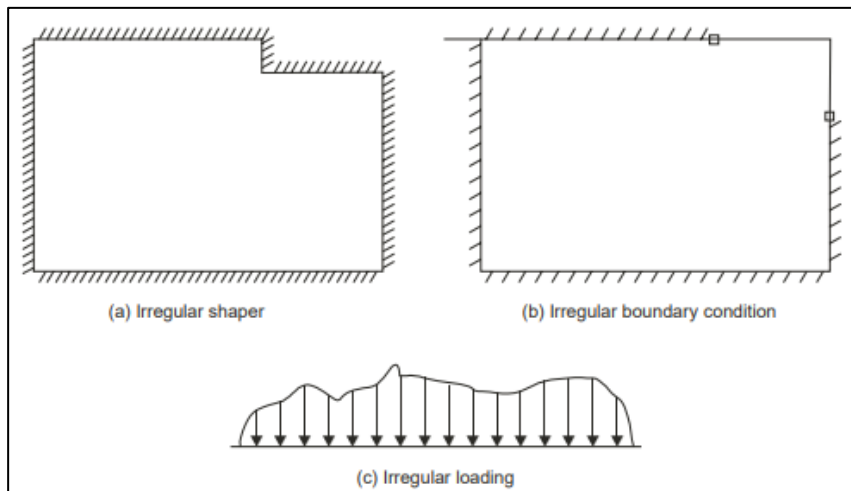
2.3 Elementtimenetelmä

FEM eli *Finite Element Method* on englanninkielinen termi sanasta elementtimenetelmä. Käsin laskennassa analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisissa rakennelmissa, joten monimutkaisemmissa rakenteissa on turvaututtava tietokoneohjelmistoilla suoritettavaan laskentaan elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmässä geometrisesti monimutkainen kappale yksinkertaistetaan jakamalla monimutkainen elementti pienempiin osiin elementti-verkolla (Lähteenmäki 2018, 2).

2.3.1 Elementtimenetelmä verrattuna käsin laskentaan

Klassisilla menetelmillä suoritettavassa laskennassa muodostetaan tarkkoja yhtälöitä ja niiden avulla saadaan tarkkoja ratkaisuja. Äärellistä elementtianalyysiä käytettäessä ratkaisut ovat likimääräisiä. Aina kun laskennan erilaiset monimutkaisuudet kohtaavat, käsin laskennassa tehdään rajuja oletuksia rakenteen muodon, liitosehtojen sekä kuormitusten perusteella. Kuva 2 esittää molemmat laskentatavat laattarakenteiden analyysissä: (a) epäsäännöllinen muoto, (b) epäsäännöllinen rajaehto, (c) epäsäännöllinen kuormitus. Ratkaisun saamiseksi kuvan kaltaisissa tapauksissa suorakaiteen muotoisilla

kappaleilla on oltava sama reunaehto ja säännölliset kuormat. Laskentaohjelmissa tämän tapaiset ongelmat käsitellään sellaisenaan (Bhavikatti 2005, 18).



Kuva 2. Laattarakenteet (Bhavikatti 2005)

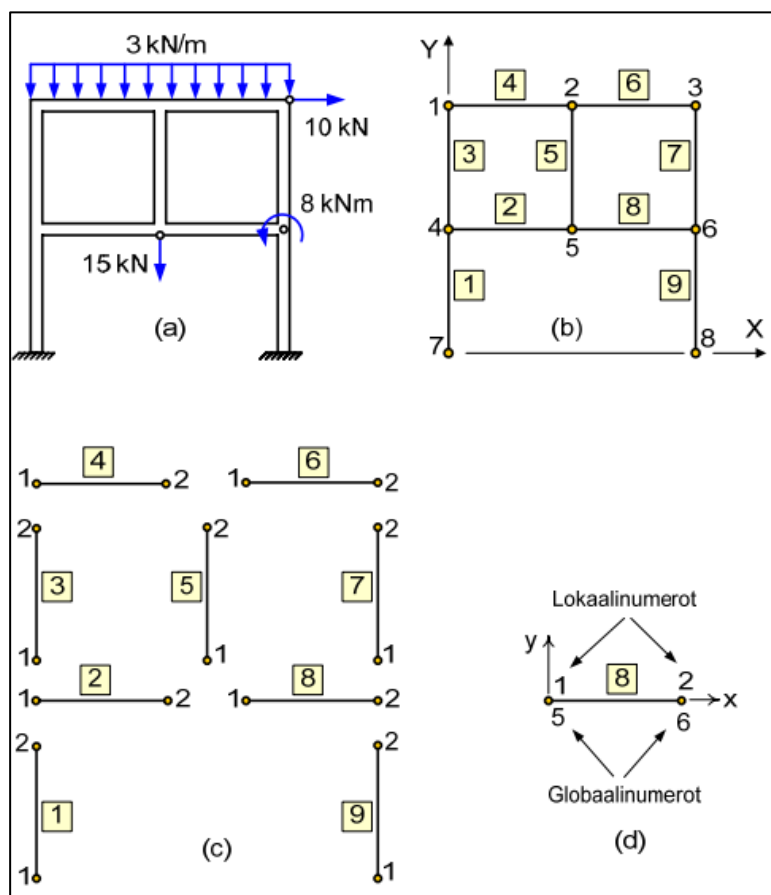
Aina kun rakenteen materiaalin ominaisuudet eivät ole isotrooppisia (eri materiaaliominaisuudet samassa rakenteessa), ratkaisun saaminen klassisella laskentamenetelmällä on haastavaa. FEM kykenee analysoimaan rakenteita, joilla on anisotrooppisia ominaisuuksia, eli sellaisia rakenteita, joilla on suunnista riippumaton rakenne. Kun rakenne koostuu useammasta kuin yhdestä materiaalista, on vaikea käyttää klassista käsin laskentamenetelmää, mutta äärellistä elementtiä voidaan käyttää ilman vaikeuksia. Materiaalien ja geometristen epälineaarisuuksien takia ongelmia on erittäin työlästä ratkaista klassisilla käsin laskentamenetelmillä (Bhavikatti 2005, 18).

2.3.2 Elementtiverkko

Analysoitavaa rakennetta kuvataan elementtijoukoilla, jota kutsutaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Elementtiverkko koostuu joukosta elementtejä, jotka yhdistyvät toisiinsa solmupisteiden avulla. Objektin jakavina osina käytettävien elementtien koko voi vaihdella tarkasteltavasta ongelmasta riippuen. Objektin elementtijaossa voidaan käyttää samanaikaisesti erikokoisia ja muotoisia elementtejä, joka tekee elementtimenetelmää hyödyntävästä laskennasta joustavaa yhdistettyjen rakenteiden käsittelyssä. Elementtiverkko kuvastaa todellista rakennetta yleensä vain likimääräisesti, mikä aiheuttaa tarkasteltavan rakenteen tuloksiin virheitä. Kyseinen mallinnusvirhe ei ole

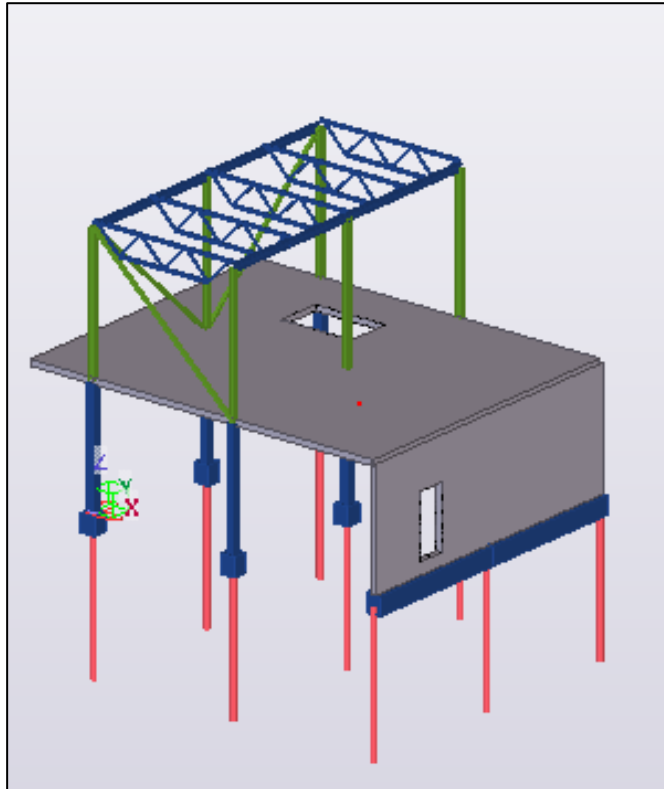
lujuuslaskennan kannalta merkittävä, mikäli käytetään kaarevareunaisia tai riittävän pieniä elementtejä (Lähteenmäki 2014, 3).

Kuvassa 3 on esitetty tasokehä ja sen FEM-malli. Kohdassa (a) on kuvattu rakenteen tuennat ja kuormitukset. Kohdassa (b) on kuvattu sauvarakenteiden elementtiverkkoa. Kohdassa (c) on kuvattu jokainen yksittäinen sauvaelementti. Kohdassa (d) kuvataan yksittäisen elementin numerointeja ja koordinaatteja. Jokaisella elementillä on oma elementtinumero (Lähteenmäki 2014, 3).



Kuva 3. Tasokehä (Lähteenmäki 2014, 3)

Kuvassa 4 on levyrakenteiden elementtiverkko, jossa kohta (a) esittää levyjen jakoa kolmion ja nelikulmion muotoisiin elementteihin. Kohdassa (b) on yleisimmin käytetty nelikulmainen elementti ja sen lokaali- sekä globaalinumerointi. Kohdassa (c) kuvataan kolmioelementtiä numerointineen (Lähteenmäki 2014, 4).



Kuva 5. Analysoinnissa hyödynnetty tietomalli

Tietomalli koostui yhdeksästä teräsputkipaalusta, kuudesta teräsbetonisesta paaluanturasta, kuudesta betonipilarista, yhdestä nauha-anturasta, yhdestä teräsbetonisesta seinäelementistä, yhdestä paikallavaletusta teräsbetonisesta lattialaatasta, kuudesta teräspilarista, viidestä teräksisestä kattoristikosta sekä kolmesta jäykistesauvasta.

3.2 Analyysimalli

Analyysimalli on rakennemalliin pohjautuva 3D-malli, joka pohjautuu pelkästään kantaviin rakenneosiin. Analyysimalliin tehtävät muutokset ennen mitoitushjelmaan viemistä ovat erittäin tärkeässä asemassa, sillä tällä menettelyllä rakennemallin solmupisteet saadaan määritettyä oikeisiin sijainteihin jo mallinnusvaiheessa ennen vientiä mitoitushjelmaan.

4 OHJELMIEN VERTAILU

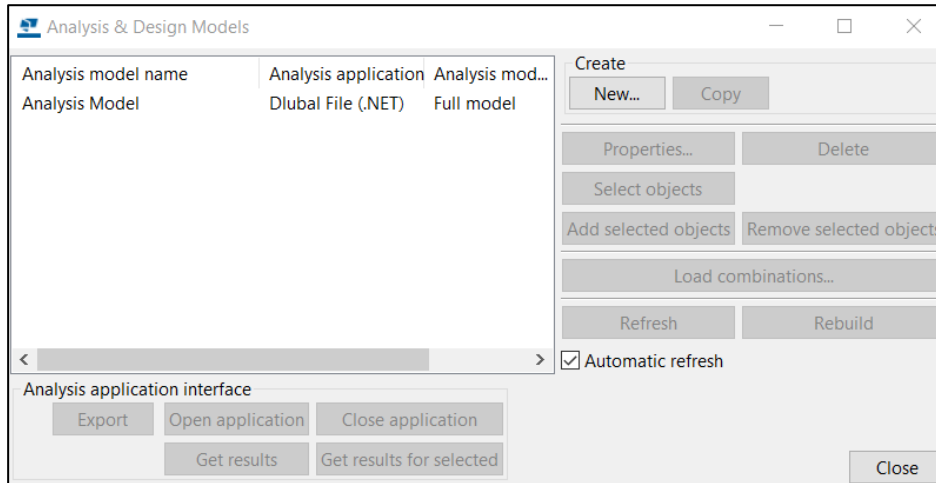
Opinnäytetyössä vertailtiin kahta markkinoilla olevaa FEM-ohjelmaa. Ensin koekäytettiin Dlubalin kehittämää RFEM 5.26 -sovellusversiota, johon sisältyi teräsrakenteiden sekä betonirakenteiden mitoitustoimintoja, joita hyödynnettiin analysoinnissa. Toisena ohjelmana koekäytettiin StruSoftin kehittämää FEM-

Design 2020 -sovellusversiota, johon sisältyi kaikki rakenteiden mitoitustoiminnot. Vertailussa hyödynnettiin Teklassa tehtyä tietomallia, johon sisällytettiin teollisuussuunnittelussa käytettäviä rakenneosia, kuten erilaisia teräsrakenteita sekä betonirakenteita.

Ohjelmien vertailu aloitettiin tuomalla *Teklassa* laadittu tietomalli ifc-muodossa molempiin analysointiohjelmiin ja raportoitiin kyseisen toiminnon toiminnasta. Vertailua jatkettiin materiaalien yhteensopivuuksien seurannalla ja mahdollisella päivitystarpeella. Vertailua jatkettiin liitosehtojen määrittämisen sekä kuorimituksien määrittämisen helppouden ja selkeyden analysoinnilla, jonka jälkeen keskityttiin mitoituksiin ja tulostusraportin selkeyteen. Kaikista yllä olevista vertailukohdista luotiin ohjelmakohtainen arviointi.

4.1 Analyysimalli

Ennen varsinaista ohjelmien testausvaihetta laadittiin tietomallista analyysimalli, joka oli tarkoitus viedä molempiin vertailtaviin mitoitushjelmiin. Tietomallin muokkaus analyysimalliksi aloitettiin Analysis & Design Models- työkalua apuna käyttäen. Teklassa on mahdollista muokata tietomallin analysointi-asetuksia, jolloin saadaan analyysimalli toimimaan oikein jo ennen vientiä laskeentaohjelmaan. Teklasta löytyi valmiina Dlubal File (.NET) -sovellus, jota hyödyntäen Teklan export-toiminto toimi yhdessä RFEM-ohjelman Direct import -toiminnon kanssa (Kuva 6). FEM-Designin löytyy oma import -työkalu nimeltään *Tekla StruXML Export*. Kyseinen työkalu ei kuitenkaan toiminut yhdessä Teklan versioiden 2021 tai 2020 kanssa, joten testauksia sen osalta ei päästy tekemään.



Kuva 6. Analyysimallin luonti Teklassa

Analyysimallin luontiin tarkoitetusta työkalusta löytyi useita valikoita. Ensin määritettiin analyysimallille nimi, mahdolliset rakennefiltrit, kantavien osien filteri, sekundääriosien filteri ja analyysimallin sisällön filteri. Oli myös mahdollista määrittää rigid-link-sauvojen eli äärettömän jäykkien sauvojen sekä liitoksien vapausasteiden sisällyttäminen analyysimalliin.

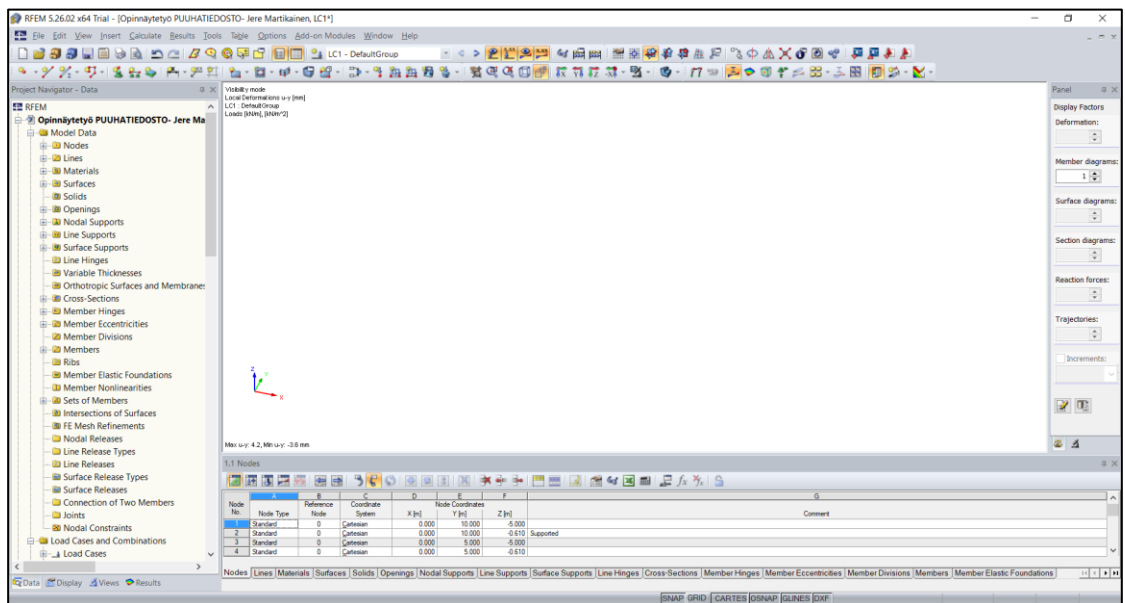
Näiden jälkeen Tekla tuotti rakennemallista analyysimallin. Tässä vaiheessa tarkistettiin solmupisteiden oikea sijainti ja referenssiakseleiden positio. Teklassa löytyi analyysimallin muokkausvalikoita, joissa voitiin muun muassa lisätä solmupisteitä ja määrittää rigid-link-sauvoja. Ensimmäiseksi ongelmaksi osoittautui teräsrakennneosien liitoskomponenttien toimimattomuus analyysimallissa. Analyysimallin tuontiin on kaksi vaihtoehtoa. Toinen on fyysinen malli, jolloin malli tuodaan sellaisena kuin se on tietomallinnettu Teklassa. Fyysisessä mallissa tarkempia tietoja ei lisätä laskentamalliin, esimerkiksi tukia, solmupisteiden vapausasteita tai kuormia. Fyysinen malli ei ole täysin laskentavalmis, koska keskilinjoja ja solmupisteitä ei välttämättä ole kytketty toisiinsa, ja siksi laskentamalli vaatii muokkausta laskentaohjelmassa. Teklassa on myös mahdollista luoda analyttinen malli. Fyysinen rakennemalli voidaan muuttaa analyysimalliksi monella eri tavalla. Esimerkiksi lähekkäin olevat solmut voidaan yhdistää äärettömän jäykällä sauvoilla toisiinsa säilyttäen rakenteiden epäkeskisyydet analyysimallissa.

4.2 Dlubal RFEM 5.26

Dlubal RFEM 5.26 eli lyhemmin RFEM on monikäyttöinen 2D/3D-FEM-rakeneanalyysiohjelma. Ohjelma kykenee mitoittamaan betoni-, teräsbetoni-, teräs-, puu-, alumiini-, ja lasirakenteet. RFEM mahdollistaa nopean ja helpon mallinnuksen, rakenteellisen ja dynaamisen laskennan sekä mallien suunnittelun sauvoilla, levyllä, seinällä, taitetulla levyllä, kuorella ja kiinteillä elementeillä. RFEMiin on mahdollista lisätä ohjelmiston lisämoduuleja, joilla saadaan lisäominaisuuksia laskennan ja analysoinnin tueksi. Ohjelma tarjoaa työkalut, jotka täyttävät kaikki nykyaikaisten maa- ja vesirakentamisen tarpeet (What is RFEM s.a).

4.2.1 Käyttöliittymä

RFEMin käyttöliittymä muodostuu neljästä pääosasta: työkalurivistä, navigointirivistä, taulukkorivistä ja mallinnustilasta. Ylhäällä oleva työkalurivi oli täysin muokattavissa omien tottumuksien mukaiseksi. Taulukkorivin alapuolelta löytyy hierarkia, jonka mukaan laskentamallia suoritetaan. Hierarkia toimii erittäin hyvin selkeyttääkseen laskentamallin tekoa. Valikkojen selkeys ja looginen järjestys auttavat käyttäjää toimimaan oikeassa järjestyksessä koko laskentaprosessin ajan (kuva 7).



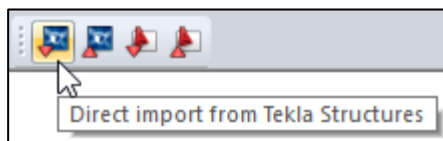
Kuva 7. RFEM 5.26 -käyttöliittymä

Kuten kuvasta 7 näkyy, vasemmassa reunassa sijaitsee navigointipalkki, jonka tärkeimmät välilehdet ovat model data ja loads. Model data -kansiossa sijaitsee kaikki fyysisen laskentamallin sisältämä informaatio, kuten solmupisteet, sauvat, materiaalit ja liitosehtojen määrittely. Loads -kansiossa sijaitsee laskentamallin kuormitustiedot. Navigointipalkissa on neljä päänäkymää: Data, Display, Views ja Results. Navigointipalkki on looginen ja selkeä, ja tarvittavien tietojen etsiminen on helppoa. Etenkin Results -välilehdellä laskentatuloksien visuaalinen seuranta on helppokäyttöistä ja selkeää.

Ohjelmasta löytyy kattavasti tuettuja tiedostomuotoja laskentaa varten. Suosittuja tiedostomuotoja rakennemallien analysointiin ovat muun muassa dxf ja ifc. Direct import osoittautui erittäin helpoksi tavaksi tuoda analyysimalli Teklasta laskentaohjelmaan. Direct importin toimintaperiaate perustuu reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon ohjelmien välillä, ja tätä hyödyntämällä Teklassa laadittu tietomalli saadaan RFEM-ohjelmaan todella nopeasti.

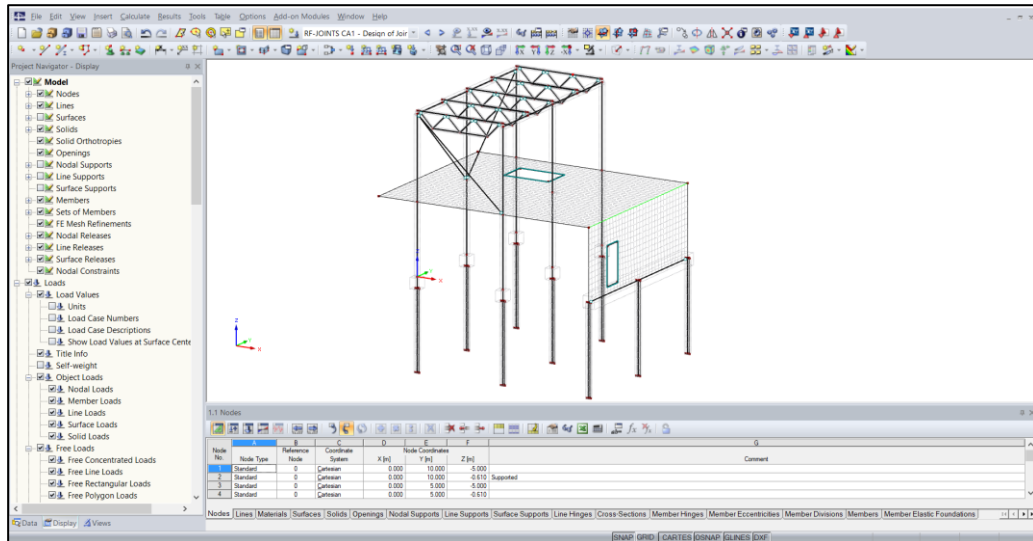
4.2.2 Tietomallin vienti laskentaohjelmaan

Tietomallin tuonnissa hyödynnettiin RFEMistä löytyvää Direct import from Tekla Structures -toimintoa. Kyseinen toiminto tunnistaa käynnissä olevasta Teklasta mallinnustilassa olevan tietomallin, jonka RFEMin import -toiminto tuo laskentaohjelmaan (kuva 8).



Kuva 8. RFEMin Direct import from Tekla Structures -toiminto

Direct import from Tekla Structures yllätti helppokäyttöisyydellään, joten laskentamallien reaaliaikainen muokkaus nopeutuu huomattavasti kyseistä toimintoa hyödyntämällä. Esimerkiksi mahdolliset mallinnusvirheet, kuten sauvojen virheellisesti määritetyt referenssiakselit, on yleensä helpompi korjata Teklassa.



Kuva 9. Laskentamalli tuotuna RFEM-ohjelmaan

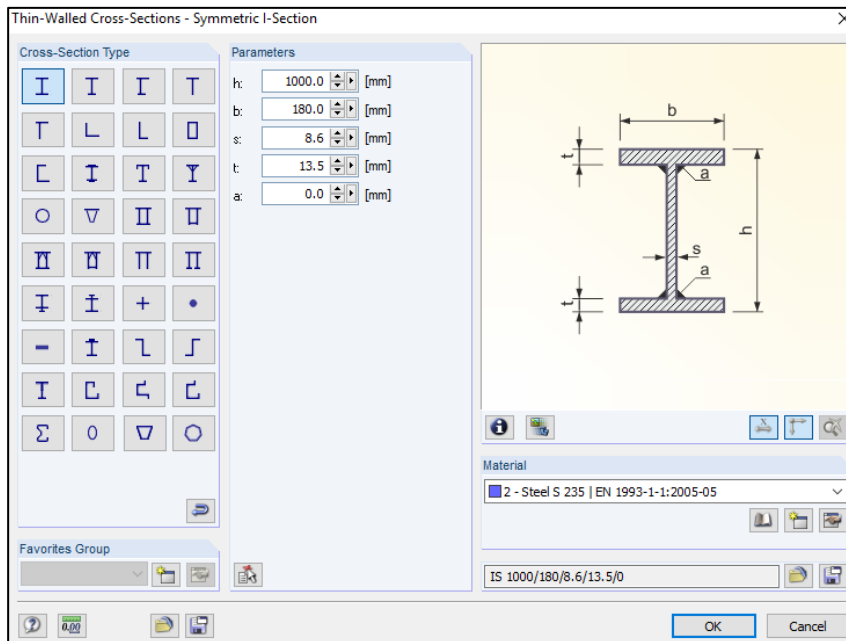
Laskentamallin tuonnin jälkeen malli koostui pelkistä sauvoista ilman materiaalitietoja, joten kaikki rakennemateriaalit sekä profiilitiedot jouduttiin päivittämään RFEMin oman materiaalien yhteensovittamisasetuksen kautta (kuva 9).

4.2.3 Laskentamallin muokkaus

Laskentamallin muokkaus aloitetaan tarkastamalla rakennemateriaalien oikeellisuus sekä solmupisteiden oikea sijainti, jotta laskennasta saadaan todenmukaisia tuloksia. Mikäli laskentaohjelma ei löydä vastaavaa materiaalinimitystä tai profiilinimitystä omasta kirjastostaan, tällöin laskentamalli koostuu vain pelkistä viivoista. Ilman materiaali- ja poikkileikkaustietoa laskentamalli ei ole sellaisenaan laskentakelpoinen.

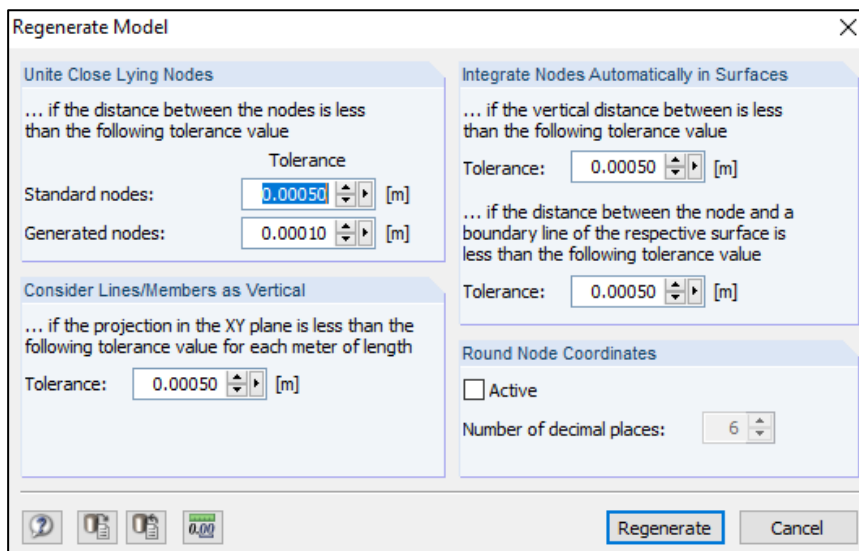
Tässä vaiheessa huomattiin, että Teklassa määritetyt rakennemateriaalien nimet eivät olleet yhteensopivia RFEMin rakennemateriaalikirjaston kanssa. RFEM ja Tekla käyttävät erilaisia materiaali- ja poikkileikkauskuvauksia. Tietojen yhteensovittaminen oli tehtävissä RFEMissä Import/Export Material Conversion -työkalulla. Aina kun malleja siirretään ohjelmien välillä, tarkistetaan ensin, ovatko samannimiset materiaalit tai poikkileikkaukset saatavilla kyseisessä ohjelmassa. RFEM-ohjelmassa muuntotiedostojen sijainnit rekisteröidään import- tai export-valintaikkunan detail settings -välilehdessä (kuva 10). Näitä voitiin muokata tekstinkäsittelyohjelmalla.

ohjelmassa voidaan myös määrittää uusia poikkileikkauksia. Kuvassa 12 esitetään RFEM-ohjelman materiaalikirjasto-välilehti.



Kuva 12. RFEM materiaalikirjasto

Toisella ohjelmalla tehtyyn analyysimalliin on suoritettavissa mallin regenerointi ennen varsinaista laskentamallin muokkausta, jolloin vältetään tietomallintamisvaiheessa syntyneet epätarkkuudet, muun muassa solmupisteiden koordinaattitietojen virheet. Regenerate Model -toiminnolla saadaan yhdistettyä käyttäjän määrittämän etäisyyden sisällä olevat solmupisteet toisiinsa. Kuvassa 13 on havainnollistettu tätä toimintoa.



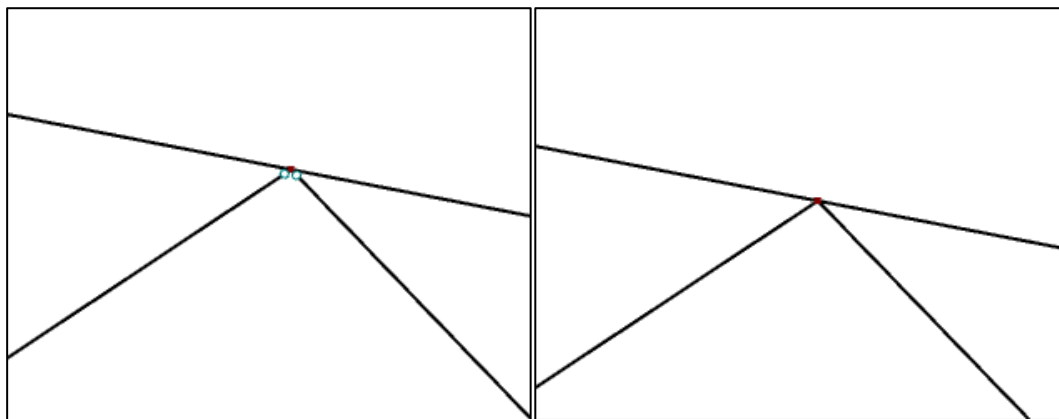
Kuva 13. RFEM laskentamallin regenerointi

Tasomaiset rakenneosat kuten teräsbetonilaatta ja teräsbetoniseinä muunnettiin tasomaiseksi elementiksi. Vaihtoehtoisesti kaikki sauvaelementit kuten teräspalkit, pilarit ja palkit muunnettiin sauvaelementeiksi, jolloin RFEM loi jokaiselle rakenneosalle referenssilinjan ja solmupisteet Teklassa tehdyn mallinnustyylin pohjalta. Teklassa luotuun analyysimalliin tehdyt rigid-link-sauvat tulivat myös RFEMiin.

Rakenneosien ja solmupisteiden numerointi saatiin päälle navigointipalkista Display-välilehdeltä. Tämä selkeyttää tarkastelemaan rakenneosien määrää, jota voidaan verrata Teklassa olevaan materiaaliluetteloon. Suljetuille laattarakenteille ja seinärakenteille oli määritettävä elementtiverkko.

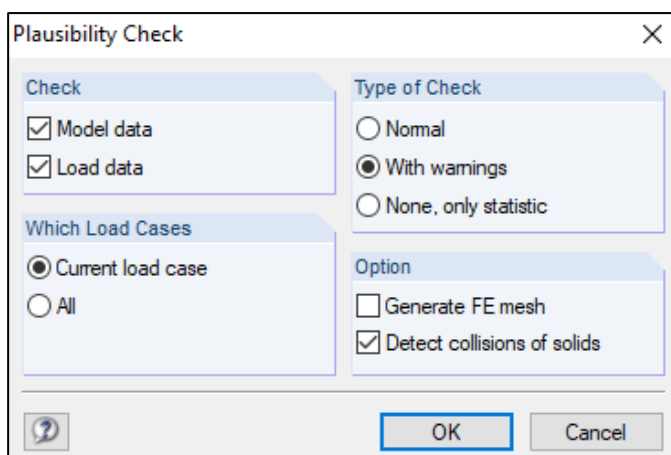
Elementtiverkon määrittävä työkalu oli helppokäyttöinen ja selkeä. Laskentamallissa oleville laatta- ja seinärakenteelle määritettiin surface -elementtiverkko. Teräspalkkien ympärille täytyi määrittää pinta-ala-elementti (surface), johon tehtiin maanpintaa simuloivia jousitukia, jotta voidaan todeta paaluihin kohdistuvia muodonmuutoksia koko paalun mitalla sekä kannatella yläpuolella olevaa rakennetta. Paalut jousituet jaetaan viiteen osaan, jotka ovat jaoteltu tasaisin välein koko sauvan mitalle. Näin ollen laskentamalliin ei tehty erillisiä tuentoja anturoiden alle.

Ohjelmassa hahmottaa hyvin, jos liitokseen on asetettu sauvojen päiden liitosehtoja. Kuvan 14 vasemman puolen mukaisen teräsristikon jokaisessa solmupisteessä kiinni olevaan sauvaan on määritetty vapausaste. Oikeanpuoleisen kuvan mukaisesti solmupisteen liittymässä kaikki sauvojen päiden liitokset ovat jäykkiä. Tämä visuaalinen esitys helpottaa liitoksien tulkintaa ja auttaa paikantamaan laskentamallissa olevia virheitä.



Kuva 14. RFEM solmupisteiden visuaalinen esitys. Vasemmalla nivelelliset sauvojen päät ja oikealla täysin jäykät sauvojen päät

Analyysimallin yleistarkastus tehtiin Plausibility Check -komennolla ennen laskentaa, jotta voidaan varmistua siitä, että laskentatulokset ovat uskottavia ja rakenne on stabiili. Valikosta voitiin helposti rajata tarkasteltavat kohdat ja ilmoitusraportin tyyli (Kuva 15).



Kuva 15. RFEM mallin tarkastus

Rakenteen omapainon määrittäminen tapahtui New load case -valikosta, jolloin valitaan Load case descriptionista Self-weight. Kyseinen toiminto oli hyvin yksinkertainen, ja niin kuuluukin olla. Samalle pinta-alalle määritettäessä kahta eri kokoista hyötykuormaa on käytettävä New Free Polygon Load -toimintoa. Normaalisti yhtä samansuuruisia hyötykuormia määritettäessä voidaan käyttää Surface Load -toimintoa.

4.2.4 Laskenta

RFEMin laskenta onnistuttiin suorittamaan, vaikka laskentamalli ei ollut kaikilta osin täysin stabiili. Esimerkiksi virheellisesti määritettyjen teräsristikkojen diagonaalisauvojen solmupisteiden vapausasteet eivät rajoittaneet laskentaa, vaan laskennan aikana ilmestyi virheilmoitus epästabiilista rakenneosasta. Mallinnusvirhe pystyttiin paikantamaan helposti taipumanäkymän avulla, jolloin diagonaalisauvat putosivat alas mallinnusnäkyvästä. Itse laskenta on nopea tämän kokoisessa rakennekokonaisuudessa.

4.2.5 Mitoitus










Teräsbetonisten rakenneosien raudoitusten mitoittamiseen käytettiin apuna RF-Concrete Members -lisämoduulia. Tällä voitiin mitoittaa vaaditut raudoitukset kuormitusten mukaisesti joko manuaalisesti määrittämällä betoniteräksien koko tai laskemalla pelkästään minimiraudoitukset. Lisäksi tällä moduulilla oli mahdollista laskea mitä tahansa betonipalkkia. Aluksi oli määritettävä laskennassa käytettävä standardi, joka on suomessa EN 1992-1-1:2004 ja kansallinen liite SFS:2007. Materiaalivalikosta täytyi valita haluttu teräslaatu betoniraudoitteille. Valittaessa raudoitusten optimointi, mitoitus suoritetaan oletusasetuksilla minimiteräksillä, joka on hyvin riskialtis tapa virheherkkyyksien takia. Tämän takia asetuksia muokattiin niin, että määritettiin halutut teräskoot. Asetuksista pystyttiin määrittämään haluttu suojabetonipeite, raudoituksen jako ja teräksien osavarmuuskertoimet.

Teräsrakenteiden mitoittamiseen käytettiin RF-Steel Members -lisämoduulia, jolla sai myös helposti mitoittettua laskentamallissa olevat teräsrakenteet. Teräsosien osavarmuuskertoimena käytetään 1,15. Ohjelmasta löytyy laaja valikoima eri rakennemateriaalien mitoitusmoduuleja sekä tarkastelutyökaluja muun muassa dynaamisille kuormille, liitoksille, perustuksille, statiikan tarkastelu, tornien-, putkistojen ja lasin mitoitus.

4.2.6 Liitosmitoitus

RFEMistä löytyy kattava lista erilaisia teräsrakenneosien liitosmitoitukseen tarvittavia lisämoduuleja. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin RF-HSS-

liitosmitoitusmoduulia, koska sieltä löytyi kattavasti eri teräsrakenteisten ristikkoliitosten mitoitussalkoita. Moduulit näkyvät kuvassa 16.




	RF-END-PLATE (Trial version)	Design of end plate connections for I-beams
	RF-CONNECT (Trial version)	Design of shear connections
	RF-JOINTS (Trial version)	Design of joints
	RF-FRAME-JOINT Pro (Trial version)	Design of bolted frame joints
	V-JOINT (not installed)	Design of simple bolted knee connections
	RF-DSTV (not installed)	Design of typified I-beam connections
	RF-DOWEL (not installed)	Design of dowel connections
	RF-HSS (Trial version)	Design of connections with hollow cross-sections
	RF-LIMITS (Trial version)	Comparison of results with defined limit values

Kuva 16. RFEM teräsrakenteiden liitosmitoituksen lisämoduulit




Ensimmäisen havainnon liitosmitoituksessa aiheutti se, etteivät aiemmin määritetyt teräsristikon profiilit olleet yhteensopivia liitosmitoituksen kanssa. Aiemmin teräsristikoihin oli määritetty profiiliksi TO 120x5 / TO 80x5 ja liitosmitoituksessa se piti muuttaa QRO 120x5 / QRO 80x5 (Kuva 17). Loppujen lopuksi liitosmitoitusmoduuli oli hyvin yksinkertainen käyttää ja kaikki asetukset tapahtuivat yhden ikkunan kautta. Liitoksen laskennan jälkeen tulokset tulivat suoraan tulosraporttiin näkyviin.




1.2 Cross-Sections




Cross-Sections




Chord: QRO 120x5 (EN 10219-2, 20C ▼   

Rotated by 90°

Strut 1: QRO 80x5 (EN 10210-2, 20C ▼   

Strut 2: QRO 80x5 (EN 10210-2, 20C ▼   

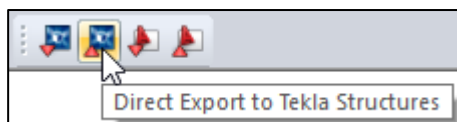
Strut 3: ▼   

Strut 4: ▼   

Kuva 17. Teräsrakenneprofiilien määrittäminen RF-HSS -mitoitusmoduulilla

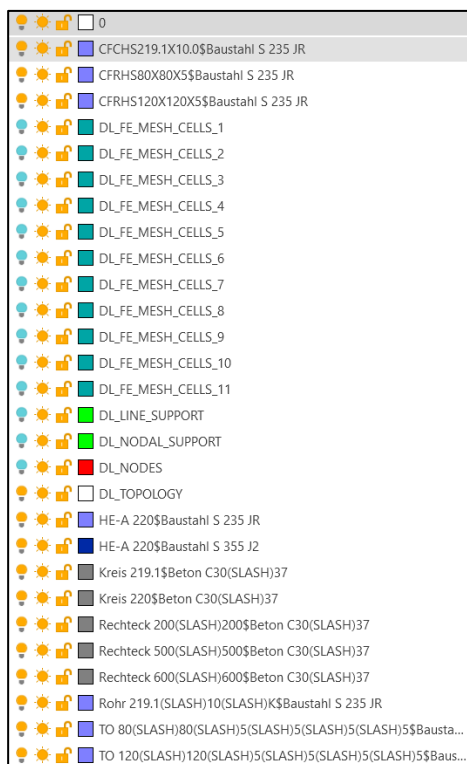
4.2.7 Export

Yhteensopivuus myös toiseen suuntaan on oleellista esimerkiksi suurissa kokonaisuuksissa tapahtuneiden optimointimuutoksien takia. Ylävalikkoriviltä löytyi Direct Export To Tekla Structures -ominaisuus, jolla voitiin viedä RFEM:ssä muokattu laskentamalli takaisin Teklaan (Kuva 18).



Kuva 18. RFEM direct export -valikko

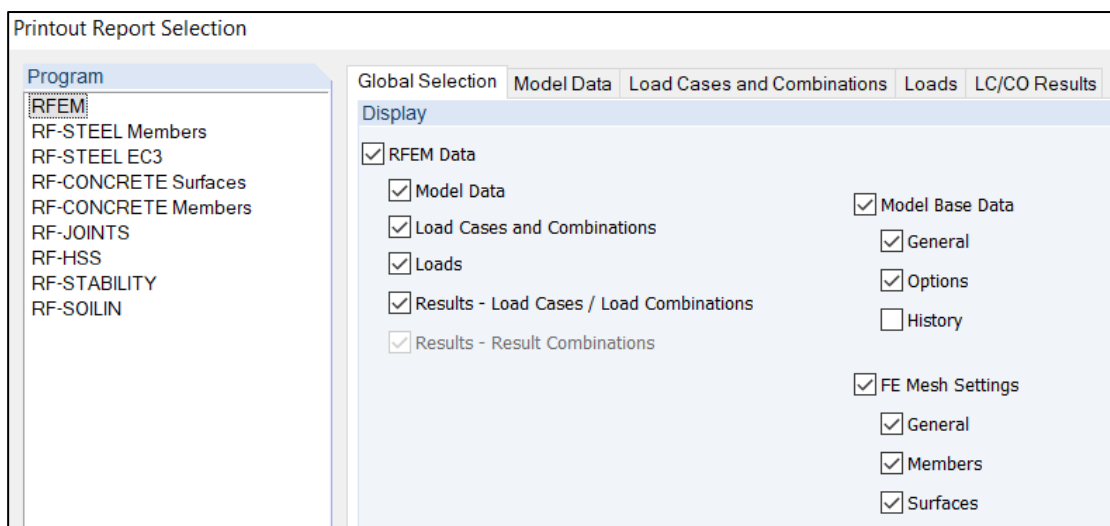
Export -asetuksiin oli määritettävä haluttu vientityyppi, koko mallin ylikirjoitus, uuden tietomallin liittäminen vanhan tietomallin päälle tai pelkkä tietomallin päivitys. Export -toiminto Auto Cadin kanssa toimi samalla tavalla kuin Teklassa. Autocadissa rakennemateriaalit sekä sauvat menevät automaattisesti omille tasoille. Tällöin on helppo rajata malliin sisältyvät rakenneosat etenkin jatkokäyttöä ajatellen toisten ulkoisten ohjelmien kanssa. Export ifc-tiedostomuodossa säilytti laskentamallissa kaikki muut tiedot paitsi kuormitukset (Kuva 19). Täten ollen ifc -tiedostomuodossa olevaa laskentamallia voidaan hyödyntää helposti jälkeempään toisessa laskentaohjelmassa.



Kuva 19. RFEMistä exportatun dxf-tiedoston tasot Auto Cadissä

4.2.8 Tulostusraportti

Tulostusraportin asetusvalikko löytyi navigointiriviltä nimellä Printout report selection. Asetusvalikko oli hyvin laajan mutta selkeästi hahmotettavissa. Aluksi rajattiin raportista kaikki tarvittavat tulokset. Vaihtoehtoisesti varsinaisessa tulostusraporttillassa voitiin poistaa ylimääräisiä kohtia (Kuva 20).



Kuva 20. RFEM tulostusraporttiasetukset

Oletuksena asetuksia muuttamatta tulosraportin pituudeksi tuli 49 -sivua, joka oli lähtökohtaisesti positiivinen asia tulosten navigoinnin kannalta. Kyseinen tulosraportti sisälsi myös kuvat betoniraidoiteista sekä yhden tarkastellun K-liitoksen tulokset. Automaattisesti betoniraidoituksien sekä liitoksen mitoittamisen jälkeen kyseiset mitoitus tulokset tulivat laskentaraaporttiin näkyviin. Teräsbetonirakenteiden raudoitukset olivat selkeän visuaalisesti näkyvissä, ja niistä selvisi kaikki oleellinen tieto kuten teräsbetonirakenteen poikkileikkaus sisältäen raudoiteteräkset ja niiden tiedot.

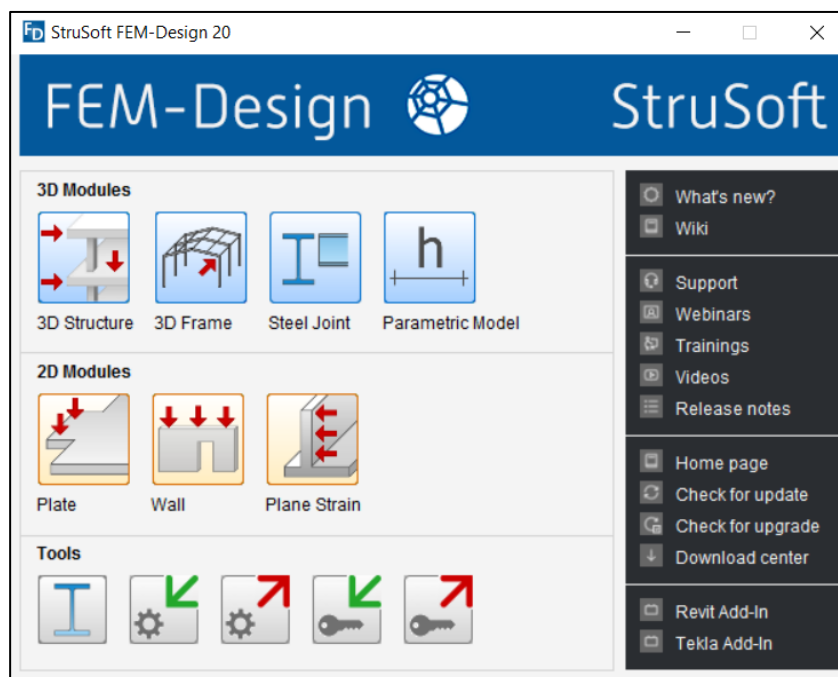
4.3 Strusoft FEM-Design 2020

Fem-Design on pohjoismainen rakenteiden mitoitukseen ja laskentaan erikoistunut ohjelmisto, jolla voidaan mitoittaa betonia, terästä, puuta ja CLT-rakenteita. Fem-Designilla voidaan mitoittaa yksinkertaisia 2D-, ja 3D-kehä rakenteita, laattarakenteita ja palkkirakenteita. Kaikista ohjelman tukemista materiaaleista voidaan muodostaa rakennemalli. Ohjelmalla voidaan myös käsitellä liittorakenteita sekä mallintaa ontelolaattoja ja betonielementtejä. Ohjelmasta löytyy kattava valikoima poikkileikkauksia. Poikkileikkauseditoria

hyödyntämällä voidaan luoda omia poikkileikkauksia. Analysoitavien tuloksien tarkastelu onnistuu diagrammeista, suoraan 3D-mallista tai taulukoista.

(StruSoft s.a)

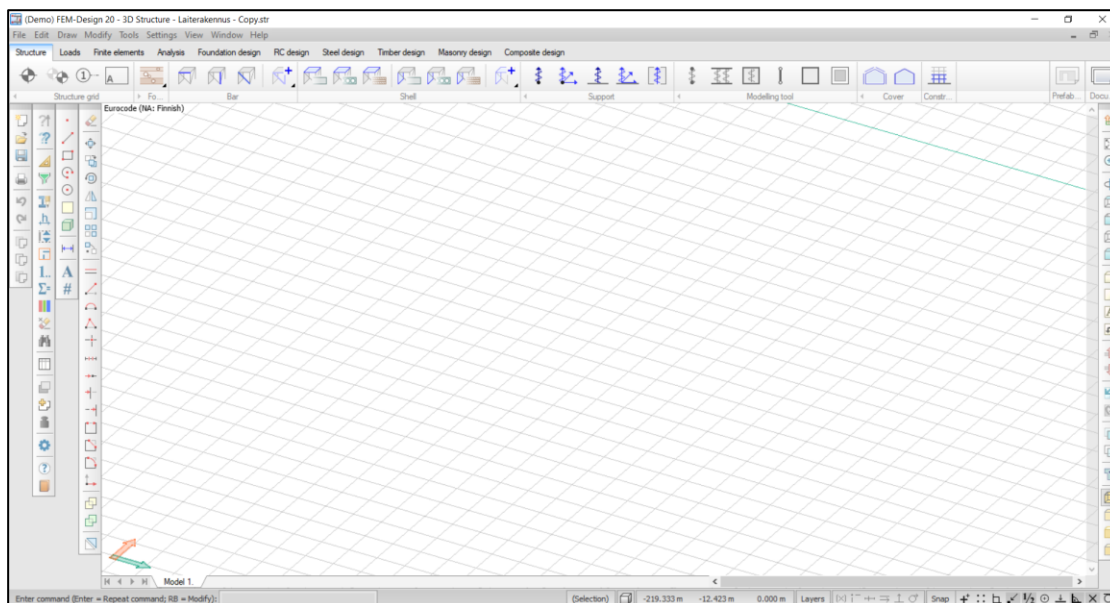
Visuaalisesti FEM-Designin alkuvalikko on selkeä. Jopa itseopiskelun kannalta oleelliset linkit löytyivät aloitusvalikon oikeanpuoleisesta pystyrivistä. Kuvassa 21 on esitetty FEM-Designin alkuvalikko.



Kuva 21. StruSoft FEM-Design 20 alkuvalikko

4.3.1 Käyttöliittymä

FEM-Designin alkuvalikko sisälsi monipuolisesti erilaisia vaihtoehtoja erityyppisten rakenteiden ja rakennekokonaisuuksien mitoitukseen. Kolmiulotteisena mitoituksena voitiin mitoittaa eri rakennusmateriaaleista koostuvia rakennekokonaisuuksia sekä teräsrakenteiden liitoksia. Kaksiulotteisena mitoituksena pystytään mitoittamaan rakennuksien lattialaattoja, seiniä ja tukimuureja. Viimeisenä asetuksista löytyi kattavasti ohjelman toimintaan liittyviä muokkausvalikoita, joilla voitiin muun muassa yhteensovittaa ulkoisesta tietomallinnusohjelmasta tuotujen rakennemateriaalien ja profiilien yhteensopivuus laskentaohjelman oman materiaalikirjaston kanssa.

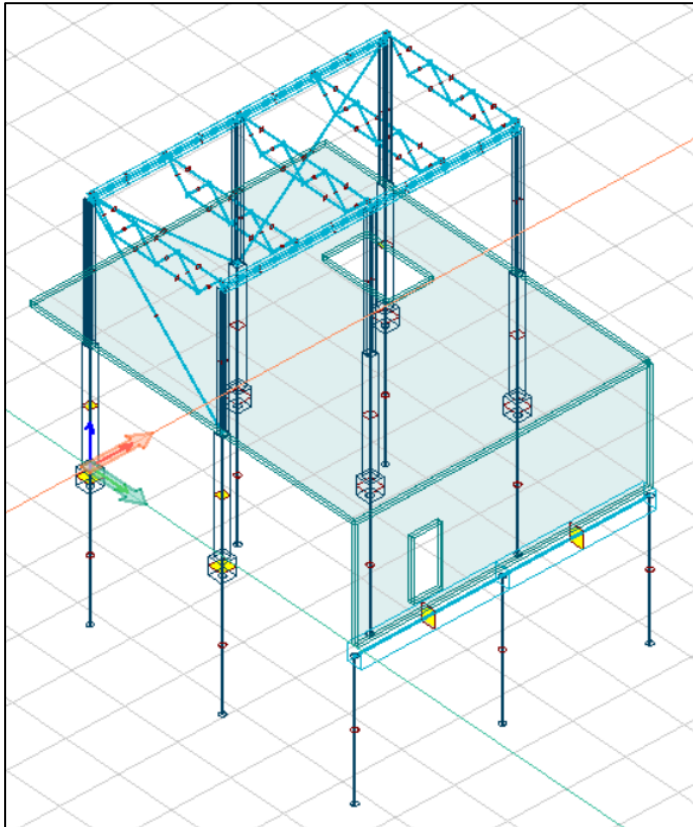


Kuva 22. FEM-Design käyttöliittymä

Käyttöliittymä on esitetty kuvassa 22. Vasemmassa reunassa sijaitsee navigointipalkki, jossa on paljon laskentamallin tekoon ja muokkaukseen tarvittavia työkaluja. Navigointipalkki muistuttaa hyvin pitkälti monen 2D-suunnitteluohjelman valikkoja, joten sen käyttäminen oli helposti sisäistettävissä. Käyttöliittymän yläosasta löytyy ohjelman valikkopalkki. Valikkopalkki näytti erittäin selkeältä ja kaikki laskentamallin muokkauksesta laskentaraaporttiin vaikuttavat valikot kulkivat loogisesti vierekkäin. Käyttöliittymän oikeasta reunasta löytyy valikkopalkki, jonka avulla voidaan muokata laskentamallin visuaalista näkyyttä mallinnusikkunassa.

4.3.2 Tietomallin vienti laskentaohjelmaan

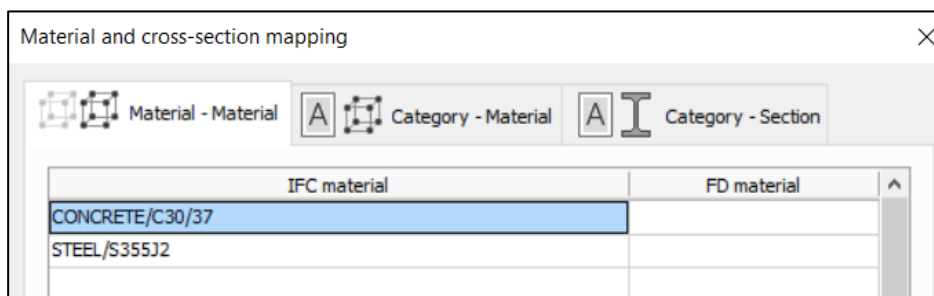
Tietomallista luotiin Teklassa ifc -tiedosto, joka tuotiin FEM-Design-ohjelmaan. Alkumäärittämiä tehtiin ohjelmassa avautuvan Material and cross-section mapping -valikon kautta. Teklassa luodut rakennemateriaalit ja poikkileikkauksien yhteensopivuus tarkastettiin etsimällä FD material -valikosta IFC material valikossa vastaava materiaali. Laskentamalli näkyy kuvassa 23 tuotuna FEM-Design ohjelmaan.



Kuva 23. Laskentamalli tuotuna FEM-Designiin

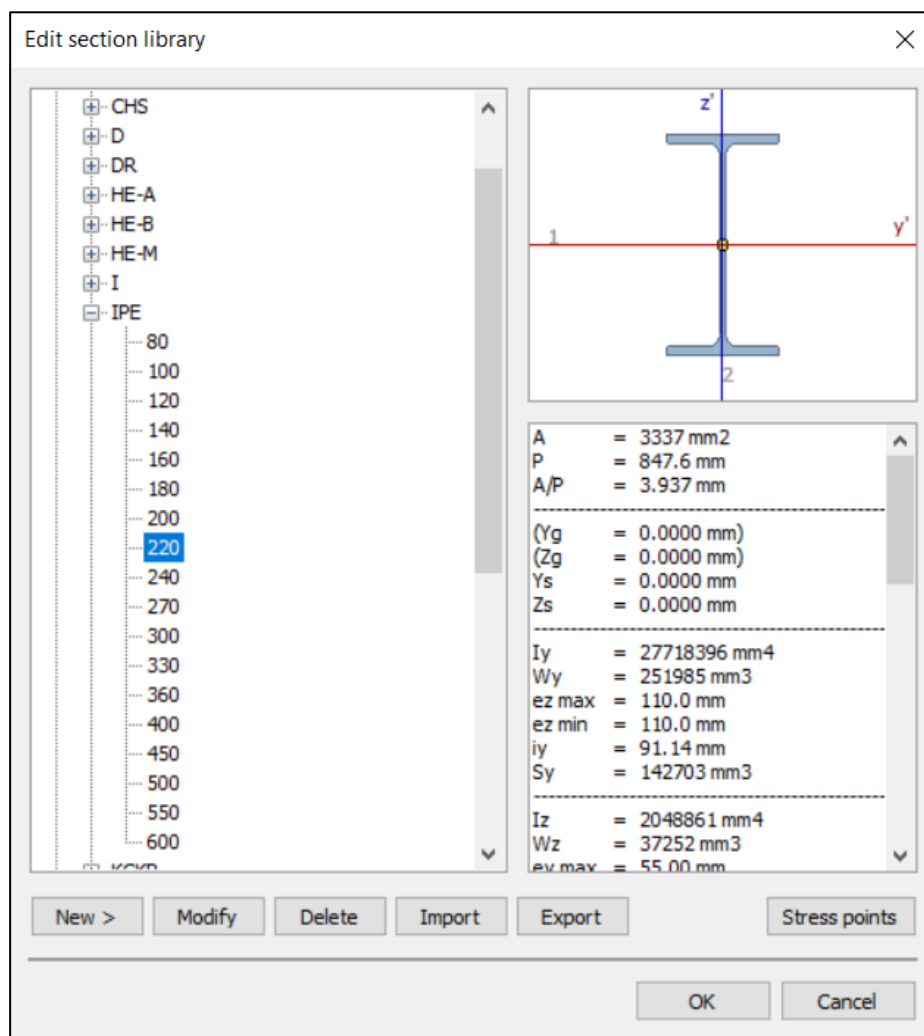
4.3.3 Laskentamallin muokkaus

Ennen varsinaista laskentaa analyysimallia voidaan selkeyttää monilla eri tavoilla muun muassa luomalla jokaiselle pilarilinjalle (*Axis, AX*) ja kerrokselle omat moduulilinjat (*Storey, STO*). Näiden määritysten jälkeen seinälinjojen ja pilarien solmupisteet saatiin venytettyä toisiinsa käyttämällä työkalua (*Adjust analytical model, AAM*), joka venyttää halutut rakenneosat joko moduulilinjoihin tai haluttuihin kerroksiin. Tämä työkalu toimii erittäin hyvin suuriin kokonaisuuksiin kuten esimerkiksi kerrostalojen analyysimallien muokkaukseen.



Kuva 24. FEM-Design materiaalien yhteensovittaminen

FEM-Design tunnisti ifc-tiedostossa olevat rakennemateriaalit sekä profiilit, mutta kaikki edellä mainitut objektit oli yhteensovittettava vastaamaan laskentaohjelman materiaalikirjastossa olevia materiaaleja sekä profiileja. Kuvissa 24 ja 25 on näkyvissä tarvittavat työkalut näihin toimenpiteisiin.



Kuva 25. FEM-Design materiaalikirjasto

Materiaalikirjasto oli hyvin kattava ja sieltä löytyi kaikki tyypillisimmät teräsrakentamisessa käytettävät teräsprofiilit. Oikeassa laidassa näkyy profiilin omat mitoitusparametrit.

Sel.	Correction	Tolerance [m]	Fixed
X	Delete identical copies	---	0
X	Fix overlaps	---	1
X	Chamfer sharp angles	0.10000	0
X	Fix small areas and lines	0.10000	0
X	Merge region lines	0.01000	0
X	Align to structure grid	0.10000	0
X	Stretch to structure grid	0.10000	0
X	Align regions	0.10000	0
X	Stretch to crossing regions	0.10000	0
X	Stretch regions in plane	0.10000	0
X	Stretch lines	0.10000	48
X	Align points	0.10000	0

Select all Clear all Marker...

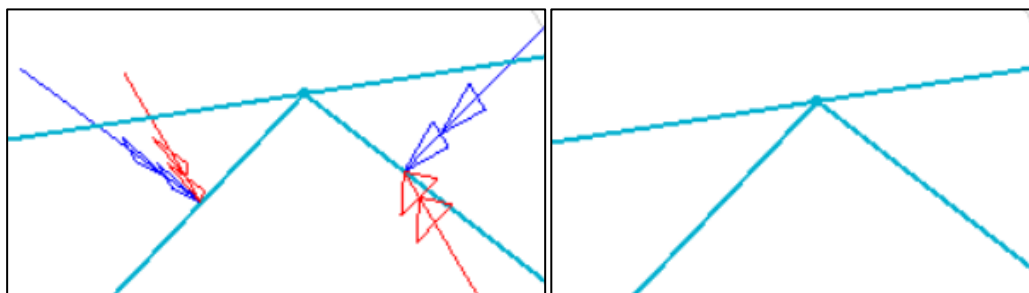
Start Ignore Mark Fix Show again

Break Ignore all Mark all Fix all Auto

Settings > OK Cancel Apply Reset

Kuva 26. FEM- Design laskentamallin korjaus *correct model*- komennolla

Analyysimallin korjaukseen käytettiin työkalua (*Correct model, CM*), jolla poistettiin mallista mahdolliset haamuelementit tai liian pienet rakenneosat, joilla ei ole vaikutusta laskennan tuloksiin. Työkalulla määritettiin toleranssi poistettaville rakenneosille, jotka olivat pienempiä kuin 0,1 metriä. Tällöin kaikki alle 0,1 metrin kokoiset haamuelementit tai rakenneosat poistuivat.



Kuva 27. FEM-Design solmupisteiden visuaalinen esitys. Vasemmalla nivelelliset sauvojen päät ja oikealla täysin jäykät sauvojen päät.

4.3.4 Laskenta

Fem Design yllätti laskentatoiminnon helppokäyttöisyydellään. Jos iterointikerroja tulee useita, niin laskenta laittaa malliin pieniä jousia. Laskennan kesto oli kyseisellä laskentamallilla suhteellisen vähän sen pienen koon ja yksinkertaisten rakenteiden ja liitoksien takia. Display results työkalulla katsellaan tuloksia

esimerkiksi kaatumis- ja liukumisvarmuus ja graafisia tuloksia. Analysis välilehdellä tarkistellaan tuloksia.

4.3.5 Mitoitus

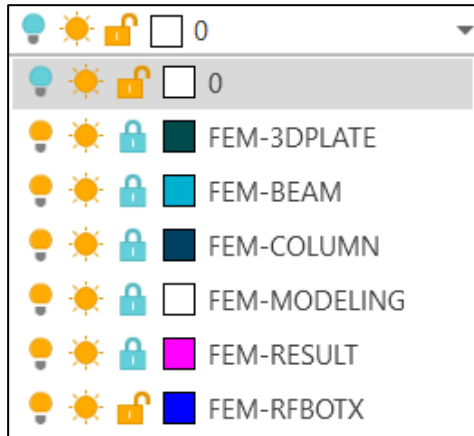
Laskentamallin betoniraidoitteet mitoitettiin RC-design välilehdeltä. Ennen raudoitusten määrittämistä koko laskentamalli kannatti laittaa läpinäkyväksi, jotta pystyttiin helpommin hahmottamaan raudoitukset visuaalisessa muodossa. Raudoitusten mitoitus voitiin tehdä manuaaliraidoituksella tai nopeammin automaattiraidoituksella. Manuaaliraidoituksen erona automaattiraidoitukseen oli siinä, että manuaaliraidoituksessa määritettiin itse pääraudoitusten ja hakaraidoitteiden koko sekä jako. Tarkistettaessa rakenteiden kestoa palotilanteissa, oli määritettävä mitoitusvälilehdeltä palomitoitus päälle. Utilization -välilehdellä nähtiin yhteenveto laskentamallissa olevista raudoitteista. Mitoitustulokset RC-designista saatiin display results -välilehdeltä. Osakohtainen mitoitusraportti saatiin näkyviin klikkaamalla rakenneosaa silloin kun display results -välilehti on avoinna.

4.3.6 Liitosmitoitus

Teräsristikon liitoksia tarkisteltiin Steel Joint -työkalulla, joka löytyi steel design välilehdeltä. Steel joint -mitoitustyökalusta löytyi kattava valikoimatyökaluja, kuten esimerkiksi palkkipilari, pilarijatkos, palkkijatkos, liitokset pulteilla ja hitsaamalla. Liitoksille voidaan myös tehdä EN 1993-1-8 jäykkyysluokittelu ja laskea jäykkyys, joka voidaan päivittää takaisin laskentamalliin ja saada aikaan todenmukaisempi laskentamalli. Steel joint toimii 3D rakenteeseen liitetynä tai itsenäisenä ohjelmana, jolloin voidaan syöttää liitoksen rasitukset itse.

4.3.7 Export

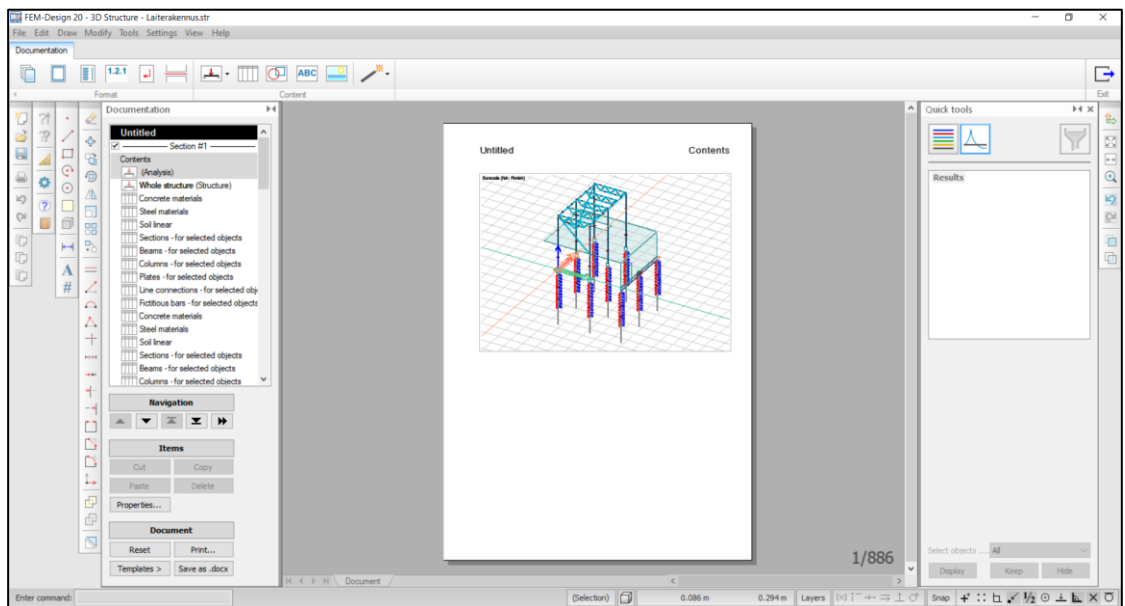
Laskentamallin vienti Auto Cadiin tehtiin dwg -tiedostomuodossa. Tiedostoon tuli myös betoniraidoitteet sekä betoniraidoitteiden tyyppimerkinnät, jotka eivät ole kovin relevanttia tietoa pelkän keskiviivamallin vientiä ajatellen. Eri rakenneosat ja profiilit oli suodatettu eri tasoille Auto Cadissa, jotka on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Fem-Designista exportatun dxf-tiedoston tasot Auto Cadissa

4.3.8 Tulostusraportti

Laskentatulosten listaus oli mahdollista suorittaa list tables -komennolla. Tätä toimintoa voidaan hyödyntää laskentatulosten jälkikäsitteilyä varten esimerkiksi liitoksien tarkasteluna ulkoisessa laskentaohjelmassa. Listausta voidaan suorittaa myös kaikille laskentamallissa oleville objekteille. Valikon avulla tulokset voidaan linkittää leikepöydälle, tulostimeen, dokumenttiin, Excel-tiedostoon tai tekstitiedostoon. Tulostusraportissa vihreällä värillä olevat laskentatulokset ovat käyttörajojen sallimalla puolelle, kun taas punaisella värillä värjättyt laskentatulokset ovat käyttörajojen ulkopuolella.



Kuva 29. FEM- Design tulostusraporttitila

Haluttujen tulosten näkyvyyteen voidaan vaikuttaa neljällä eri tavalla. Voitiin valita kaikki mallissa olevat tulokset, jolloin listaukseen sisältyi kaikki

laskennassa valmistuneet tulokset. Voitiin myös valita halutut objektit, joiden laskentatulokset listataan tai skaalata näkymäikkuna niin, että vain näkyvät objektit listattiin. Viimeisenä vaihtoehtona voitiin määrittää objektifiltteri, joka kokosi tulokset vain käyttäjän määrittämistä objekteista. Dokumentaatiovalikosta voitiin tulostaa laskentamalli ja sen laskentatulokset paljon visuaalisemmassa muodossa. Oletusasetuksilla tulosraportista tuli 909-sivun pituinen. Näin ollen raporttiin sisältyviä tietoja joutui rajaamaan pois raportin saattamiseksi siistiin kuntoon.

5 TULOKSET

5.1 Dlubal RFEM 5.26

Analyysimallin tuonti RFEM-laskentaohjelmaan oli tehty erittäin helpoksi Direct Importin ansiosta. Reaaliaikaisesti rakennemallin muokkaus Teklassa toimi erittäin hyvin yhteen RFEMin kanssa. Tärkeänä seikkana huomattiin Teklan liitoskomponenttien toimimattomuus analyysimallissa ja sitä kautta RFEMissä. Yhtenevien arviointituloksien takia RFEMin rakennemalli tuotiin Teklasta ifc-tiedostomuodossa, koska FEM-designissa kyseinen reaaliaikainen tiedonsiirto ei toiminut uusimman Tekla 2021-version kanssa. Analysointimallin muokkaamista RFEMissä voi vähentää tekemällä Teklassa rakenteiden liitoksista sellaisia, että rakenteiden referenssilinjat ja solmupisteet kohtaavat jo rakennemallissa. Teklassa analyysimallin ongelmaksi koitui liitoskomponenttien käyttö, jotka eivät toimineet halutulla tavalla ulkoisten laskentaohjelmien kanssa, joten liitokset määritettiin vasta laskentaohjelmassa. Tulokset RFEM esittää numeerisesti, sekä graafisesti. Laattamaisissa objekteissa laskentatulosten graafinen ja visuaalinen esittäminen tulee tarpeeseen rasituksien tarkempaa tarkastelua varten.

Epästabiilin rakenteen takia tullut virheilmoitus on helppo paikantaa ohjelman antamalla visuaalisella nuolella, joka ilmestyy laskentayrityksen jälkeen mallinustilaan. RFEM-ohjelma koostuu useista lisäosista, joita tarvitaan monimutkaisempien rakennekokonaisuuksien mitoittamisen kanssa. Ohjelmasta löytyy kattavasti lisäosia rakenteiden tarkempiin tarkasteluihin, kuten dynaamisten kuormien analysointi, rakenteiden optimointi ja geotekninen analysointi. RFEM kykenee laskemaan muodonmuutoksia, sisäisiä voimia, rasituksia, tukivoimia ja maaperän kosketusrasituksia. Kuormitustoiminnot helpottavat tuuli- ja

lumikuormien käyttöä ja muuta kuormaa. Lisäosien avulla voi tehdä lisäanalyyskejä ja -malleja eri standardien mukaisesti esimerkiksi betoni-, teräs- ja puurakenteissa. RFEM on kaikin puolin itsenäinen laskentaohjelma, jonka käyttöliittymä sisältää kaikki tavanomaisen sekä vaativan laskennan työkalut.

5.2 Strusoft FEM-Design

Analyysimallin tuonti FEM-Design ohjelmaan tuotiin ifc-tiedostomuodossa. Alun perin tarkoituksena oli tuoda analyysimalli StruSoftin omalla StruXML Export toolilla, mutta kyseinen ohjelma ei toiminut Tekla 2020 ja 2021 versioiden kanssa, joten kyseisestä ohjelmasta ei tehty syvempää tarkastelua. Oikein mallinnettuna rakennemateriaalit sekä profiilit siirtyivät oikein laskentaohjelmaan. Myös tämän ohjelman kanssa oikeaoppinen tietomallintaminen on tärkeässä asemassa, vaikka ohjelmasta löytyykin rakenteiden venytystyökaluja toistensa suhteen.

RFEMiin verrattuna FEM-Design osaa laskea rakenteet jopa silloin kun rakenne ei ole täysin stabiili. Iterointikertojen aikana epästabiileihin solmuihin FEM-design tekee pieniä jousia, jotta laskennan saa suoritettua loppuun. Virheelliset liitosmäärittelyt tai tuennat selviävät graafisesti katsomalla siirtymiä, jolloin virheellisesti määritettyihin liitoksiin liittyvät komponentit tippuvat huomattavan paljon alaspäin. FEM-Designin tulostusraportti on hyvin selkeä ja virtaviivainen. Tulokset on esitetty myös graafisesti väritettyinä, joka selkeyttää rakenteiden rasituksien selvittämistä etenkin laattarakenteissa. Ongelmaksi koitui tulostusraportti- osiossa navigoinnin takkuisuus. Navigoidessa hiiren kursori katoili satunnaisesti, jonka takia navigointi oli hidasta. FEM-Design on kaikin puolin itsenäinen laskentaohjelma, jonka käyttöliittymä sisältää kaikki tavanomaisen sekä vaativan analysoinnin työkalut.

5.3 Vertailu

Tarkastelujen perusteella molemmille ohjelmille annettiin numeerinen pisteytys. Kuvasta 30 selviää ohjelmakohtaiset erot käyttökokemuksen antaman arvioinnin perusteella. Kuvan mukaisesti suurin painoarvo annettiin ohjelmien välisen tiedonsiirron perusteella sekä laskentaraaporttiin liittyvissä kohdissa. Arvioinnissa pääpaino painottui ohjelmien import-asetuksissa, laskentamallin jälkikäsitelyssä sekä laskentaraaportin selkeydessä. Muita huomioitavia

arviointiin vaikuttavia seikkoja oli käyttöliittymän selkeys sekä laskentamallin esikäsittely. Arvioitavien osioiden pisteytys tehtiin asteikolla 1...5.

Arvioitavat kohdat:	Painoarvo:	RFEM	FEM-Design
Yhteensopivuus Teklan kanssa:			
- Import	30%	4	4
- Export	5%	5	3
Käyttöliittymä:			
	5%		
- Valikkojen selkeys		4	4
- Navigointi		3	3
- Looginen järjestys		4	5
Mallin esikäsittely:			
	10%		
- Materiaalien päivitystarve		3	3
- Tukien määrittäminen		5	4
- Kuormien määrittäminen		4	5
Mallin jälkikäsittely:			
	20%		
- Raudoituksien mitoitus		4	5
- Liitosten mitoitus		5	3
Laskentatietojen selkeys:			
	30%		
- Raporttiasetukset		5	3
- Raportin selkeys		5	4
- Raportin pituus		4	3
	Yhteensä:	100%	55%
			49%

Kuva 30. Arviointitaulukko

Molempien ohjelmien tavanomainen IFC-import-toiminto toimi hyvinkin samalla tavalla. Molemmat ohjelmat tunnistivat Teklassa määritetyt materiaalit, mutta yhteensovittamista tarvittiin molemmissa ohjelmissa, joten tämän vertailukohdan suhteen ei eroavaisuuksia ollut. Molemmissa ohjelmissa joutui kuitenkin yhteensovittamaan kaikki rakennemateriaalit ja poikkileikkaukset ohjelman tukemaan muotoon.

Export-toiminto oli tehty RFEMissä helpoksi sen direct-export-toiminnon ansiosta, jolloin viivamallin sai reaaliaikaisesti vietyä esimerkiksi Autocadiin. Myös direct-export toimi hyvin vietyä Teklaan, mutta ongelmaksi koitui laskentamallin rikkonaisuus RFEMissä, joten malli ei ollut täysin hyödyntämiskelpoinen jatkomallinnusta ajatellen. Esimerkiksi teräsristikon yläpaarteeseen liittyvät

diagonaalisauvojen solmupisteet katkaisevat yläpaarten useaan eri osaan, jonka takia rakennemalli näkyy Teklassa samanlaisena, kun RFEMissä. FEM-Designissa laskentamallin export voitiin toteuttaa joko ifc-tiedostomuodossa tai dxf-tiedostomuodossa. Oletusasetuksilla dwg-tiedostoon sisältyi kaikki näkyvillä olevan laskentamallin tiedot kuten betoniraudoitteet ja kuormamerkin-

nät. Käyttöliittymän selkeydessä oli paljon eroavaisuuksia ohjelmien välillä. RFEM näytti aluksi erittäin vaikeaselkoiselta ja laskennan kulkuun vaikuttavat valikot olivat hieman epäloogisessa järjestyksessä verrattuna FEM-Designin valikoihin, joten käyttöliittymään perehtyminen vei paljon aikaa sekä perehtymistä ohjelmien käyttöohjeisiin. FEM-Designin käyttöliittymän selkeys ja loogiset valikkosijainnit helpottivat ohjelman käyttöä huomattavasti. Työkalurivin valikot kulkivat vierekkäin laskentamallin muokkaamisesta jälkikäsitteilyyn asti.

Navigointi ohjelmien sisällä erosi hieman toisistaan. RFEMin käyttö vaati totuttelua, mutta ajan kuluessa navigointi vaikutti selkeältä, myös sen takia, että mitoitustyökalut olivat samassa käyttöliittymässä varsinaisen ohjelman kanssa. Valikot kulkivat loogisesti ohjelman navigointipalkissa, mutta tulostusraporttiasetukset olivat epäloogisesti file -valikon alla normaalien tulostusasetuksien vieressä. FEM-Designissa navigointi oli aluksi todella paljon helpompaa verrattuna RFEMiin. Ohjelmaa enemmän käytettäessä valikoiden käyttö oli paljon aikaaviemempää verrattuna RFEMiin, koska laskenta-asetukset sijaitsivat monesti eri ikkunoissa, joten klikkauksia tuli paljon enemmän.

Käyttöliittymän looginen järjestys erosi ohjelmakohtaisesti melko paljon. RFEM:ssä laskentamallin muokkausvalikot kulkivat loogisesti vierekkäin aina kuormitusvalikkoihin asti, jolloin laskennan sekä mallin jälkikäsitteilyä vaativat valikot sijaitsivat eri kohdassa. Toisin kun FEM-Designissa kaikki laskentamallin muokkausvalikot ja mallin jälkikäsitteily valikot kulkivat vierekkäin käyttöliittymän valikkopalkissa, mutta liitosmitoituksen työkalun joutui navigoimaan käynnistysikkunan kautta.

Laskentamallin muokkauksissa ei ollut paljoa eroja. Teklassa määritetyt rakennemateriaalit ja poikkileikkaukset vaativat molemmissa laskentaohjelmissa yhteensovittamisen, joka oli tehty molemmissa mahdollisimman helpoksi.

Materiaalien yhteensovittaminen toimi molemmissa ohjelmissa lähes samalla tavalla. Miinuspisteitä tästä arvioitavasta kohdasta tuli sen takia, että molemmat ohjelmat tunnistivat ifc -materiaalit ja poikkileikkaukset, mutta niin sanottuja yhteensovittamistiedostoja ei löydy sovelluskehittäjien kesken, vaan käyttäjän on määritettävä ne manuaalisesti. Suurissa rakennekokonaisuuksissa kyseinen toiminto vie paljon aikaa.

RFEMissä tuentojen määrittäminen oli tehty selkeäksi ja valikko oli monipuolinen. FEM-Designin tuentavalikko erosi RFEMin valikosta todella paljon. Esimerkiksi vapausasteiden määrittäminen varten oli valittava, laitetaanko vapautukset positiiviseen vai negatiiviseen koordinaatistoon ja vasta sen jälkeen vapausasteen suunta.

Visuaalisesti FEM-Designin kuormien määrittämisvalikot olivat selkeästi rivissä työkalupalkissa. Näin ollen kuormien määrittäminen oli yksinkertaista ja nopeaa. Tosin kun RFEMissä kuormamäärittämisvalikot sijaitsivat työkalupalkissa useiden eri valikkojen alla, jolloin niitä sai etsiä useasti, ja se vei aikaa. Itsessään kuormitusasetuksissa ei ollut huomattavia eroavaisuuksia, ja valikot toimivat hyvin.

Raudoituksen mitoituksissa oli ohjelmakohtaisia eroja. RFEMissä betonirakenteiden rauditusmitoitukseen vaadittava RF-CONCRETE -lisämoduuli oli helpokäyttöinen, mutta tarvittavat mitoitus tulokset näkevät vasta mitoitusraportissa. FEM-Designissa betoniraudoitteiden mitoitus oli hieman helpompaa. Raudoituksien määrittäminen joko automaattisesti tai manuaalisesti oli tehty visuaalisesti helpoksi. Myös mitoitus tulokset näkyivät mallinnustilassa selkeästi ja rakennetta voitiin muokata samaan aikaan samassa tilassa.

Liitosten mitoitus vaati molemmissa laskentaohjelmissa ulkoisen laskentamoduulin tarkasteluja varten. Opinnäytetyössä tarkasteltiin vain teräsrakeneristikon liitosmitoitusmoduulia. Ongelmaksi koitui se, että opinnäytetyössä käytössä oli määrääkaikaiset testiläisenssit, jolloin liitosten mitoituksen syvemmät tarkastelut jäivät tekemättä.

Laskentareportin asetuksissa oli havaittavissa suuria eroja. RFEMin laskentareportin muokkaus oli helpokäyttöistä ja selkeää. Raporttitilasta pystyi

poistamaan haluttuja tuloksia navigointiriviltä löytyvästä palkista. Samalla tyylillä toimi myös FEM-Designin raportin muokkaus. FEM-Designin raporttitiilassa yksi epäkohta oli se, että hiiren kursori vilkkui satunnaisesti valintaikkunoiden ollessa auki.

Raporttien selkeydessä todettiin tulkittavuuden kannalta huomattavia eroja. Esimerkiksi RFEMin raportti oli selkeästi otsikoitu. Näin ollen kokonaiskuvassa raportin läpikäynti helpottuu. FEM-Designissa raportti oli hieman epäselvä, koska raportista puuttui tuloskohtaiset otsikot. Visuaalisesti se oli todella pelkistetty.

Oletusasetuksilla RFEMin laskentatuloraportti oli 49-sivun mittainen, joka sisälsi myös betonirauδοitteet ja teräsrakeneristikon yhden liitoksen mitoitusluokset. Vastaavasti FEM-Designin oletusasetuksilla olevan laskentatuloraportin pituus oli 909-sivun pituinen, jolloin kyseistä raporttia joutui siivoamaan todella paljon.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli vertailla laskentaohjelmistoja laskentamallin tuonnista tuloraporttiin asti. Tilaajan antamien rajojen myötä työssä päädyttiin testaamaan kahta suosittua markkinoilla olevaa laskentaohjelmistoa.

Työn aikana huomattiin, kuinka yksinkertaisesti rakenteiden optimointia voidaan hyödyntää rakennesuunnittelun eri osa-alueilla. Ohjelmistot ovat enemmässä määrin korvaamassa tavanomaisen käsinlaskennan jopa yksinkertaisten rakenteiden mitoittamisessa. Mitoittaminen laskentaohjelman avulla edesauttaa laskentadatan helppoa päivittämistä, sekä tiedoston säilyttämistä arkistointia varten. Ohjelmistot ovat hyvin kalliita, mutta mikäli ohjelmiston käyttö on päivittäistä tai edes viikoittaista, on sellaisen hankinta perusteltua.

RFEM on käytännössä täysverinen mitoitusohjelma sen erittäin laajojen asetusten sekä lisämoduulien ansiosta. Sillä voidaan mitoittaa lähes kaikkia rakennemateriaaleja, nesteitä sekä kaasuja, joita laitossuunnittelussa voidaan tarvita. Hyviä puolia löytyy myös kyseisen ohjelman kattavista video-

ohjemateriaaleista, joita löytyy todella paljon verkosta. Ohjelma käyttö vaatii paljon perehtymistä lujuuslaskennan ja statiikan teoriaan, koska laskentavirheiden mahdollisuus on hyvin suuri. Suurta helpotusta ohjelman käyttöön tuo sovelluskehittäjän verkkosivuilta löytyvä laaja laskentamallikirjasto, sekä internetistä löytyvä videoaineisto, joita hyödyntämällä voidaan ottaa esimerkkejä tiettyjen rakennekokonaisuuksien laskentatapaan.

FEM-Designissa on kapasiteettia myös vaativille rakennekokonaisuuksille sekä optimointimahdollisuudet rakenteiden mitoitukseen ovat laajat. FEM-Designin hyviä puolia löytyy myös sen Ruotsissa sijaitsevista tukipalveluista, joita hoidetaan englannin kielen sijasta myös suomen kielellä. Testauksien perusteella ohjelma on edelläkävijä betonirakenteiden mitoituksessa sen helppokäyttöisen ja visuaalisesti selkeiden mitoitusvalikoiden johdosta.

Opinnäytetyössä tehdyn vertailun perusteella korostui se, että yrityskäyttöön tarkoitetut laskentaohjelmistot tulisi koekäyttää perusteellisesti ennen hankintapäätöstä. Mahdollisia ohjelmointivirheitä tai puutteita ei yleensä tuotekehittäjän ohjeissa tai ohjevideoissa ole, joten ne on selvitettävä itse.

Jatkokehityksen kannalta opinnäytetyötä tehdessä kokonaiskuva tietokoneavusteiseen lujuuslaskentaan ja laskentamallien luontiin laajeni paljon. Opinnäytetyötä tehdessä konkretisoitui se, että ennen varsinaista ohjelmiston hankintapäätöstä, on eri vaihtoehtoisia ohjelmia vertailtava keskenään. Tällöin hankintapäätös voidaan osoittaa perustelluksi.

LÄHTEET

Bhavikatti. 2004. Finite Element Analysis. E-kirja. [viitattu 1.11.2021]

Dlupal. S.a. What is RFEM. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dlupal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem> [viitattu 16.10.2021]

Dr.G.Paulraj. 2019. Finite Element Analysis. Unit-1. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/propaul/finite-element-analysis-unit1> [viitattu 5.10.2021]

Lähteenmäki, M. 2014. Elementtimenetelmän perusteet. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf [viitattu 16.11.2021]

Strusoft. 2021. FEM-Design, Structural Engineering Analysis and Design Software. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://strusoft.com/uploads/documents/femdesign/FEM-Design%20Brochure%2025-08-2021.pdf> [viitattu 1.10.2021]

Tekla. S.a. Tehokas rakennesuunnittelun tietomalliohjelmisto. WWW-Dokumentti. Saatavissa: <https://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-structures> [viitattu 6.10.2021]

Vertex 2017. Tuotedokumentaatio. FEA-laskennan teoriaa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa> [viitattu 5.10.2021]

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 Osa 1. Rakennustieto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv/> [viitattu 16.9.2021]