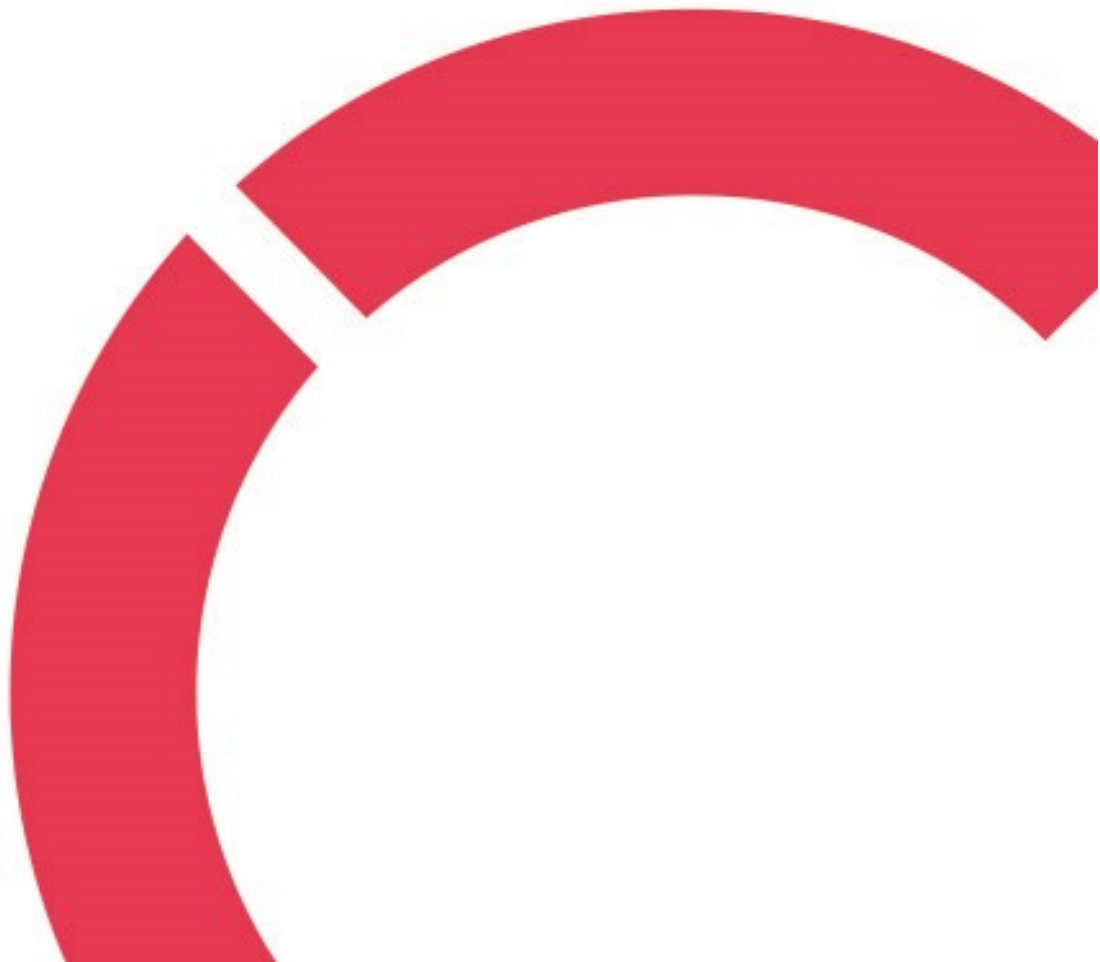


Eva-Marie Lehtonen

PARAMETRIMALLI JA LUJUUSLASKENTA AUTODESK INVENTORILLA

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Tuotantotalouden koulutus
Lokakuu 2022**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Lokakuu 2022	Tekijä/tekijät Eva-Marie Lehtonen
Koulutus Tuotantotalous	<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK	
Työn nimi PARAMETRIMALLI JA LUJUUSLASKENTA AUTODESK INVENTORILLA		
Työn ohjaaja Mika Kumara	Sivumäärä 27 + 2	
Työelämäohjaaja Sami Kuivalainen		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä ohjeet siitä, kuinka Autodesk Inventor suunnitteluohjelmalla saadaan tehtyä parametrimalli ja lujuuslaskenta mallinnettuun kappaleeseen. Muita tavoitteita tälle opinnäytetyölle ovat parametrin toimivuus ja konerungon lujuuden riittävä kestävyys.</p> <p>Työ aloitettiin mallintamalla kannatinrunko parametrisesti Inventoriin linkitettyä Excel-tiedostoa käyttäen. Lujuustarkastelua tehtiin kahta eri tapaa käyttäen. Palkkirakenteet tutkittiin frame -analyysillä ja mallinnettu kokonaisuus tarkasteltiin stress -analyysillä. Tuloksina saadaan frame -analyysistä kappaleen taipumat sekä ominaistaajuuudet ja -muodot. Stress -analyysin tulokset ovat mm. kappaleen taipumat, von Mises -jännitykset, siirtymät ja varmuuskerroin.</p> <p>Tämän lisäksi opinnäytetyö kertoo teoriaosuuksissa tietoja mekaniikkasuunnittelun historiasta, parametrisuudesta sekä yllä mainituista analyyseistä.</p>		
Asiasanat Autodesk Inventor, FEM -simulointi, Parametri, Lujuuslaskenta		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date October 2022	Author Eva-Marie Lehtonen
Degree programme Industrial Management		
Name of thesis PARAMETRIC MODEL AND STRENGTH CALCULATION WITH AUTODESK INVENTOR		
Centria supervisor Mika Kumara	Pages 27 + 2	
Instructor representing commissioning institution or company Sami Kuivalainen		
<p>The aim of the to provide instructions on how to use the Autodesk Inventor design program to create a parameter model and a strength calculation on a modeled piece. Other aims for this thesis work were the functionality of the parameter and the sufficient durability of the strength of the machine frame.</p> <p>The work began by modeling the bracket body parametrically using an Excel file linked to Inventor. The strength test was carried out using two different methods. Beam structures examined by Frame analysis and the modeled entity were examined with Stress analysis. The results are the deflections of the body as well as the specific frequencies and shapes of the body. The results of stress analysis include the deflections of the piece, von Mises stress, displacement and the safety factor.</p> <p>In addition to this, the thesis provides information in the theory sections on the history, parameters and the above-mentioned analyses of mechanical design.</p>		
<p>Key words Autodesk Inventor, FEM simulation, parameter, strength calculation</p>		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AUTODESK INVENTOR

Suunnitteluohjelmisto

FEM

Elementtimenetelmä, tulee sanoista Finite Element Method

KOKOONPANO

Assembly, useita osia sisältävä kokonaisuus

FRAME ANALYSIS

Inventorissa oleva työväline kehärakenteiden simulointiin

MOODIANALYYSI

Mekaanisten värähtelyominaisuuksien tarkastelu

PARAMETRI

Muuttuja, joka on esimerkiksi matemaattinen kaava tai ohjelma, jolla voi olla eri lukuja

PATTERN COMPONENT

Toiminto, jolla voidaan kopioida osaa tarkoin määrätyllä välillä

RAUTALANKA

Sketch-luonnos, jolla aloitetaan kokoonpanon rakennus

SKETCH

Luonnos, joka ohjaa piirteiden geometriaa

STRESS ANALYSIS

Inventorissa oleva työväline rakenteen simulointiin

3D-CAD

kolmiulotteinen tietokoneavusteinen suunnittelu/piirtäminen

.IPT

Tiedostomuoto Inventorissa

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO.....	1
2 MEKANIKKASUUNNITTELU	2
2.1 Historia	2
2.2 Autodesk Inventor	3
3 PARAMETRI.....	4
3.1 Ohje Excel-tiedoston lisäämiseen.....	4
3.2 Kannatinrunгон mallinnusohje	7
4 LUJUUSLASKENTA	11
4.1 Historia	11
4.2 Lujuuslaskenta-teoriaa.....	12
4.3 FEM-laskenta	13
4.4 Frame- ja stress -analyysit sekä ohjeita niiden käyttöön	13
4.4.1 Valikot ja yleisiä huomioita	15
4.4.2 Frame -analyysi ohje.....	17
4.4.3 Stress -analyysi ohje.....	20
5 POHDINTA.....	26
LÄHTEET	27
LITTEET	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tehtävänä on tehdä ohjeet siitä, kuinka Autodesk Inventor -mallinnusohjelmalla tehdään parametri ja parametrisesti mallinnetusta kappaleesta lujuuslaskenta (LIITE 1 ja 2). Tavoitteena tässä on se, että suunnittelusta tulee tehokkaampaa ja tuote valmistuu nopeammin. Lisäksi ohjeista on hyötyä niin uusille kuin vanhemmillekin työntekijöille, jotka eivät ole olleet niin paljon parametrisen mallintamisen tai lujuuslaskennan parissa.

Opinnäytetyössä on esimerkkinä konerunko, josta muodostetaan parametrimalli, jota voidaan myös jatkossa muokata muihin haluttuihin mittoihin. Parametrin teossa käytetään Inventoriin linkitettyä Excel -tiedostoa, jonka lisäämisestä löytyy myös ohjeet opinnäytetyöstä. Parametrisuuden tavoitteena on osata rakentaa malli, joka toimii muokattavuuden kanssa.

Hyötyä parametrimallintamisesta on yrityksille, sillä parametrimallit tekevät suunnittelusta nopeampaa, jolloin tuote menee tuotantoon aikaisemmin ja myös valmistuu pikaisemmin. Tämä tietenkin edellyttää, että jokaisesta erilaisesta tuotteesta tehdään omat parametrimallit, jotta niistä on enemmän hyötyä.

Parametrimallin avulla pystytään helposti muuttamaan mittoja ja saadaan muutoksia nopeasti aikaseksi ja nähdään, paraneeko rakenne tai onko se muutosten jälkeen parempi ja sellainen kuin siitä tietyillä muutoksilla haluttiin tehdä.

Lujuuslaskennassa tutkitaan, kestääkö rakenne sille määritetyt voimat sekä millaisia taipumia syntyy käyttäen Inventorin frame- ja stress -analyysi -toimintoja. Lisäksi opinnäytetyössä on muutamia havaintoja, miten muodonmuutosta voidaan mahdollisesti vähentää tai ehkäistä. Lujuuslaskennassa tavoitteena on selvittää, säilyttääkö kappale muotonsa.

2 MEKANIKKASUUNNITTELU

2.1 Historia

1970-luvulla mekaniikkasuunnittelu tapahtui vielä käsin piirtäen. Pääsuunnittelijoiden piirustuspöydille alkoi muotoutua laitteiden ja koneiden kokoonpanopiirustuksia, joista nuoremmat insinöörit hakivat tiedot, joita tarvitsivat omiin osapiirroksiinsa. (Hietikko 2007, 14.)

Mallinuksessa on käytetty tietokoneita jo 1960-luvulla asti, mutta jokaisen suunnittelijan saataville se tuli vasta 1980-luvun alussa, jolloin markkinoille saapuivat ensimmäiset henkilökohtaiset PC-tietokoneet. 1970- ja 1980-luvun vaiheessa tavallinen CAD-ohjelma koostui 16-bittisestä minitietokoneesta, jossa oli maksimissaan 512 kilotavua keskusmuistia ja 20–300 megatavua levytilaa. Hinnaksi muodostui tuolloin noin 125 000 dollaria. (Hietikko 2007, 14.)

Alussa suunnittelu oli enemmänkin tietokoneavusteita piirtämistä: suunnitteluohjelmilla yritettiin matkimaan piirustuslaudan toimintaa. Piirtäminen oli kaksiulotteista ja projektiot piirrettiin yksittäisenä; ne pystyttiin siirtämään kopioimalla kokoonpanoihin, mutta kuitenkin muutoksia tehdessä niitä kumpaakin jouduttiin muuttamaan, jotta muutokset muokkautuivat, koska niiden välillä ei ollut yhteyttä kopioinnin vuoksi. Kolmiulotteista suunnittelua kehitettiin 1980-luvulla vaihtelevin menestyksin, kunnes tavoitteeksi otettiin tehdä kolmiulotteinen vuorovaikutuksen ohjelmisto. (Hietikko 2007, 14–15.)

Nykypäivänä suunnittelu ja tietokoneet ovat kehittyneet kaikilta osa-alueilta, ja niiden lisäksi myös suunnitteluohjelmistoja kehitetään koko ajan suunnittelijoille sopivimmiksi. Kaikki suunnittelu tapahtuu tietokoneella, ja suurimmaksi osaksi 3D-mallintamalla eli kolmiulotteisesti, ja malleista pystytään luomaan helposti työkuvia. Lisäksi muokkaaminen on helppoa: kun yhtä osaa muuttaa, se muuttuu kaikissa sijainneissa, joissa sitä on käytetty; osia voidaan myös piilottaa halutessaan.

Suunnitteluohjelmia on useita, ja niitä kannattaakin vertailla ja katsoa, mikä on omaan käyttöön sopiva, esimerkiksi millaisia vaatimuksia ohjelma tarvitsee suunnittelun suhteen. Ohjelmissa ovat perustoiminnot yleensä samoja, mutta syvemmin suunniteltaessa ominaisuuksia löytyy vaihtelua.

2.2 Autodesk Inventor

Inventor on 3D-CAD-ohjelmisto, jossa on mahdollista tehdä mekaniikkasuunnittelua, dokumentointia ja tuotesimulointia ammattitasolla. Ohjelmasta löytyy ominaisuuksia tehoyhdistelmällisen parametrin, suoran, vapaamuotoisen ja sääntöpohjaiseen suunnitteluun. Sisäistettyihin työkaluihin kuuluvat esimerkiksi metallilevyt, putket, runkosuunnittelu, simulointi ja monta muuta toimintoa. (Autodesk 2022, a.)

Syyskuussa vuonna 1999 julkaistiin ensimmäinen Inventorin versio, jonka julkaisijana toimi Autodesk (Munford & Normand 2016). Siitä asti Inventorista on julkaistu uusi versio joka vuosi ja nyt juuri julkaistiin versio nimeltä Inventor 2023 (Autodesk b).

Inventorissa on paljon erilaisia ominaisuuksia, ja niiden tiedostaminen ja oppiminen vievät aikaa, mutta mitä enemmän niitä osaa käyttää sitä helpompaa suunnittelun mallintamisvaiheesta sekä piirustusten/työkuvien teosta tulee. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin keskitytään ohjelmiston ominaisuuksista parametrimaliin, jossa pohjana käytetään linkitettyä Excel-tiedostoa ja lujuuslaskentaan, jossa puolestaan perehdytään frame- ja stress -analyysiin.

Frame -analyysissä käytetään palkkielementtejä, joissa kehikkorakenne mallinnetaan palkkielementeillä ja tuloksiksi saadaan taipuma sekä ominaistajuudet ja -muodot. Stress -analyysissä puolestaan käytetään tilavuuselementtiä, joka ottaa huomioon koko kappaleen geometrian. Analyysin tuloksena saadaan esimerkiksi taipumat, von Mises -jännitykset, siirtymät ja varmuuskerroin. Opinnäytetyössä Stress -analyysin tarkastelu keskittyy enemmän kappaleen omaistajuuksiin ja -muotoihin.

3 PARAMETRI

Opinnäytetyössä parametrisuudella tarkoitetaan osan tai rakenteen helppoa muokattavuutta niin, että osan muoto kestää muutoksista huolimatta. Tämä tarkoittaa, että osan tietyt pinnat ovat määrättyjä suhteessa toisiinsa, niin että niiden vapaasti liikkuminen ei onnistu eli ovat täysin lukittuina toisiinsa nähden. Parametri on kontaktissa mallinnusohjelmaan ja toimii sen mukaisesti.

Parametrin avulla voidaan rakentaa luonnoksia, osia ja kokoonpanoja. Niiden avulla pystyy myös asettaa ominaisuuksia muodon, koon tai kokoonpanon asennon mukaan (Autodesk Inventor 2022a). Parametri on ominaisuus, jolla pystytään muuttamaan mittoja mallinuksen vaiheesta riippumatta, niin että kappaleen geometria muuttuu. Parametrisuus helpottaa suunnittelua, sillä alkuvaiheessa ei välttämättä tiedetä suunniteltava kohteen mittoja tarkasti, suunnittelun edessä ne yleensä selviävät ja silloin ne pystytään muuttamaan helposti parametrisen rakenteen avulla. Lisäksi mitat muuttuvat geometrian lisäksi myös parametrimalleihin liittyvissä kohteissa, kuten esimerkiksi piirustuksissa ja kokoonpanoissa. (Hietikko 2007, 23.)

Parametrisessa mallinuksessa voidaan myös tehdä mittojen välille erilaisia relaatioita ja matemaattisia yhteyksiä kuten esimerkiksi niin, että jokin luku on aina samansuuruinen tai kaksinkertainen verrattuna toiseen lukuun. Muita ehtoja parametrille ovat muun muassa samankeskisyys, symmetria ja yhden-suuntaisuus. Tämä tarkoittaa, että jos yhtä arvoa muuttaa, niin kaikki tälle arvolle määritetyt osat muuttuvat, esimerkiksi parametrille määritetty pituus muuttuu jokaisessa sille määritetyssä osassa. Mallin täytyy toimia hallitusti, jos esimerkiksi kappaleen keskellä on reikä ja kappaleen kokoa muutetaan, niin reiän on edelleen pysyttävä keskellä kappaletta. (Hietikko 2007, 25.)

Toiminnolla on helppo tehdä osaperheitä, joissa mitat vaihtuvat, mutta muoto pysyy samana. Täällaisestä Tämmöisestä hyvänä esimerkkinä on ruuvi, jossa muoto säilyy mutta koko vaihtelee. Taulukkolaskentaohjelmalla mittojen muuttaminen on helppoa, ja näin ei tarvitse mallintaa jokaista ruuvia osatiedostona vaan eri versiot parametria hyödyntäen. (Hietikko 2007, 231.) Lisäksi parametrilla voidaan rakentaa isompia kokonaisuuksia ja tai osia niihin.

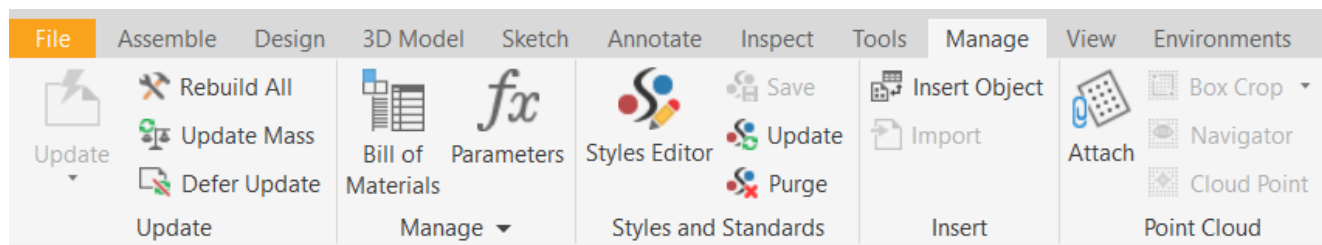
3.1 Ohje Excel-tiedoston lisäämiseen

Excel-tiedosto linkitetään Inventorin parameters-osioon, kuitenkin ensin Excel-tiedosto täytyy muodostaa oikealla tavalla. Ensimmäiseksi Excel-sarakkeisiin on kirjoitettava parameter_name, equation, unit/type sekä comment. Tässä huomioitava, että parameter_name-tekstin oltava yhtenäinen eli ilman välilyöntejä, koska Inventor ei tue niitä sekä comment-kenttä on pakollinen. Näihin kohtiin annetaan pyydyt arvot tai merkinnät eli parametrin nimi ja mitta, yksikkö ja kommentti. Kommenttikenttään kirjoitetaan tarkentavia tietoja kuten mistä osa on mitoitettu. Kuvassa 1 on esimerkki, miltä Excel-tiedosto näyttää täytettynä. Parametrien nimeämisessä kannattaa huomiota kiinnittää sen nimeämiseen, sillä sitten se on jatkossa helpompi löytää eikä tällöin jää epäselväksi mitä tietyt parametrit tarkoittavat.

	A	B	C	D	E
1	Parameter_name	Equation	Unit/Type	Comment	
2	runko_pituus	13363	mm		
3	runko_leveys	5778	mm		
4	runko_korkeus	1420	mm		
5	jalka_1	425	mm	rungon päästä	
6	jalka_2	4195	mm	c/c	
7	jalka_3	3850	mm	c/c	
8	jalka_4	2955	mm	c/c	
9	välituki_1väli	2500	mm	c/c	
10	välituki_2väli	3038	mm	c/c	
11	välituki_pituus1	4993	mm		
12	välituki_pituus2	3038	mm		
13					

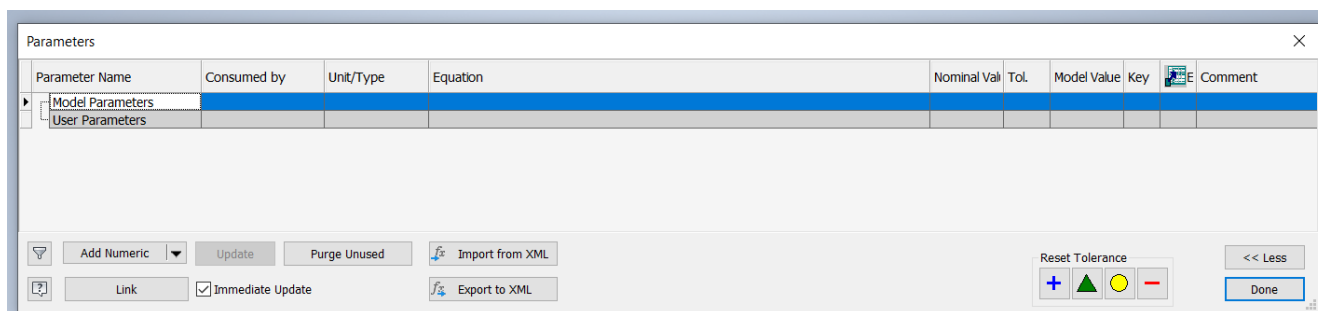
KUVA 1 Excel-tiedosto

Excel-tiedosto lisätään Inventoriin Manage-valikosta kohdasta Parameters, kuten (KUVA 2).

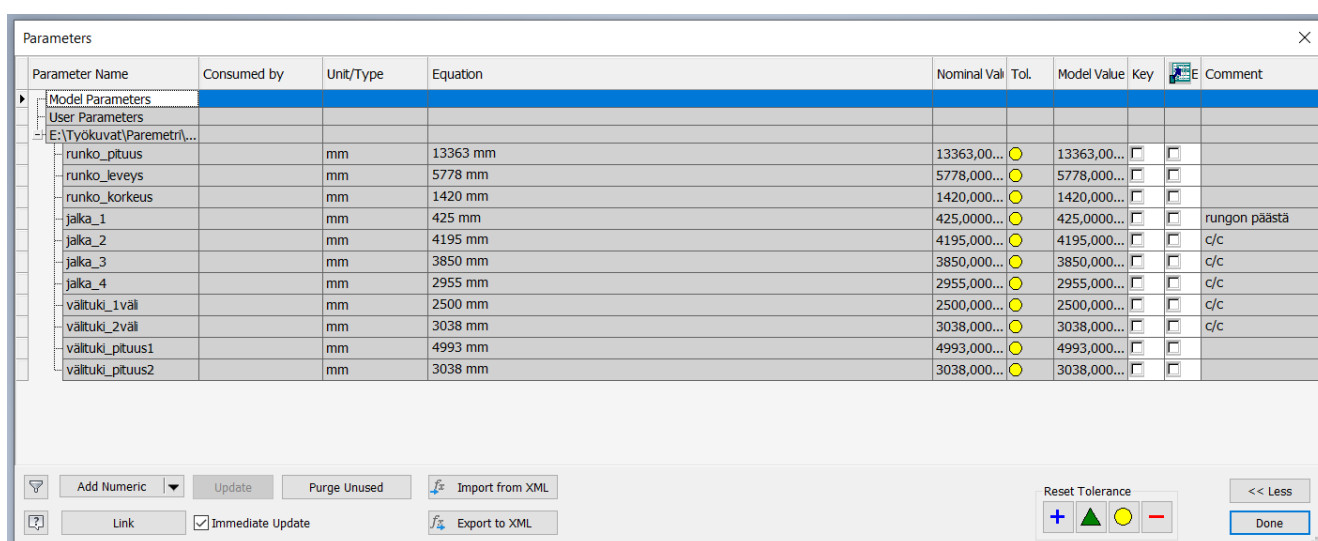


KUVA 2. Valikko, josta parameters löytyy

Kun Parameters-valikko avautuu, näkymä on kuten kuvassa 3. Kohdasta link, voi valita haluamansa Excel-tiedoston, jolloin se linkittyy Inventoriin.



KUVA 3. Parameters-valikko



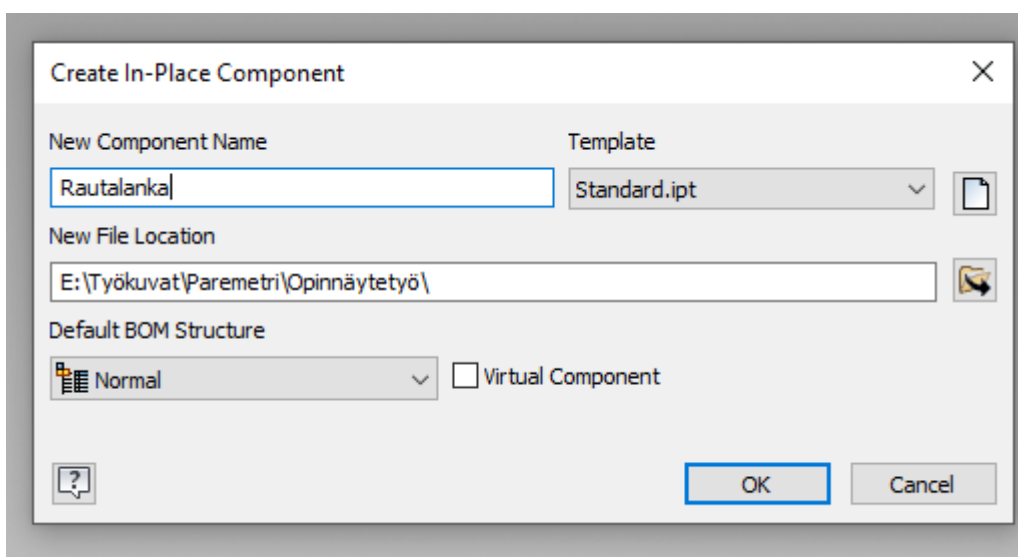
KUVA 4. Näkymä kun Excel-tiedosto on lisätty

Kun Excel-tiedosto on lisätty näyttää parameters-valikko tältä kuten kuva 4. Tämän jälkeen voidaan sinne annettuja mittoja käyttää, ne toimivat sketcheissä, osia luodessa tai kokoonpanon eri vaiheissa kuten esimerkiksi kiinnityksissä. Tässä konerunko -esimerkissä löytyy kaikki vaihtoehdot, sketchi muodostuu rautalangasta, johon on annettu mitat runko_pituus ja runko_leveys, osan luonnissa toimii runko_korkeus, jolloin se antaa jalalle oikean pituuden ja kokoonpanossa esimerkiksi jalkojen väli pituussuunnassa menee suoraan komennolla jalka_1 tai jalka_3, jolloin se siirtyy rungolla sille määritetyille paikalle.

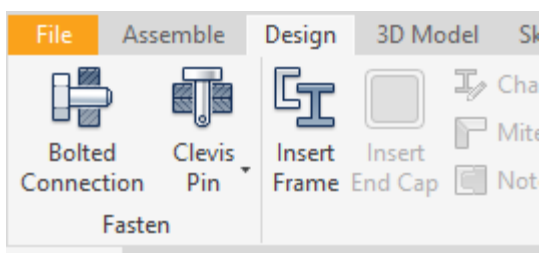
Jälkeenpäin osa mitan muuttaminen tapahtuu vaihtamalla arvo, sille määritetyille paikalle Excel -tiedostossa ja kun halutaan, että arvot muuttuvat myös Inventorissa olevaan parametrimalliin, niin tulee Excel-tiedosto tallentaa ja parametrimalli muuttuu sen mukaan painamalla salamaa local update -kohdassa Inventorin puolella. Jos halutaan muuttaa vain palkin kokoa, niin se tapahtuu valitsemalla palkki, jonka kokoa halutaan muuttaa ja hiiren oikeaa näppäintä ja valikosta change size ja avautuu valikko, jossa ovat muut vaihtoehdot palkkikokoon standardien mukaisesti.

3.2 Kannatinrungon mallinnusohje

Kannatinrungon mallintaminen aloitetaan luomalla kokoonpano, jonka sisälle luodaan part template (Assembly → create → nimeä ja valitse template -kohtaan tiedostotyyppi standard (mm).ipt sekä tallennussijainti), kuten kuvassa 6. Tämän sisälle luodaan rautalankamalli, jolle annetaan parametrissa mitat, jonka jälkeen valitaan finish sketch. Seuraavaksi tallennetaan assembly eli kokoonpano nimellä, ja valitaan halutut profiilit Insert Framen kautta, joka löytyy kuvan 7 mukaisesta paikasta. Palkkien valinnan aikana ne voi asettaa oikeille paikoille ja siten luoda siitä Frame -kokoonpanon tai luoda ensin, ja sen jälkeen käydä muuttamassa sijoitukset paikoilleen. Lisäksi pituussuuntaisten palkkien toinen pää pitää viistää ja kumpaakin päähän lisätään vielä suojalaput.



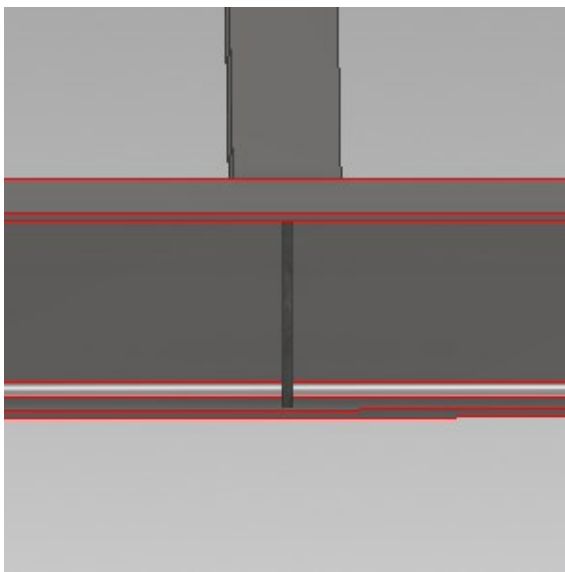
KUVA 6. Rautalankamallin aloitus



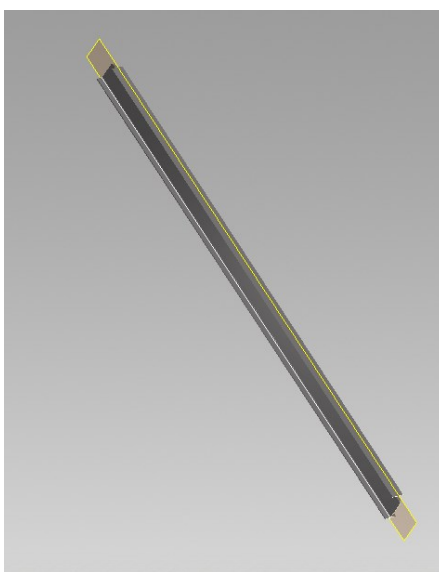
KUVA 7. Palkin valinta

Kun frame -osa on tehty, voidaan alkaa lisäämään muita osia. Jokainen osa lisätään kokoonpanoon, mutta jotkin osista täytyy avata omana tiedostona ja linkittää sitä kautta parametriin samalla tavalla kuten Excel- tiedosto linkitetään. Lisättyyn kohtaan kirjoitetaan mikä osa on kyseessä esimerkiksi kannatinrungon tapauksessa rungon_korkeus kirjoitetaan kohtaan, jossa määritellään jalan korkeutta.

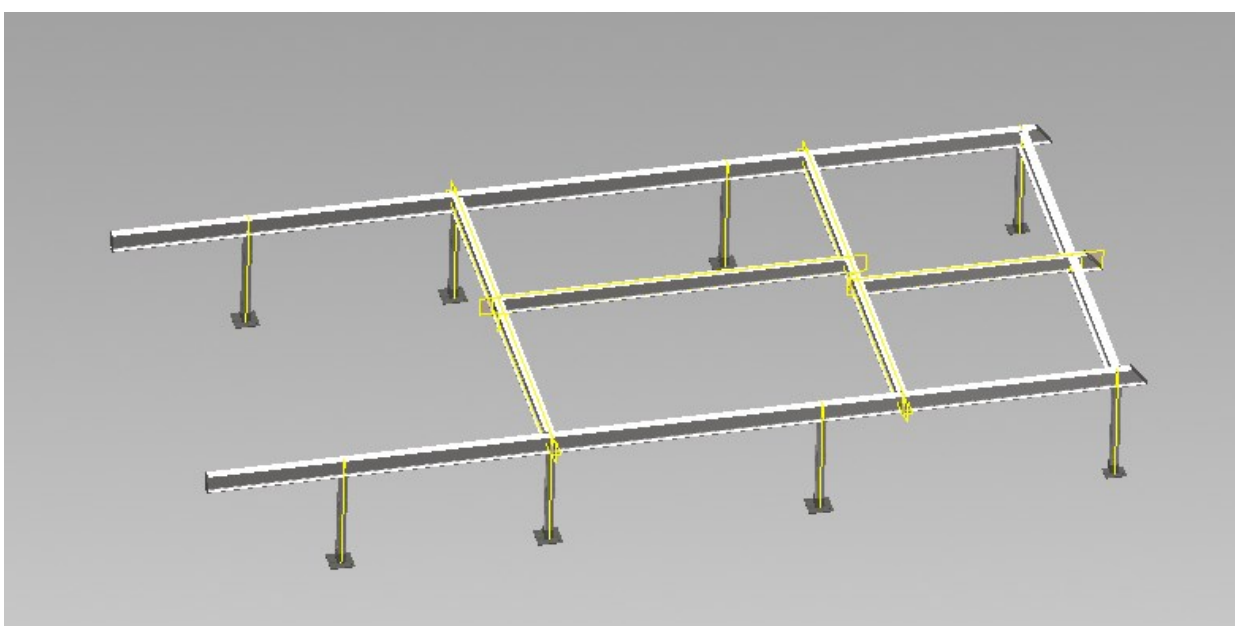
Tapauksissa, joissa osa on kiinteä eikä sen koon tarvitse muuttua, vaikka parametrimallin kokoa muutetaan osan voi tehdä ilman linkitystä. Kannatinrungon kohdalla esimerkiksi tukipalat pysyvät yleensä samoina, jos palkkien kokoa ei muuteta, joten tässä tapauksessa ne ovat aina samankokoisia pysyviä osia, joita ei ole linkitetty, ne kuitenkin muuttavat paikkaa sivuttaissuunnassa annettujen käskyjen mukaan. Kuvassa 8 uumatuki on sijoitettu palkin keskelle ehdoilla, joilla se siirtyy palkin mukana pitäen paikkansa ja esimerkiksi palkin ja uumatuen keskelle voidaan laittaa työtasot ja niiden välille on määritetty kontakti. Apuna voi käyttää työtasoja. Esimerkit kuvassa 9 ovat siitä, kuinka keskipalkeissa on työtasot ja kuvassa 10 kaikki apuna käytetyt ennen niiden piilottamista rakenteesta.



KUVA 8. Uumatuki sijainti

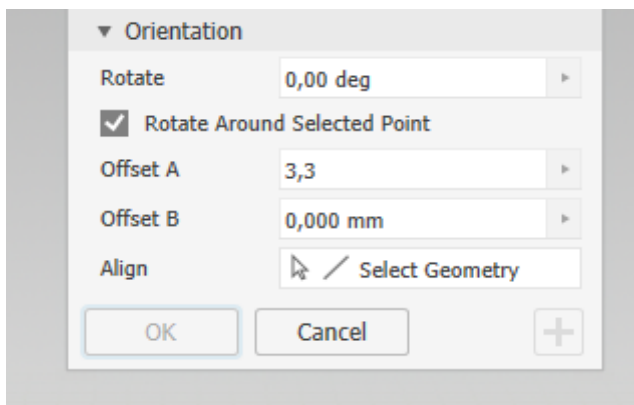


KUVA 9. Työtaso palkissa



KUVA 10. Kannatinrunno työtasoilla

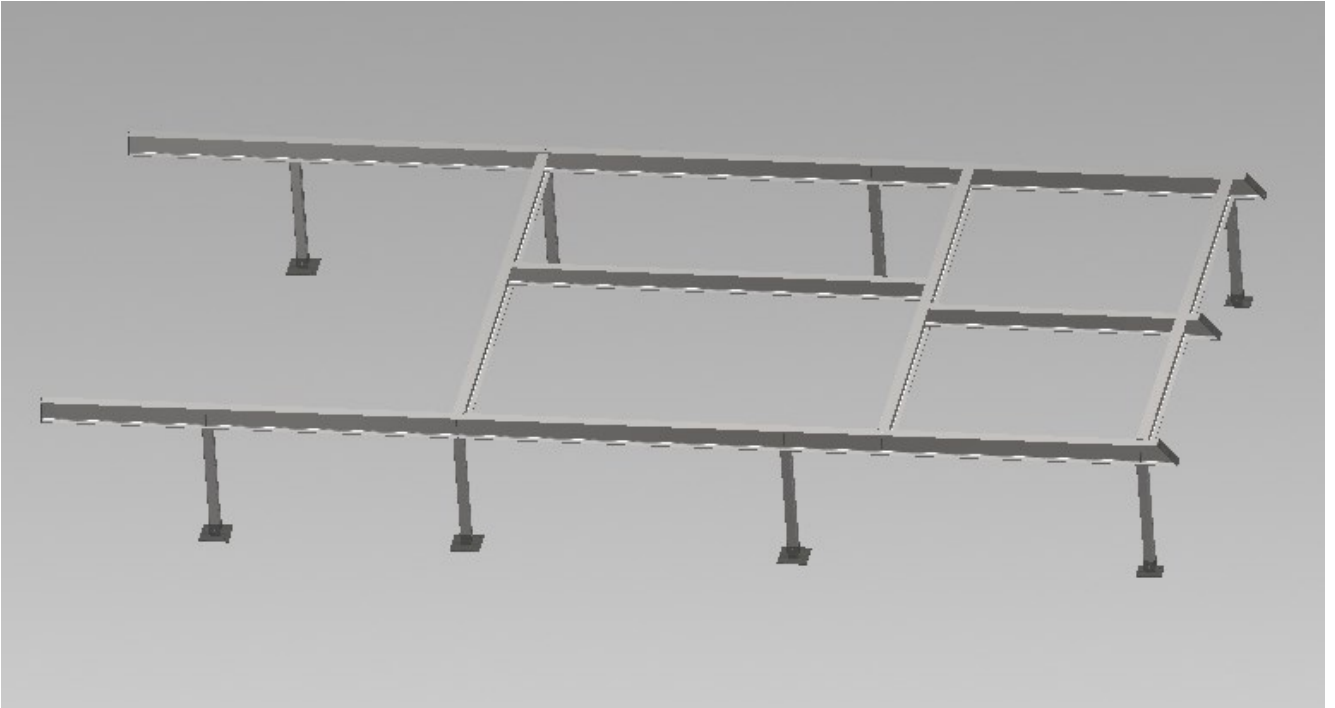
Rautalankamallissa olevien palkkien sijainteja voi muuttaa sivuttaissuunnassa toiminnolla edit with frame generator ja alhaalta orientation. Tätä tarvitaan esimerkiksi tilanteissa, joissa rautalankamalli tekee framen palkkien keskeltä, vaikka niiden kuuluisi olla tasan palkkien päästä. Kuvassa 11 näkyy tällainen tilanne, jossa palkkia on siirretty 3,3 mm suunnassa A.



KUVA 11. Siirretty palkki

Välillä on hyvä tarkistaa toimivatko parametrin muutokset, tällöin mahdollisen virheen huomaa aikaisemmin eikä sen selvittämiseen kulu silloin välttämättä niin paljon aikaa.

Parametriä voi käyttää myös kokoonpanon osia liittäessä toisiinsa sekä niiden sarjaa kytkennässä. Lisäksi niihin voidaan lisätä myös erilaisia laskutoimituksia, niiden tulee olla kuitenkin tarpeeksi yksinkertaisia, kuten plus-, miinus-, kerto- ja jakolaskut onnistuvat hyvin esimerkiksi runko_leveys + 6,6 mm määrittää kannatinrunгон jalkojen paikan pattern component -toiminnolla.



KUVA 12. Valmis runkorakenne

4 LUJUUSLASKENTA

Lujuuslaskennalla tarkastetaan kappaleen kestävyyttä, kuten kuormituksista johtuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia ja niiden avulla kappaleesta saadaan tietoja esimerkiksi siirtymistä, jännityksistä ja varmuuskertoimen. Kun kappaleen geometria on tarpeeksi yksinkertainen, löytyy yhtälöitä käsinlaskentaan. Monimutkaisemmissa tapauksissa täytyy tyytyä likimääräisiin tuloksiin, koska niitä ei pysty selvittämään matemaattisin ratkaisuin.

4.1 Historia

Italialainen Leonardo da Vinci (1564–1642) on ensimmäinen henkilö, jonka tiedetään kiinnittäneen huomiota teoreettisessa mielessä lujuuslaskentaan. Muistikirjat käsittelivät palkin ja ristikon kantokykyyn vaikuttavia asioita, mutta analyttisiä menetelmiä hänkään ei kuvailut. Tätä ennen rakentaminen pohjautui kokemukseen tietoon, joka periytyi sukupolvien välillä. (Hietikko 2021, 11.)

Toisena tulee italialainen Galileo Galilei (1564–1642), joka loi ensimmäisen systemaattisen lujuuslaskennan teorian ja kirjoitti siitä kirjan, kun hän oli kirkon määräämässä kotiarestissa Firenzen lähetyvillä. Käsikirjoitus salakuljetettiin Hollantiin ja julkaistiin 1636 Leidenissa. Kirja käsitteli esimerkiksi palkin taivutusta ja sauvan aksiaalista vetoa. Galilei teki monia mekaniikan kokeita, joissa hän esitteli esimerkiksi monia Aristoteleen väitteitä. Lisäksi hän todisti, että putoava kappale liikkuu kiihtyvällä nopeudella, jos ilmanvastusta ei oteta huomioon. (Hietikko 2021, 11.)

Robert Hooken (1635-1703) merkittävimpiä huomioita ovat kappaleeseen vaikuttavan voiman ja siihen syntyvän muodonmuutoksen suhde, tämän mukaan onkin nimetty Hooken laki. (Hietikko 2021, 11.)

Leonard Euler (1707-1783) kehitti etenkin lujuusopin analyttisiä menetelmiä ja tutki kappaleiden muodonmuutoksia. Palkkien nurjahdukseen liittyvät teorit ovat varmaakin kuuluisimpia hänen teorioistaan. (Hietikko 2021, 11-12.)

Muita lujuusopin kannalta tärkeitä henkilöitä ovat olleet mm. Thomas Young (1773–1829), joka laajensi Hooken tutkimuksia ja sai aikaan kimmomoduulin sekä Simeon Poisson (1781–1840), joka yleistti Hooken lain kolmiulotteiseksi. (Hietikko 2021, 12.)

4.2 Lujuuslaskenta-teoriaa

Rakenteen on oltava tarpeeksi luja, mutta ei kuitenkaan liian luja, jotta se ei ole liian suurikokoinen ja samalla myös liian painava ja kallis. Kuitenkaan painavat osat eivät liikkuvissa laitteissa varmista suurempaa varmuutta, koska dynaamiset hitsausvoimat voivat nousta erittäin suurikokoisiksi. Kertautumisefektiin on syytä myös kiinnittää huomiota kannattaa, sillä tarkoitetaan sitä, että yksittäisen osan massan muutoksilla voi olla kovia heijastusvaikutuksia laitteen muiden osien massaan. (Hietikko 2021, 13.)

Koska lujuuslaskenta on analyyttinen tieteenala, niin ennen laskentaa sille on määritetty tiettyjä reunaehtoja, jotka suunnittelevan rakenteen on täytettävä. Laskennassa eritellään annettuja reunaehtoja vastaavien muuttujien arvoja sekä vertaillaan niitä reunaehtoihin. Suunniteltavan kappaleen dimensioita ja tai materiaaliarvoja määrittäessä voidaan hyödyntää myös reunaehtoja. Analysoitaviin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi jännitykseen, kulumiseen tai muodonmuutokseen. Tämä tarkoittaa, että analysointi voidaan rakenteen kuluminen tiedossa olevana aikana ja tarkistaa, että se jää rajojen sisälle ja myöskin voidaan asettaa rakenteen paksuus niin, että kuluminen maksimissaan ylittää sallitun arvon. (Hietikko 2021, 13-14.)

Hyvän tuotteen tuntomerkinä on luotettava ja turvallinen toiminta sopivan käyttöiän aikana. Kun halutaan ennustaa käyttöiän aikana suuntautuvat rasitukset, on tiedettävä vähintään seuraavat seikat:

- Kuormitusten suuruus, suunta, taajuus ja muuttuminen ajan mittaan.
- Käytettyjen materiaalien mekaaniset ominaisuudet.
- Käytettävät laskenta- ja mittaamenetelmät. (Hietikko 2021, 14.)

Kappaleen jännitystä lasketaan erilaisilla kaavoilla, minkä jälkeen sitä verrataan kappaleessa käytetyn materiaalin sietokykyyn. Tavallisesti laskemien epävarmuustekijät otetaan huomioon jättämällä väliin tarpeeksi suurivarmuusmarginaali. (Hietikko 2021, 15.)

ATK-menetelmät ovat nykyaikana myös paljon apuna lujuuslaskennassa. Yleisin menetelmä on FEM (Finite Element Method tai Finite Element Modeling, joka tarkoittaa elementtimenetelmää). Sen avulla pystytään laskemaan monimutkaisiakin rakenteiden jännityksiä ja muodonmuutoksia suhteellisen helposti ja tarkasti, ja lisäksi niiden tulokset voidaan esitellä kuvina. (Hietikko 2021, 15.)

4.3 FEM-laskenta

FEM- laskennan avulla voidaan mallintaa jo lähes minkäläinen kuormitus, kappale, kokonaisuus tai materiaaliominaisuus tahansa. Sen avulla voidaan saada likimääräisiä ratkaisuja esimerkiksi jännityksistä. (Hietikko 2021, 170.)

Rakenne menetelmässä kuvataan pienemmillä osilla eli elementeillä, jotka on kytketty toisiinsa solmupisteissä. Yleensä elementtien muoto on sidottu, mutta verkkoa tarpeen mukaan voidaan tihentää, harventaa tai yhdistellä ja saadaan aikaan lähes mitä tahansa. (Hietikko 2021, 170.)

4.4 Frame- ja stress -analyysit sekä ohjeita niiden käyttöön

Frame -analyysillä tutkitaan kehikon rakenteellista kokonaisuutta jännitysten ja muodonmuutoksen suhteen, kun kappaleeseen kohdistuu kuormituksia. Reunaehtojen on määrittelyn jälkeen voi suorittaa simuloinnin ja vertailla tulosta suhteessa määritettyihin reunaehtoihin. Simulaation keinoin pystyy tunnistamaan mahdollisia tulevia suorituskykyongelmia, kuten kappaleen kestävyteen vaikuttavia tekijöitä ja samalla voi löytää parempia suunnitteluvaihtoehtoja. (Autodesk Inventor, 2022c.)

Frame -analyysi ei tue kaarevia palkkeja, mikä tarkoittaa, että kaarevat palkit pitää mallintaa suorilla palkkielementeillä. Moodianalyysissä massa kohdennetaan solmuille, jossa jokaisessa solmupisteessä on kussakin kuusi siirtymävapausastetta. (Autodesk Inventor, 2022c.)

Frame -analyysillä voidaan tarkastella kahdella tavalla staattisia kuormitusilanteita eli arvioida rakenteellisia kuormitusolosuhteita, jotka ovat ajasta riippumattomia. Moodianalyysillä selvittää luonnollisia ominaistajuuksia ja -muotoja. Analyysissä geometrinen rakenne korvataan elementtiverkolla. Elementteinä käytetään palkkielementtejä. Analyysissä elementtimalliin on mahdollista lisätä reunaehtoja mm. tuentoja ja kuormituksia. Analyysin tuloksia on mahdollista tarkastella jälkikäsitteilytoiminnolla. (Autodesk Inventor, 2022c.)

Tyypillinen prosessi frame -analyysissä:

1. Aseta reunaehdot
2. Esikäsitteily. Syötä mallin tiedot ja määritä suoritettavat analyysit.
3. Ratkaiseminen, suorita simulointi.
4. Jälkikäsitteily, tulosten tarkastelu

5. Tarkista reunaehdot. Vertaa tuloksia alkuperäisiin odotusarvoihin.

6. Johtopäätökset vastaavatko tulokset odotusarvoja?

- Kyllä, analyysi on tällöin valmis.
- Ei, voit parantaa tuloksia erilaisilla muutoksilla. (Autodesk Inventor, 2022c.)

Stress -analyysillä voidaan tarkastella toimivatko eri rakenneratkaisut suunnitellulla tavalla esimerkiksi yksittäisen osan tai kokoonpanon osalta. Esimerkiksi suunnittelun alkuvaiheessa voidaan testata, toimiiko valittu geometria eli kestääkö se halutussa toiminnassa rikkoutumatta. (Autodesk Inventor, 2022b.)

Stress -analyysi on tarkoitettu isotrooppisten materiaalien kanssa, tällaisia ovat esimerkiksi lasi, muovi tai metalli. Menetelmästä löytyy kaksi erilaista simulaatiota, joita ovat staattinen analyysi ja moodianalyysi. Staattisen analyysin tarkoitus on arvioida rakenteellisia kuormitusolosuhteita, jotka ovat ajasta riippumattomia. Moodianalyysi puolestaan tutkii luonnollisia ominaistajuuksia sekä rakenteen jäykän kappaleen liiketilaa. (Autodesk Inventor, 2022b.)

Simulaatio tekee erilaisia asioita kuten luo elementtiverkotuksen ja automaattiset kontaktit sekä ratkaisee tulokset solmuille. Tulosten tultua arvioidaan tulokset grafiikka-alueella, joka näyttää simulaation tilan eli mallin geometrian ja simulointi tulokset. Määritetyille arvoille simulaatio prosessi luo FEM -tuloksia, jotta ne löytyvät paremmin. Kokoonpanot ja hitsaukset ovat tuettuja, mutta tilanteissa, joissa hitsaamattomat pintakontaktit eivät ole täydellisesti sidottuja, eikä automaattinen kontakti toimi, ne vaativat muutoksia. Niitä voi muokata joko automaattisten kontaktien luomisen kautta tai lisätä kontakteja manuaalisesti. (Autodesk Inventor, 2022b.)

Tyypillinen prosessi jännitysanalyysissa:

1. Reunaehtojen asettaminen, määritä kappaleelle reunaehdot.
2. Esikäsitteily, jossa määritetään materiaalit, ja muut reunaehdot, kuten kuormat sekä kontaktit ja elementtiverkotus.
3. Ratkaiseminen, suorita simulointi.
4. Jälkikäsitteily, tulosten tarkastelu
5. Kriittisten reunaehtojen/tavoitteiden tarkasteleminen. Simulointimallin antamia tuloksia tarkastellaan ja tarvittaessa muutetaan reunaehtoja.
6. Johtopäätökset vastaavatko tulokset reunaehtoja:
 - Kyllä, analyysi on tällöin valmis.

- Ei, voit parantaa tuloksia erilaisilla muutoksilla, kuten geometriaa tai analyysityyppiä. (Autodesk Inventor, 2022b.)

4.4.1 Valikot ja yleisiä huomioita

Frame Analysis ja Stress Analysis löytyvät välilehdeltä Environments. Täältä valitaan haluttu menetelmä ja create study, avautuvaan valikkoon määritetään halutut ominaisuudet. Seuraavaksi tehdään asetuksia kontaktien suhteen sekä suunnittelun kohde (yksittäinen vai parametrimitoitus).

Frame analyysin valikossa voi valita:

- Staattinen analyysi
- Moodianalyysi
 - laskee esikuormitetut malleja.
 - tehostettuja tarkkuuksia. Laskee jännitykset mallille, jonka jälkeen laskee esijännityksen tilan. Tämä vaihtoehto on oletusarvoisesti käytössä.
 - asettaa voi myös esimerkiksi maksimi mallien määrän ja toleranssin.
 - Kohtiin kirjoitetaan mallinen määrä
 - määritetään suurin toleranssiarvo, joka on saavutettava rakenteen iteratiivisen analyysin aikana. Oletusarvo on 0,0001.
 - Syötä iteraatioiden enimmäismäärä. Oletusarvona on 8. Kuitenkin, jos syötetty luku ylittyy ja vaadittua toleranssia ei saavuteta, rakenteen laskelmat pysähtyvät.
 - normalisoi modaaliset etäisyydet

Stress -analyysin valikossa:

- Staattinen analyysi pystytään
 - havaitsemaan ja eliminoimaan jäykät rakenteen tilat. Ohjelma poistaa jäykät rakenteet ongelmassa, joissa kontakteja ei ole tarpeeksi määritelty, mutta niillä on kuitenkin tasapainoinen kuormitus kelvollisin elastisuusratkaisuin.
 - erottelemaan jännitykset kontaktipinnoilla. Ohjelma määrittää sopimattomat esitykset epäyhtenäisistä jännityksistä yli kontaktipintojen FEM -laskennassa.
 - tehdä liikekuormitusanalyysi.
- Moodianalyysi

- asettaa taajuuksien määrän. Määrittää rakenteelliselle taajuudelle etsittävien resonanssi-taajuuksien määrän. Sisältää ne taajuudet, jotka vastaavat rakenteen jäykkiä liikkeitä.
- taajuusaleen. Määrittää haluttujen mooditaajuuksien taajuusalueen.
- saadaan laskettua esikuormitetut malleja
- tehostettuja tarkkuuksia. Lisää laskettujen taajuusarvojen tarkkuutta suuruusluokalla (10).

Ero frame -analyysin ja stress -analyysin välillä on se, että frame -analyysillä voi tutkia palkkielementtien rakenteita. Stress Analyysin avulla saadaan tutkittua koko kappaleeseen mallinnettu geometria. Tulosten geometriat näyttää myös hieman erilaisilta. Frame -analyysi muodostaa palkeista ohuita viivoja, kun taas stress -analyysin tuloksen rakenne on geometrialtaan samanlainen kuin alkuperäinen kappale. Näistä kummastakin tulokset määräytyvät kyllä samaten eli kappaleessa näkyy sen siirtymät ja väri, kuinka paljon taipumista tapahtuu.

Ennen aloittamista kannattaa tarkistaa ovatko osien materiaalit oikeat ja tarvittaessa muuttaa tai asettaa osille sopivat materiaalit. Mikäli jostakin osasta on unohtunut materiaali, niin ohjelma kyllä ilmoittaa siitä eli lujoustarkastelua ei voi tehdä ennen kuin materiaalit on annettu. Lisäksi myös täytyy miettiä, mitä voimia rakenteeseen vaikuttaa. Yleisesti kappaleeseen kohdistuviin voimiin kuuluvat omasta massasta aiheutuva kuormitus sekä ulkoiset kuormitukset.

Kannatinrunkoon kohdistuvat voimat ovat tässä tilanteessa maan vetovoiman ($9,81 \text{ m/s}^2$) aiheuttama kiihtyvyys, joka kerrotaan kannatinrungon omalla massalla ja saadaan tuloksena voima. Kannatinrungon massa on $2\,282 \text{ kg}$ ja päälle laitetaan esimerkiksi kuljetin, jonka massa on $2\,500 \text{ kg}$. Kun edellä mainituista voimista lasketaan kohdistuvat voimat, niin kannatinrungon keskiosaan kuljettimen alla oleviin kohtiin kohdistuneiksi voimiksi tulee $46\,911 \text{ N}$ ja reunoille $22\,386 \text{ N}$.

Kohdistuvan voiman laskeminen kuljettimen alle

$$G = mg$$

$$G = (2\,282 \text{ kg} + 2\,500 \text{ kg}) * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$G = 46\,911,42 \text{ N}$$

Kohdistuvat voimat muu runko (sivu palkit)

$$G = mg$$

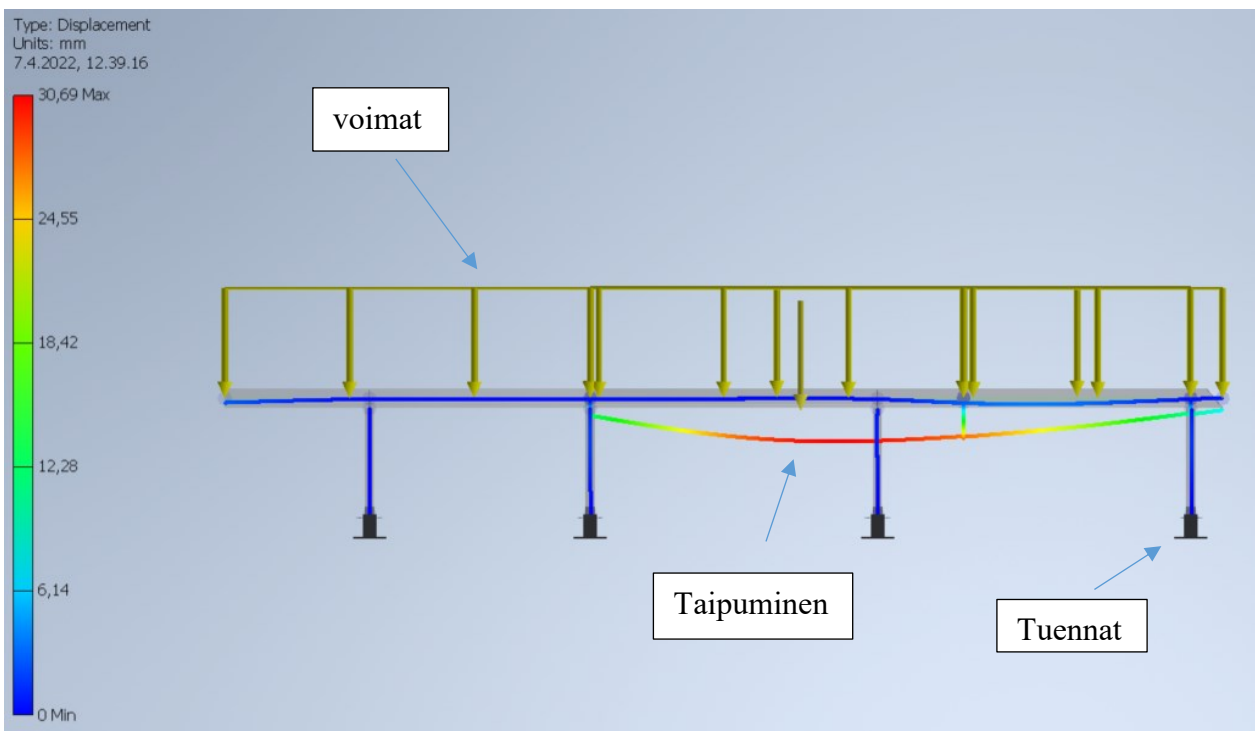
$$G = 2\,282 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$G = 22\,386,42 \text{ N}$$

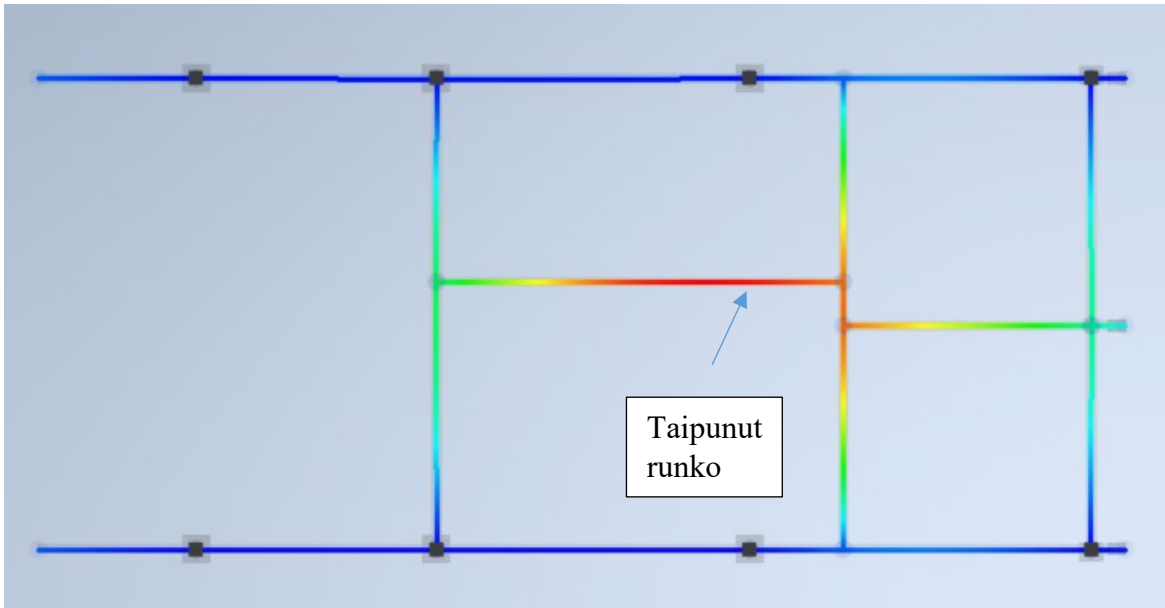
Materiaalina kannatinrunossa on käytetty terästä, palkit ovat terässtandardien mukaisia palkkeja. Ne ovat DIN 1025-5 IPE 270, DIN 1025-5 IPE 240 ja putkipalkki SFS EN 10219-2 – 120x120x5. Lisäksi käytetty itse mallinnettuja uumatukia, jotka ovat 10 mm terästä. Tavoitteeksi voidaan määrittellä, että rakenne säilyy ennallaan ja ettei se taivu liikaa, jotta rungon päällä oleva kuljettimen toiminta ei häiriinny.

4.4.2 Frame -analyysi ohje

Asetuksista valitaan staattinen analyysi, jolla saadaan tutkittua siirtymiä. Sen jälkeen määritellään materiaalit, niin voidaan tutkittavan kohteen muut tiedot asettaa. Näin ollen kappaleen jaloille osoitetaan tuennat (fixed) jäykästi alustaan sekä voimat continuous load -toiminnolla, jolla voimat jakautuvat tasaisesti koko palkille. Tämän jälkeen voidaan tehdä simulaatio ja saadaan tulokset tarkasteltaviksi.



KUVA 13. Frame analysis tulokset sivulta katsottuna.

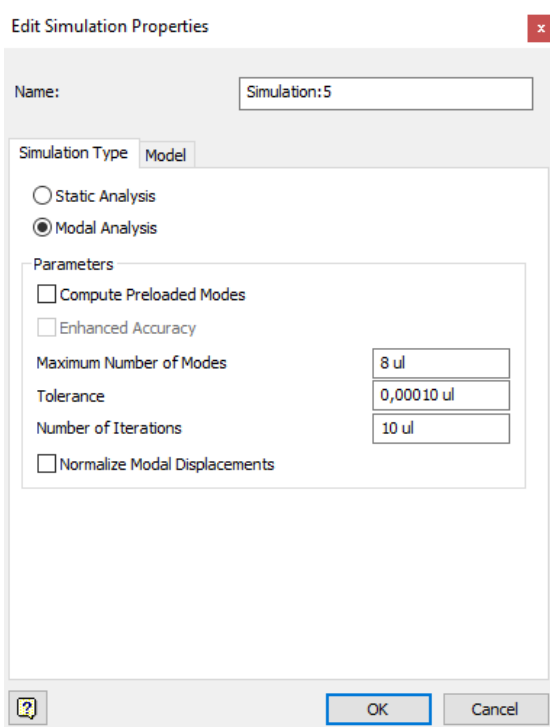


KUVA 14. Frame -analysis -tulokset ylhäältä katsottuna.

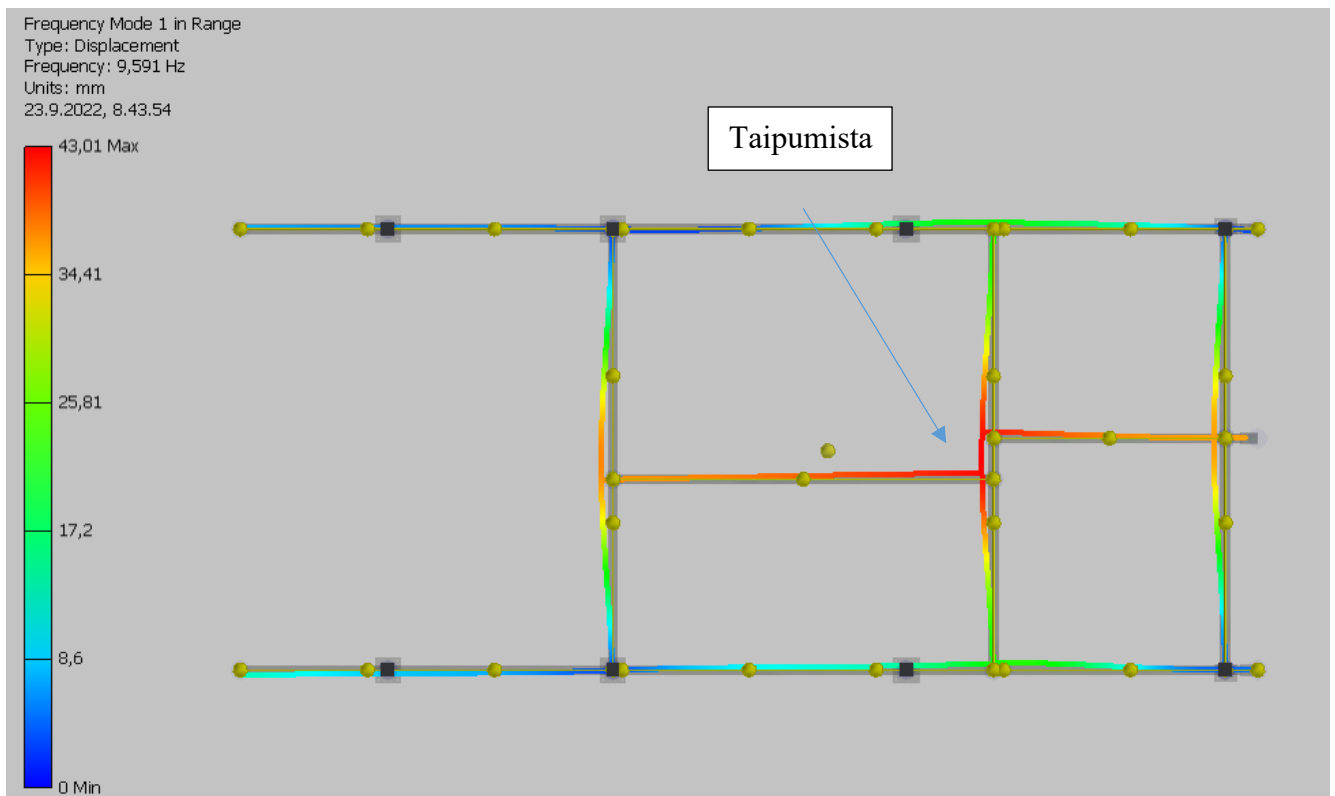
Kuvissa 13 ja 14 näkyy, että tuloksesta huomattiin, että kappale pysyy reunoilta paikallaan, mutta keskeltä kappale taipuu. Maksimi taipuma on 30,69 mm. Näitä saatuja arvoja verrataan olemassa oleviin raja-arvoihin. Kuitenkin jos rakenteesta haluttaisiin kestävämpi, voitaisiin välipalkit vaihtaa isommaksi eli tässä tapauksessa IPE 240 vaihdettaisiin IPE 270. Tasapainoa antaisi myös, jos palkit olisivat samassa linjassa ja keskellä. Kannatinrungolla on suunniteltu noin, jotta kuljettimen paino jakautuu sille tasaisemmin, joten välikappaleiden siirtämisen näissä mittasuhteissa olisi tarpeetonta.

Muita rakenteen kestävyysvaikuttavia tekijöitä, jotka voivat muuttaa sitä kestävämmäksi ovat mahdollisesti päälle laitettava rautalevy tai poikittain palkkeja, joka tukee jo rakennetta. Myös se minkäläinen kokoonpano päälle laitetaan voi vaikuttaa asiaan, koska senkään paino ei välttämättä jakaudu tasaisesti kannatinrunkoon nähden.

Muita ominaisuuksia voidaan tutkia moodianalyysin avulla, tuloksista saadaan selville ominaistajuuDET ja -muodot. Asetuksista valitaan moodianalyysi, josta valinnat kuvan 15 mukaisesti, numeraaliset arvot Inventorin oletusasetuksilla. Alimmaksi ominaistajuudeksi saadaan 9,591 HZ, ja vastaava ominaismuoto nähdään kuvassa 16. Moodianalyysissä ollaan useimmiten kiinnostuneita alimmista taajuuksista.



KUVA 15. Moodianalyysi -valikko (Frame analyysi)

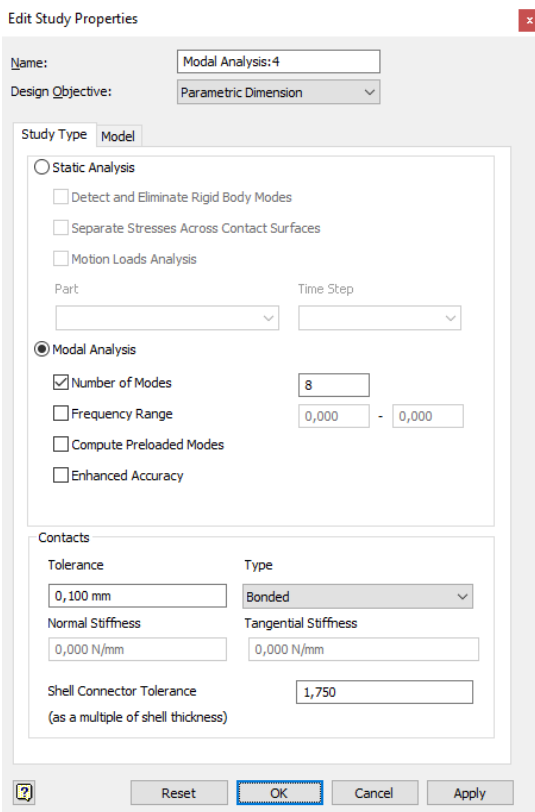


KUVA 16. Moodianalyysi -tulokset ylhäältä.

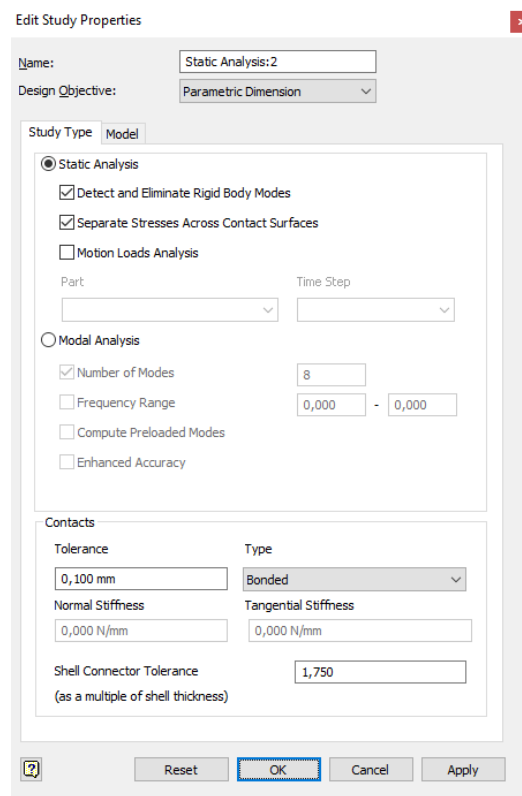
4.4.3 Stress -analyysi ohje

Tämä tarkastelu aloitetaan samalla tavalla kuten frame -analysis eli ensin laitetaan tuennat (fixed), jonka jälkeen lisätään kohdistuvat voimat (force). Näiden lisäksi luodaan kontaktit joko automaattilla tai manuaalisesti. Verkotusta tehdessä tulee katsoa, että verkko on hyvän kokoinen tiheydeltään, mutta sitä voi myös muuttaa tarvittaessa jälkikäteen. Verkotusta tehdessä pitää kiinnittää huomiota ainakin seuraaviin asioihin: elementin koko, tyyppi, lukumäärä ja verkon laatu. Jännityshuiput vaativat tiheämpää verkotusta, kun taas paikoissa, joihin ei oleteta ilmaantuvan niin suurta jännitystä, voidaan käyttää harvempaa verkotusta. Pienillä verkotuksilla laskenta yleensä onnistuu. Kuvista 19 ja 20 huomataan myös, miten voimat ja tuennat on asetettu eli nuolet viittaavat voimiin, jotka tulevat yläpuolelta ja tuentaa puolestaan ovat valkoiset neliöt, joissa kuvio.

Tarkasteluja tehtiin moodianalyysin ja staattisen analyysin laskelmilla. Moodianalyysissa valittiin laskettavaksi 8 alinta ominaistajuutta, kuten kuvassa 17. Staattisen analyysin asetuksista havaita ja eliminoi jäykät rakenteen tilat sekä erotella jännitykset kontaktipinnoilla kuten kuvassa 18. Tarkastelusta saadaan selville muita rakenteen ominaisuuksia, kuten esimerkiksi varmuuskerroin myötölujuuteen nähden.

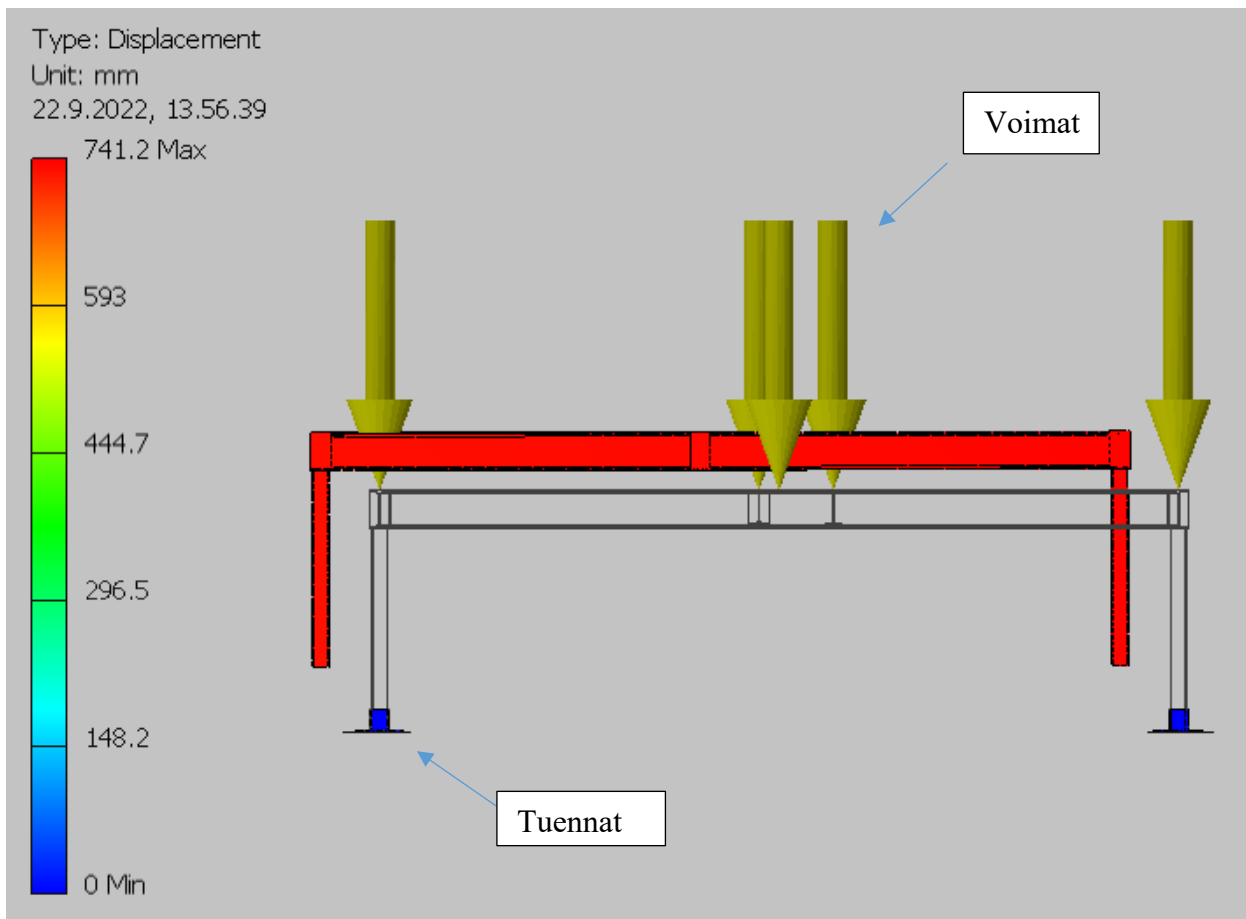


KUVA 17. Moodianalyysi -valikko

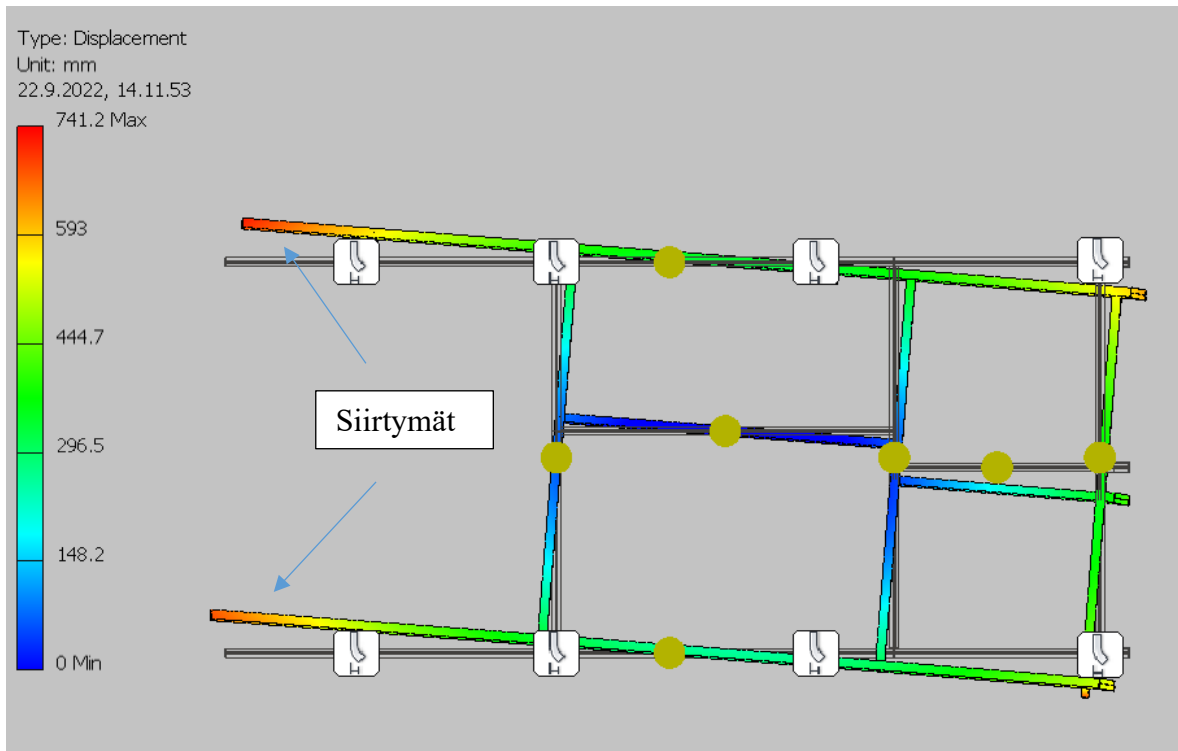


KUVA 18. Staattinen analyysi -valikko

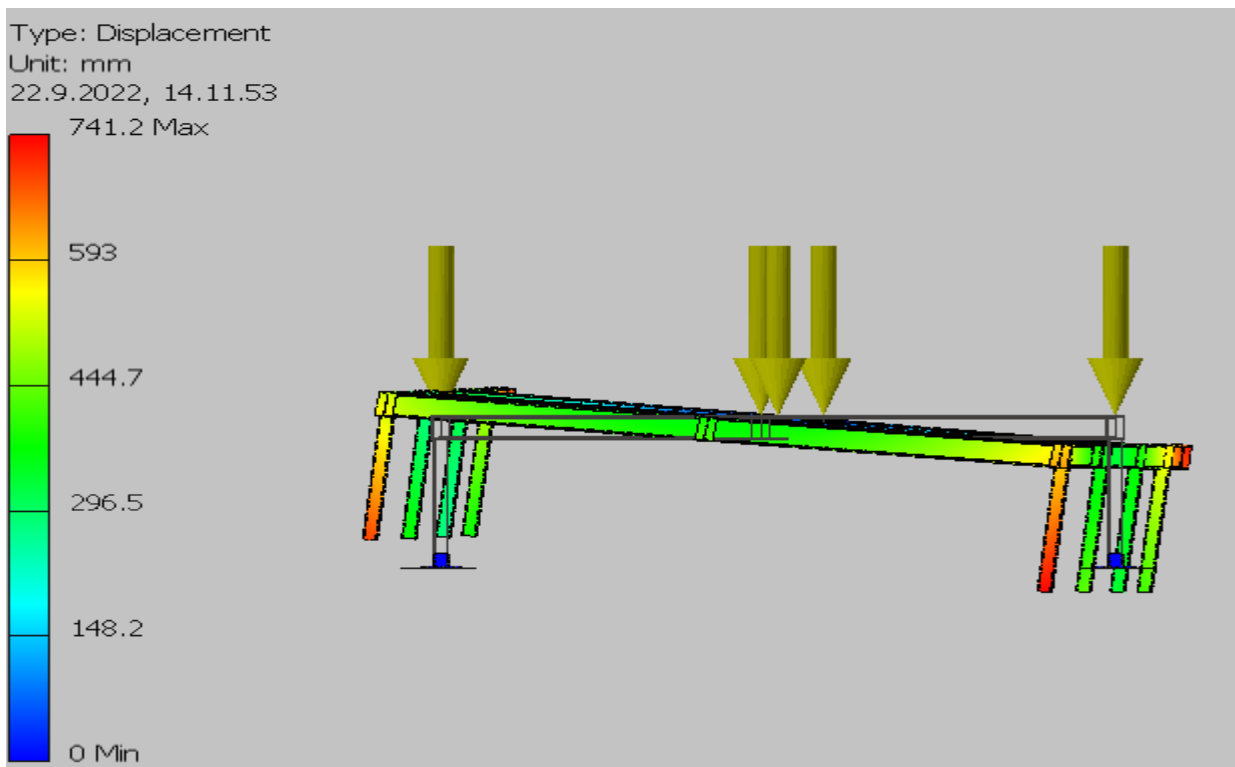
Moodianalyysi liittyy vapaisiin värähtelyihin ja tietyn taajuuden ominaismuotoon, niin varsinaisia siirtymiä ei ole ja näin ollen niillä ei ole varsinaista merkitystä. Tämä tarkoittaa, sitä että kappaleilla on oma muotonsa ja tapansa värähdellä, niin että hitsausvoimat ja elastiset voimat ovat sopivasti tasapainossa. Siis jos rakenne ”kelluu” avaruudessa ja sitä kolautetaan moukarilla, rakenne alkaa värähtelemään eri taajuuksilla ja tämä kuva on vain tietyn taajuuden värähtelymuoto.



KUVA 19. Stress -analyysi: moodianalyysin alin ominaismuoto



KUVA 20. Stress -analyysi: moodianalyysin toiseksi alin ominaismuoto ylhäältä

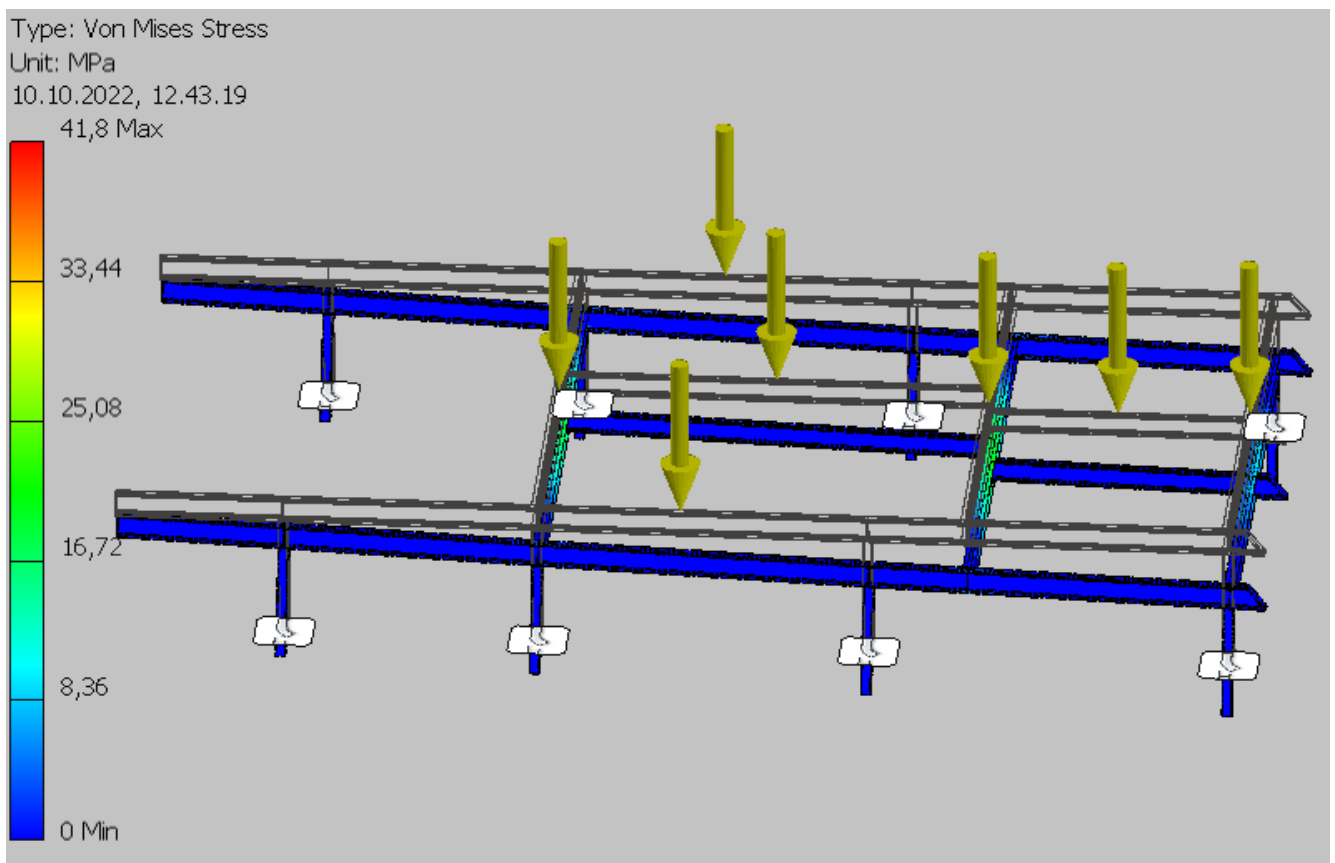


KUVA 21. Stress -analyysi: moodianalyysin toiseksi alin ominaismuoto päädystä

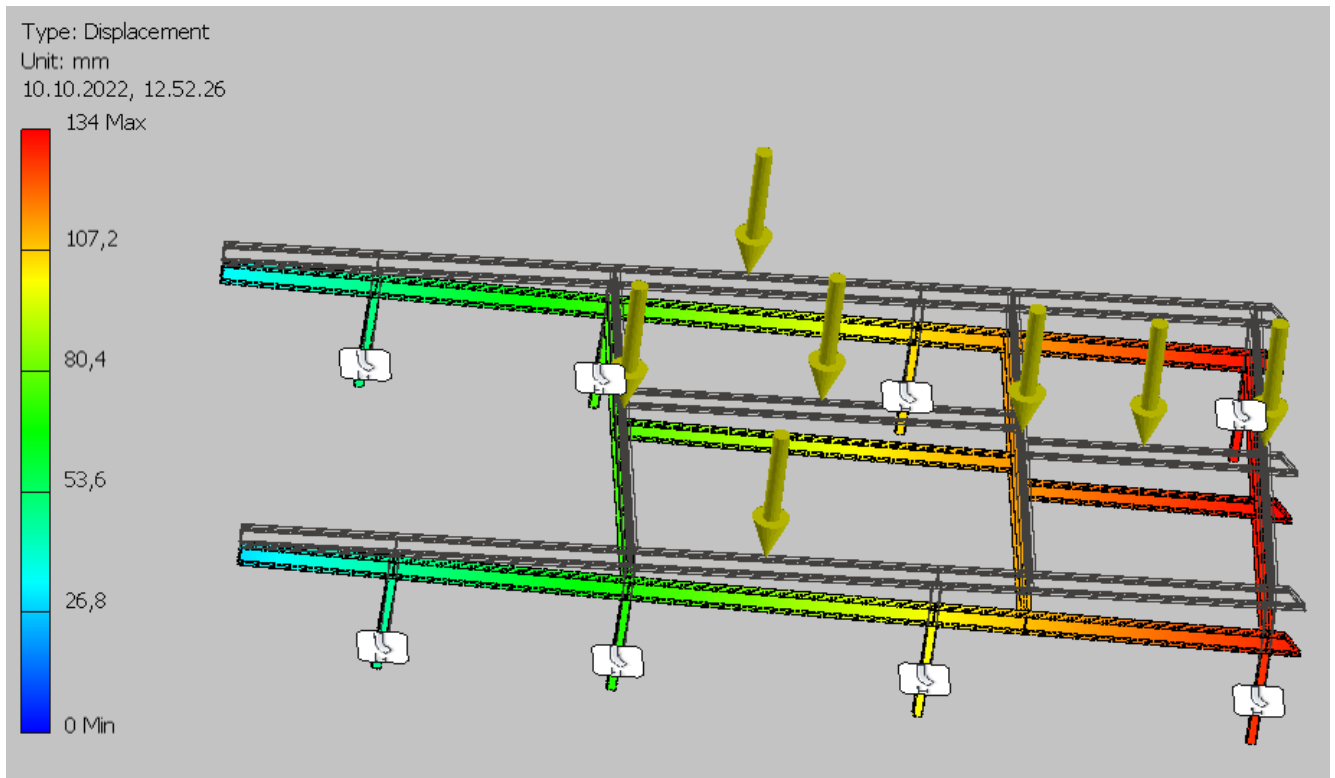
Kuten kuvasta 21 nähdään, ominaismuotojen takia kannatinrunko taipuu vasemmanpuoleiselta reunalta ylöspäin sekä (kuva 20) oikealle niin paljon, että maksimi siirtymä on 741,2 mm. Kuitenkaan luvulla ei

saada konkreettisia tuloksia vaan moodianalyysi skaalaa siirtymät vain siihen asti, että ominaismuodot tulevat selkeästi esille. Molemmat palkit siirtyvät ylöspäin, vaikka voimat tulevat yläpuolelta, johtuen siitä, että nämä ovat rakenteen vapaiden värähtelyiden ominaismuotoja, jolloin tuenta ei ole mukana laskennassa.

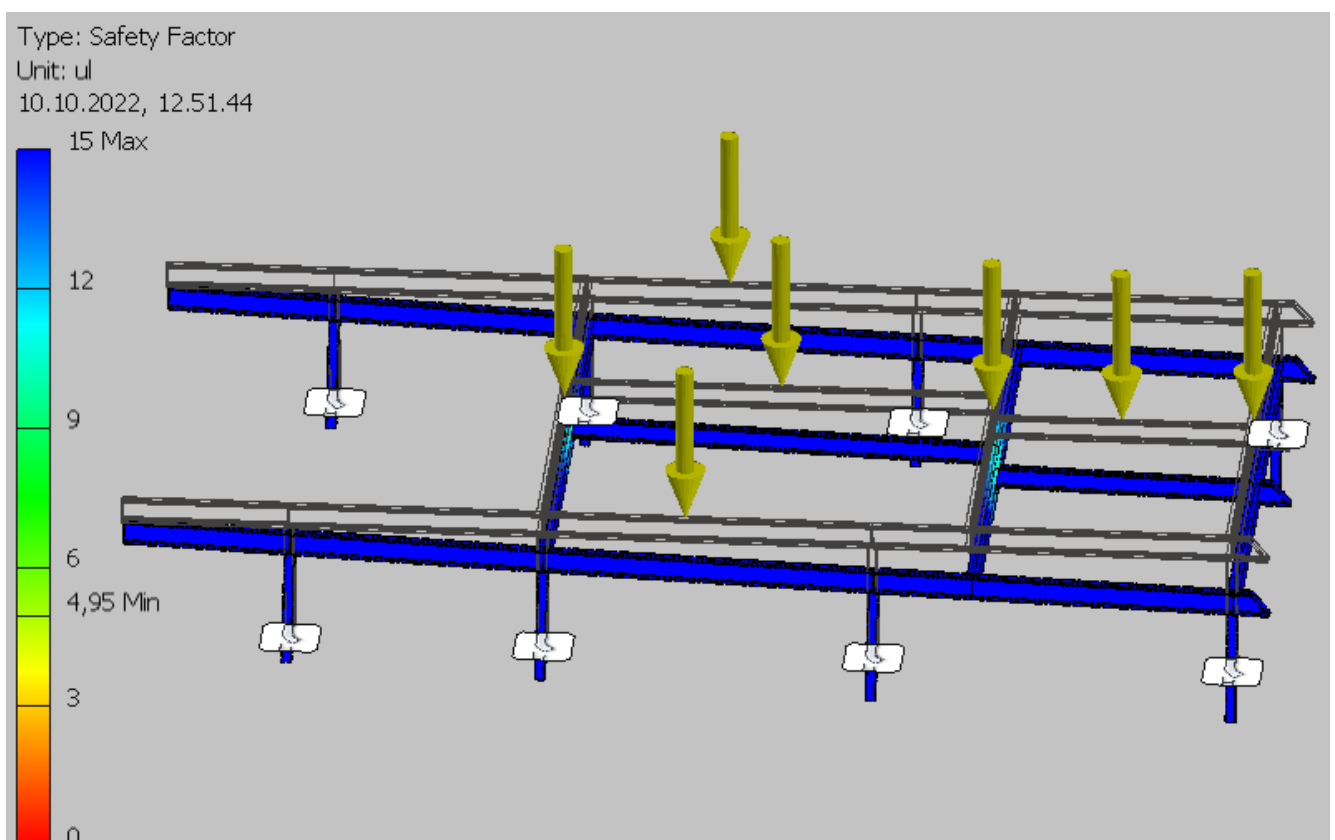
Muita ominaisuuksia lujuuslaskentaan liittyviä tuloksia, joita saatiin selville staattisen analyysin puolelta (kuvat 21-23) ovat Von Mises jännitykseksi max 41,8 MPa. Von Mises -jännityksellä tutkitaan antaako kappale myöten vai murtuuko se. Kappaleen kestävyyttä selvitetään tilanteissa, joissa se altistuu puristukselle, taipumiselle ja venymälle. siirtymä 134 mm sekä varmuuskerroin 15 myötölujuuteen nähden, jolla pyritään ehkäisemään rungon rikkoutumista ja siitä aiheutuvia vaaratilanteita. Eli millainen voima aiheuttaa sen, että kappale antaa myöten, mutta ei kuitenkaan murru.



KUVA 21. Von Mises - jännitykset



KUVA 22. Siirtymä



KUVA 23. Varmuuskerroin

Analyysin tuloksista päätellään pitääkö muutoksia tehdä, lisäksi voi katsoa Inventorin luoman raportin tuloksista ja verrata niitä reunaehtoihin. Raportti löytyy simulointi -välilehden oikeasta yläkulmasta kohdasta Export. Kun tarkasteluja on tehty, niin tarvittaessa voidaan tehdä muutoksia esimerkiksi materiaaleihin tai kuormituksiin, jonka jälkeen tehdään analyysi uudelleen ja nähdään, autoivatko tehdyt muutokset.

5 POHDINTA

Opinnäytetyössä käytetyt ominaisuudet olivat ennestään jo kaikki jokseenkin tuttuja. Inventoria olen käyttänyt useamman kuukauden ja parametrimalleja olen tehnyt muutamia, lujuuslaskennasta koneellisesti kokemusta oli vähemmän varsinkin Inventorin osalta, muilla ohjelmilla joitakin lujuuslaskuesimerkkejä on kuitenkin kokeiltu.

Opinnäytetyön päätavoitteet täyttyivät, sillä ohjeista käy ilmi, miten rakenteesta saadaan tehtyä parametrisen sekä mitä lujuuslaskentaan tarvitaan. Lisäksi pienemmät tavoitteet, joita asetettiin parametriselle sekä lujuuslaskennalle täyttyivät eli kannatinrungon tekeminen onnistui sekä se pysyi suhteellisen hyvin rakenteessaan lujuustarkastelussa.

Opinnäytetyötä tehdessä parametrimallin tekeminen onnistui ilman suurempia ongelmia. Jälkeenpäin olen kyllä miettinyt pitäisikö siihen tehdä pieniä muutoksia, jotta se toimisi hieman paremmin lisäksi pohdin erään parametrin nimen muuttamista enemmän parametrimallia kuvaavammaksi. Helpommaksi kokonaisuuden tekemistä voisi vielä tehdä, jos käytössä olisivat älykkäät osaperheet, niin sen avulla voitaisiin uumatuetkin valita valmiiksi oikeissa mitoissa, jolloin ei niitäkään tarvitsisi itse mallintaa. Se ei kuitenkaan kuulunut tähän työhön, joten parametrimallin toimivuus on riittävä, pääasiat toimivat tarpeeksi ja mitään ongelmia ei aiheudu, vaikka parametrimalliin tekee muutoksia.

Tämän opinnäytetyön kohdalla lujuuslaskenta frame -analyysin kohta onnistui hyvin, stress -analyysi tuotti aluksi hieman harmia, mutta pienen tarkastelun jälkeen se kuitenkin onnistui ja siitä sai tehtyä päätelmiä kappaleen kestävydestä ja pohdittua ratkaisuja mahdolliseen kestävyden parantamiseen.

LÄHTEET

Autodesk. Mikä on Inventor. 2022a Saatavissa: [Inventor-ohjelmisto | Katso hinnat ja osta virallinen Inventor 2023 \(autodesk.fi\)](#). Viitattu 13.4.2022

Autodesk. Inventor 2023 is here. b Saatavissa: [Inventor 2023 | What's New \(autodesk.com\)](#). Viitattu 13.4.2022

Autodesk Inventor 2022a. About parameters in models. Saatavissa: [Inventor 2022 Help | About Parameters in Models | Autodesk](#). Viitattu 1.3.2022.

Autodesk Inventor. 2022b. About stress analysis. Saatavissa: [Inventor 2022 Help | About Stress Analysis | Autodesk](#). Viitattu 8.4.2022.

Autodesk Inventor. 2022c. Frame Analysis Overview. Saatavissa: [Inventor 2022 Help | Frame Analysis Overview | Autodesk](#). Viitattu 8.4.2022

Hietikko, E. 2007. Autodesk Inventor. Helsinki: Readme.fi.

Hietikko, E. 2021. Palkki: Lujuuslaskennan perusteet. 4. painos. Helsinki: BoD - Books on Demand

Munford, P. & Normand, P. 2016. *Mastering Autodesk Inventor 2016 and Autodesk Inventor LT 2016*. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, Inc.

Parametrimallin mallintaminen lyhyesti

1. Tehdään Excel- tiedostopohja ja linkitetään se Inventoriin
2. Luodaan rautalankamalli parametrisillä mitoilla
 - a. Rautalankaan valitaan halutut palkit esimerkiksi IPE 270
 - b. katsotaan asetuksista, että ne asettuvat oikein ja muokataan tarvittaessa
3. Lisätään muut osat
 - a. välituki
 - linkitä parametriin ja merkitse oikean osan kohdalle
 - määritä tarvittavat kontaktit
 - b. jalat
 - linkitys ja merkintä
 - kontaktit
 - pattern component kaavat
 - c. säätöjalka
 - kontakti jalan kanssa
 - pattern component kaava
 - d. uumatuki
 - oikeat kontaktit niin, että se liikkuu tuettavien kappaleiden mukana
 - e. lappu IPE- palkkien päähän
 - määritellään vain oikealle paikalle

Lujuustarkastelu lyhyesti

1. Valitse haluamasi tarkastelu muoto
2. Reunaehtojen asettaminen
 - a. voimat
 - b. kontaktit
 - c. tuennat
3. Simuloinnin suorittaminen
4. Tulosten tarkastelu
5. Mahdollinen parannus
6. Uudestaan simulointi, jos tarpeellista