



# Solid edge FEM ohjelman käyttöönotto

Juuso Lindén

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2022

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

**Lindén, Juuso**

## **Solid edge FEM ohjelman käyttöönotto**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2022**, 54 sivua.

Tekniikan ja liikenteen ala, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto ohjelma, opinnäytetyö AMK

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi UKKO-STEKA Oy.

Tavoitteena oli käyttöönottaa Solid edge FEM ohjelmisto yritykselle, jossa tehtävänä oli integroida yrityksen sisäiseen suunnittelu prosessiin toimintatapa ja ohjeistus koskien FEM-lineaarisen staattisten analyysien suoritusta.

Työ toteutettiin kvantitatiivisen tutkimuksen menetelmillä, empiirisen ja tapaustutkimuksen piirteitä hyödyntäen.

Teräsrakenteiden kustannusjakaumasta suuri osa on materiaali kustannuksia ja tähän pyritään entistä enemmän vastaamaan suunnittelulla, johon yritys on hankkinut Solid edgen.

Työn teoriaosuudessa paneudutaan SFS-EN 1993 vaatimukseen koskien FEM:iä, elementtimenetelmän perusteisiin, ohjelman käyttöön ja ominaisuuksiin sekä dokumentaatioon.

Toteutuksessa vertailtiin yksinkertaisista rakennemalleista siirtymiä sekä jännityksiä käsin laskennan ja FEM:in välillä lujuusopin teorioin. Huomioitavaa oli, että tietyt arvot kuten elementtiverkon tiheys vaikuttaa lopputulokseen merkittävästi ja todettakoon vielä, että FEM:iä käytettäessä tulee ollakin aina laskennan suuruusluokasta selvillä jo laskutoimituksiin ryhtyessä.

Näiden lisäksi luotiin ohjeistus koskien dokumentaatiota rakenneanalysejä tehdessä.

Tuloksena todettiin, että ohjelma soveltuu yrityksen käyttöön.

Johtopäätöksenä todettiin, että kehitystyötä tulee jatkaa sovelluksen muiden ominaisuuksien kanssa.

### **Avainsanat (asiasanat)**

FEM, PDM, SFS-EN 1993, ELEMENTTIVERKKO

### **Muut tiedot**

**Lindén Juuso**

### **Introduce solid edge FEM**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2022, 54 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The thesis was assigned by UKKO-STEKA Oy.

The goal was to introduce Solid edge FEM software for a company and its internal design process that was tasked with integrating mode of operation and guidance regarding the company's performance of FEM linear static analysis.

The work was carried out using quantitative and empirical research methods as well utilizing case study features.

A large part of the cost distribution of steel structures is material costs and this is increasingly addressed by design, for which the company has acquired Solid edge.

The theoretical part of the work focuses on the requirements of SFS-EN 1993 concerning FEM, the basics of the element method, the use and characteristics of the programme and documentation.

The implementation compared transitions from simple structural models and tensions between manual calculation and FEM by using the theories of strength. It should be noted that certain values, such as the density of the prefabricated network, have a significant impact on the end result. It should also be noted that when using FEM, you must always be aware of the magnitude of the calculation when starting to calculate. In addition to these, guidance was created regarding documentation when carrying out structural analyses.

As a result, it was found that the programme is suitable for the company. In conclusion, the development work should continue with the other features of the application.

### **Keywords/tags (subjects)**

FEM, PDM, SFS-EN 1993, MESH

### **Miscellaneous**

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Aiheen valinta</b> .....	<b>4</b>
2.1	Aiheen valinnan perustelu .....	4
2.2	Aiheen rajaus.....	5
<b>3</b>	<b>Kehittämistyön tavoitteet</b> .....	<b>5</b>
3.1	Kehittämistyön tehtävä.....	6
<b>4</b>	<b>Tietoperusta</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Toteutus</b> .....	<b>7</b>
5.1	Kehittämismenetelmät .....	7
5.2	Aineistonkeruu ja -analyysi .....	8
<b>6</b>	<b>FEM (Finite element method)</b> .....	<b>8</b>
6.1	Yleiskuvaus .....	8
6.2	Elementtimenetelmän historia .....	9
6.3	Elementtiverkko .....	10
<b>7</b>	<b>Eurocode 3</b> .....	<b>11</b>
7.1	Eurocode 3 ohjeistus FEM laskelmiin.....	11
<b>8</b>	<b>Pätevyudet</b> .....	<b>13</b>
8.1	Rakennusten suunnittelu .....	13
8.2	Muiden teräsrakenteiden vaatimat suunnittelijan pätevyudet.....	14
<b>9</b>	<b>Suunnitteluprosessi</b> .....	<b>14</b>
9.1	3D-Suunnittelu .....	15
9.2	Dokumentin hallinta (PDM) .....	15
9.3	Solid edgen FEM ohjelmisto.....	16
9.4	Solid edge FEM ja FLOEFD.....	16
<b>10</b>	<b>Rakenneanalyysi</b> .....	<b>17</b>
10.1	Materiaaliominaisuudet.....	17
10.2	Yksiköt .....	19
10.3	Uuden rakenneanalyysin perustiedot (New study) .....	20
10.3.1	Analyysin tyyppi (study type).....	21
10.3.2	Verkon tyyppi (Mesh type) .....	21
10.3.3	Tarkasteltavat suureet.....	21
10.3.4	Rakenteen materiaalin valinta.....	22
10.4	Rakenneanalyysin kuormitukset ja reunaehdot .....	23

10.4.1	Kuormien määrittäminen.....	23
10.4.2	Tukivoimat .....	25
10.4.3	Verkotus.....	26
<b>11</b>	<b>Rakenneanalyysit .....</b>	<b>27</b>
11.1	Vedetty pyörötanko .....	27
11.1.1	Tuloksien analysointi .....	29
11.1.2	Visuaalinen tarkistus.....	29
11.1.3	Numeerinen tarkistus .....	32
11.2	Taivutettu kaksiaukkoinen palkki.....	33
11.2.1	Tuloksien analysointi siirtymä huippu .....	34
11.2.2	Tuloksien analysointi taivutusjännitys.....	35
11.3	Pilari momenttijäykällä liitoksella .....	36
11.3.1	Tuloksien analysointi siirtymä huippu .....	37
11.3.2	Tuloksien analysointi taivutusjännitys.....	37
11.4	Konsoli.....	38
11.4.1	Konsoli rakenne .....	38
11.4.2	Konsolin tarkastelu .....	42
11.4.3	Momentti tasapainon tarkastelu.....	43
<b>12</b>	<b>Rakenneanalyysien dokumentointi .....</b>	<b>47</b>
12.1	FEM-Raportti .....	47
12.2	Vienti PDM järjestelmään .....	47
12.2.1	Tapahtuma.....	47
12.3	Versionhallinta PDM järjestelmässä .....	48
<b>13</b>	<b>Kehittämistyön eettisyys ja luotettavuus .....</b>	<b>49</b>
<b>14</b>	<b>Tulokset ja pohdinta .....</b>	<b>50</b>
14.1	Johtopäätökset.....	51
14.2	Pohdinta .....	51
	<b>Lähteet .....</b>	<b>52</b>
<b>Kuviot</b>		
	Kuvio 1. Gauss-seidelin menetelmä.....	9
	Kuvio 2. Standardisarjan EN 1993 rakenne.....	11
	Kuvio 3. Materiaalin käyttäytyminen.....	17
	Kuvio 4. Oletukset FEM laskelmia varten. ....	18
	Kuvio 5. Yksikkö asetukset .....	19

Kuvio 6. Rakenneanalyysin asetukset .....	20
Kuvio 7. Rakenteen materiaalin määrittäminen .....	22
Kuvio 8. Myötörajan fy ja vetomurtolujuuden fu nimellisarvot standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti. ....	23
Kuvio 9. Ulkoinen voima .....	24
Kuvio 10 Maanvetovoiman kiihtyvyys .....	25
Kuvio 11. Tuen määrittäminen.....	26
Kuvio 12. Rakenteen verkotus. ....	27
Kuvio 13. Useampi analyysi yhdelle rakenteelle.....	29
Kuvio 14. Rakenneanalyysin tulokset.....	30
Kuvio 15. Jännitysvenymän vaikutus jännitykseen. Reaktiota skaalattu x100.....	30
Kuvio 16. Leikattu rakenne. ....	31
Kuvio 17. Numeerinen tarkastelu .....	32
Kuvio 18. Vapaasti tuettu 1-aukkoinen palkki. Siirtymä .....	34
Kuvio 19. Vapaasti tuettu 1-aukkoinen palkki. Jännitykset. ....	35
Kuvio 20. Momentti jäykästi tuettu pilari. Siirtymä huippu .....	37
Kuvio 21. Momentti jäykästi tuettu pilari. Jännitys huippu.....	38
Kuvio 22. Rungon ja konsolien rakenne.....	39
Kuvio 23. Valokuva ekonomaisesta konsolien päällä. ....	40
Kuvio 24. Valokuva konsolista.....	40
Kuvio 25. Valokuva konsolista sivu suunnasta.....	41
Kuvio 26. FEM-malli konsolin käyttäytyminen.....	42
Kuvio 27. Konsoli tasapaino ehto.....	43
Kuvio 28. FEM-laskelmat. Pulttivoimat.....	44
Kuvio 29. FEM-malli. Puristusalueen voimat. ....	46

## Taulukot

# 1 Johdanto

Opinnäytetyössä käyttöön otetaan Solid edge FEM-ohjelma yritykselle konepajateollisuudessa toimivalle yritykselle UKKO-STEKA Oy. UKKO-STEKA Oy toimii tytäryhtiön STEKA Oy:n projekti- ja suunnittelu-yhtiönä sekä tuottaa tarvittavat HR ja taloushallinto palvelut konsernille. STEKA Oy:n päätoimipaikka on Lievestuore missä sijaitsee tuotantopinta-alaltaan 10 000 m<sup>2</sup> laaja konepaja. Pääasialliset tuotteet ovat painelaitteita kategoria I-IV sekä teräsrakenteet 1090 EXC4 luokkaan asti. (Kolehmainen, 2022).

Valittu FEM-ohjelma Siemensin Solid edge ohjelmisto valikoitui yritykselle, koska sillä voi tehdä FEM analyysjä mm. virtausmallinuksesta, lämmönsiirtymisestä sekä lujuustarkastelusta. Tässä opinnäytetyössä käsitellään lujuuslaskennan FEM-ohjelman käyttöönottoa. Opinnäytetyö suoritetaan kvantitatiivisena tutkimuksena. Käytössä olevat lujuusopin teoriat sekä standardien määrittämät arvot ovat työn lähtötietoina laatiessa ohjeistuksia sekä tarkistaessa FEM ohjelman soveltuvuutta eri rakennemalleihin.

## 2 Aiheen valinta

### 2.1 Aiheen valinnan perustelu

Aihe valikoitui sen ajankohtaisuuden sekä mielenkiintoisuuden vuoksi. Teräsrakenteiden kustannusjakaumasta suuri osa on materiaali kustannuksia ja tähän pyritään entistä enemmän vastaamaan suunnittelulla.

FEM taas on nykyaikainen laskenta menetelmä, joka on saavuttanut johtavan jalansijan numeeristen laskentamenetelmien kategoriassa tekniikan aloilla. Kehittämistyössä on kiinnostavaa oppia ymmärtää FEM:in laskenta prosessia sekä tutkia SFS-EN 1993 standardin ohjeistusta koskien FEM:in käyttöä.

Erään tyypillisen kustannusjakauman mukaan teräsrakenteen kokonaiskustannuksesta materiaali-kustannus on merkittävimmissä roolissa, joten rakenteen kilojen optimoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 14). Näkemykseni mukaan raaka-aine

kustannukset ovat 35-85% riippuen tuotteesta ja jalostus asteesta. Onkin tärkeää pystyä optimoimaan rakenteita, jotta ne olisivat ympäristöystävällisiä ja kokonaisvaltaisesti edullisia. Rakenneanalyysien suorittamiseen parhaaksi numeeriseksi menetelmäksi on osoittautunut FEM. (Lähtemäki n.d. 1).

2022 toteutetun kiertotalous-projektin laskennan mukaan STEKA Oy:n kasvihuonepäästöt ovat 98.5 % teräsraka-aineiden hankinnoista johtuvia ja tämä yhdessä poikkeuksellisten korkeiden raaka-ainekustannuksien takia on yrityksessä tavoitteena raaka-aineiden optimointi mm. rakenteiden optimoinnin kautta. (Kolehmainen, 2022).

## **2.2 Aiheen rajaus**

Kehittämistyön aihealuetta rajataan, jotta tutkimustyössä voidaan keskittyä syvemmin haluttuihin aihealueisiin.

Ohjelmistollisesti kehittämistyö rajataan lineaariseen staattiseen analyysiin. Staattinen analyysi valittiin tutkimuksen kohteeksi, koska se on kuormitustapauksista yleisin, sekä sen todenmukaisuus käsin laskelmin on mahdollista todentaa.

Työn rajaus normien ja standardien mukaan rajataan standardisarjan SFS-EN 1993 mukaisiin rakenteisiin, josta määräytyy mm. materiaalien ominaisuudet. SFS-EN 1993 valittiin siksi, että se on Suomessa noudatettava teräsrakenteiden standardisarja.

## **3 Kehittämistyön tavoitteet**

Tutkimuksen pääasiallisena tavoitteena on käyttöönottaa Solid edge FEM ohjelma yritykselle, jotta yritys voi kehittää ja optimointia teräsrakenteita kannattavammaksi sekä tehokkaammaksi.

Kehittämistyön tavoitteena on tutkia, onko valittu ohjelma käyttötarkoitukseen sopiva ja onko valitun ohjelman laskennan tarkkuus riittävä, sekä saadaanko valitun ohjelman käyttö integroitua osaksi jo olemassa olevaa suunnittelu prosessia.

### 3.1 Kehittämistyön tehtävä

Kehittämistyön tehtävänä on integroida yrityksen sisäiseen suunnittelu prosessiin toimintatapa ja ohjeistus koskien FEM-lineaaristen staattisten analyysien suoritusta. Suunnittelu prosessin kehityksen sisältöön kuuluvat ohjeistus FEM-analyysin toteutuksesta, loppudokumentaatiosta sekä dokumentinhallinnasta. Kehittämistyö on rajattu lineaarisien analyysien prosessin integroimiseen ajankäytöllisistä syistä.

Kehittämistyön tehtävänä on myös todentaa valitun ohjelmiston laskennan lopputuloksen todenmukaisuus. Laskennan lopputuloksen todenmukaisuuden varmistamiseksi tarkasteluja varten yksinkertaisiin valittuihin rakenteisiin tehdään käsin laskentana Excel -pohjaiset laskentakaavat, jotta saadaan vertailulaskelma ja varmistus tuloksien suuruusluokkien ja käyttöasteiden oikeellisuudesta. Vertailulaskentaan valitut rakenteet valikoituvat siten, että ne edustavat tyypillisiä rakenteita ja kuormitustapauksia sekä ovat luotettavalla tavalla osoitettavissa oikeiksi käsin laskennan avulla.

Excel pohjaiset laskentapohjat mitoitetaan eurokoodien ohjeiden mukaisesti. Molemmissa laskentatavoissa käydään yksityiskohtaisesti läpi kaikki liitokseen vaikuttavat ilmiöt ja komponentit. Tiivistäen voidaan sanoa, että vertailu laskelmista tulee saada samansuuruiset tulokset kuin FEM-ohjelman vastaavasta analyysistä.

## 4 Tietoperusta

Tiedonhaussa pyritään käyttämään aina alkuperäislähteitä. Mahdollisuuksien mukaan lähteiden tiedot pyritään tarkistamaan myös muualta ja lähteisiin suhtaudutaan aina asianmukaisella kriittisyydellä.

Pääasiallisia tiedonhakumenetelmiä ovat, alan kirjallisuus kuten Teräsrakenneyhdistys RY julkaisemat soveltavat eurokoodi 3 käsikirjat, joiden tiedot usein tarkistetaan alkuperäislähteestä SFS-EN 1993 standardisarjasta.

Elementtimenetelmän teorian perusteet tutkitaan pääasiassa kansainvälisestä kirjallisuudesta, jossa tutustutaan mm. elementtiverkkoon, elementtisolmuun sekä elementtiin. Tutkimuksessa käytetään myös kansallista aineistoa, kansainvälisen aineiston lisäksi.

Valittuun ohjelmistoon tutustutaan koulutuksen sekä Siemensin käyttöoppaan avulla.

Lisäksi työssä käytetään henkilöhaastatteluja, jotta työhön saadaan näkemystä alan nykytilanteesta sekä tulevaisuudesta.

## 5 Toteutus

### 5.1 Kehittämismenetelmät

Opinnäytetyön tavoitteet ovat saavutettavissa kvantitatiivisen eli määrällisen tutkimuksen menetelmillä. Tutkimuksessa havainto sekä johtopäätös aineisto tulee soveltua numeeriseen mittaamiseen. Kvantitatiivinen tutkimus sopii hyvin tutkimukseen juuri sen menetelmäsuuntauksen vuoksi, jossa kohteen kuvaamiseen käytetään tilastollista sekä numeerista tulkintaa. (Tutkimusstrategiat, 2015).

Opinnäytetyössä käytetään myös tapaustutkimuksen menetelmiä, sillä työ on rajattu hyvin tiiviisti yhden sovelluksen käyttöönottoon ja siitä sekä sen ominaisuuksista pyritään etsimään yksityiskohdaisesti ja intensiivisesti tietoa. (Tutkimusstrategiat, 2021).

Empiirisiä piirteitä tutkimuksesta löytyy tutkimuksen toteutuksen sekä tuloksien havainnollistamisessa, jossa konkreettisia havaintoja osoitetaan analysoimalla ja mittaamalla menetelmiä (Tutkimusstrategiat, 2015).

## 5.2 Aineistonkeruu ja -analyysi

Kehittämistyöni kohderyhmänä on rakennus ja terästeollisuuden ammattilaiset. Kohderyhmässäni on paljon korkeasti koulutettuja sekä pidän kohderyhmääni älykkäänä kohderyhmänä, joten työhön tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Kehitystyön aineistonkeruu tapahtuu valmiiden ja tuotettujen dokumenttien kuten kirjojen, kuvien asiakirjojen ja mediatekstein avulla. Lisäksi kehitystyössä nojaututaan laskennalliseen sekä tilastolliseen aineistoon määrällisen tutkimuksen tavoin. (Määrällinen analyysi, 2015.)

Aineisto analysoidaan, tarkistetaan ja täydentämään puutteet sekä virheet. Tarkistuksessa käydään vastaukset läpi ja tarvittaessa poistetaan esimerkiksi puutteelliset vastaukset tai tulokset.

Aineistoni analysoinnilla pyrin ymmärtämiseen pyrkivää analysointia. Määrälliset tutkimukset pyrkivät yleensä selittämään ilmiöitä, ja niissä analysoidaan tuloksia usein tilastollisin tai numeerisin menetelmin. Ymmärtämiseen pyrkivässä lähestymistavassa tavoitteenani on tehdä päätelmiä. Aineiston analysoinnissa on menetelmästä huolimatta erittäin tärkeää kytkeä tulokset tutkielmassa käytettyyn teoriataustaan. (Aineiston analysointi. n.d).

## 6 FEM (Finite element method)

### 6.1 Yleiskuvaus

FEM (finited element method) suomeksi elementtimenetelmä. Yleensä puhutaan kuitenkin lyhenteestä FEM ja joskus käytetään myös lyhennettä FEA, joka viittaa englanninkieliseen termiin Finite Element Analysis. Mielenkiintoisen elementtimenetelmästä tekee sen ominaisuudet ratkoa monimutkaisia laskutehtäviä esimerkiksi liittyen lujuusoppiin, virtausoppiin ja lämmönsiirtoon.

Lähtemällä liikkeelle lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista, voidaan lujuusopin elementtimenetelmän perusyhtälöt johtaa kaikille rakennetyypeille. (Lähteenmäki, N.d. 2) Perusyhtälöt muodostetaan elementtien alueissa toteutettavan interpoloinnin avulla ja niistä saadaan tarkasteltavalle tehtävälle likiratkaisu. Kolmiulotteisille solidirakenteille ja pintarakenteille (levyt, laatat ja kuoret) interpolointiin perustuva elementtimenetelmä on ainoa mahdollinen. (Lähteenmäki, n.d, 2). Laskiessaan 3D-elementtejä solid edge käyttää iteratiivista laskentaa. Gauss-Seidelin menetelmää käyttäen sovellus laskee kaikki mahdolliset lopputulokset korjaten lopputulosta jokaisen laskelman jälkeen elementeissä. Gauss-Seidelin menetelmä kuvaus on esitetty kuviossa 1. (Iterative Method for Solving a System of Linear Equations, 2016).

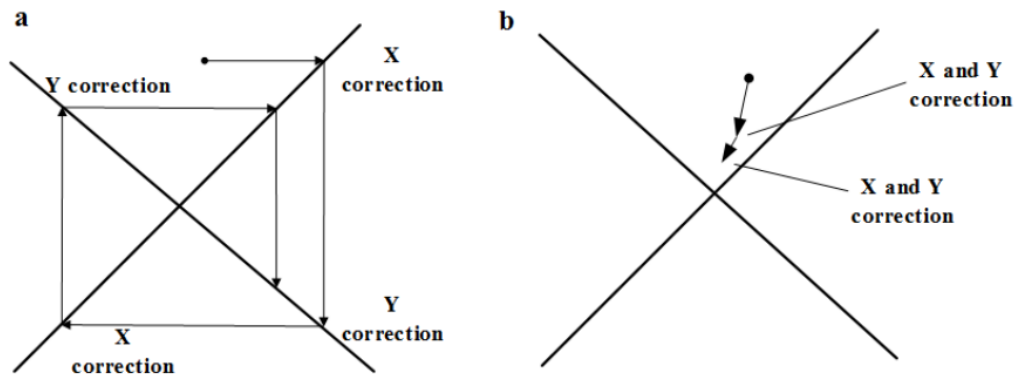


Fig 1. (a) the iterative solution according to the Gauss-Seidel method – a single variable is corrected in every step; (b) the provided iterative solution scheme – all the variables are corrected in every step.

Kuvio 1. Gauss-seidelin menetelmä (Iterative Method for Solving a System of Linear Equations, 2016)

## 6.2 Elementtimenetelmän historia

Elementtimenetelmän käyttö alkoi Yhdysvalloissa lentokoneiteollisuudessa 1950-luvulla ja levisi sieltä nopeasti kone- ja rakennustekniikan alueille rakenteiden statiikan ja dynamiikan käsittelyyn (Lähteenmäki n.d, 1). Voidaankin todeta, että lähteenmäen toteamus menetelmän menestymisen ja tietokoneiden suurten numerolaskumäärien käsittelyn kohtuullisessa ajassa olevan yhteydessä toisiinsa. Menetelmän suosio kasvoikin tietokoneiden kehityksen mukana nopeasti vuonna 1960-

ja 1970 luvuilla (Lähteenmäki n.d, 1). Lähteenmäki (n.d.) toteaa että, elementtimenetelmän levinneen laajalle tekniikanalojen piirissä. Elementti menetelmä onkin nykyään laajalti käytössä eri tekniikan aloilla esimerkiksi lämmönsiirron, virtausopin, maamekaniikan, kalliomekaniikan, sähkötekniikan ja akustiikan tehtävien ratkaisemisessa (Lähteenmäki n.d, 1).

### 6.3 Elementtiverkko

Elementtimenetelmässä tarkasteltava malli jaetaan äärellisiin elementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmukohdissa. Solmukohdissa vallitsevia siirtymiä, jännityksiä sekä muita suureita tarkastellaan analyysissä. Elementtien muodostamaa verkkoa kutsutaan elementtiverkoksi. Elementtimenetelmä on likiarvo menetelmä ja likiarvon tarkkuus riippuu elementtiverkon tiheydestä.

FEM-analyysistä ja rakenteesta riippuen voidaan käyttää erityyppisiä verkkoja. Tyypillisiä elementti tyyppejä ovat kolmiulotteisen kappaleiden elementteinä käytettävät neli-, viisi- ja kuusita-hokkaat elementit, joiden reunapinnat voivat olla tasoja tai yksinkertaisia kaarevia pintoja. Pintarakenteiden yhteydessä käytetään neli- ja kolmisivuisia tasoelementtejä, joiden reunaviivat voivat olla suoria tai yksinkertaisia käyriä viivoja. (Lähteenmäki, n.d.)

Elementtiverkko kuvaa todellista kappaletta likimääräisesti mikä aiheuttaa saataviin tuloksiin virhettä. Elementtiverkon liian suuri tiheys taas kuormittaa tietokonetta ja näin ollen laskennasta tulee hidasta. Elementtiverkon tiheyttä tulee muuntaa sen mukaan, mistä kohdasta halutaan tarkimmat arvot mitattavasta suureesta. Laskenta-ajan optimointi suoritetaan tihentämällä/väljentämällä verkon laskentakappaleen eriosissa, ja näin ollen kriittiset sijainnit rakenteesta saadaan laskettua tarkasti ja samalla laskenta-aika pysyy inhimillisenä.

Tyypillisesti mittavien ja moniulotteisten rakenteiden kohdalla alussa verkkotiheys pidetään suurena ja suoritetaan välilaskentoja kesken mallin rakentamisen, jotta nähdään, että malli toimii. Mallin tarkentuessa ja haluttaessa lopullisia arvoja, elementti verkkoa tihennetään halutun tarkkuuden saavuttamiseksi.

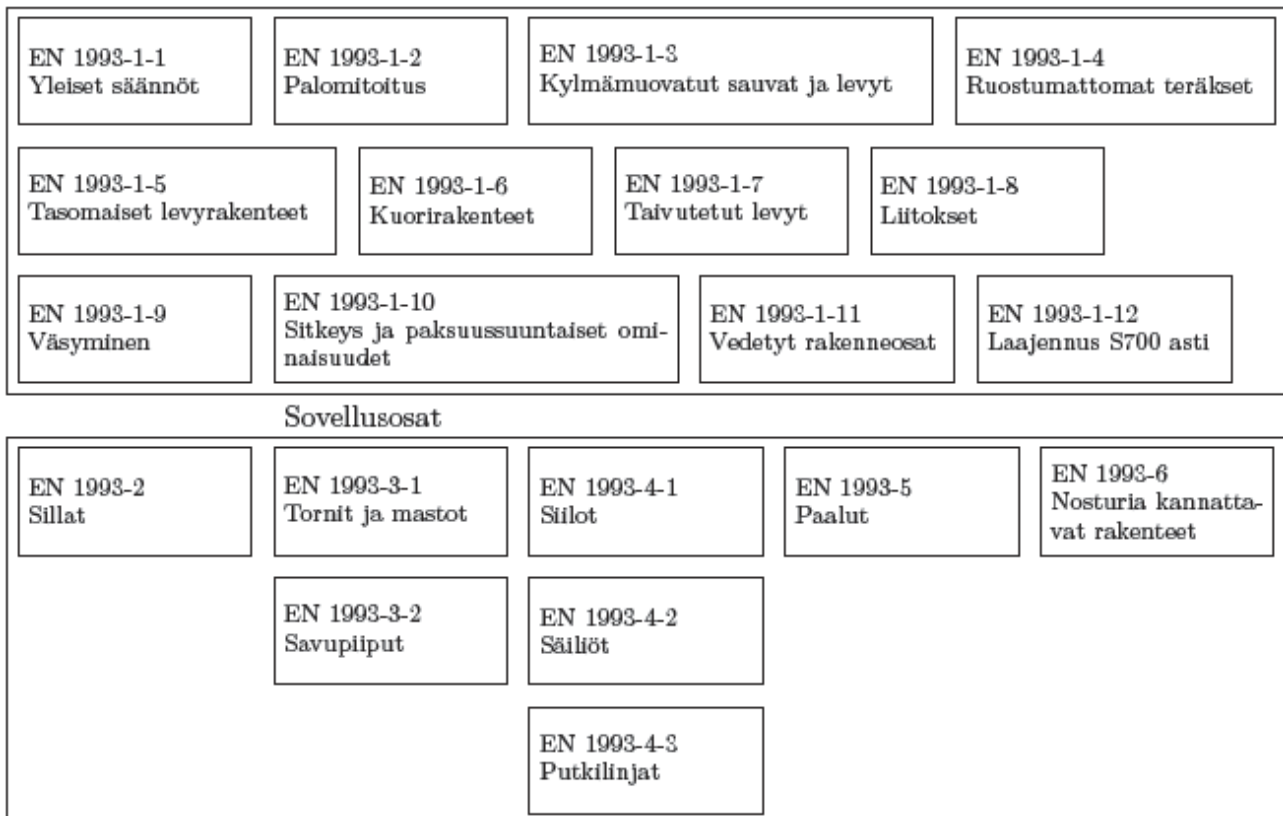
## 7 Eurocode 3

Eurocode 3 on Suomessa noudatettava standardisarja mm. rakennuksien teräsrakenteissa. Eurocode 3 järjestelmä kehitettiin eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukykyä parantamiseksi sekä Euroopan Unionin alueella että muualla maailmassa. Eurocode 3 järjestelmästä on tullut tasaväkinen kilpailija Yhdysvaltain standardijärjestelmille ja se onkin levinnyt laajasti eri puolille maailmaa. (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 11).

Standardisarjan SFS-EN 1993 (Eurocode 3) rakenne koostuu yhteensä kuudesta pääosasta, jotka sisältävät erillisiä standardeja. Kaikkiin standardisarjan SFS-EN 1993 liittyy myös standardisarja SFS-EN 1090, joka käsittelee teräsrakenteiden toteutusta ja asettaa siten ehtoja ja vaatimuksia suunnittelulle.

(Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 11).

Eurokoodi rakenne on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Standardisarjan EN 1993 rakenne (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 12)

### 7.1 Eurocode 3 ohjeistus FEM laskelmiin

Standardissa SFS-EN 1993-1-1 ”Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt” ei puututa numeristen menetelmien käyttöön, mutta siinä viitataan standardiin SFS-EN 1993-1-5 ”Tasomaiset levyrakenteet”, jossa annetaan ohjeita FEM-laskelmien tekemiseen (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62).

Ohjeistus on tehty levyrakenteita silmällä pitäen, mutta alan ammattilaiset näkevät, että samat periaatteet soveltuvat myös kehärakenteiden analysointiin

(Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62).

Standardissa SFS-EN 1993 määritellään, että elementtimenetelmää käytettäessä rakenneanalyysiin, tehdään sauvojen mitoitus normaaliin tapaan standardin SFS-EN 1993-1-1 sääntöjen mukaisesti (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62).

Mikäli elementtimenetelmällä halutaan määrittää rakenteen kantokyky, vastaa se rakenteen mitoitusta. Tällöin elementtimenetelmällä lasketaan murtorajatilassakuormien suurennuskerroin  $\alpha_u$ , jolla kaikki tarkasteltavan kuormitusyhdistelyn kuormat on kerrottava, jotta rakenteen kantokyky saavutetaan. Suurennuskerroin  $\alpha_u = \alpha_1 \alpha_2$ , missä  $\alpha_1$  vastaa FEM-mallin mallinnusepäätarkkuutta,  $\alpha_2$  kattaa kuormia ja kestävyyttä kuvaavien mallien hajonnan. Mikäli rakenteen stabiilius on määräävä murtorajatilassa, käytetään arvoa  $\alpha_2 = \gamma_m1$  ja jos materiaalin murtuminen on määräävä, käytetään arvoa  $\alpha_2 = \gamma_m2$ . FEM-mallinnusepäätarkkuutta kuvaava termi  $\alpha_1$  määritetään eurokoodin EN 1990 liitteen D mukaisesti vertaamalla koetuloksiin (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62; Tasomaiset levyrakenteet, 49).

FEM-ohjelmia käyttäessä suurimmat mahdollisuudet virheelliseen lopputulokseen tulee ohjelman käyttäjän syöttämistä virheellisistä reunaehdoista tai arvoista.

Eurokoodi SFS-EN 1993-1-5 ohjeistaakin Teräsrakenneyhdistyksen Eurokoodi 3 oppikirjastakin löytyvät seikat joihin käyttäjän tulee kiinnittää erityistä huomiota tehdessä FEM-analyysia (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62; Tasomaiset levyrakenteet, 49).

1. Rakennekomponenttien ja niiden reunaehtojen mallintaminen
2. Tietokoneohjelman ja dokumentoinnin valinta
3. Epätarkkuuksien huomioon ottaminen
4. Materiaaliominaisuuksien mallintaminen
5. Kuormien mallintaminen
6. Rajatilaehtojen mallintaminen
7. Osavarmuuslukujen soveltaminen
8. Laskelmien tulosten suuruusluokan tarkistaminen käsin laskentamenetelmillä

(Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 62; Tasomaiset levyrakenteet, 49).

## 8 Pätevydet

### 8.1 Rakennusten suunnittelu

Kantavien teräsrakenteiden suunnittelu vaatii teoreettista osaamista, materiaali tuntemusta ja käytännön kokemusta suunnittelijalta. Rakennuksissa olevien teräsrakenteiden suunnittelijan pätevyys perustuu maankäyttö- ja rakennuslakiin sekä sitä täydentäviin Ympäristöministeriön asetuksiin ja ohjeistuksiin. (Teräsrakenteiden suunnittelija, n.d.)

Fise Oy on voittoa tavoittelematon yritys, joka ylläpitää pätevyysrekisteriä ja rakennusvirhetietopankkia. FISE-henkilöpätevyyspalvelu on rakennettu kansainvälisen ISO-standardin mukaisesti. (FISEn esittely, n.d). Fise Oy:n pätevydet eivät ole lakien ja asetusten vaatimia, mutta ne ovat yksi tapa osoittaa pätevyys.

Fisen verkkosivuilla (n.d.) esitellään kantavien teräsrakenteiden suunnittelutehtävät, jotka jaetaan vaatimusluokkien mukaan, jotka ovat T (tavanomainen), V ja V+ (vaativa) sekä PV (poikkeuksellisen vaativa). (Teräsrakenteiden suunnittelija n.d.) Nämä vaatimusluokat perustuvat maankäyttö- ja rakennuslakiin, jossa pykälässä 120d§ käydään vaatimusluokkien määräytyminen pintapuolisesti läpi, mutta siellä todetaan, että ”Valtioneuvoston asetuksella voidaan antaa tarkempia säännöksiä suunnittelutehtävän vaatimusluokan määräytymisestä.” (Maankäyttö- ja rakennuslaki 17.1.2014/41, 120d§). Vaatimusluokkien kriteeristö kuvataan tarkasti asetuksessa ”Valtioneuvoston asetus rakentamisen suunnittelutehtävien vaatimusluokkien määräytymisestä”. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 17.1.2014/41, 120§).

Kussakin vaatimusluokassa on omat kriteerit koulutukselle ja työkokemukselle. Toisaalta vaatimusluokkien kriteerit vaihtelevat hieman sen mukaan onko kyseessä uudis- vai korjausrakentamista. Suunnittelijan tulee täyttää suunnittelukohteessa vaadittu pätevyys, jotta se voi toimia kohteen suunnittelijana. Suunnittelijan kelpoisuuden kyseiseen tehtävään arvioi rakennusvalvonta viranomaisen (Maankäyttö- ja rakennuslaki 17.1.2014/41, 120f§). Kelpoisuuden arviointi perustuu maankäyttö- ja rakennuslakiin pykäliin 120e§ suunnittelijoiden kelpoisuusvaatimukset sekä 120d§ suunnittelutehtävien vaatimusluokat. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 17.1.2014/41, 120f§).

## 8.2 Muiden teräsrakenteiden vaatimat suunnittelijan pätevyudet

Koneiden ja laitteiden lujuus laskenta pohjautuu usein EN 1993 standardeihin, mutta niihin ei välttämättä voida suoraan käyttää suunnittelussa standardia EN 1993 eikä toteutus standardia 1090 niitä joudutaan soveltamaan tapauskohtaisesti. Yksi oleellinen asia on, että EN1993 eikä 1090 tunne teollisuudessa paljon käytettyjä kuumalujia teräslaatuja.

Painelaitteiden ja koneiden suunnittelijoille ei ole tarkkoja pätevyysvaatimusta. vaativimmissa kohteissa esimerkiksi painelaittepuolella suunnitelmat tarkastaa hyväksytty tarkastuslaitos, mutta tämä koskee vain painetta kantavaa rakennetta, ei sen tukirakenteita. Tällöin suunnittelijan pätevyyden vaatimus tulee valmistajalta.

## 9 Suunnitteluprosessi

UKKO-STEKA Oy:llä on jo olemassa sisäinen suunnitteluprosessi, joka koostuu projektista riippuen erilaisista suunnittelun tehtävistä ja projektinhallinnasta. Suunnittelu tehtävät ovat projektista riippuen erilaisia, aina asiakkaan tuotesuunnittelun tukemisesta, suurempien rakenteiden detalji suunnitteluun sekä painelaitesuunnitteluun. UKKO-STEKA Oy:llä on laaja kokemus teräsrakenteiden valmistuksesta, suunnittelusta sekä tietämys metallurgiasta ja hitsausteknologiasta. Osana suunnittelu ryhmää toimii myös kolme pätevöitettyä kansainvälisen tutkinnon suorittanutta hitsausinsinööriä (IWE), heidän vastualueenansa on hitsausten ja niiden tarkastuksien suunnittelun ohjeistus ja katselmointi.

Voitaisiinkin sanoa, ettei tämän työn tavoitteena ole luoda uutta toimintatapaa vaan integroida FEM-ohjelma yritykselle muun suunnittelun tueksi osana kokonaisuutta. UKKO-STEKA Oy tekee yhteistyötä kansallisten ja kansainvälisten yhtiöiden kanssa erilaisissa suunnittelun tehtävissä nyt ja tulevaisuudessa.

## 9.1 3D-Suunnittelu

3D-suunnittelua on yrityksellä jo käytössä ja siksi onkin tärkeää luoda yritykselle järjestelmällinen prosessi eri ohjelmien välille, jotta ylimääräiseltä työltä vältytään. Yrityksellä on käytössään 3D-cad ohjelmisto nimeltä Vertex G4 plant, jolla yritys tekee mm. konepaja ja laitossuunnittelua. Rakenteiden 3D mallinnus tapahtuu jatkossakin Vertex G4 plantissa, josta tarvittaessa mallit siirretään STEP-mallina Solid edgeen FEM-analyysejä varten.

## 9.2 Dokumentin hallinta (PDM)

Mikä tahansa tuote on, se vaatii järjestelmällistä dokumentointia koko elinkaaren ajan. PDM-järjestelmä on yksi käytetyimmistä järjestelmistä tähän tarkoitukseen. PDM-järjestelmä mahdollistaa tuotetiedon keskityksen yhteen paikkaan, jossa dokumentteja voidaan hallita järjestelmällisesti. (Importance of the PDM Application, 2011).

Jotta FEM laskelmat olisivat käyttökelpoisia ja niistä olisi hyötyä jatkossakin on dokumentaation hallinta yksi tärkeimmistä asioista, johon työssä on kiinnitettävä huomiota.

Tässä opinnäytetyössä dokumentaation hallinta tapahtuu Vertex Flow ohjelmalla. Vertex Flow on PDM (Product data management) ohjelmistoympäristö, jolla pystytään keskittämään kaikki tuotetieto yhteen paikkaan. Onkin huomattavaa, että Vertex Flow täyttää ISO 9001:2015 dokumentaatiohallinnan vaatimukset. Dokumenteista näkee mm. kuka dokumentin on luonut, muuttanut, revidoinut, hyväksynyt ja milloin, sekä missä dokumenttia on käytetty. (Vertex flow tuotetiedonhallinta PDM/PLM n.d). Myöskin kenellä on oikeudet katsoa tai muokata kyseistä dokumenttia, on nähtävissä. (Vertex flow tuotetiedonhallinta PDM/PLM, n.d) Järjestelmässä voidaan myös hallita järjestelmällisesti poikkeamia, muutoksia sekä luoda kehitysehdotuksia. Luodessaan Vertex flow:hun minkä tahansa asian: tapahtuman, projektin, nimikkeen, tuotteen, dokumentin saa se aina oman yksilöivän tunnuksen ohjelmistolta, jota kukaan käyttäjä ei voi muokata. Tämä on mielestäni erittäin hyvä ominaisuus ja tätä tullaan käyttämään tässäkin projektissa hyödyksi. Vertex flow onkin ollut yrityksen käytössä jo useamman vuoden ja näin ollen oli selkeä valinta opinnäytetyön dokumentaation työkaluksi.

### 9.3 Solid edgen FEM ohjelmisto

Solid edge FEM eli finite element methods on tavallaan eräänlainen laskin. Niin kuin aina laskimien kanssa vastaus on niin hyvä kuin tiedot mitä sinne syöttää. Onkin tärkeää, että lähtötiedot syötetään oikein ja valitaan oikea laskentaprosessi aina rakennetyyppi kohtaisesti. Solid edge FEM ohjelmassa voidaan tehdä erilaisia rakenne analyysyjä ja simuloiteja. Tyypillisimmät ja tässä opinnäytetyössä käytettävät ovat jännitysten, liikkeen, muodon muutoksen ja lineaarisen nurjahduksen analysointi ja simulointi. (Solid edge simulation, n.d.) Laskennan tulokset voidaan tarkistaa numeerisesti solmuittain sekä elementeittäin sekä myöskin visuaalisesti värein ja liikkeen sekä muodon muutoksen animaation avulla.

### 9.4 Solid edge FEM ja FLOEFD

Solid edge FEM ohjelmisto pitää sisällään

1. Liikkeen (muodon muutoksen) simuloinnin
2. Jännitys analyysin ja simuloinnin
3. Tärinän simulointi ja rakenteen normaalitaajuuden määrittäminen
4. Värähtely simulointi määrättyllä taajuusalueella
5. Lineaarisen nurjahduksen simulointi
6. Lämpöjännityksien simulointi sekä lämmönsiirtymisen simulointi

Solid edgen lisäosa Simcenter FLOEFD on kehitelty virtausmallinnukseen, jossa voidaan simuloida mm. Virtauksia ja lämpötilan muutoksia. FLOEFD:n tulokset voidaan tuoda Solid edge FEM-analyysiin rakenteellisina kuormina. (Solid edge simulation, n.d)

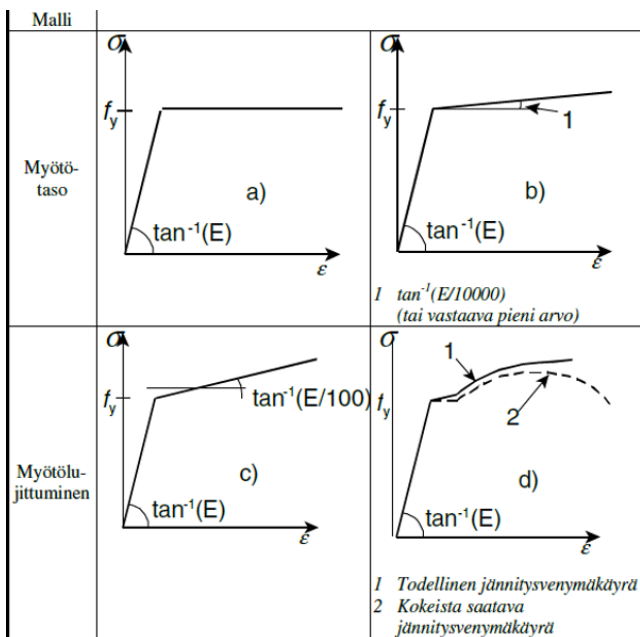
## 10 Rakenneanalyysi

### 10.1 Materiaaliominaisuudet

Solid edgessä materiaali on kimmo-plastinen eli materiaali on lineaarisesti myötölujeneva. Ohjel-  
misto käyttää määriteltyä kimmokerrointa sekä poissonin lukua määrittäessään jännitysvenymää.  
(Hookes Law, n.d.) Eurokoodi EN 1993-1-5 ohjeistaa neljä tapaa FEM-ohjelmissa käytettäviin mate-  
riaali malleihin. Eurokoodin tuntemat materiaali mallit on esitetty kuviossa 3.

- kimmo-plastinen materiaali ilman myötölujittumista*
- kimmo-plastinen materiaali, joka lujenee keinotekoisesti (numeeristen laskelmien takia)*
- kimmo-plastinen materiaali, joka on lineaarisesti myötölujeneva*
- todellinen jännitys-venymäkäyrä, joka määritetään kokeellisesta jännitys-venymäkäyrästä seuraavasti:  $\sigma_{true} = \sigma(1 + \epsilon)$ ,  $\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon)$*

(Tasomaiset levyrakenteet, 54).



Kuva C.2 Materiaalin käyttäytymisen mallinnus

Kuvio 3. Materiaalin käyttäytyminen (Tasomaiset levyrakenteet, 54).

Ohjelmiston materiaalin käyttäytyminen malli mahdollistaa standardissa EN 1993-1-5 taulukon C.1 kohtien 1,3 ja 4 mukaiset tarkastelut.

Epätäydellisyydet, joilla tarkoitetaan ekvivalentteja geometrisiä poikkeamia, voidaan mallintaa Ohjelmistossa. Eurokoodin määrittämän FEM oletukset on näytetty kuviossa 4.

**Taulukko C.1 Oletukset FEM-laskelmia varten**

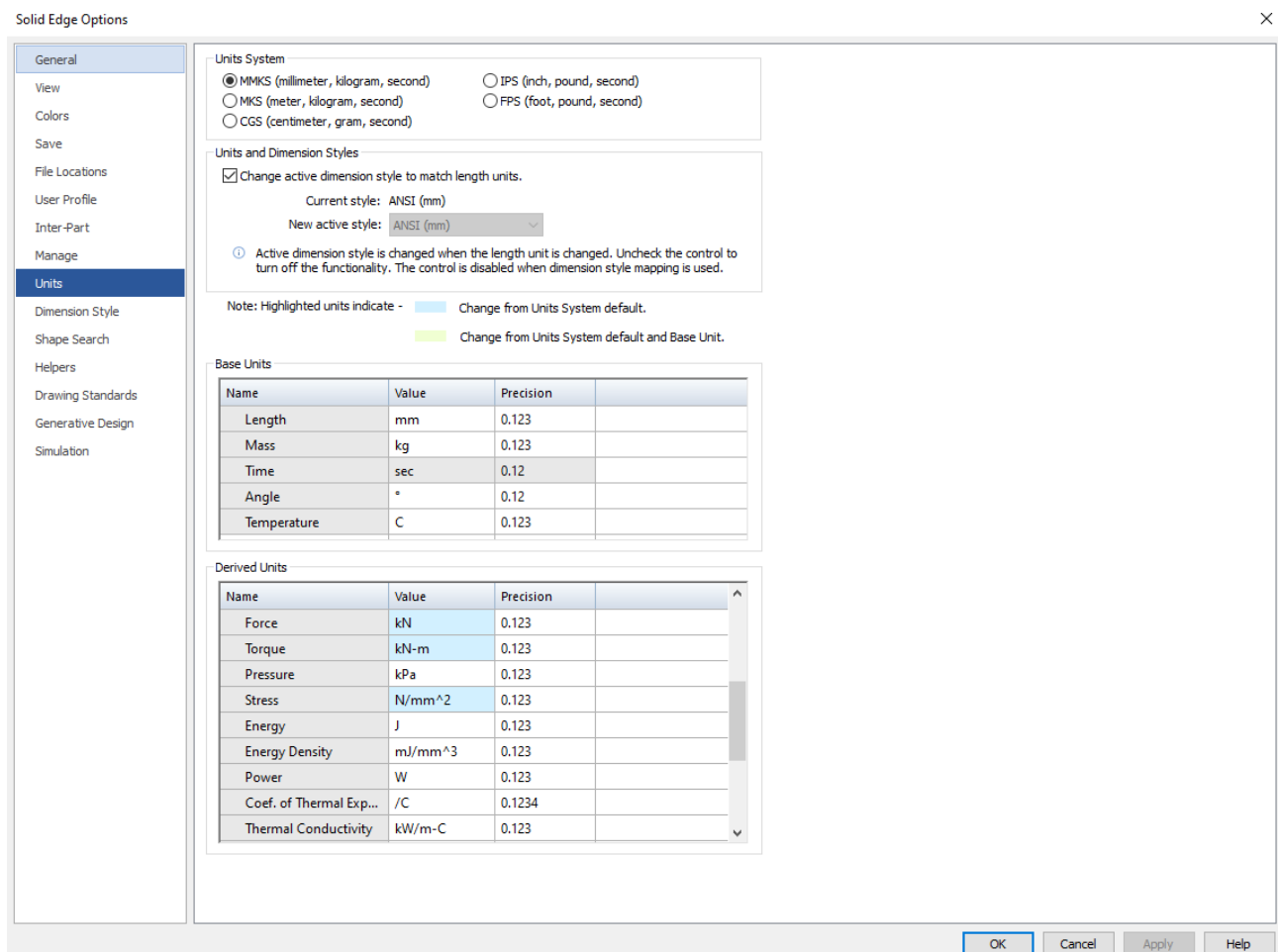
No	Materiaalin käyttäytymisen	Geometrinen käyttäytymisen	Epätäydellisyydet, ks. kohta C.5	Käyttöesimerkki
1	Lineaarinen	Lineaarinen	Ei	Kimmenteorian mukaisen shear lag-ilmiön vaikutus, kimmenteorian mukainen kestävyys
2	Epälineaarinen	Lineaarinen	Ei	Plastisuusteorian mukainen kestävyys murtorajatilassa
3	Lineaarinen	Epälineaarinen	Ei	Kimmenteorian mukainen kriittinen levyn lommahduskuorma
4	Lineaarinen	Epälineaarinen	Kyllä	Kimmenteorian mukainen levyn lommahduskestävyys
5	Epälineaarinen	Epälineaarinen	Kyllä	Kimmo-plastiseen materiaalmalliin perustuva kestävyys murtorajatilassa

Kuvio 4. Oletukset FEM laskelmia varten (Tasomaiset levyrakenteet, 51).

## 10.2 Yksiköt

Sovelluksessa tulee määrittellä yleiset mittayksiköt pituus, paino, aika, astekulma ja lämpötila. Lisäksi tulee määrittellä johdetut yksiköt, joista tässä opinnäytetyössä keskeisimpinä mm. tiheys, kiihtyvyyys, voima, momentti sekä jännitys.

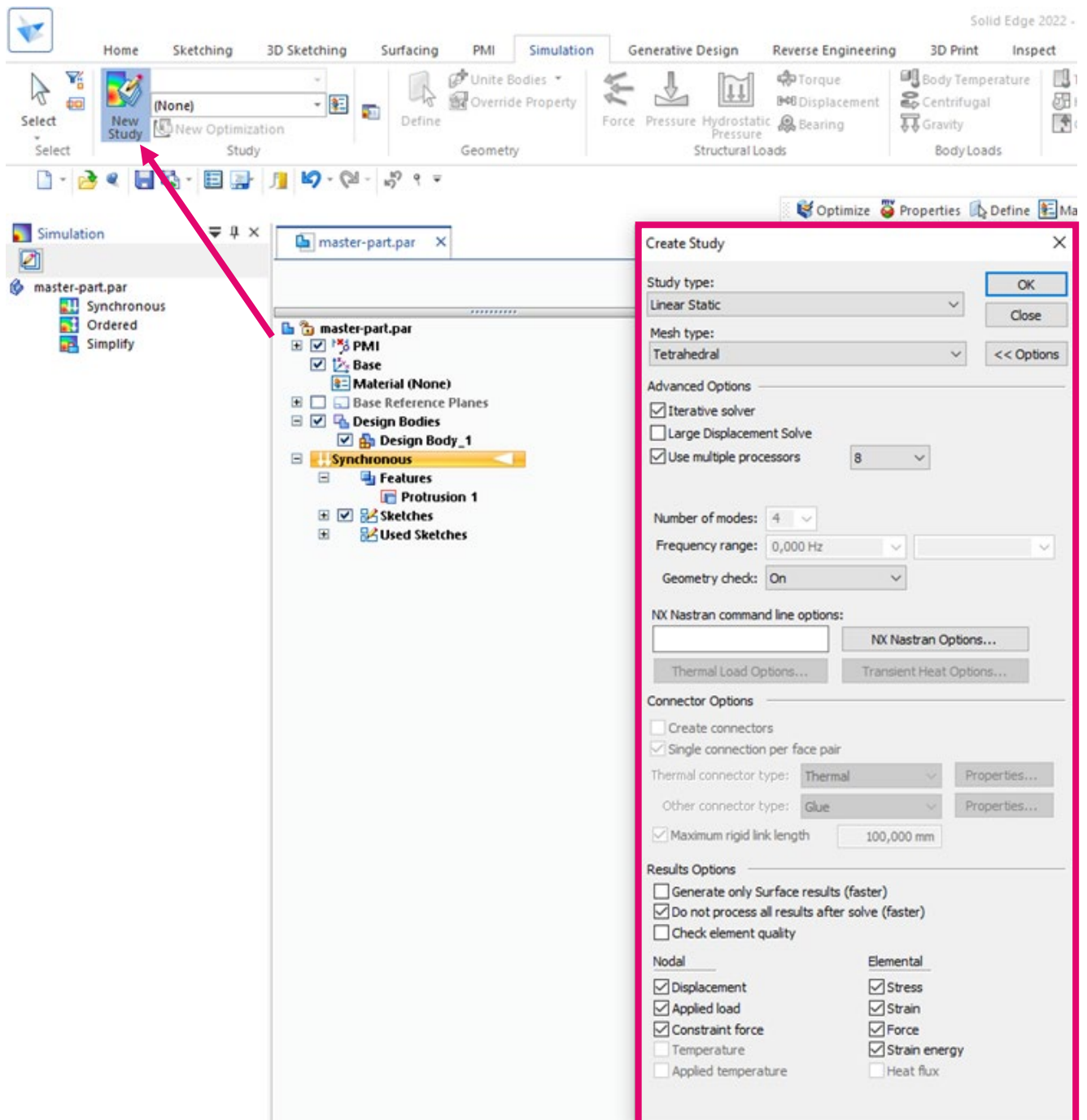
Käytettävät yksiköt on hyvä olla kaikilla ohjelmiston käyttäjillä yhtenevät, joten on tärkeää, että ne on ennalta määritelty ja tarkoituksen mukaiset, jotta aikaa ei kulu asetuksien hakemiseen. Opinnäytetyön aikana luotiin yritykseen valmiit part ja assembly pohjat, joissa asetukset ovat valmiina tarkoituksen mukaiset. Toki aika ajoin voi tarvita muokata asetuksia, joten ne löytyvät sovelluksen sijainnista settings → options → Units. Solid edge yksikkö asetukset on esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5. Yksikkö asetukset (Lindén 2022)

### 10.3 Uuden rakenneanalyysin perustiedot (New study)

Kuten jo tässäkin työssä on todettu niin lähtöasetuksien asettaminen oikein on erittäin tärkeää tehdessä rakenneanalyysijä FEM-ohjelmistolla. Tässä opinnäyte työssä esitän keskeisimmät asiat, joihin tulee kiinnittää huomiota perustaessaan uuden rakenneanalyysin. Solid edge rakenneanalyysin lähtöasetukset on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Rakenneanalyysin asetukset (Lindén 2022)

### 10.3.1 Analyysin tyyppi (study type)

Solid edgessä voidaan valita kolmen eri analyysin välillä vallitsevan tilanteen mukaan. Lineaarisen staattisen analyysin avulla voidaan laskea siirtymiä, venymää, tukivoimia sekä jännitystä. Lineaarisessa staattisessa analyysissä kuormitus ei voi liikkua eli se on pysyvä paikallaan muuttumattomana. (Structural studies. n.d.) Nurjahdus analyysissä määritetään kuormitus, millä kuormalla rakenteesta tulee epävakaa. Tämä analyysi on tyypillinen puristettujen ja taivutettujen rakenteiden tarkasteluissa. Normaalitila analyysillä voidaan, kartoittaa rakenteen ominaistuuksia, jolloin rakenne alkaa värähtelemään. Ominaisuuksien tarkastelu tulee tarpeen esim. Piippujen sekä mastojen tarkastelussa. (Structural studies. n.d.)

Tämä työ on rajattu Lineaarisen staattisen analyysin luomiseen.

### 10.3.2 Verkon tyyppi (Mesh type)

Opinnäytetyössä on käyty jo FEM-ohjelmiin liittyvän verkon teoriaa, joten tässä ei enää kerrata sitä. Solid edgessä verkotus tyyppiä on kolme.

Mikäli tarkasteltava kappale on perinteinen kiinteä solidi malli, käytetään verkkotyyppiä "Tetrahedral", jolloin ohjelma luo verkotuksen 3D-solidi elementeistä. Solid edgessä voidaan tehdä myös ohutlevy rakenteesta pintamalli, jolloin kappaleen ohutlevyosista jätetään vain yksi pinta näkyviin, jolle määritetään parametrilla ainevahvuus. Tällaisissa tapauksissa verkon tyyppiä valitaan "Surface", jolloin ohjelma luo verkotuksen 2D-tasoelementeistä. Pintamalleja käytetään, jotta laskennasta saadaan keveämpää. Kolmantena verkotus tyyppinä on "general bodie", joka on tarkoitettu yhdistelmä rakenteiden verkotukseen, jossa osa mallista on pintamallia ja osa on 3D-solidi mallia. (Mesh material properties. n.d)

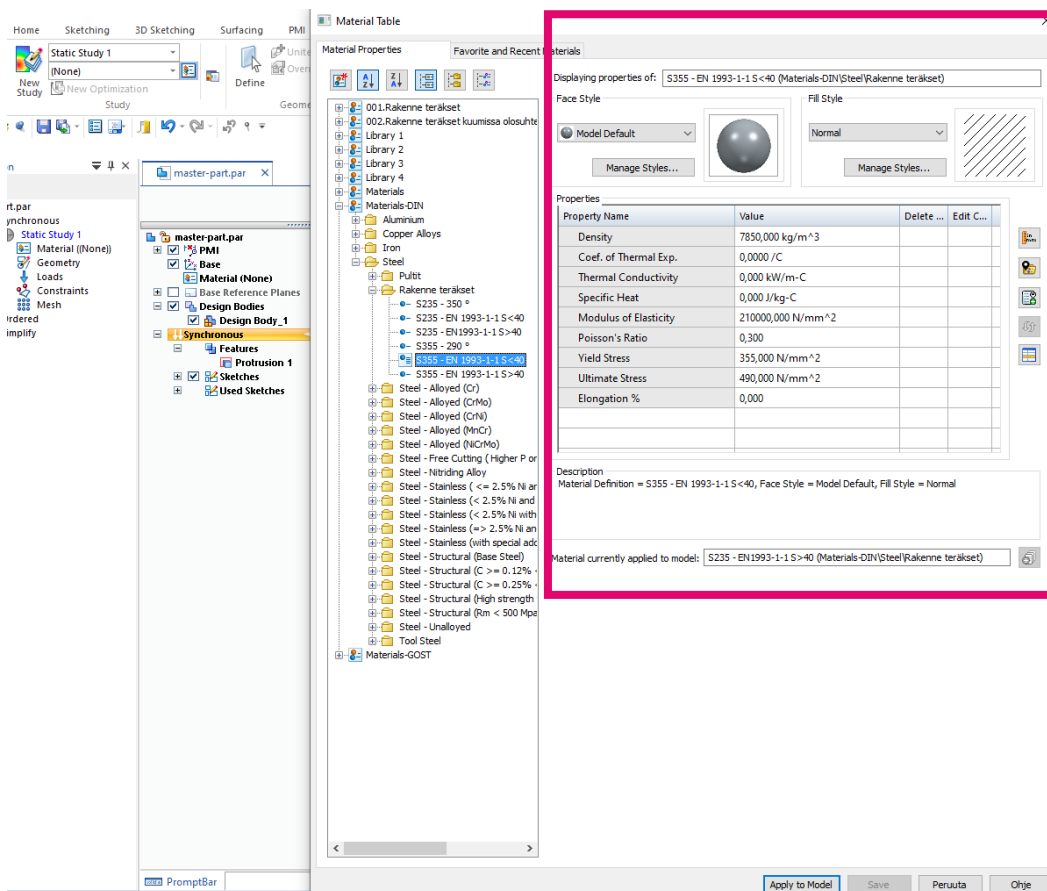
### 10.3.3 Tarkasteltavat suureet

Tarkasteltavat suureet määritetään perustaessaan uutta rakenneanalyysiä. Suureet määritetään erikseen solmupisteisiin ja elementteihin. Rakenneanalyysin tuloksissa voidaan tarkastella vain valittuja suureita. Lineaarisessa staattisessa analyysissä solmupisteissä voidaan tarkastella siirtymiä,

reaktivoimaa sekä normaalivoimaa X, Y ja Z akselien suuntaisesti. Elementeissä taas voidaan tarkistella jännityksiä ja jännitysenergiaa tasojen suuntaisesti sekä voimia X, Y ja Z akselien suuntaisesti. (Results Options for studies. n.d.)

### 10.3.4 Rakenteen materiaalin valinta

Solid edgessä on laaja materiaali kirjasto eri materiaalilaadun teräksille. Opinnäytetyössäni kuitenkin loin materiaali kirjastoon EN 1993-1-1 mukaisilla materiaali arvoilla olevat teräokset yleisimmille kuumavalssatuille teräksille paksuuden mukaisesti. Materiaaleja ja materiaali kategorioita voi luoda vapaasti, joka mahdollistaa erilaisten materiaalien analysoinnin. Materiaalien luonti vapaasti on tärkeää projekteissa, joissa teräokset ovat esimerkiksi kuumissa olosuhteissa, voi ohjelmaan lähötietoina määritellä käytettäviä lujuuksia sekä materiaali vakioita kussakin lämpötiloissa. Solid edge rakenteen valinta on esitetty kuviossa 7 ja kuviossa 8 on esitetty eurokoodin ohjaaman materiaali arvot



Kuvio 7. Rakenteen materiaalin määrittely (Lindén 2022)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus $t$ [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$t > 40$ mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10025-2</b>				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	490	335	470
S450	450	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S275 N/NL	275	390	255	370
S355 N/NL	355	490	335	470
S420 N/NL	420	520	390	520
S460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S275 M/ML	275	370	255	360
S355 M/ML	355	470	335	450
S420 M/ML	420	520	390	500
S460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S235 W	235	360	215	340
S355 W	355	490	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S460 Q/QL/QLI	460	570	440	530

Kuvio 8. Myötörajan  $f_y$  ja vetomurtolujuuden  $f_u$  nimellisarvot standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti. (Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 43)

SFS-EN 1993-1-1 antaa materiaalivakioille seuraavat arvot:

Kimmo kerroin  $E=210\,000$  N/mm<sup>2</sup>

Liukkerroin  $G=81\,000$  N/mm<sup>2</sup>

Poissonin luku  $\nu=0,3$

Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin  $\alpha=12 \cdot 10^{-6}$  /°C

Tiheys  $\rho=7850$  kg/m<sup>3</sup>

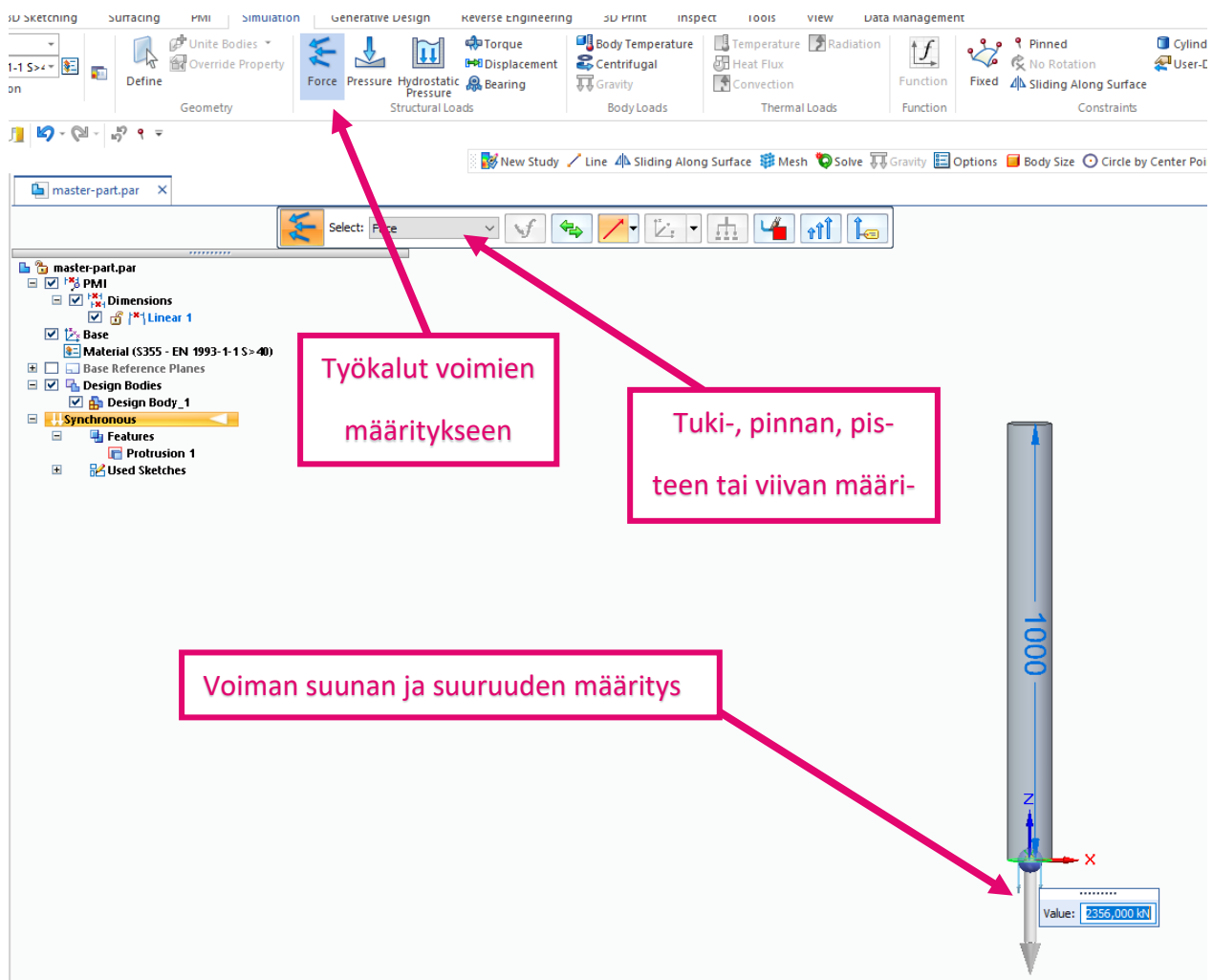
(Teräsrakenteiden suunnittelu 2020, 49)

## 10.4 Rakenneanalyysin kuormitukset ja reunaehdot

### 10.4.1 Kuormien määrittäminen

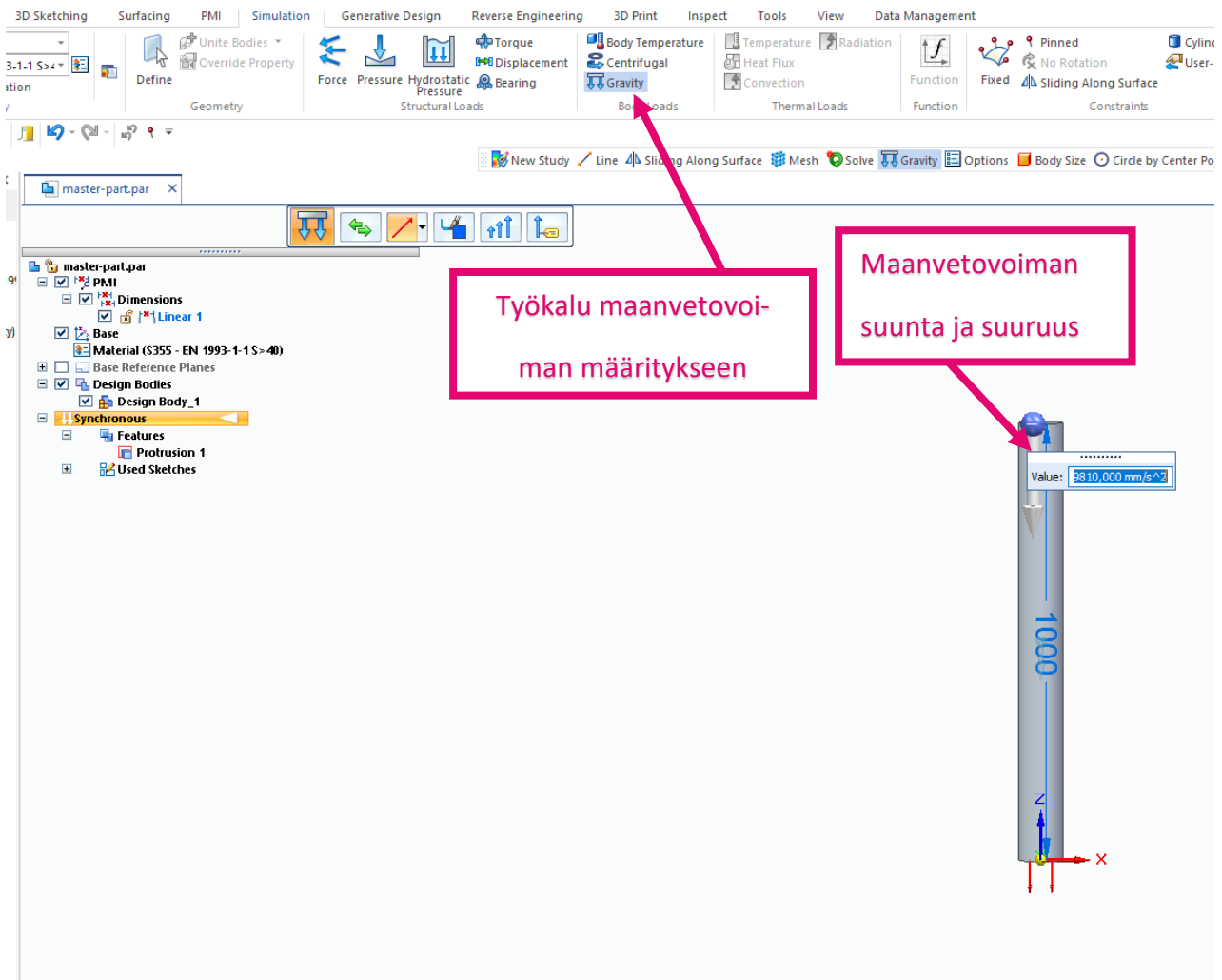
Rakenteelle määritetään ulkoinen kuormitus. Kuormitusta valittaessa tulee määrittää kolme tärkeää asiaa, jotka näytetään kuviossa 9. Ensimmäisenä tulee valita kuormitus tyyppi, joka voi olla normaalivoima, paine, hydrostaattinen paine, vääntö tai akseli paine. Lisäksi voidaan määrittää

maksimi siirtymä ja tarkistaa millä kuormalla rakenne siirtyy annetun arvon verran. Toisena valintana tulee valita mihin kyseinen voima kohdistuu. Valitaan vetolaatikosta pinta, piste tai viiva, jonka jälkeen se klikataan mallista. Kolmantena syötetään valitun kuorma suunta ja suuruus. Kuorma suuntaa valitusta pisteestä, viivasta tai pinnasta voidaan vapaasti kääntää.



Kuvio 9. Ulkoinen voima (Lindén 2022)

Rakenteen omanmassan aiheuttama kuormitus määritellään valitsemalla maanvetovoiman suuruus sekä suunta. Ohjelmisto laskee näiden tietojen avulla itse ominaiskuorman aiheuttaman voiman. Maanvetovoimasta aiheutuvan voiman määrittämisessä tulee valita työkalu maanvetovoiman kiihtyvyys ja kohdasta kaksi maanvetovoiman suunta ja suuruus, jotka näytetään kuviossa 10.

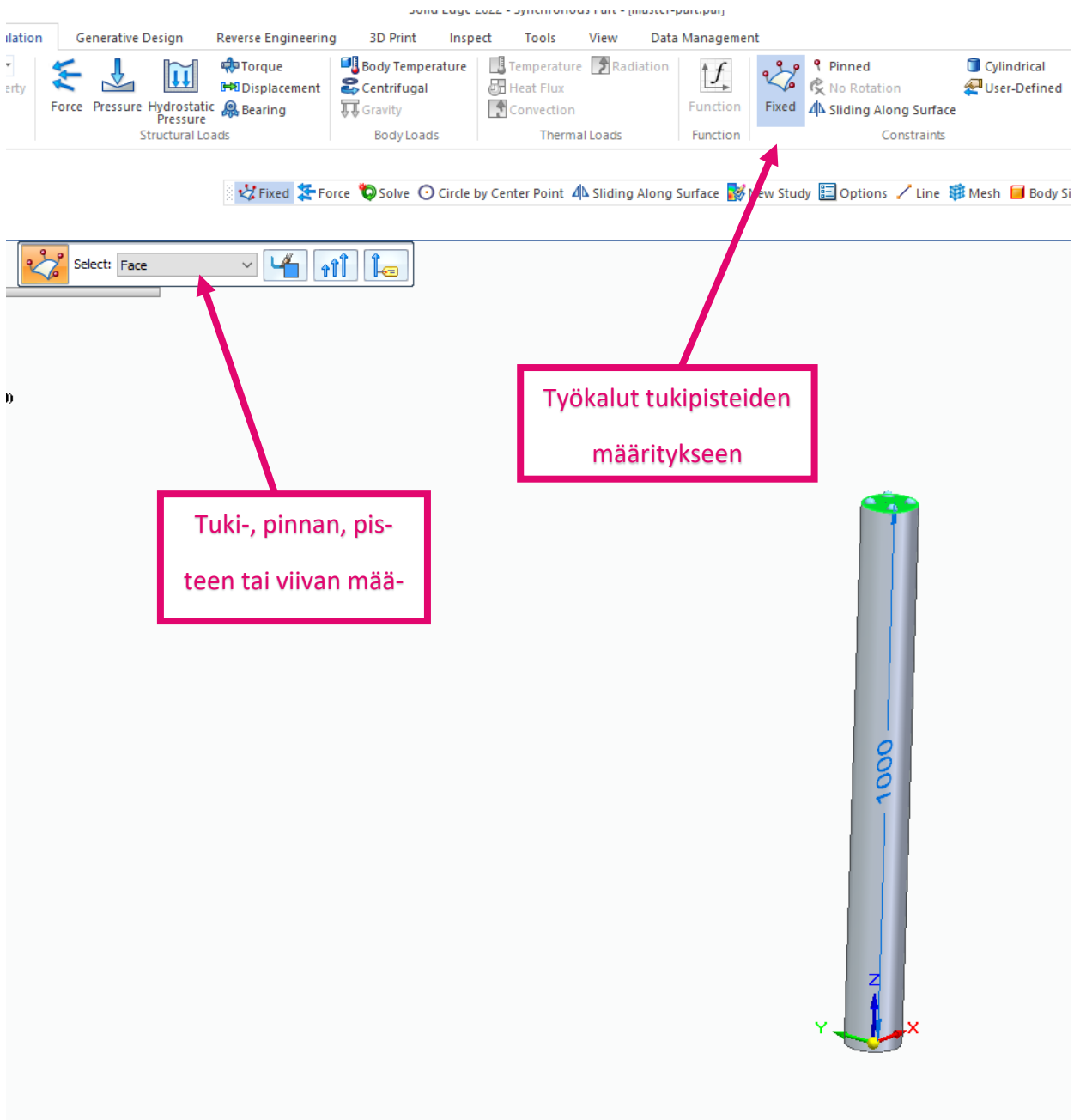


Kuvio 10 Maanvetovoiman kiihtyvyyys (Lindén 2022)

#### 10.4.2 Tukivoimat

Tukipisteitä määriteltessä tulee miettiä ensin todellinen tilanne. On tärkeää, että tuki on mallinnettu juuri sellaisena kuin se todellisuudessa tulee olemaan. Solid edgessä tukea valittaessa valitaan neljän erilaisen tuen väiltä, jotka näkyy kuviossa 11. Fixed tuki on momenttijäykkä 6-arvoinen eli kaikki aksiaaliset suunnat on tuettu sekä kierto jokaisen akselin ympäri on tuettu. Pinned tuki on 3-arvoinen tuki, joka tukee kaikki aksiaaliset suunnat. User-defined tuen avulla voidaan vapausasteet valita 1-3 arvoisen tuen välillä, jossa voi itse määrittää mitkä aksiaaliset suunnat on tuettu. Näiden lisäksi on sylinterituki, jota voidaan käyttää esim. Nivelappiliitoksissa. Tukea valittaessa on määriteltävä kantaako tuki reunasta, pinnasta vai pisteestä kohdassa kaksi vetolaatikosta, jonka

jälkeen se klikataan mallista.

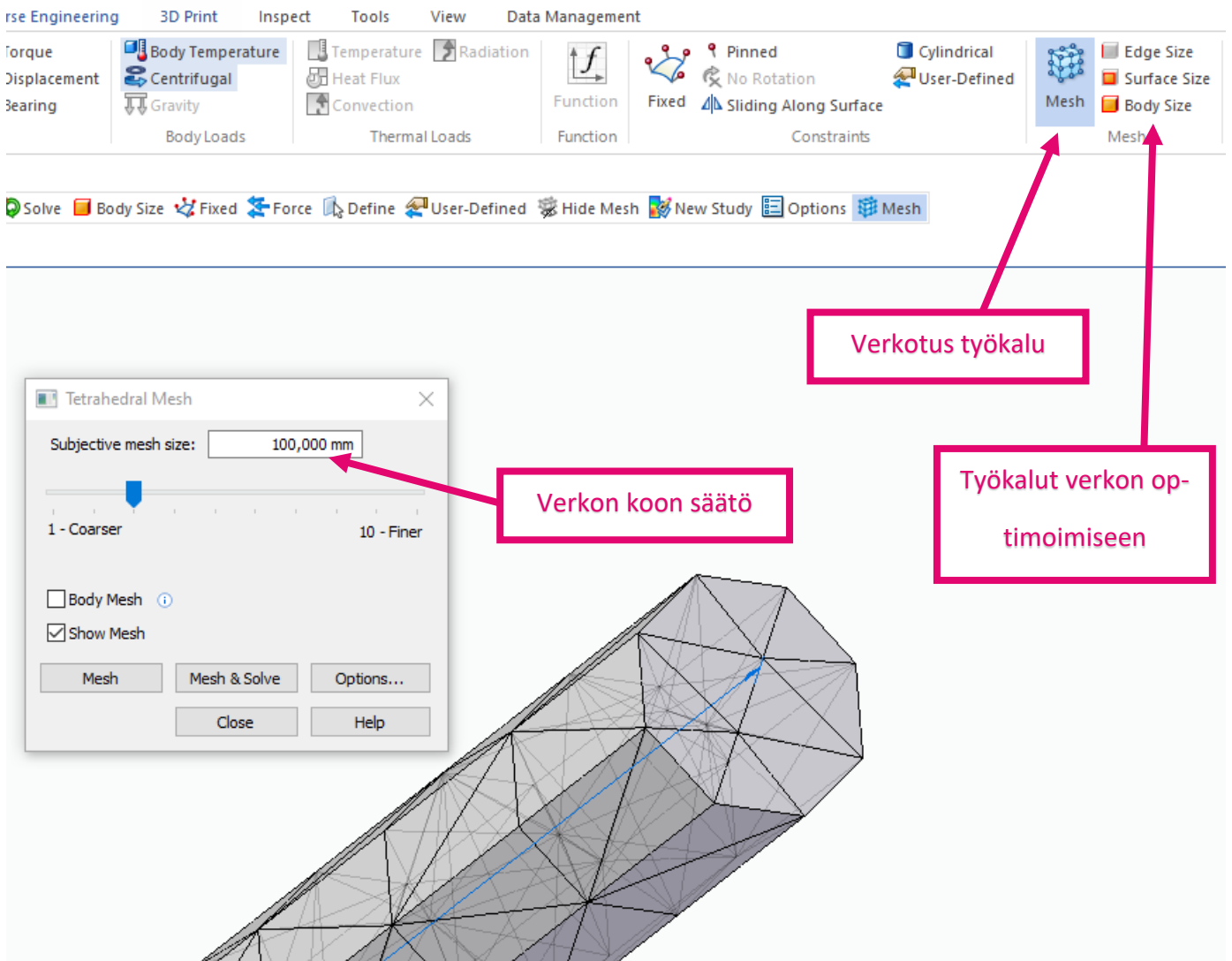


Kuvio 11. Tuen määrittäminen (Lindén 2022)

### 10.4.3 Verkotus

Verkotus tapahtuu mesh ikkunan kautta, josta päästään määrittelemään solmujen etäisyys Mesh ikkuna esitetään kuviossa 12. Ohjelma tarjoaa aina rakenteen koon mukaan optimoituja verkkoko- koja, mutta käyttäjä itse voi määrittää verkon koon halutun laskentatarkkuuden mukaisesti. Käyt- täjä voi myös muokata verkkoa erikokoiseksi rakenteen eri osissa määrittelemällä tietyllä pinnalla

verkko koon työkalulla surface size tai määrittämällä reunan läheisyydessä verkko koon työkalulla edge size.



Kuvio 12. Rakenteen verkotus. (Lindén 2022)

## 11 Rakenneanalyysit

### 11.1 Vedetty pyörötanko

Seuraavassa esimerkissä käytettiin teoreettista tilannetta, jossa yläpäätästä kolmenarvoisella tuella (pinned) kiinnitettyyn pyörötankoon kohdistuu vetoa 2356kN alaspäin. Materiaali on standardin EN 10025-2 mukainen pyörötanko  $\varnothing 100$  teräslaji S355.

Alla olevasta taulukosta voidaan huomata kuinka verkotuksen tiheys vaikuttaa lopputuloksen tarkkuuteen. Teoreettinen arvo saavutettiin vasta toisella iterointi kierroksella, kun verkon tiheydeksi asetettiin 5 millimetriä. Voidaankin todeta, että on tärkeää olla perillä tarkasteltavien suureiden suuruusluokasta jo lähtiessä laskemaan, jotta tuloksia voidaan tulkita kriittisesti. Tuloksien eroavaisuus voi olla kumpaankin suuntaan, joten laskennoissa on oltava tarkkana. Arvot on tarkistettu sovelluksessa valitsemalla halutun pinnan elementit, jotka olivat tässä tapauksessa tangon alapinnan elementtejä. Lukemalla valittujen elementtien jännitykset ja siirtymät huomataan, että molemmissa tapauksissa jännitykset ja siirtymät olivat yhtä suuret kaikissa valituissa elementeissä rakenneanalyysi kohtaisesti. Vertailu laskennat selviävät alla olevista taulukoista.

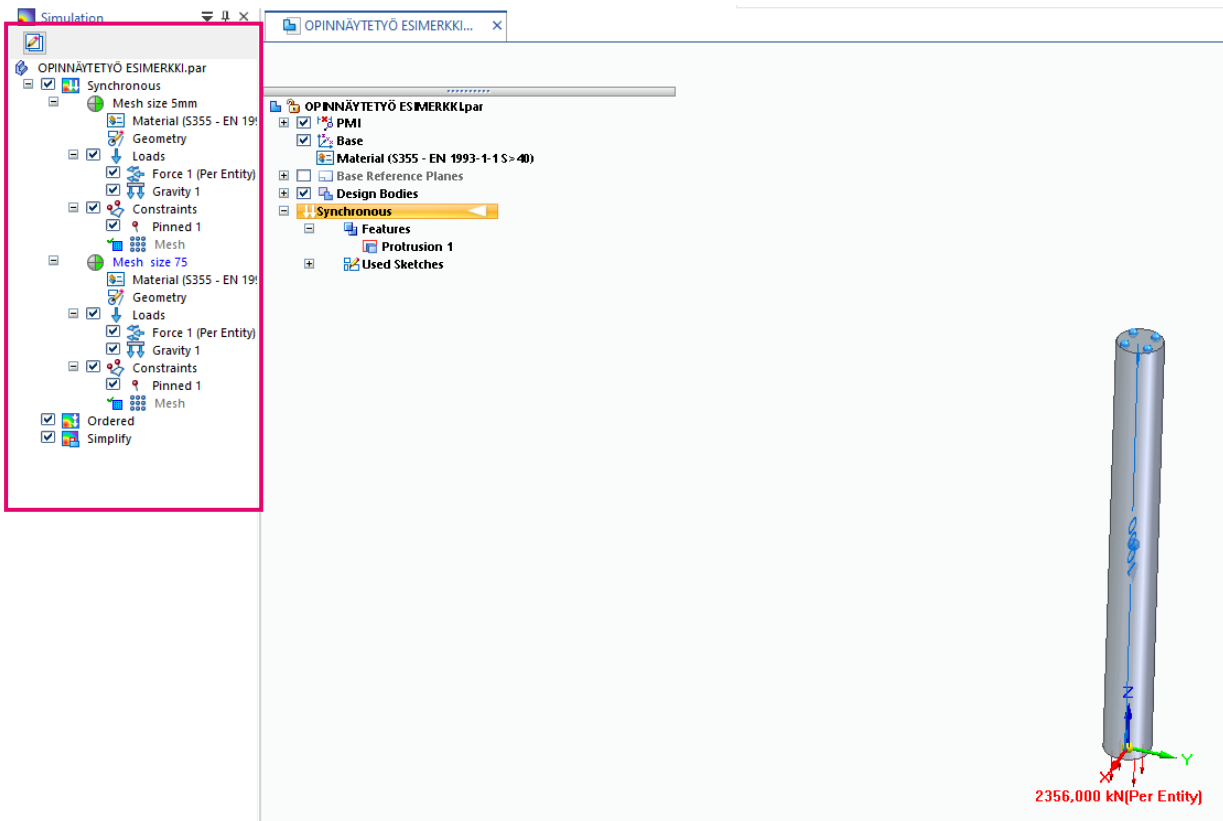
Max venymän määrittäminen käsin laskennalla Ø100 Tangolle kuormituksella 2356kN		
$\Delta L =$	$(F \cdot L_0) / (E \cdot A)$	(mm)
F=	2356000	N
L <sub>0</sub>	1000	mm
E	210000	N/mm <sup>2</sup>
$A = \pi \cdot 50^2$	7854,0	mm <sup>2</sup>
<b><math>\Delta L =</math></b>	<b>1,43</b>	<b>mm</b>

Vetojännityksen määrittäminen käsin laskennalla Ø100 Tangolle kuormituksella 2356kN		
$\sigma =$	F/A	(N/mm <sup>2</sup> )
F=	2356000	N
$A = \pi \cdot 50^2$	7854,0	mm <sup>2</sup>
<b><math>\sigma =</math></b>	<b>299,98</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

	Käsin laskenta	Solid edge FEM (mesh size 75mm)	Solid edge FEM (mesh size 5mm)
<b>Vetojännitys <math>\sigma_{max}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	299,98	333,00	300,00
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\sigma_{max}</math>) %</b>	-	10 %	0 %
<b>Pituuden muutos <math>\Delta L</math> (mm)</b>	1,43	1,58	1,43
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\Delta L</math>) %</b>	-	10 %	0 %

Ohjelmistossa voi tehdä rajattomasti rakenneanalyysyjä yhdelle rakenteelle niin, että aina vanha analyysi jää muistiin. Jokainen analyysiin tehtävä asetus, voima ja tukipiste tulee kirjastopiirteenä simulaation mallin kirjastopuuhun. Kirjastopuusta annettuja arvoja voidaan muokata helposti ja selkeästi. Tässä esimerkki tapauksessa tein verkotuksen ensiksi harvalla verkotuksella, jolloin las-

kenta on nopeaa ja näen, että mallin on rakennettu oikein sekä tarkasteltavat arvot ovat suuruusluokaltaan oikein. Tämän jälkeen kopion analyysin uudeksi, muokkasin sen arvoja ja tein laskennan uudelle rakenneanalyysille. Näin ollen molemmista jää dokumentti. Kuviossa 13 esitetään, kuinka rakenneanalyysin rakenne näkyy kirjastopuussa.



Kuvio 13. Useampi analyysi yhdelle rakenteelle (Lindén, 2022)

### 11.1.1 Tuloksien analysointi

Tarkastelua varten tuloksien tarkastelu on tehty poikkileikkaus alapäässä, jossa kuormitus sijaitsee. Materiaalimallin ollessa kimmo-plastinen, lineaarisesti myötölujeneva sekä kun materiaali ottaa huomioon jännitysvenymän voidaan todeta, että jännitys ei voi olla, joka paikassa tasainen kuten insinööri tieteseen perustuvat käsin laskenta kaavat olettavat.

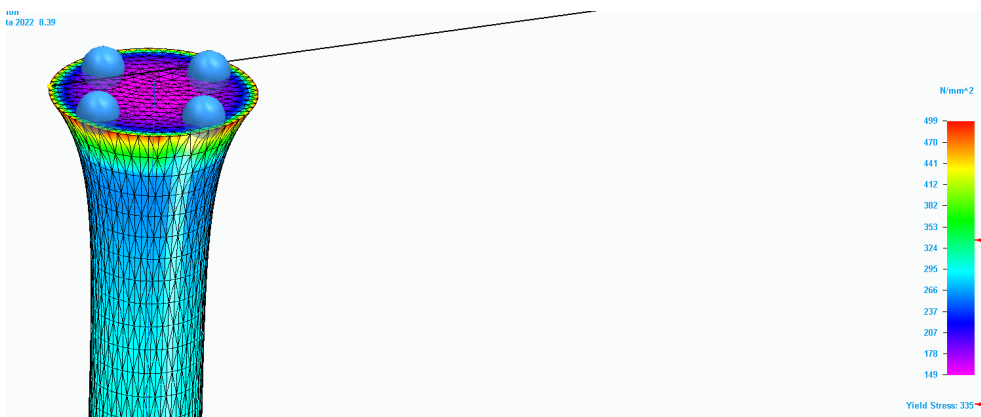
### 11.1.2 Visuaalinen tarkistus

Ensimmäisenä voidaan visuaalisesti tarkistaa, onko jännitykset suuruusluokaltaan sellaisia kuin voisi odottaa. Kuviossa 14 on esitetty kuin rakenneanalyysiä voidaan tarkastella visuaalisesti.



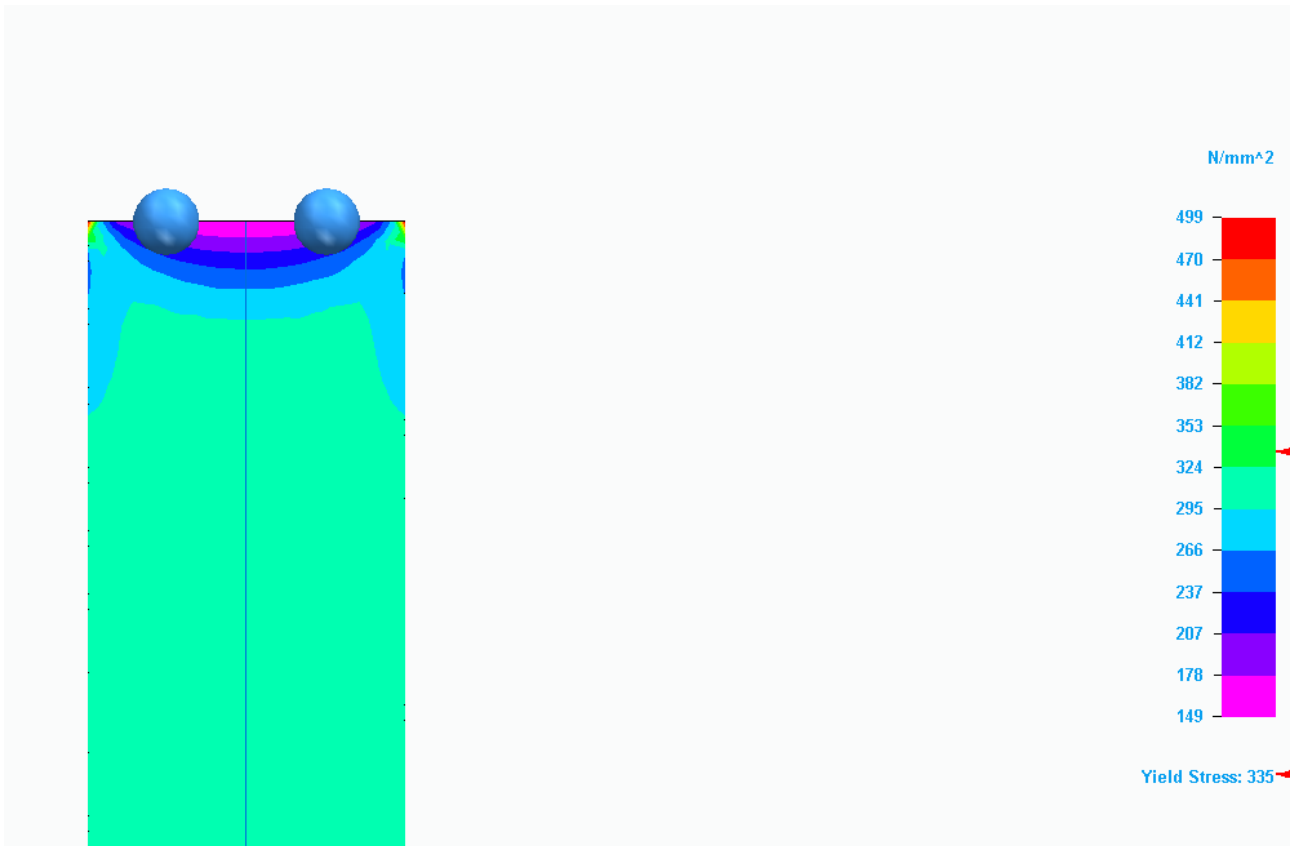
Kuvio 14. Rakenneanalyysin tulokset (Lindén, 2022)

Skaalaamalla siirtymää ja muodonmuutosta, voidaan nähdä, käyttäytyykö rakenne kuten pitäisi. Voidaankin huomata, että rakenteessa jännitysten jakaantumisella ja muodonmuutoksella on yhteys. Rakenteen toiminnan näkee myös hyvin animoimalla liikkeen. Kuviossa 15 näytetään kuinka kiinnityspäässä jännitykset kasvaa kohti reunoja.



Kuvio 15. Jännitysvienymän vaikutus jännitykseen. Reaktiota skaalattu x100 (Lindén, 2022)

Rakennetta voidaan myös leikata ja jännityksiä voidaan tarkastella rakenteen sisällä visuaalisesti sekä numeerisesti. Tässä esimerkki tapauksessa huomataan kuin jännitys ei jakaannu tasaisesti rakenteen tukipäässä. Kuviossa 16 on esitetty leikattu rakenne, josta näkee jännitysjauman vedetyn pyörötangon kiinnityspäässä.

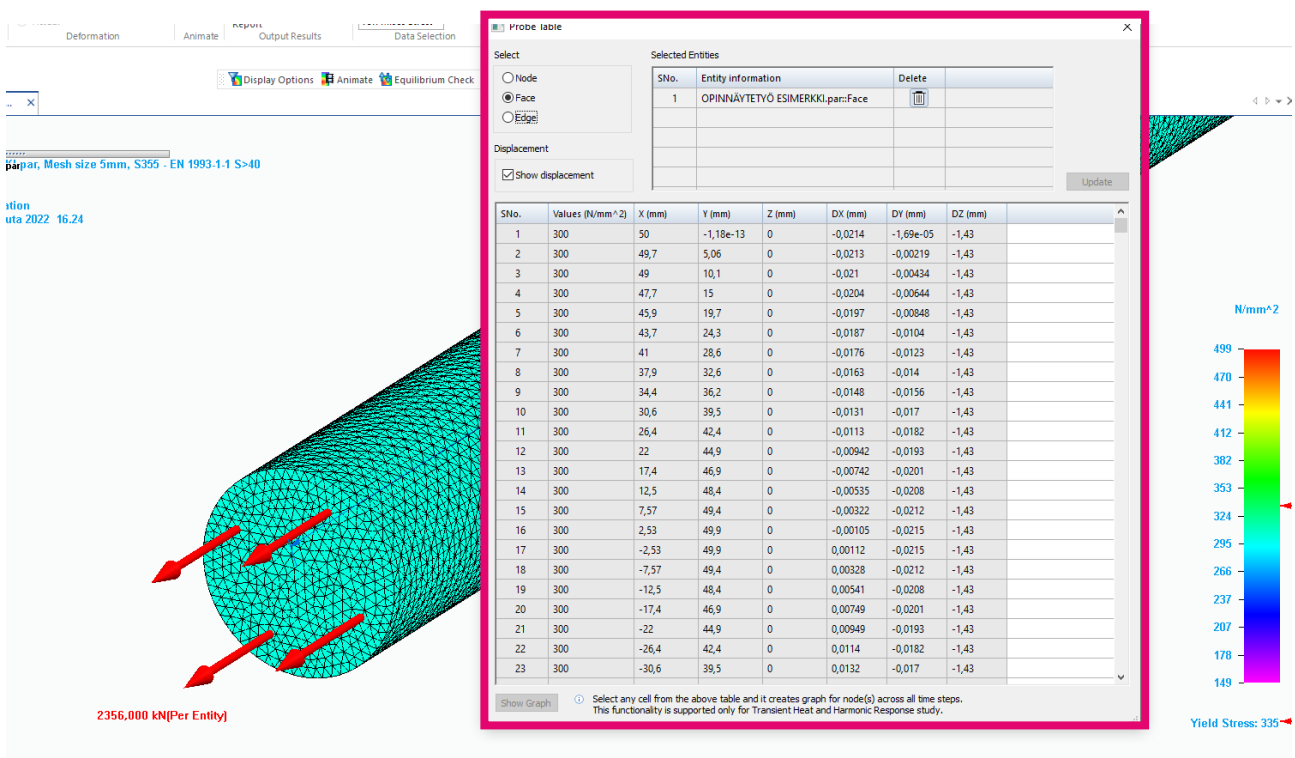


Kuvio 16. Leikattu rakenne. (Lindén, 2022)

### 11.1.3 Numeerinen tarkistus

Rakenne analyysissä voidaan tarkistaa piste kerrallaan solmuuureiden jännitys arvoja tai voidaan valita kaikki pinnalla olevat solmut tai kaikki viivaan liittyvät solmut. Tässä esimerkissä solmuja tarkastellaan tangon alapinnassa, jossa oli 1447 kpl solmuja. Kaikissa solmuissa jännitys oli 300,0 N/mm<sup>2</sup> ja siirtymä DZ kuormituksen suunnassa 1,43 mm.

Numeerisia arvoja voidaan tarkastella myös hakemalla rakenteessa vallitsevia pienimpiä ja suurimpia arvoja kustakin suureesta. Kuviossa 17 on esitetty numeeristen arvojen tarkastelua.



Kuvio 17. Numeerinen tarkastelu (Lindén, 2022)

## 11.2 Taivutettu kaksiaukkoinen palkki

Seuraavassa esimerkissä tarkasteltiin tilannetta, jossa vapaasti tuettua yksiaukkoista palkkia HEB240 355, L=3000 kuormitettiin tasaisella kuormituksella 150N/mm. Toisen päädyn tuki oli määritetty pinned eli kaikki aksiaaliset kolmen suuntaa on tuettu, kun taas toinen pää määriteltiin user defined tuella niin, että se tukee ainoastaan ylöspäin sallien liikkeen muissa aksiaalisissa suunnissa. Verkotuksen koko oli 10 millimetriä.

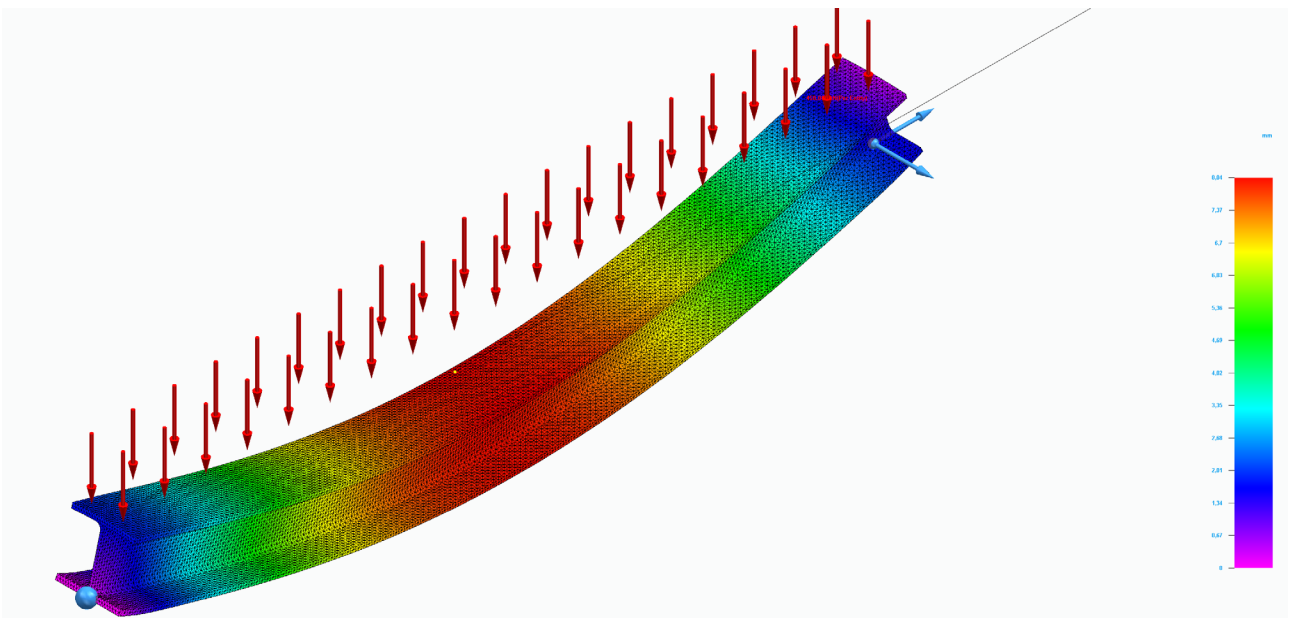
Tässä esimerkissä vertailtiin siirtymä- ja jännityshuippuja palkin jännevälin keskellä. Alla olevissa taulukoissa on esitetty käsin laskennan sekä Solid edge FEM-ohjelman tulokset sekä tuloksien vertailu.

<b>Max taipuman sekä Max taivutusjännityksen määrittäminen palkille HEB 240 L=3000 S355. Palkki on tasaisesti kuormitettu 150N/mm ja rakennemalliltaan vapaasti päistään tuettu</b>		
L=	3000,0	mm
Tasainen kuormitus q=	150,0	N/mm
Kimmokerroin E=	210000,0	n/mm <sup>2</sup>
Jäyhyysmomentti I=	112600000,0	mm <sup>4</sup>
Plastinen taivutusvastus Wpl	938000,0	mm <sup>3</sup>
Max momentti $M_{max}=(qL^2)/8$	168750000,0	Nmm
<b>Max taipuma <math>\Delta f= (5*q*L^4)/(384*E*I)</math></b>	<b>6,7</b>	<b>mm</b>
<b>Taivutusjännitys palkin keskellä <math>\sigma_t= M_{max}/W_{pl}</math></b>	<b>179,9</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

	<b>Käsin laskenta</b>	<b>Solid edge FEM (mesh size 10mm)</b>
<b>Taivutusjännitys palkin keskellä <math>\sigma_{tmax}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	179,90	182,00
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\sigma_{tmax}</math>) %</b>	-	1 %
<b>Max taipuma <math>\Delta f</math> (mm)</b>	6,69	8,04
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\Delta L</math>) %</b>	-	17 %

### 11.2.1 Tuloksien analysointi siirtymä huippu

Tarkasteltaessa siirtymän huippuja huomataan, että käsin laskennan ja FEM laskennan välillä on pientä eroa 17%/1,35 millimetriä. Käsin- ja FEM-laskennan ero selittyy osittain sillä, että kuormitus on jaettu FEM-analyysissä koko laipalle ja FEM laskenta ottaa huomioon myös laipan siirtymän kun taas käsin laskennassa lasketaan ainoastaan profiilin taipumaa. Alalaipasta tarkastettuna suurin siirtymä on 7,91 millimetriä, josta voidaan laskea, että laippa taipui kuormituksesta 0,13 millimetriä. Lopputuloksena 7,91 millimetrin arvo eroaa kuitenkin käsin laskennasta, joten siirtymä tarkastelussa on siis pientä eroavaisuutta käsin laskennan ja FEM-laskennan välillä. Laskennat ovat suuruusluokaltaan kuitenkin samansuuruiset sekä kuten kuviosta 18 voidaan huomata, niin taipuma on lineaarinen kuten todellisuudessaakin. Voidaan siis todeta, että FEM laskee vapaasti tuetun yksiaukkoisen palkin siirtymät oikein.



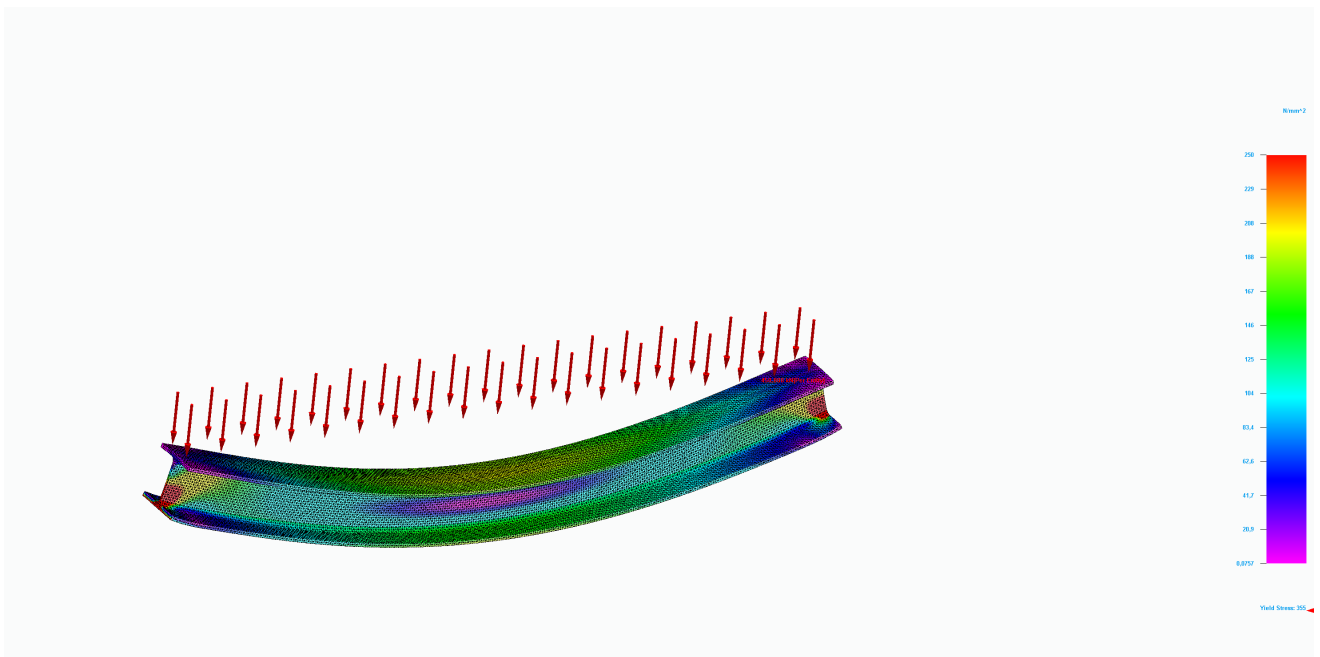
Kuvio 18. Vapaasti tuettu 1-aukkoinen palkki. Siirtymä. (Lindén, 2022)

### 11.2.2 Tuloksien analysointi taivutusjännitys

Vertailussa tarkasteltiin taivutusjännitystä palkin keskellä siksi, että se on vertailtavissa käsin laskentaan, koska leikkausjännitystä ei esiinny palkin keskellä.

Palkin jännitys tarkastettiin numeerisina arvoina laipan alapinnasta. Jännityshuippu oli  $182\text{N/mm}^2$ , jolloin käsin- ja FEM-laskennan eroksi muodostui 1%. Eroavaisuus on hyvin marginaalinen.

Kuviosta 19 voidaan myös huomata, että jännitys jakauma on todellisuuden mukainen, jossa jännitysvälin keskellä palkin neutraaliakselilla jännitys on nolla ja vedetty- sekä puristettu laippa ovat jännitykseltään samansuuruiset. FEM laskee siis oikein jännitykset, vapaasti tuetulle yksiaukkoiselle palkille.



Kuvio 19. Vapaasti tuettu 1-aukkoinen palkki. Jännitykset. (Lindén, 2022)

### 11.3 Pilari momenttijäykällä liitoksella

Seuraavassa esimerkissä tarkasteltiin tilannetta, jossa alapäästään momenttijäykällä tuella (fixed) kiinnitettyä putkipalkkia PP150x150x5 S355 L=2500, kuormitettiin tasaisella kuormituksella 10N/mm. Esimerkissä käytettiin verkotuksen tiheytenä 10millimetriä.

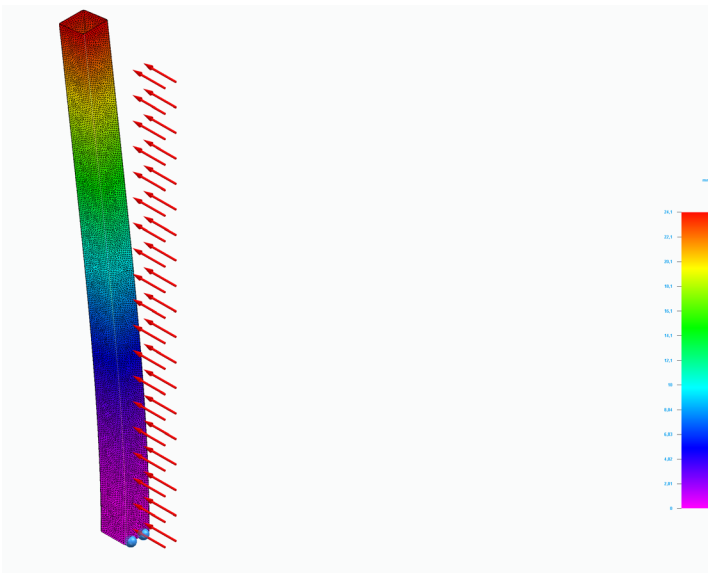
Tässä esimerkissä vertailtiin siirtymähuippuja pilarin yläpäässä sekä jännityshuippuja pilarin yläpäässä. Alla olevissa taulukoissa on esitetty käsin laskennan sekä Solid edge FEM-ohjelman tulokset sekä tuloksien vertailu.

<b>Max taipuman sekä Max taivutusjännityksen määrittäminen PP150x150x5 L=2500 S355. Palkki on tasaisesti kuormitettu 10N/mm ja kiinnitetty momenttijäykästi alapäästä.</b>		
Rakennemallin jänneväli L=	2500,0	mm
Tasainen kuormitus q=	10,0	N/mm
Kimmokerroin E=	210000,0	N/mm <sup>2</sup>
Jäyhyysmomentti I=	9820000,0	mm <sup>4</sup>
Plastinen taivutusvastus Wpl	153000,0	mm <sup>3</sup>
Max momentti $M_{max} = -(qL^2)/2$	-31250000,0	Nmm
<b>Max taipuma <math>\Delta L = (q \cdot L^4)/(8 \cdot E \cdot I)</math></b>	<b>23,7</b>	<b>mm</b>
<b>Taivutusjännitys <math>\sigma = M_{max}/W_{pl}</math></b>	<b>-204,2</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

	<b>Käsin laskenta</b>	<b>Solid edge FEM (mesh size 10mm)</b>
<b>Taivutusjännitys <math>\sigma_{max}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	-204,25	-235,80
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\sigma_{max}</math>) %</b>	-	13 %
<b>Max taipuma <math>\Delta f</math> (mm)</b>	23,68	24,11
<b>Ero käsin laskennan ja Solid edge FEM välillä (<math>\Delta L</math>) %</b>	-	2 %

### 11.3.1 Tuloksien analysointi siirtymä huippu

Tarkasteltaessa siirtymän huippuja huomataan, että eroavaisuus on hyvin marginaalinen 2% / 0,43mm käsin laskennan ja FEM laskennan välillä. Kuviosta 20 voidaan huomata, että siirtymä on lineaarisesti kasvava kuten rakenne todellisuudessaakin käyttäytyy. Voidaankin siis todeta, että Solid edge laskee rakenteen siirtymät oikein, yhdestä päästä momenttijäykästi kiinnitetylle palkille.

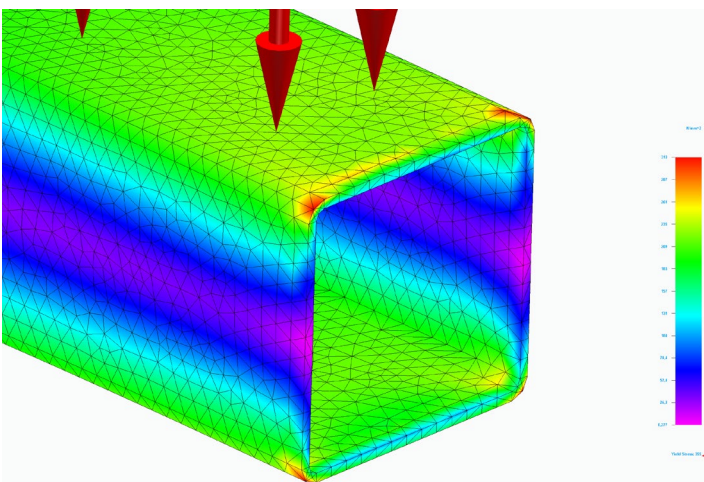


Kuvio 20. Momentti jäykästi tuettu pilari. Siirtymä huippu. (Lindén, 2022)

### 11.3.2 Tuloksien analysointi taivutusjännitys

Tarkasteltaessa taivutusjännitystä nähdään pientä eroavaisuutta käsin laskennan sekä Solid edge FEM välillä. Pilarin kiinnityspäässä huomataan pistemäisiä jännityshuippuja nurkkienpyöriäyksien alueella, joissa todellinen jännityshuippu onkin 313N/mm<sup>2</sup>. Tätä voidaan pitää todennäköisenä käyttäytymisenä sillä jännityshuiput kasaantuvat nurkka-alueille.

Todellinen taivutus jännityksen vertailu arvo FEM:istä katsottiin valitsemalla vedetyn- ja puristetun laipan pinta, josta luettiin solmusuureiden arvot. Arvoista voitiin katsoa, mitkä ovat nurkka-alueen arvoja ja mitkä ovat varsinaisia laippojen jännityksiä. Huomattiin, että kun ei oteta huomioon nurkka-alueen jännityksiä niin laippojen jännityshuiput ovat  $235,80 \text{ n/mm}^2$ . Tässä FEM:in antama tulos on +13% suurempi kuin käsin laskennan. Eroavaisuus selittyy sillä, että käsin laskenta olettaa jännityksen olevan tasaista eikä ota huomioon osan todellista geometriaa vaan ainoastaan taivutusvastuksen suhteen suurimpaan taivutusmomenttiin. FEM:issä jännitykset jakaantuvat mallinnetun geometrian mukaan, jolloin jännitykset solmusuureiden välillä eivät ole täysin samansuuruisia ja esimerkiksi tässä tapauksessa jännitykset kasvavat laipan keskeltä kohti nurkka-aluetta. Voidaan kuitenkin todeta, että laskennan tulokset ovat suuruusluokaltaan samansuuruisia. Kuviosta 21 voidaan myös huomata, että jännitysjaakauma on todellisuuden mukainen, jossa palkin neutraaliakselilla jännitys on nolla ja vedetty- sekä puristettu laippa ovat jännitykseltään samansuuruiset. FEM laskee siis oikein jännitykset, yhdestä päästä momenttijäykästi kiinnitetylle palkille.



Kuvio 21. Momentti jäykästi tuettu pilari. Jännitys huippu. (Lindén, 2022)

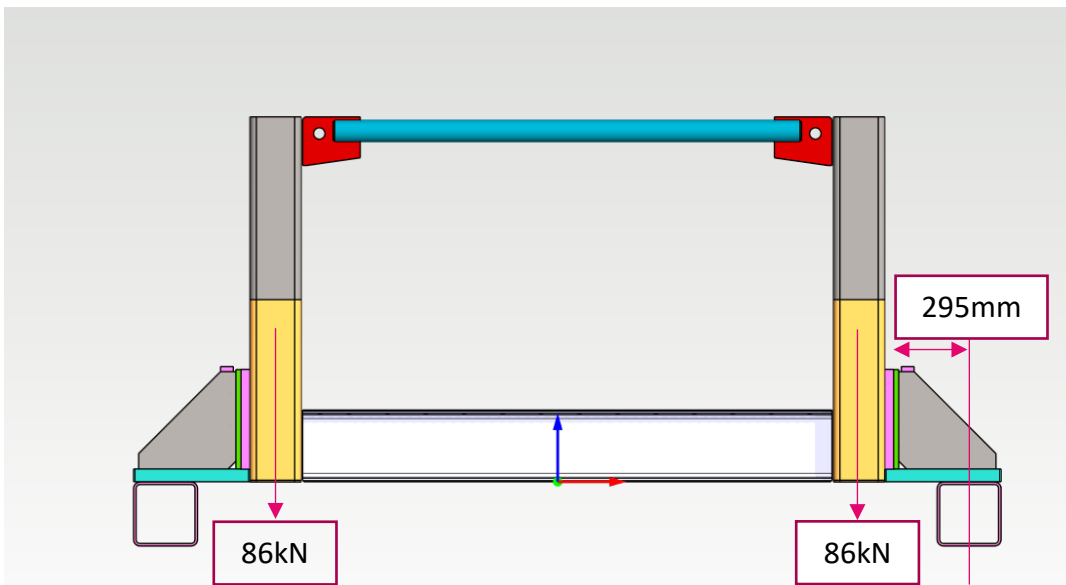
## 11.4 Konsoli

### 11.4.1 Konsoli rakenne

Seuraavassa esimerkissä esitellään rakenneanalyysi konsoleista, jotka toteutettiin vuoden 2022 keväällä. Rakenteen käyttötarkoituksena oli saada levennettyä STEKA Oy:llä valmistettujen ekonomaiserien pukitusleveyttä. Yhden ekonomaiserin massa oli n.30 000 kg. Ekonomaiserien rungon leveys oli noin 2400 mm kun taas kapeimmat lavetit ovat noin 2500 mm. Konsolin rakenteen

monimuotoisuuden vuoksi laskenta suoritettiin siten, että rakennemalli laskettiin FEM:issä sekä kriittiset kohdat tarkasteltiin myös käsin laskennalla. Tässä esimerkissä ei käydä koko laskentaa läpi vaan katsotaan rakennemallin käyttäytyminen ja tehdään yksinkertaiset vertailut. Kuviossa 22 esitetään pilari-palkki-konsoli rakenne. Rakenteessa on nurkkapilarien välissä UNP280 palkki. UNP280 palkki tuo kuormat pilareilla, jotka siirtävät kuormat konsoleille. UNP280 toimii myös puristettuna sauvana pilarien välissä estäen niiden kokoon painumisen. Tässä esimerkissä tarkastellaan kuitenkin ainoastaan konsoleita. Pilarien kylkeen on hitsattu vahvuudeltaan 35mm vahvat teräslevyt, joihin on kierteistetty 3kpl M30 pulttien reikiä.

Rakenne toimi siten, että pilariin hitsatun lapun alapinta on kosketuksessa konsolin laipan yläpinnan kanssa. Kuormituksen ja tuen välisestä etäisyydestä aiheutuu momenttia. Momenttitasapaino saavutetaan siten, että konsoleiden kolmiotuet vievät voimia puristuksena pilareille ja pulttiliitokset ottavat vastaan voimista aiheutuvan vetorasituksen. Käsin laskenta suoritettiin teoriassa siten, että koko epäkeskisyydestä aiheutuva momentti mitoitettiin pulttiliitoksille. Tässä esimerkissä kuitenkin tarkistellaan FEM:in oikeellisuutta tarkastelemalla rakenteen tasapainoehdot.



Kuvio 22. Rungon ja konsoleiden rakenne. (Lindén, 2022)

Kuviossa 23 esitetään toteutettu rakenne. Valokuvassa rakenne on peitetty tiivistyslevyillä, joten palkki-pilari-konsoli rakenne ei ilmene valokuvasta täysin.



Kuvio 23. Valokuva ekonomaisista konsoleiden päällä. (Lindén, 2022)

Kuviossa 24 on valokuva toteutetusta konsolista.



Kuvio 24. Valokuva konsolista. (Lindén, 2022)

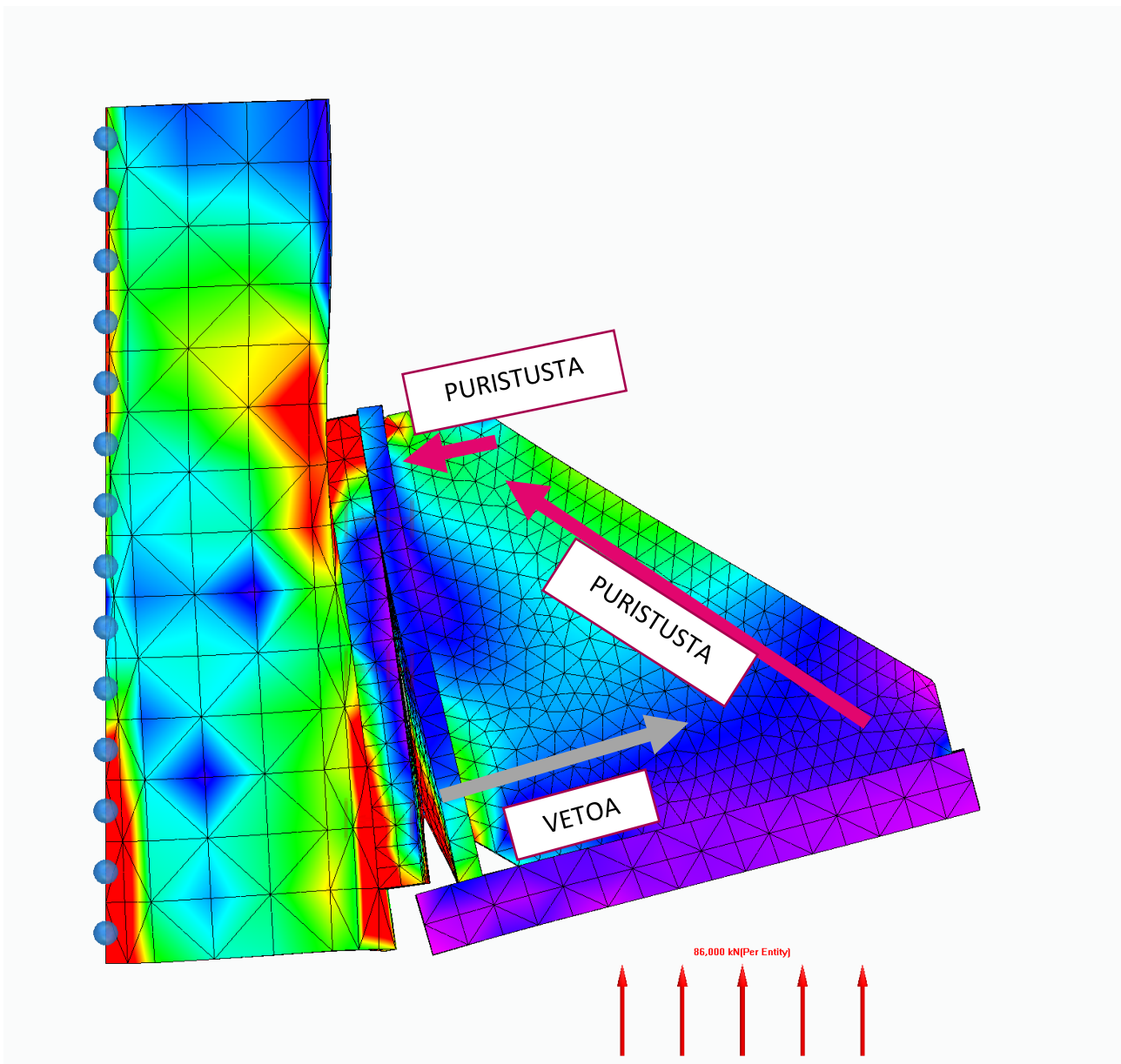
Kuviossa 25 on valokuva toteutetusta konsolista. Valokuvasta ilmenee konsolin rakenne, joka koostuu laipasta sekä kahdesta vahvike kolmiosta. Konsoli on pultattu pilariin hitsattuun vahvuudeltaan 35 mm vahvaan levyyn. Laipan vahvuus on 50mm ja kolmioiden vahvuus on 20mm. Konsolin päällä oleva levy on vain konsolin nostoa varten.



Kuvio 25. Valokuva konsolista sivu suunnasta. (Lindén, 2022)

### 11.4.2 Konsolin tarkastelu

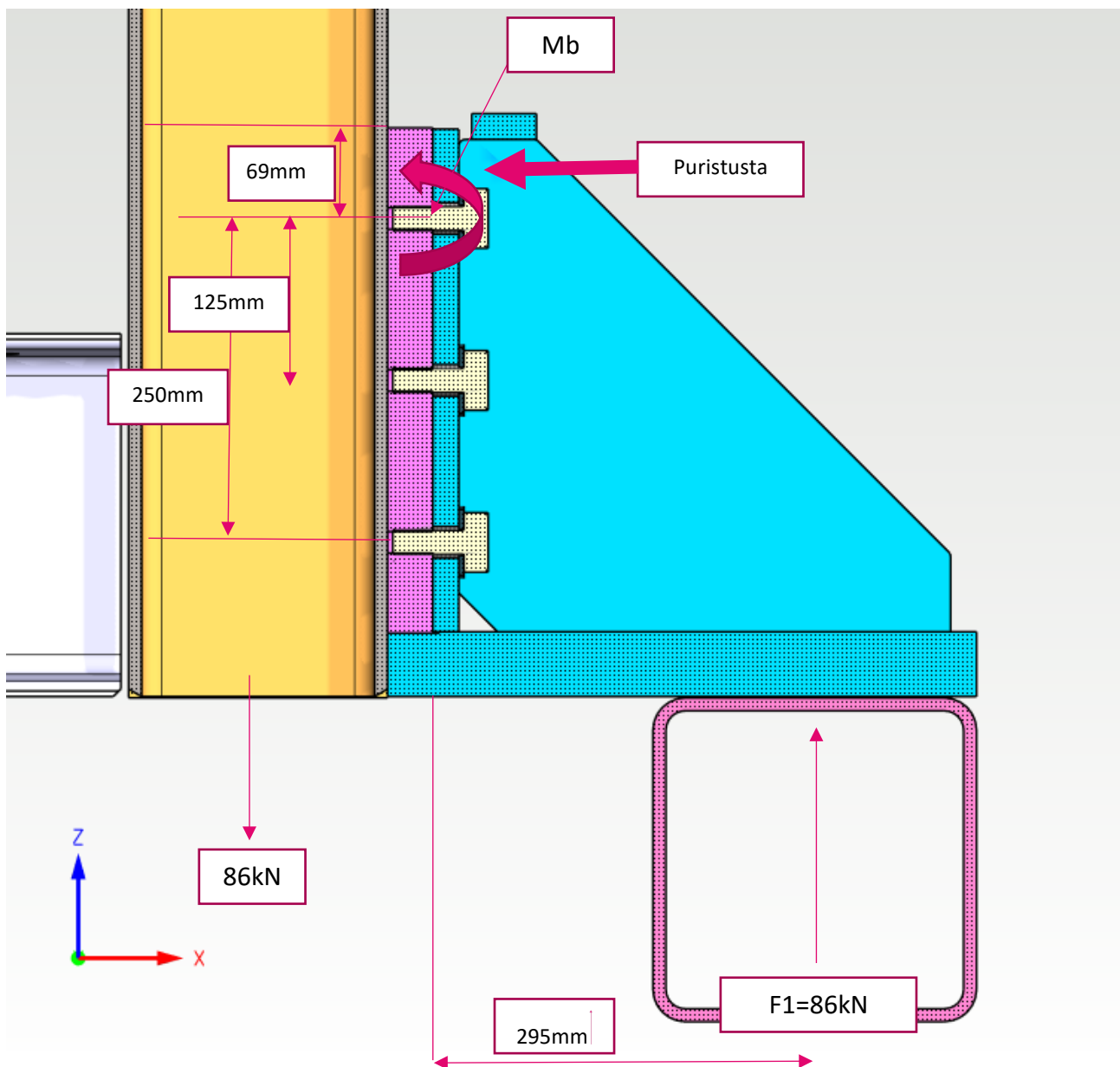
Kuviosta 26 nähdään visuaalisesti miten rakenne käyttäytyy. Rakenteen konsolit siirtävät kolmitukien kautta voimia puristuksena pilarille ja pultit rasittuvat vedolle. Punaisella alueella jännitykset ovat suurimmat ja violetillä alueella pienimmät. Rakenteen muodonmuutos on 10-kertaistettu kuviossa 26.



Kuvio 26. FEM-malli konsolin käyttäytyminen. (Lindén, 2022)

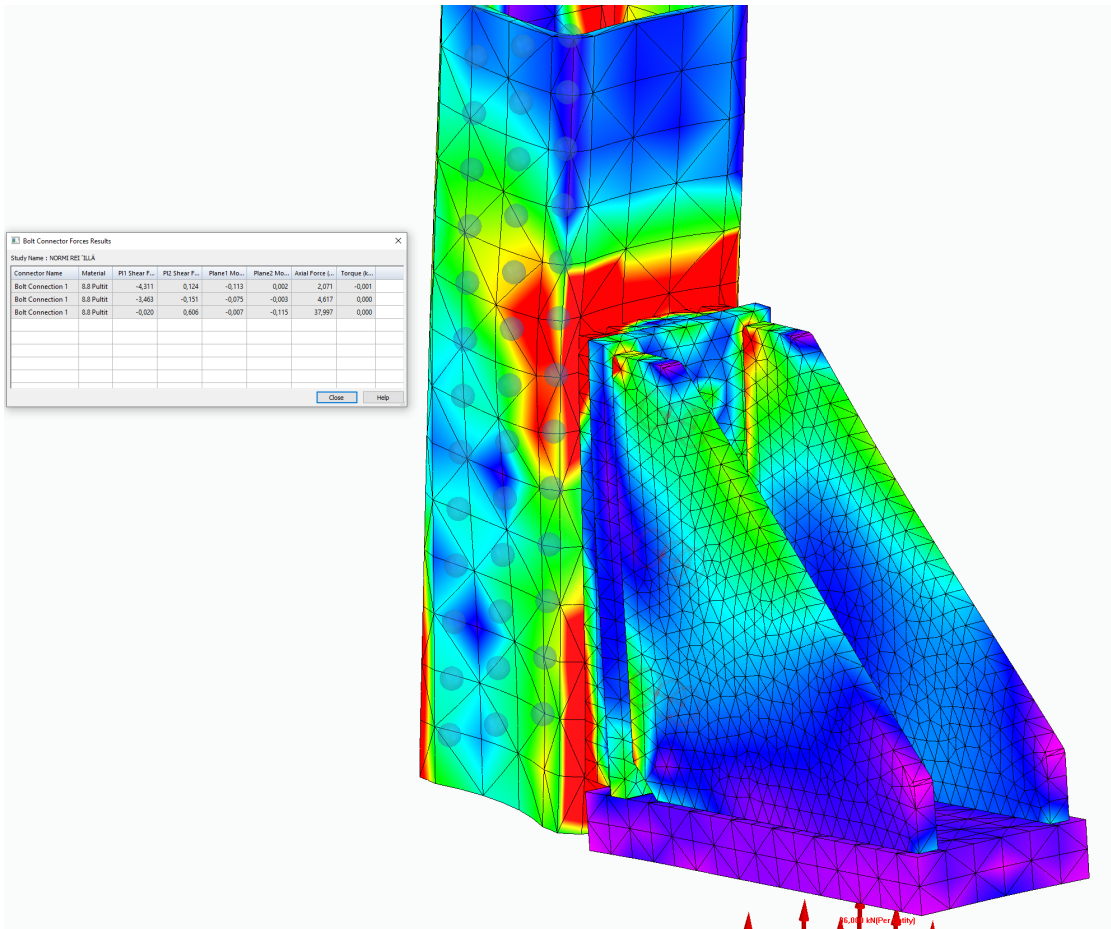
### 11.4.3 Momentti tasapainon tarkastelu

Momentti piste muodostuu ylimmän pulttirivin kohdalle. Kuvion 27 mukaisesti tasapainoehto on toteuduttava momenttipisteen suhteen. Seuraavaksi esitetään esimerkki, jossa lasketaan momentti tasapainon vertailu laskelma FEM laskelmiin.



Kuvio 27. Konsoli tasapaino ehto. (Lindén, 2022)

FEM:istä saadaan luettua pulttivoimat, jotka esitetään kuviossa 28. Tässä tapauksessa alimman rivin aksiaalinen pulttivoima oli 37,98kN ja keskimmäisen rivin aksiaalinen pulttivoima 4,6kN.



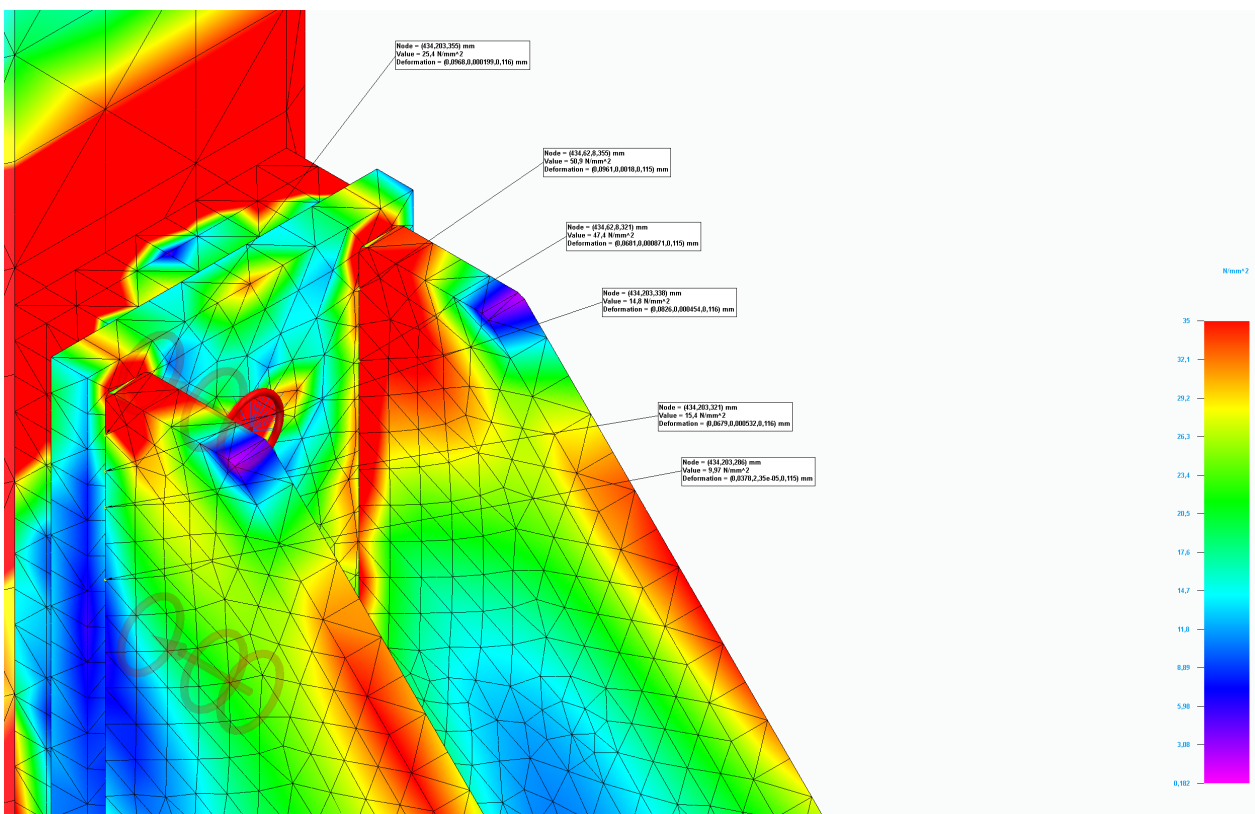
Kuvio 28. FEM-laskelmat. Pulttivoimat. (Lindén, 2022)

Absoluuttisia arvoja laskiessa voidaan pulttivoimien avulla ratkaista tarvittava puristusvoima, jotta rakenne pysyy tasapainossa. Alla olevassa taulukossa on esitetty laskelmat, mikä muodostuisi puristusjännitykseksi FEM:in antamien pulttivoimien seurauksena.

<b>Pulttivoimat</b>			
	<b>Aksiaalinen voima</b>	<b>Etäisyys (m)</b>	<b>kNm</b>
Keskimmäinen pulttirivi	-4,6	0,125	-0,6
Alempi pulttirivi	-38,0	0,25	-9,5
<b>Pulttivoimien yhteis tukimomentti M1</b>			<b>-10,1 kNm</b>
<b>Pulttivoimien resultantin avulla voidaan johtaa vaadittava puristusvoima</b>			
<b>Ulkaisen voiman aiheuttama momentti <math>M2=86\text{kN}\cdot 0,295\text{m} =</math></b>			
			25,4 kNm
<b>Voiman aiheuttaman momentin ja pulttien tukimomentin summa <math>M3=M2+M1</math></b>			
			15,3 kNm
<b>Voiman aiheuttaman momentin ja pulttien tukimomentin summasta voidaan johtaa puristusvoima F2, joka pitää ottaa vastaan kolmiotukien välittämällä puristusvoimalla <math>F2=M3/0,295\text{m}</math></b>			
			51,8 kN
<b>Tuelta tulevan voiman ollessa 51,8kN lopullinen puristusvoima <math>F_{mit}=F2/(\sin 45)</math></b>			
			60,9 kN
<b>Puristusvoima <math>F_{mit}=F2/(\sin 45)</math></b>			
			60926,8 N
<b>Puristetun alueen pinta-ala <math>A= 20\text{mm}\cdot 69\text{mm}\cdot 2=</math></b>			
			2760,0 mm <sup>2</sup>
<b>Jännitys puritusalueella voidaan nyt laskea <math>\sigma=F_{mit}/A</math></b>			
			<b>22,1 N/mm<sup>2</sup></b>

Käsin laskennan tuloksena voidaan todeta, että puristusvoiman tulisi olla noin 22 N/mm<sup>2</sup> puristulla alueella ylimmän pulttirivin yläpuolella. Kuviossa 29 rakenteen jännitykset on skaalattu siten, että kaikki yli 35 N/mm<sup>2</sup> jännitykset ovat punaisia. Lisäksi rakenteesta on otettu numeerisia arvoja solmusuureiden kohdalta, joista näkee puristusalueella jännityksen olevan 10-50 N/mm<sup>2</sup>. Tuloksena jännitykset ovat oikeansuuruisia. Todettakaan myös, että jännitys ei voikaan tässä tapauksessa olla samansuuruinen, puristusalueen jokaisessa solmukohtassa johtuen puristusvoiman etäisyydestä puristetun alueen eri solmukohtiin.

Lopputuloksena tästä esimerkistä voidaan todeta, että FEM:in laskenta on oikean suuruisen.



Kuvio 29. FEM-malli. Puristusalueen voimat. (Lindén, 2022)

## 12 Rakenneanalyysien dokumentointi

### 12.1 FEM-Raportti

Jokaisesta tehdystä rakenneanalyysistä voidaan luoda raportti suoraan ohjelmiston työkalulla ”Create report”-toiminnolla. Ohjelman luomaan raporttiin kirjoitetaan rakenneanalyysin esittely sekä johtopäätökset. Ohjelmisto luo raporttiin automaattisesti taulukot kyseisen rakenneanalyysin asetuksista, materiaali arvoista, kuormitustiedoista, tukipisteistä sekä elementtiverkon arvoista. Lisäksi ohjelmisto luo taulukot mitattavista suureista kuten siirtymät ja jännitys sekä ottaa näistä analyyseistä kuvat.

### 12.2 Vienti PDM järjestelmään

Ohjelmiston käyttöönoton yhteydessä yritykselle on luotu toimintatapa Solid edge FEM-analyysin sekä niihin liittyvien dokumentin hallintaan. Toimintatapa on luotu käyttäen sekä kehittäen yrityksessä jo olemassa olevia toimintatapoja suunnitelmien ja dokumenttien hallintaan liittyen.

#### 12.2.1 Tapahtuma

Aloittaessa projektia, johon tarvitaan FEM-analyysijä, perustetaan Vertex flow:hun projekti sekä tapahtuma, jotka saavat automaattisesti yksilöivät tunnukset. Tapahtuma ja projekti liitetään toisiinsa PDM:ssä ja tapahtuman alle liitetään kaikki suunnittelun lähtötiedot, sopimukset sekä aiheeseen liittyvät sähköpostikeskustelut. Kaikki dokumentit ovat näin järjestyksessä ja saavat yksilöivän tunnuksen. Näin koko projektin tieto määrä pystytään hallitsemaan hallitusti. Edellä mainitun rakenteen luotua, liitetään FEM-raportti sekä analyysin rakennemalli tapahtumaan, jolloin myös ne saavat automaattisesti täysin yksilöivät tunnukset.

Dokumenttien ollessa lopulliset, tulee dokumentti luokitella PDM järjestelmässä valmiiksi. Luokittelun jälkeen kaikista tiedostoon tehtävistä muutoksista jää jälki, kuka ja milloin muutti tiedostoa.

### 12.3 Versionhallinta PDM järjestelmässä

Revisiointi eli muutos arkistointi/aktiivivaiheessa oleviin dokumentteihin on tehtävä selkeästi. Dokumentista tulee laatia uusi painos versio/revisio ja siihen luoda muutosmerkintä, jossa selkeästi osoitetaan seuraavat asiat:

- Muutoksen sisältö*
  - Muutoksen sijainti*
  - Muutoksen syy (jos tarpeen)*
  - Muutoksen seuraukset*
  - Milloin kyseessä olevan komponentin muutos tulee voimaan, ja*
  - Muu dokumentille tarpeellinen tieto koskien muutosta*
- (Tekninen tuotedokumentointi. Dokumentin hallinta, 26).

Solid edge ei ole synkronoitu Vertex Flown kanssa, joten ohjelmiston käyttö vaatii välitallennuksen levyynnin kautta. Ohjelmiston käyttöönoton yhteydessä yritykselle on luotu toimintatapa, jonka mukaan versionhallinta tapahtuu. Käyttäjä hakee alkuperäisen tiedoston Vertex flow:sta. Käyttäjä tallentaa väliaikaisesti tiedoston omalle levyynille ”*tiedostonimellä\_REV1...n*”. Tämän jälkeen käyttäjä tekee tarvittavat muutokset, jotka hän tallentaa takaisin Vertex flow:hun uudella revisio numerolla kullekin varatun dokumentti tunnuksen päälle sekä samalla kirjaa muutoksen luonteen. Edellä mainitulla menettelyllä, muutoksesta jää jälki, milloin on muutettu ja kuka on muuttanut sekä mitä on muuttanut. Lisäksi aiempi revisio jää talteen saman dokumentti tunnuksen taakse, jolloin tarpeen tullen voidaan aina palata katsomaan edellistä versiota.

#### Hakutulokset (2)

Tyyppi	Nimi	Revisio	Tila	Kuvaus (fi)	Muutoksen kuvaus	Päivämäärä	Muuttaja	
	<a href="#">D109605</a>	1	READY	Kuormitus muutettu	KUORMITUS MUUTETTU 2356kN --> 3000kN	23.4.2022 klo 12.11.54	Juuso Linden	<a href="#">Poista</a>
	<a href="#">D109605</a>		READY			23.4.2022 klo 10.42.04	Juuso Linden	

[Peruuta](#)

Kuvio 18. Esimerkki versiohallinnasta ja dokumentin revisioista (Lindén, 2022)

### 13 Kehittämistyön eettisyys ja luotettavuus

Kehittämistyössä noudatettiin tiedeyhteisön tunnustamia toimintatapoja eli rehellisyyttä, yleistä huolellisuutta ja tarkkuutta tutkimustyössä, tulosten tallentamisessa ja esittämisessä sekä tutkimusten ja niiden tulosten arvioinnissa. (Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK), 2021). Tutkimustyön luotettavuutta ylläpidettiin lähteiden analysoinnilla, erillään käytöllä ja lähteiden väittämien tarkistuksella toisesta lähteestä. Lähteen valinnoissa analysoitiin lähteen riippumattomuus, ajankohtaisuus, asiantuntijuus kyseiseen aiheeseen ja alkuperäisyys.

Tutkimuksessa sovellettiin tieteellisen tutkimuksen kriteerien mukaisia ja eettisesti kestäviä tiedonhankinta-, tutkimus- ja arviointimenetelmiä. Avoimuutta ja vastuullisuutta noudatetaan kuten tieteelliseen tiedon luonteeseen kuuluu. (Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK), 2021).

Kehittämistyössä noudatettiin eettisiä suosituksia kuten, tietosuojalakea, tekijänoikeuslakia, hallintalakea sekä oikeutta yksityisyyden suojaan. Lähteiden alkuperää sekä tekijänoikeutta kunnioitettiin ja lähteet merkittiin aina asiaan kuuluvalla tavalla.

Tutkimus suoritettiin kokonaan julkisena, eikä tutkimukseen liity salassapito velvollisuuksia. Tutkimus tarkistetaan plagiointitunnistusjärjestelmällä eettisyyden ja luotettavuuden varmistamiseksi.

## 14 Tulokset ja pohdinta

Kehittämistyössä todennettiin valitun sovelluksen laskennan oikeellisuus laskemalla absoluuttisia arvoja käyttäen kolmea erityyppistä yksinkertaista rakennemallia. Laskennassa tarkasteltiin taipumia ja jännityksiä eri rakennemalleille, lujuuslaskennan teorioin. Sekä käsin laskennassa, että FEM laskennassa käytettiin materiaaliarvoja määrittäessä, kehittämistyön pohjana olevaa standardia SFS-EN 1993. Laskennan tuloksena voidaan todeta, että valittu sovellus Solid edge laskee tarkasti lineaarisien staattisten rakennemallien tapaukset. Kuitenkin on huomattava, että laskentaan liittyy epätarkkuuksia riippuen esimerkiksi elementtiverkon tiheydestä. Eroavaisuuksia käsin laskennan ja FEM:in välille muodostui myös geometriasta johtuen, sillä Solid edge laskee suureet aina mallissa olevalle geometrialle, kun taas käsin laskentakaavat eivät sitä aina huomioi. Todettakoon vielä, että FEM:iä käytettäessä tulee olla aina laskennan suuruusluokasta selvillä jo laskemaan ryhtyessä.

Kehittämistyössä tarkasteltiin myös erikoisempaa konsolirakennetta. Rakenteesta lasketut arvot täsmäsivät FEM:in antamiin arvoihin.

Kehittämistyössä selvitettiin laskelmiin oleelliset asiat Solid edge FEM:in oletuksista kuten esimerkiksi materiaalin käyttäytyminen. Materiaalin ollessa kimmo-plastinen materiaali, joka on lineaarisesti myötölujeneva sekä sovelluksen mahdollistaessa epätäydellisyyksien huomioon ottaminen voidaan todeta, että valittu sovellus on sopiva yrityksen käyttöön.

Kehittämistyössä integroitiin valittu FEM-sovellus yrityksen jo olemassa olevaan suunnittelu prosessiin. Integrointi sujui luontevasti käyttäen yritykselle jo luontevaa toimintamallia sekä toiminta ympäristöä. Haasteena integroinnissa oli se ette uusisovellus ole integroitu yrityksen käytössä olevaan PDM-järjestelmään kuten käytössä oleva 3D-CAD sovellus. Tähän kehitystyössä on kuitenkin kehitetty toimiva järjestelmä käyttäen yrityksen PDM-järjestelmää.

Yhteenvetona kehittämistyössä saavutettiin tavoitteet ja valittu FEM sovellus on saatu yrityksen käyttöön mahdollistaan teräsrakenteiden optimointia kannattavammaksi sekä tehokkaammaksi ja tukemaan kaupallista toimintaa.

## 14.1 Johtopäätökset

Tärkeimpänä tehtävänä työssäni oli käyttöönottaa ja integroida FEM-ohjelma osaksi yrityksen suunnitteluprosessia ja siinä olen mielestäni hyvällä tasolla onnistunut. Työn tavoitteena käyttöönotossa oli kokonaisuuden hallinta sisältäen dokumentin hallinnan ja toimintatavat.

Opinnäytetyötä aloittaessa oli jo selvää, ettei opinnäytetyössä voida käydä läpi kaikkia Solid edge FEM-ohjelmiston, laajan työkalu repertuaarin ominaisuuksia. Siksi opinnäytetyön aihetta rajattiin tietoisesti alusta asti määrätietoisesti ja suunnitelmallisesti.

Kehitysprojektiä tulee mielestäni jatkaa ja se tulee jatkumaan yrityksessä osaltani siten, että luon kattavan ohjeistuksen tässä opinnäytetyössä käymistäni asioista ja jatkan kehitystyötä seuraavien sovelluksen sisältävien ominaisuuksien kanssa kehittämällä niistä työkaluja yrityksen käyttöön. Tärkeinä seuraavina kehitys projekteina on nurjahdusanalyysin sekä virtausmallinnuksen käyttöönotto.

Lisäksi tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista toteuttaa projekteja, jossa ohjelmistolla suunniteltu rakenne koe ponnistettaisiin SFS-EN 1990 liitteen D mukaisesti. Yrityksellä on jo kokemusta paineenalaisten rakenteiden koeponnistuksesta ja dokumentoinnista sekä resurssit vastaavien koeponnistuksien suoritukseen teräsrakenteille.

## 14.2 Pohdinta

Aiheena tämä opinnäyte oli mielestäni yritykselle ajankohtainen, henkilökohtaisesti mielenkiintoinen ja riittävän haastava.

Ajankohtaista, tästä aiheesta tekee se, että kuluvan muutaman vuoden aikana alalle on tullut mitavia haasteita aiheutuen koronasta ja nyt Ukrainan tilanteesta. Edellä mainitut kriisit ovat aiheuttaneet teräsrakentamiseen haasteita materiaalin saatavuuden ja hinnan suhteen, joka on pistänyt monet toimijat varmasti ajattelemaan rakenteiden kulojen optimoimista. FEM-ohjelma on tähän

tarkoitukseen yksi mahdollinen työkalu, jolla voidaan nopeasti simuloida esimerkiksi optimirakenteita, mihin suuntaan mitoituksessa kannattaa lähteä, jotta kiloja saadaan optimoitua.

Henkilökohtainen mielenkiintoni teräsrakenteisiin ja niiden lujusteknisiin ominaisuuksiin tuki aiheen valintaa. Ohjelmiston toimittajan järjestämän koulutuksen jälkeen tein useita eri rakennanalysejä ja pääsin tutustumaan hyvin ohjelman ominaisuuksiin ja mahdollisuuksiin.

## Lähteet

Aineiston analysointi. N.d. Viitattu 25.4.2022 <https://opinkirjo.fi/tutkimuksen-perusteet/aineiston-analysointi/>

Empiirinen tutkimus. 2015. Viitattu 4.4.2022.

<https://koppa.iyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/empiirinen-tutkimus>

Hookes Law. N.d. Siemens. Viitattu 4.3.2022

[https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help#uid:index\\_sesim:xid280815:hookes\\_law](https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help#uid:index_sesim:xid280815:hookes_law)

Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK). 2021. Viitattu 4.4.2022

<https://tenk.fi/fi/tiedevilppi/hyva-tieteellinen-kaytanto-htk>

Iterative Method for Solving a System of Linear Equations. 2016. Viitattu 4.3.2022

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917300868>

John Stark. Importance of the PDM Application. Springer © 2011. Viitattu 4.3.2022

<https://janet.finna.fi/Record/jamk.993634087406251>

Kolehmainen J. 2022. Haastattelu. 23.4.2022 Suomi.

Lähteenmäki, M. N.d. Elementtimenetelmän perusteet. Verkkosivu. Viitattu 1.1.2022.

[https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf)

Lähteenmäki, M. N.d. Elementtimenetelmän perusteet. Verkkosivu. Viitattu 1.1.2022.

[https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf)

Maankäyttö ja rakennuslaki. 17.1.2014/41. Julk. 17.3.2022. Viitattu 20.3.2022.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>.

Mesh material properties. N.d. Siemens. Viitattu 4.3.2022

<https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help#uid:meshprops1a>

Määrällinen analyysi. 2021. Viitattu 4.4.2022.

<https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/metelmapolkuja/metelmapolku/aineiston-analyysimetelm/maarallinen-analyysi>

Määrällinen tutkimus. 2015. Viitattu 4.4.2022.

<https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/metelmapolkuja/metelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus>

Results Options for studies. N.d. Siemens. Viitattu 4.3.2022

<https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help#uid:study3d>

SFS-EN ISO 11442. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Viitattu 4.3.2022.

<https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 1993-1-5, 2006. Tasomaiset levyrakenteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Viitattu 4.1.2022. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Solid edge simulation. N.d. Siemens. Viitattu 4.1.2022.

<https://solidedge.siemens.com/en/solutions/products/simulation/solid-edge-simulation/#1643371684593-a8c4273d-6d11>.

Structural studies. N.d. Siemens. Viitattu 4.3.2022

<https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help#uid:study1a>

Tapaustutkimus. 2015. Viitattu 4.4.2022.

<https://koppa.iyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>

Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Teräsrakenneyhdistys ry, 2020. Viitattu 5.1.2022

Teräsrakenteiden suunnittelija. N.d. FISE Oy. Viitattu 4.3.2022. <https://fise.fi/tietoa-fisesta/>

Teräsrakenteiden suunnittelija. N.d. FISE Oy. Viitattu 4.1.2022. <https://fise.fi/patevyysspalvelu/hae-patevyytta/suunnittelijat/terasrakenteiden-suunnittelija>.

Vertex flow tuotetiedonhallinta PDM/PLM, N.d. Vertex Oy. Viitattu 5.1.2022.

<https://vertex.fi/flow>