



Kuljetusrobotin teräsosien FEM-laskenta

Jaakko Järvi

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

JÄRVI, JAAKKO:
Kuljetusrobotin teräsosien FEM-analyysi

Opinnäytetyö 35 sivua
Toukokuu 2023

Opinnäytetyössä varmistettiin aiemmin suunnitellun kuljetusrobotin mekaaninen kestävyys ennen lopullista kokoonpanoa FEM-laskentaa apuna käyttäen. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuljetusrobotin teräsrungon kestävyyteen liittyviä asioita. Kyseinen kuljetusrobotti on suunniteltu Voimalaite Service Oy:lle, koska sopivaa sähköhydraulista ja kauko-ohjattavaa haalauslaitetta ei ollut markkinoilla valmiina.

Kuljetusrobottia käytetään raskaiden koneiden viemiseen konehuoneisiin. Työn tilaajana oli varavoimakoneita valmistava yritys, Voimalaite Service Oy, joka on valmistanut varavoimakoneita vuodesta 1986 alkaen. Toimivalla kuljetusrobotilla saadaan merkittäviä säästöjä koneiden kuljetuksessa sekä pienennetään työntekijöiden tapaturmariskiä.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin varmuus kuljetusrobotin mekaanisesta kestävydestä ennen laitteen käyttöönottoa. Runkoa vahvistettiin tulosten perusteella kahdesta kohdasta. Kuljetusrobotista voitaisiin kehittää matalampi malli, joka mahtuisi kokonaan kuljetettavan rungon alle. Voimanlähteenä kuljetusrobotissa olisi erillinen hydraulipumppuyksikkö, jonka käyttövoimana voitaisiin hyödyntää useampaa eri energiamuotoa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

JÄRVI, JAAKKO:
FEM analysis of the steel parts of a Transport Robot

Bachelor's thesis 35 pages
May 2023

In the thesis, the mechanical durability of a previously designed transport robot was verified before the final assembly using FEM calculation. The transport robot is used to carry heavy machinery to the machine room. A functioning transport robot provides significant savings in the transportation of machinery and reduces the risk of accidents to the workforce. The client of the work is Voimalaite Service Oy which has manufactured diesel generators since 1986.

As a result of the thesis, certainty on the durability was obtained from the mechanical point of view. The reliability of the transport robot was ensured before commissioning. Because, when the practical research work was extensive, it was possible to collect a large amount of data for the FEM-analysis.

Key words: fem analysis, Solid Works, strength of materials, static analysis.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	KULJETUSKONEEN SUUNNITTELU	7
	2.1 Vaatimusten määrittely.....	7
	2.2 Rakenteen esisuunnittelu	8
	2.3 Suunnittelu	9
3	TERÄSTEN KÄYTTÄYTYMINEN	11
	3.1 Teräksien perusominaisuuksia.....	11
	3.2 Hooken Laki ja kimmomoduuli	12
	3.3 Lujuushypoteesit	14
	3.4 Jännitysmatriisi ja Jännityskomponentit	16
	3.5 Jännityselementit	17
	3.6 Elementtimenetelmä	18
	3.7 Elementin vapausasteet.....	19
	3.8 Elementin perusyhtälö.....	19
	3.9 Esimerkkilasku	20
4	FEM laskeminen Solid Works ohjelmistolla	23
	4.1 Ohjelmisto ja simulointi	23
	4.2 Nostopuomin tulosten tulkinta	29
	4.3 Pulttien kestävyysvarmistus	30
	4.4 Kokonaisuuden laskenta	32
	4.5 POHDINTA	34
	LÄHTEET	35

ERITYISSANASTO tai LYHENTEET

FEM	Finite element method
VVEH	Vääristymistiheysenergia (Huber, Hencky, Von Mises)
MLJH	Maksimileikkausjännityshypoteesi (Coulomb, Tresca, Guest)
Mesh	verkotus
n	Varmuuskerroin
σ	Normaalijännitys
ε	Venymä
A	Poikkipinta-ala
R_{eL}	Alempi myötöraja
R_{eH}	Ylempi myötöraja
R_m	Murtolujuus
σ_E	Kimmoraja
E	Kimmomoduuli
W	Taivutusvastus
M	Taivutusmomentti
I	Jäyhyysmomentti
ΔL	Pituuden muutos
τ	Leikkausjännitys
L_0	Mittapituus
S_0	Sauvan alkuperäinen poikkipinta-ala

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tarkastelee aiemmin suunnitellun sähköhydraulisen tela-alustaisen kuljetusrobotin kriittisimpien osien kestävyyttä ennen lopullista kokoonpanoa FEM-analyysin avulla. Ohjelmistona käytettiin Solid Works:iin lisäosana saatavaa monipuolista Simulation ohjelmaa. Laahattavat koneet ovat raskaita sekä kalliita, joten kuljetusrobotin teräsosien on kestävä kuormat varmuuskertoimella 2.

Työn tilaajana oli Voimalaite Service Oy, joka on varavoimakoneita sekä niiden huoltoa ja modernisointeja tekevä yritys. Yritys toimii Tampereella ja se on toiminut alalla vuodesta 1986.

Perinteisesti raskaiden koneiden laahaaminen konehuoneisiin on tapahtunut miesvoimin pumppukärryillä sekä vinsseillä. Haasteita on ollut varsinkin käytävillä, johon ei mahdu trukkia tai kuorma-autoa tai ei voida käyttää polttomoottorilla käytettäviä koneita pakokaasujen takia. Tämän kuljetusrobotin tarkoitus on nopeuttaa kuljetustyötä sekä vähentää työntekijöihin kohdistuvaa kuormitusta.

Tässä opinnäytetyössä kerrotaan kuljetusrobotin suunnittelusta annettujen suureiden avulla. Työ oli kokonaisuudessaan laaja, joten tässä työssä perehdytään lujuuslaskennan perusteisiin sekä kuljetusrobotin teräsosien simuloimiseen Solid Works ohjelmiston avulla, jotta saataisiin riittävä varmuus rakenteen kestävydestä.

2 KULJETUSKONEEN SUUNNITTELU

2.1 Vaatimusten määrittely

- Koneen vaatimusten määrittely
- Taakan määrittely

Kuljetusrobotilla on tarkoitus kuljettaa raskaita koneikkoja sekä runkoja konehuoneisiin ahtaita käytäviä pitkin, joissa ei voida käyttää polttomoottorilla toimivia laitteita, esimerkiksi trukkeja. Tavoitteena oli saada koneen leveys alle 1050 mm, jotta päästäisiin mahdollisimman kapeasta oviaukosta huoneisiin. Laitetta ei ole tarkoitus käyttää kuin pinnoitetuilla alustoilla. Laitteen kuljetuskyky pitäisi riittää viemään maksimitaakka kaltevuuteen 1:10 asti, tämä vaikuttaa lähinnä voimansiirron sekä moottoritehon mitoitukseen.



KUVA 1. Kuljetusrobotti (Järvi 2022)

Haalattavalla koneella laahattavat koneet rajattiin teholuokkaan 1100 kVA, sen teholuokan koneiden paino on noin 6000 kg (kuva 1). Kuormituksesta puolet raskaita kuljetusrobottia, koska koneen toinen pää on tarkoitus kannatella kuvassa 1 näkyvillä laahausrullilla.

2.2 Rakenteen esisuunnittelu

- Luonnosten teko
- Suunnittelu

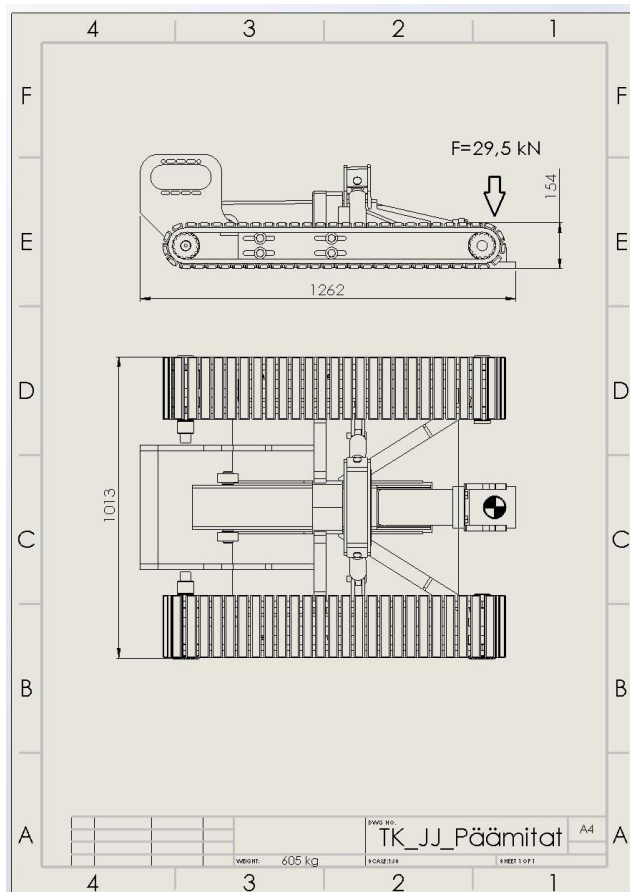
Kuljetusrobotin rakennetta suunniteltiin annettujen vaatimusten mukaan. Yksi haaste oli kuljetettavan rungon alle mahtuva rungon matala profiili, joka teki rakenteen suunnittelusta haastavampaa. Käytännössä tämä johti suurempiin ainevahvuuksiin sekä tukirakenteiden lisäämiseen. Esimerkiksi telojen sivulevyt valmistettiin 30 mm teräksestä. Suuren kantavuuden kannalta päädyttiin telavetoiseen koneeseen kantokyvyn sekä hyvän pidon takia. Telalaput kumitettiin vulkanoimalla pidon parantamiseksi. Kuvassa 2 näkyvät rungon etuosaan tehdyt vahvikelevyt sekä -putket.



KUVA 2. Tukirakenteita (Järvi 2022)

2.3 Suunnittelu

Suunnittelu eteni muutamien eri versioiden jälkeen versioon, joka täytti vaaditut mitat sekä vaatimukset. Laitteen mataluuden takia nostopuomin nostoalue rajattiin noin 100 mm, käytännössä raskaimmat taakat nostettaisiin valmiiksi ylös ja laite ajettaisiin kuorman alle, sillä laitteen puomilla nosto äärimittojen ulkopuolella ei painopisteen takia onnistuisi. Projektissa oli myös voimansiirron, hydrauliiikan sekä sähköpiirikaavioiden suunnittelu. Kuljetusrobotti on radio-ohjattava. Kuvassa 3 näkyvät lopullisen suunnitelman päämitat.



KUVA 3. Päämitat (Järvi 2022)

Isohkon kantokyvyn takia runkoon asennettiin telojen kohdalle kuvassa 4 näkyvät PE-1000 kulutuslevystä valmistetut levyt, jotka jakavat kuormitusta laakeroinneilta pois. Varsinkin epätasaisella pinnalla on tärkeää, ettei telalappujen yläpinta osu rungon rakenteisiin.



KUVA 4. PE-1000 kulutuslevyt (Järvi 2022)



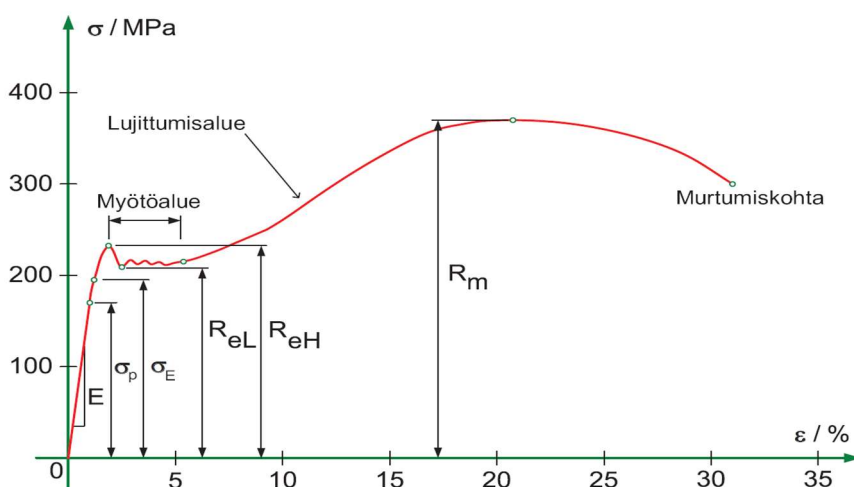
Kuvassa 5 näkyy rullaketjuvälitys, siinä on käytetty välityksen toisiopuolella Din 8187_5/8” kaksoisrullaketjua, jonka minimi murtolujuus on 44,5 kN. Se on moninkertainen ketjuun kohdistuviin rasituksiin nähden.

KUVA 5. Rullaketjuvälitys (Järvi 2022)

3 TERÄSTEN KÄYTTÄYTYMINEN

3.1 Teräksien perusominaisuuksia

Teräksen perusominaisuuksiin kuuluu hyvä veto ja puristuslujuus -sitkeys sekä muovattavuus. Jos materiaalina on esimerkiksi S235 J2 G3, niin sen myötöraja R_{eH} on minimissään 235 N/mm^2 (MPa) sekä murtolujuus $340\text{--}470 \text{ N/mm}^2$ (MPa), nämä vaihtelevat hieman materiaalin vahvuuden mukaan. Kuvassa 6 on S235 laatuselle teräkselle tehty vetokoe.



Kuva 6. Sitkeän teräksen σ - ϵ -käyrä (Matti Lähteenmäki 2013–2014)

E	Kimmomoduuli
σ_p	Suhteellisuusraja
σ_E	Kimmoraja
R_{eL}	Alempi myötöraja
R_{eH}	Ylempi myötöraja
R_m	Murtolujuus

3.2 Hooken Laki ja kimmomoduuli

Hooken laki, jännityksen ja venymän välinen yhteys yhtälö (1)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Venymän yhtälö (2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Rakenteen varmuus saadaan laskettua yhtälöllä (3)

$$\eta = \frac{R_e}{\sigma} \quad (3)$$

Kappaleen poikkileikkauksen normaalijännitys saadaan yhtälön (4) avulla.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (4)$$

Leikkausjännitys saadaan ratkaistua yhtälöllä (5)

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Esimerkkilasku kimmomoduulin määrittelystä koesauvan materiaalille:

Määritellään kimmomoduuli E , 140 mm pitkälle koesauvalle, jonka halkaisija on 14 mm. Koesauvaan aiheutuu kimmoisella alueella vedettäessä 60100 N voima. Metallien vetokoe tehdään standardin SFS-EN 100021-1 mukaisesti. Kimmomoduuli E , kuvaa materiaalin jäykkyyttä.

Lasketaan jännitys σ yhtälöllä (4)

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{60100 \text{ N}}{153,9 \text{ mm}^2} = 390 \text{ Mpa}$$

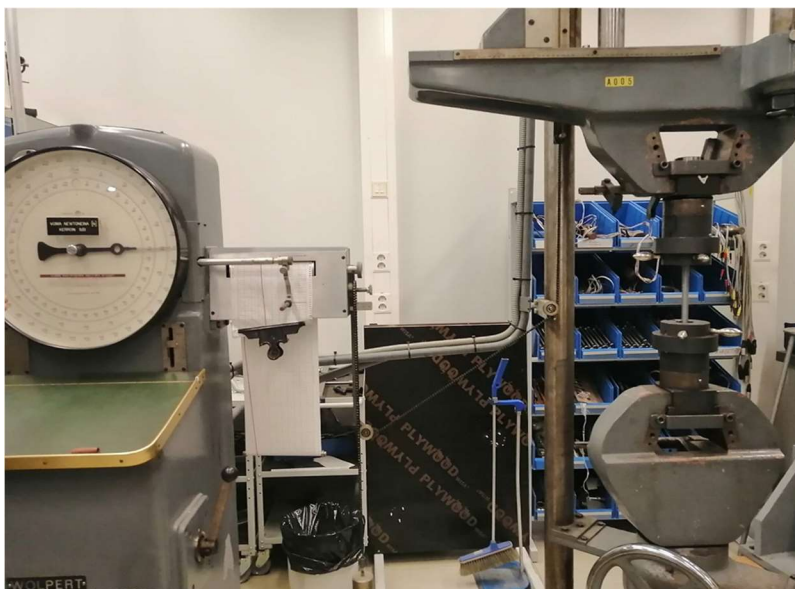
Lasketaan venymä yhtälöllä (2), Venymä mitataan σ_p kimmoiselta osuudelta, se on esimerkkilaskussa $0,2636 \text{ mm}$. Kuva 6.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,2646 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 0,00189$$

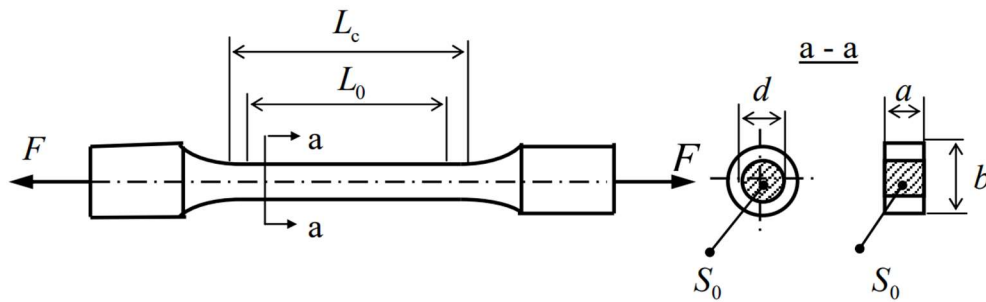
Lasketaan kimmomoduuli kaavalla (1)

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{390 \text{ Mpa}}{0,00189} = 206349 \text{ Mpa} \sim 206 \text{ Gpa}$$

Vetokokeessa sauva muokkauslujittuu myötöalueen jälkeen murtolujuuteen (R_m) asti. Silloin sauvan vetolujuus kasvaa, kunnes sauva katkeaa. Sitkeämmillä teräksillä ei ole myötöaluetta, ne katkeavat heti ylempään myötörajan jälkeen. Lujilla teräksillä mitataan se voima, mikä jättää $0,2 \%$ venymän pysyvästi sauvaan. Kuvassa 7 oikealla näkyy vetosauva kytkettynä vetokoneeseen, vasemmalla näkyvässä mittarista luetaan voima N . Kuvassa 8 näkyy vetosauvan muoto.



Kuva 7. Vetosauvan mittausta TAMK:n tiloissa (Järvi 2021)



Kuva 8. Vetosauvan muoto (rmseura.tkk.fi, materiaali)

3.3 Lujuushypoteesit

Lujuushypoteesilla on tarkoitus määrittellä kestäkö materiaali vaaditun jännitystilan ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z$) murtumatta tai myötäämättä.

Määrittelyyn tarvittavat materiaalivakiot, jotka saadaan vetokokeesta:

- R_e Vetomyötöraja
- R_m Vetomurtolujuus

Määrittelyyn tarvittavat materiaalivakiot, jotka saadaan vääntökokeesta:

- τ_s Leikkausmyötöraja
- τ_B Leikkausmurtolujuus

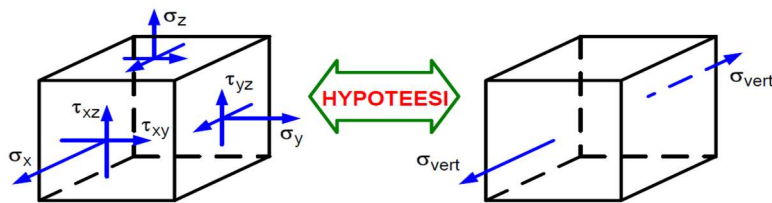
Vertailujännityksen määritelmä:

Yleistä jännitystilaa vastaavalla vertailujännityksellä σ_{vert} tarkoitetaan sen aksiaalisen vetotilan normaalijännitystä, jolla on sama varmuusluku kyseessä olevan materiaalivaurion suhteen.

Vertailujännityksen lausekkeen määrittäminen:

Tiettyyn lujuushypoteesiin liittyvä vertailujännityksen lauseke saadaan selville merkitsemällä vauriokriteerinä oleva suure yhtä suureksi yleisessä jännitystilassa ja aksiaalisessa vedossa kuva 8. Maksimileikkausjännityshypoteesissa (MLJH) vaaditaan, että kuvan elementeillä on samansuuruinen τ_{\max} .

Vakiovääristymisenergiyahypoteesissa (VVEH) vaaditaan, että elementteihin on sitoutunut yhtä suuri vääristymisenergiatiheys.



Kuva 8. Lujuushypoteesi (Matti Lähteenmäki, arkisto 2012–2013)

Yleisen jännitystilan jännityskomponenttien avulla saadaan kirjoitettua vääristymisenergiatiheyden lauseke (6).

$$U_{0D} = \frac{1}{12G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \quad (6)$$

Josta saadaan johdettua Von Mises, Huber, Hency, vertailujännityksen lauseke (7)

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (7)$$

VVEH, Von Mises myötöehto ottaa huomioon kaikki 3 leikkausjännityksen ääriarvoja kun taas MLJH, Tresca huomio vain suurimman arvon.

Tasojännityksen tapauksessa kaava yksinkertaistuu muotoon: (8)

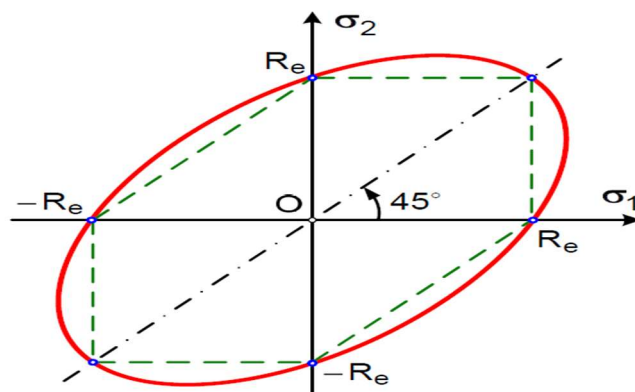
$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Myötääminen alkaa, kun $\sigma_{vert} = R_E$.

Kuva 9. havainnollistaa VVEH sekä MLJH:n eroavaisuuksia.

(Tapio Salmi, Sami Pajunen, Lujuusoppi 2018)

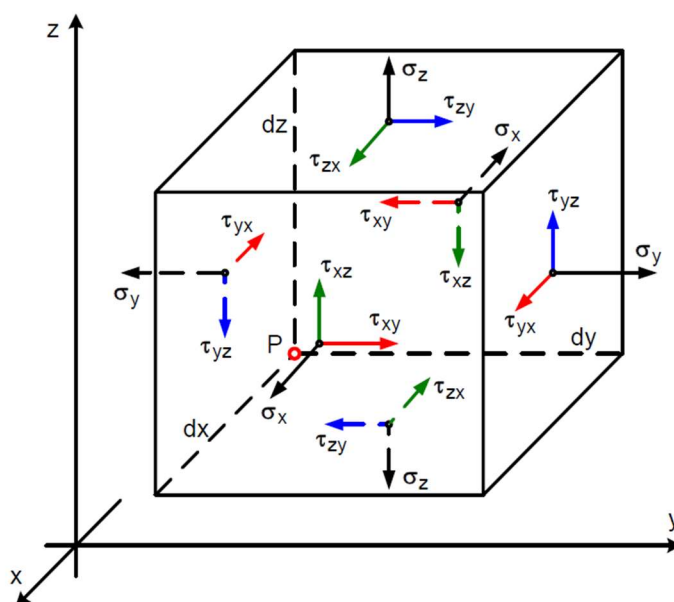
Punainen viiva on VVEH, joka sopii teräksille hieman paremmin kuin MLJH. Tässä työssä käytettävässä Solid Works simuloinnissa käytetään (VVEH) Von Mises myötöehtoa FEM laskennassa.



Kuva 9. Matti Lähtenmäki, arkisto 2012–2013

3.4 Jännitysmatriisi ja Jännityskomponentit

Jännityskomponenteista voidaan muodostaa jännitysmatriisi, jota käytetään lähinnä käsin laskennassa hyväksi.



Kuva 10. Matti Lähtenmäki, arkisto 2012–2013

Kuvassa 10 havaitaan että jännityskomponentit esiintyvät pareittain tämän takia pisteen P jännitystilän tuntemiseen riittää 6 jännityskomponenttia.

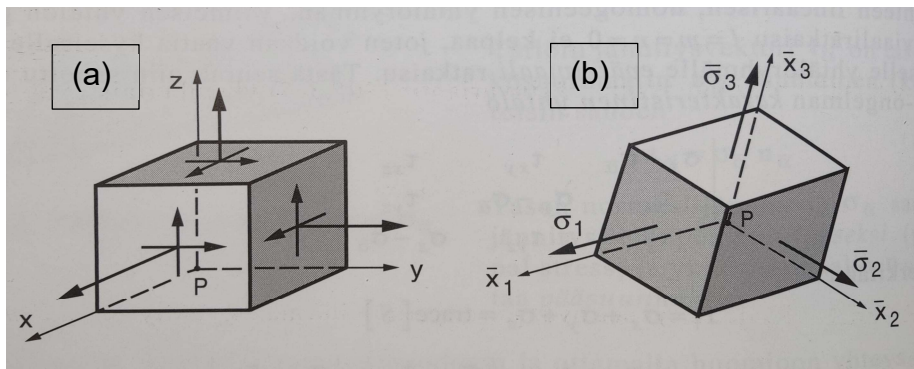
Yhtälö 9. kuusi kappaletta jännityskomponentteja.

$$\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz}$$

(9)

3.5 Jännityselementit

Kuvassa 11 jännityselementti (a) sekä pääjännityselementti (b). Jännityselementtiä (a) kiertämällä pisteen P ympäri, niin ettei missään tahkossa esiinny leikkausjännityksiä saadaan pääjännityselementti (b).



Kuva 11. (Tapio Salmi, Sami Pajunen, Lujuusoppi 2018,306)

Pääjännityselementeistä saadaan muodostettua lävistämatriisi (10) Käyttämällä pääjännityselementtiä jännitystilän käsittelyssä saadaan laskentaa yksinkertaistettua.

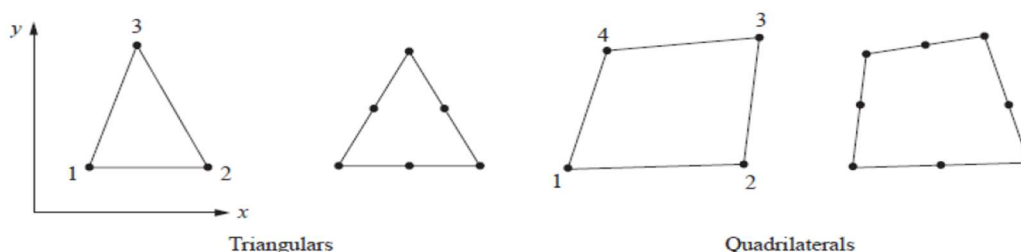
$$[S] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.6 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmän kehittäminen on alkanut 1940-luvulla mekaniikan sovelluksiin. Menetelmästä alkoi tulla yleisempi tietokoneiden laskentatehon kasvaessa 1960- ja 1970-luvulla. Kuusikymmentäluvun puoleen väliin saakka oli lähes mahdotonta ratkaista monimutkaisia rakenteita, lukuun ottamatta ristikko- tai kehärakenteita. Elementtimenetelmä on osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisuun kehitetty numeerinen ratkaisumenetelmä. Elementtimenetelmässä differentiaaliyhtälöitä ratkaistaan algebran avulla. Rakenteen jaetaan äärellisen (finite) määrän ja elementtejä (element), jotka ovat solmupisteiden (node) avulla toisiinsa kytköksissä.

(Mikko Ukonaho, FEM-kurssimateriaali, 2019)

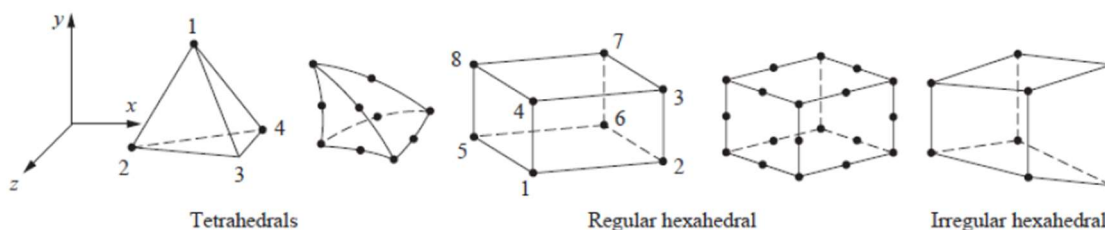
Elementtityyppejä on useita erilaisia eri tarkoituksiin. Useimmiten riittää, kun käyttää ohjelmiston esivalinta-arvoja. Kuori- ja levyelementit (2D ja 3D), Sopii 2D sekä 3D-pintoihin. Tarvitsee lisäksi tiedon materiaalin paksuudesta. Käytössä useimmiten levyäisissä osissa. Kuva 12.



Kuva 12.

(Mikko Ukonaho, FEM-kurssimateriaali, 2019)

Solidi elementti, käytetään solidielementtien laskennassa. Kuva 13.



Kuva 13.

(Mikko Ukonaho, FEM-kurssimateriaali, 2019)

3.7 Elementin vapausasteet

Elementin vapausasteet (Degree of freedom, DOF) kertoo elementin solmujen vapausasteet, kiinnitys sekä kuormituksen. Yhdellä solmulla on maksimissaan 6 eri vapausastetta:

- Translaatio x-, y-, sekä z- suuntaan.
- Rotaatio x-, y-, sekä z-akselien ympäri.

Esimerkiksi sauvaelementillä ei ole rotaatiovapausasteita, sen takia sauvaa voidaan kiertää vapaasti. Sauvan päät ovat nivelöidyt.

3D-solidielenteillä on ainoastaan x-, y-, sekä z-translaatiovapausasteet.

Fem-mallia voidaan kuvitella jousien muodostamaksi systeemiksi. Kun siihen vaikuttaa ulkoinen kuorma, systeemin kaikki elementit (jouset) muuttavat muotoaan kunnes systeemi on tasapainossa. Rakenteen jokaista elementtiä kohden voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt, jotka yhdistetään yhteensopivuusehtojen avulla solmupisteissä. Koska rakenne edellyttää monesti useiden tuhansien yhtälöryhmien ratkaisemista on tietokoneen käyttö laskennassa ehdoton apuväline.

(Esa Hietikko, Palkki 2021,170)

3.8 Elementin perusyhtälö

$$\{f\}^e = [k]^e \{u\}^e \quad (10)$$

Kaava on (10) on elementin perusyhtälö jossa:

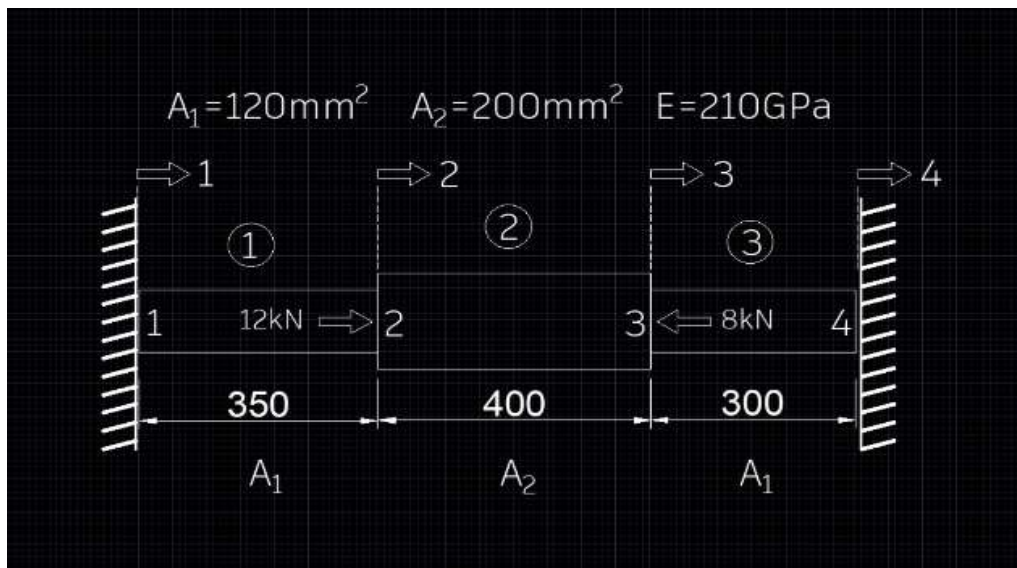
- $\{f\}^e$ = Elementin solmuvoimavektori
- $[k]^e$ = Elementin jäykkymatriisi
- $\{u\}^e$ = Elementin solmusiirtymävektori

$$k = \frac{EA}{L} \quad (11)$$

Kaava (11) on sauvan jousivakio, joka sijoitetaan jäykkyyismatriisiin, kaava 12.

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

3.9 Esimerkkilasku



Kuva 14.

(Järvi 2023)

Lasketaan esimerkkilasku kuvan 14. lähtötiedoilla:

- $E=210$ GPa
- $A_1=120$ mm²
- $A_2=200$ mm²
- $L_1=350$ mm
- $L_2=400$ mm
- $L_3=300$ mm
- $F_1=12$ kN
- $F_2=8$ kN

Tehdään jäykkyysmatriisit:

Elementille 1.

$$k_1 = \frac{EA}{L_1} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 72 & -72 \\ -72 & 72 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

Elementille 2.

$$k_1 = \frac{EA}{L_1} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 105 & -105 \\ -105 & 105 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

Sekä elementille 3.

$$k_1 = \frac{EA}{L_1} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 84 & -84 \\ -84 & 84 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

Tehdään koko rakenteen jäykkyysmatriisi:

$$K = \begin{bmatrix} 72 & -72 & 0 & 0 \\ -72 & 72 + 105 & -105 & 0 \\ 0 & -105 & 105 + 84 & -84 \\ 0 & 0 & -84 & 84 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

$$K = \begin{bmatrix} 72 & -72 & 0 & 0 \\ -72 & 177 & -105 & 0 \\ 0 & -105 & 189 & -84 \\ 0 & 0 & -84 & 84 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

$$\left(\begin{bmatrix} 72 & -72 & 0 & 0 \\ -72 & 177 & -105 & 0 \\ 0 & -105 & 189 & -84 \\ 0 & 0 & -84 & 84 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm} \begin{bmatrix} -1 \\ U_2 \\ U_3 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \\ F_4 \end{bmatrix}$$

Poimitaan jäljelle jäävät alimatriisit:

$$K_c = \begin{bmatrix} 177 & -105 \\ -105 & 189 \end{bmatrix} \frac{kN}{mm}$$

$$F_c = \begin{bmatrix} 10,00 \\ -8,00 \end{bmatrix}$$

Siirtymät saadaan käänteismatriisin avulla:

$$U_c = K_c^{-1} F_c = \begin{bmatrix} 0,047 \\ -0,016 \end{bmatrix} mm$$

U_1 siirtyy 0,05 mm oikealle ja U_2 siirtyy vasemmalle 0,02 mm.

Lasketaan solmuvoimat kaavalla (10).

$$K U = \begin{bmatrix} -3,37 \\ 10 \\ -8 \\ 1,37 \end{bmatrix} kN$$

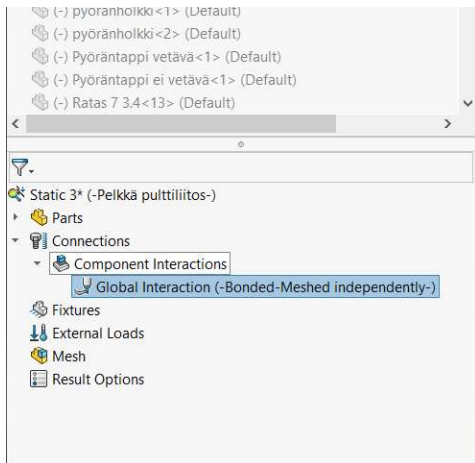
4 FEM laskeminen Solid Works ohjelmistolla

- Mallin valmistelu lujuuslaskentaa varten
- Materiaalin valinta osille
- Erilaisen osien oikeat tilavuus- ja pintamäärittelyt osille
- Tukipisteet, tukipisteiden tyypit
- Kuormitukset, kuormitustyyppit sekä suunnat
- Mahdollinen ohjelmiston tulosten näyttöyksiköiden vaihto

4.1 Ohjelmisto ja simulointi

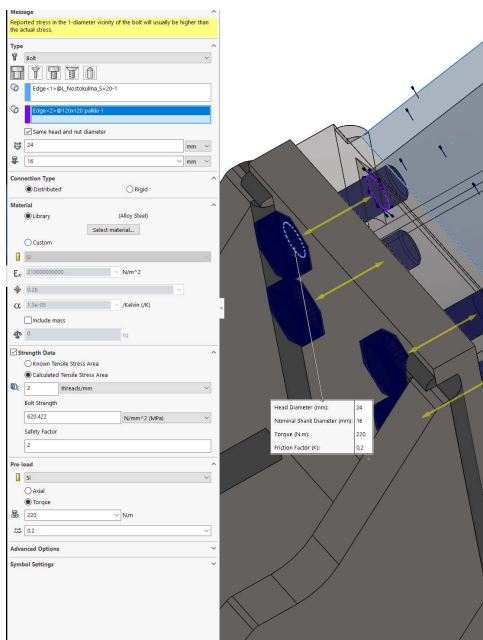
FEM- laskentaa varten oli käytössä Solid Works 2022 version simulaatio-osa, jossa on varsin kattavat mahdollisuudet laskea rakenteille erityyppisiä kuormituksia kuten: staattisia (static)- ja tykyttäviä frequency) kuormituksia, Lämpötilan vaikutuksia (thermal), Nurjahduksia (buckling), väsymisvaurio (fatigue) sekä Dynaamiset kuormitukset (dynamic). Myös pudotus sekä erilaiset nesteiden ja kaasujen virtaussimuloinnit ovat mahdollisia.

Laskennan yksinkertaistamiseksi päätin jakaa sen kahteen osioon, kriittisimpään osaan nostopuomiin sekä kokonaisuuteen, jossa oli kaikki osat yhdessä. Simulointi aloitetaan painamalla new study painiketta, sen jälkeen valitaan kuormituksen tyyppi tässä, laskennassa tehtiin kaikki static asetuksella.



Kuva 15. (Järvi 2023)

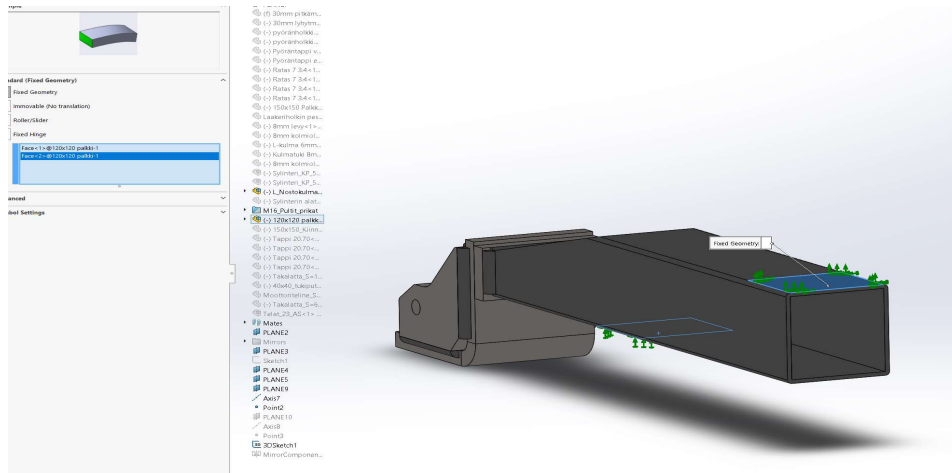
Ohjelmisto tarjoaa oletusasetuksena kappaleiden kiinnitysehdoksi Bonded, mikä ei tässä toimi koska rakenteen osat ovat kiinnitetty toisiinsa pulteilla sekä hitsiliitoksilla. Connections valikon alta (kuva 15). valitaan local interaction / contact pulttiliitoksella yhdistettäviin pintoihin.



Kuva 16. (Järvi 2023)

Seuraavaksi asetellaan samasta connection-valikosta bolt, pulttikiinnitystä varten. Mikäli pultit ovat jo piirrettynä ohjelma tarjoaa niitä automaattisesti laskentaan mukaan. Avautuvasta connectors-valikosta valitaan vielä joka pultille pulttien ja kappaleen reikien kosketuksessa olevat pinnat. Valikosta lisätään myös haluttu varmuuskerroin, esikiristysmomentti sekä pulttien nousu. Pulttien lujuus on myös hyvä tarkistaa, tässä pultit ovat lujuudeltaan 8.8. Ohjelma tarjoaa tähän 620 MPa (kuva 16).

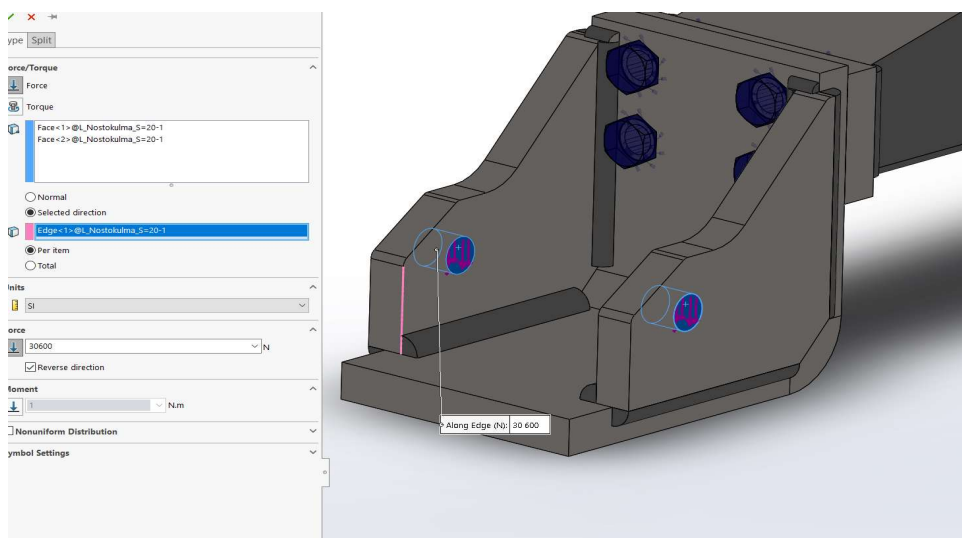
Seuraavaksi asetellaan laskennassa käytettävät oletetut tukipisteet, Tässä tapauksessa on tehty split-toiminnolla valmiiksi alueet, jotka valitaan nyt aktiiviseksi Fixtures / Fixed asetuksella (kuva 17). Fixed asetukset lukitsee kaikki vapausasteet.



Kuva 17.

(Järvi 2023)

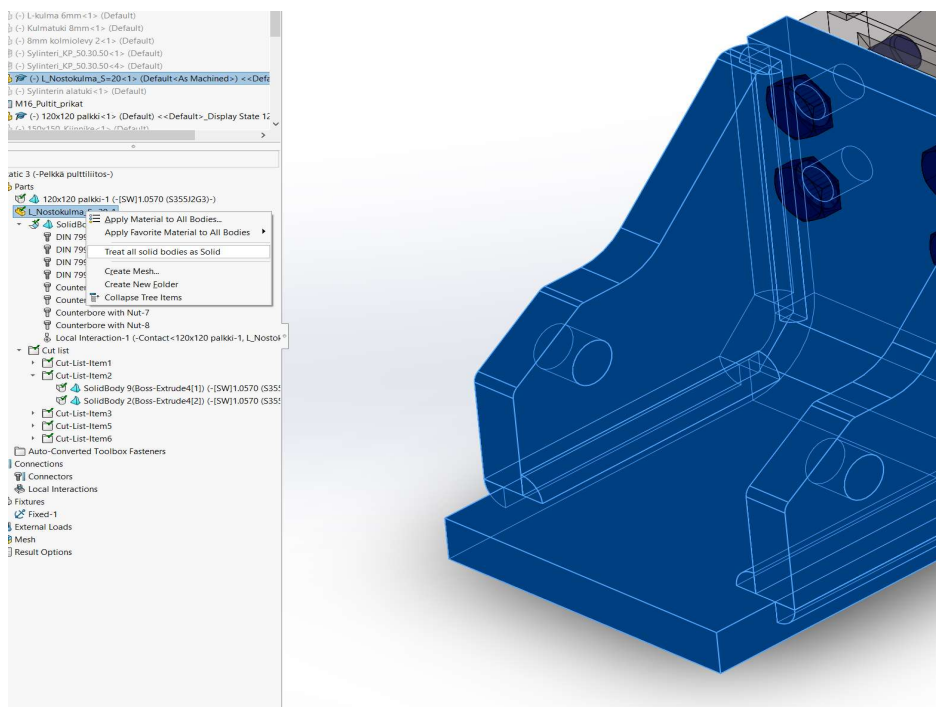
Kappaleeseen vaikuttavat voimat asetellaan external loads-valikosta. Tähän laskelmaan aseteltiin 30,6kN kuormituksen vaikutuksena olevat reiät, samasta valikosta asetellaan myös kuormituksen suunta tai vaihtoehtoisesti voimien komponentit (Kuva 18).



Kuva 18.

(Järvi 2023)

Pulttiliitos vaatii osien malliksi solid-osan. Painetaan hiiren oikealla painikkeella piirrepuun valikosta kyseisen osan kohdalla ja valitaan tread as solid aktiiviseksi, tämä sitoo myös hitsaussaumamat kappaleeseen (kuva 19). Tässä mallissa hitsi-saumamat piirrettiin valmiiksi jo aiemmin, ne voi myös valita simuloinnin valikosta connectors, mutta toiminto vaatii surface-pinnan mitä ei kappaleessa nyt ollut käytettävissä.

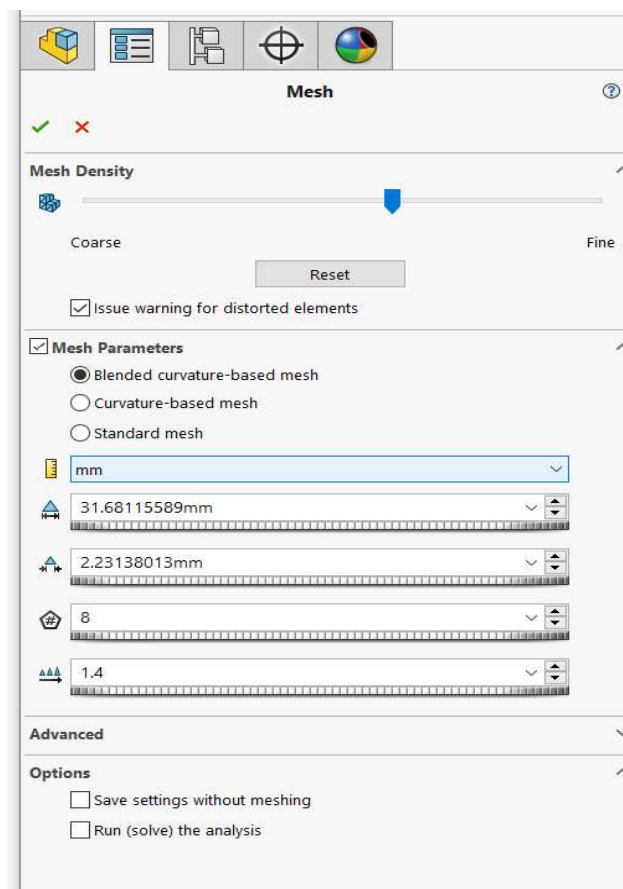


Kuva 19.

(Järvi 2023)

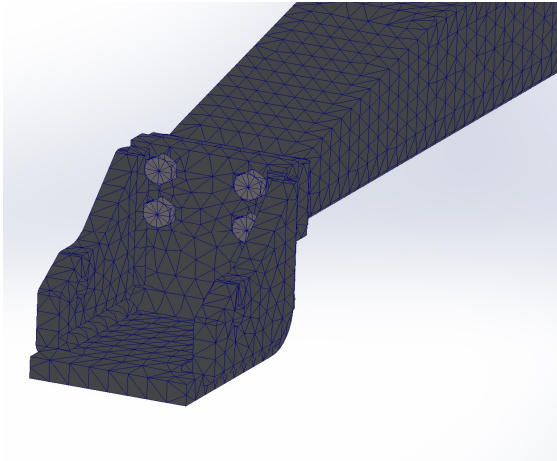
Viimeiseksi asetellaan verkotus mesh-asetukset (kuva 20). Säädetään verkotuksen tiheys (mesh density) sopivaksi. Jos mallissa on tarkkoja piirteitä, joita on tarkoitus analysoida voi verkotusta laittaa tiheämmälle. Silloin on syytä huomioida, että verkotus vaikuttaa olennaisesti laskennan aikaan. Mitä tiheämpi verkko, sitä enemmän aikaa laskentaan kuluu. Verkotusvaihtoehtoina on kolme erilaista asetusta:

- Blended curvature mesh, mukautuu automaattisesti kappaleen muotoihin ja säätää elementtien kokoa automaattisesti. Solidworks suosittelee tätä asetusta, mikäli muut asetukset aiheuttavat ongelmia.
- Curvature based mesh, tekee verkotuksen automaattisesti muotojen mukaan.
- Standard mesh, tekee verkotuksen Voronoi-delanay metodilla, joka ei sovellu monimutkaisiin kappaleisiin.

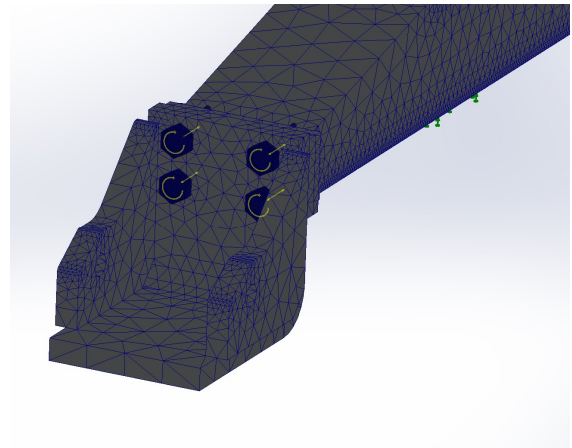


Kuva 20. (Järvi 2023)

Kuvissa 21 sekä 22 näkyy standard- ja blended curvature mesh eroavaisuudet, blended curvature mukautuu kappaleeseen tarkemmin.



Kuva 21. Standard mesh (Järvi 2023)

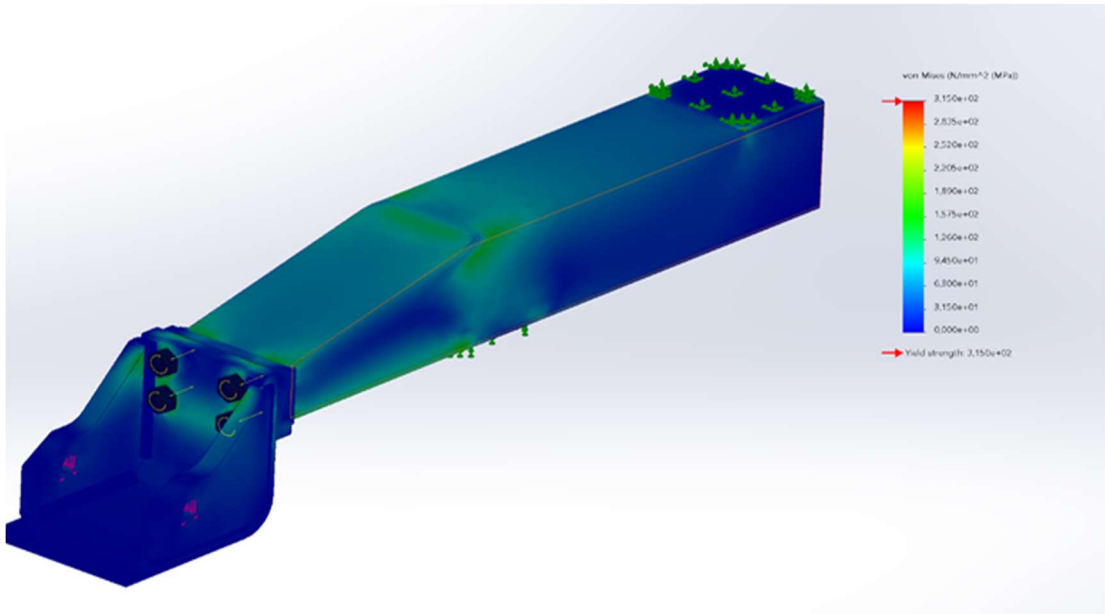


Kuva 22. Blended curvature mesh (Järvi 2023)

Verkotuksen jälkeen voidaan aloittaa laskenta painamalla, run this study.

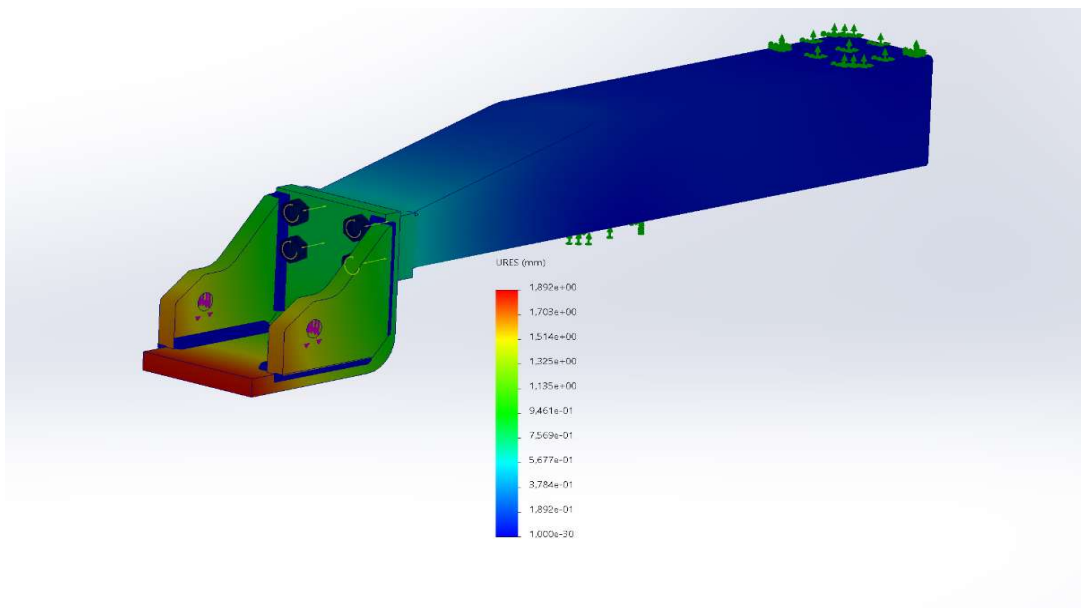
4.2 Nostopuomin tulosten tulkinta

Laskennan jälkeen voidaan aloittaa laskentatulosten tulkinta, kuvassa 23 näkyy nostopuomin jännitykset. Jännitykset pysyvät kauttaaltaan alle 150 N/mm^2 , joka riittää varmuuskertoimen 2 saavuttamiseksi. Kuvassa 24 nähdään suurin siirtymä pystysuunnassa mikä on noin $1,7 \text{ mm}$.



Kuva 23. Nostopuomin jännitykset

(Järvi 2023)

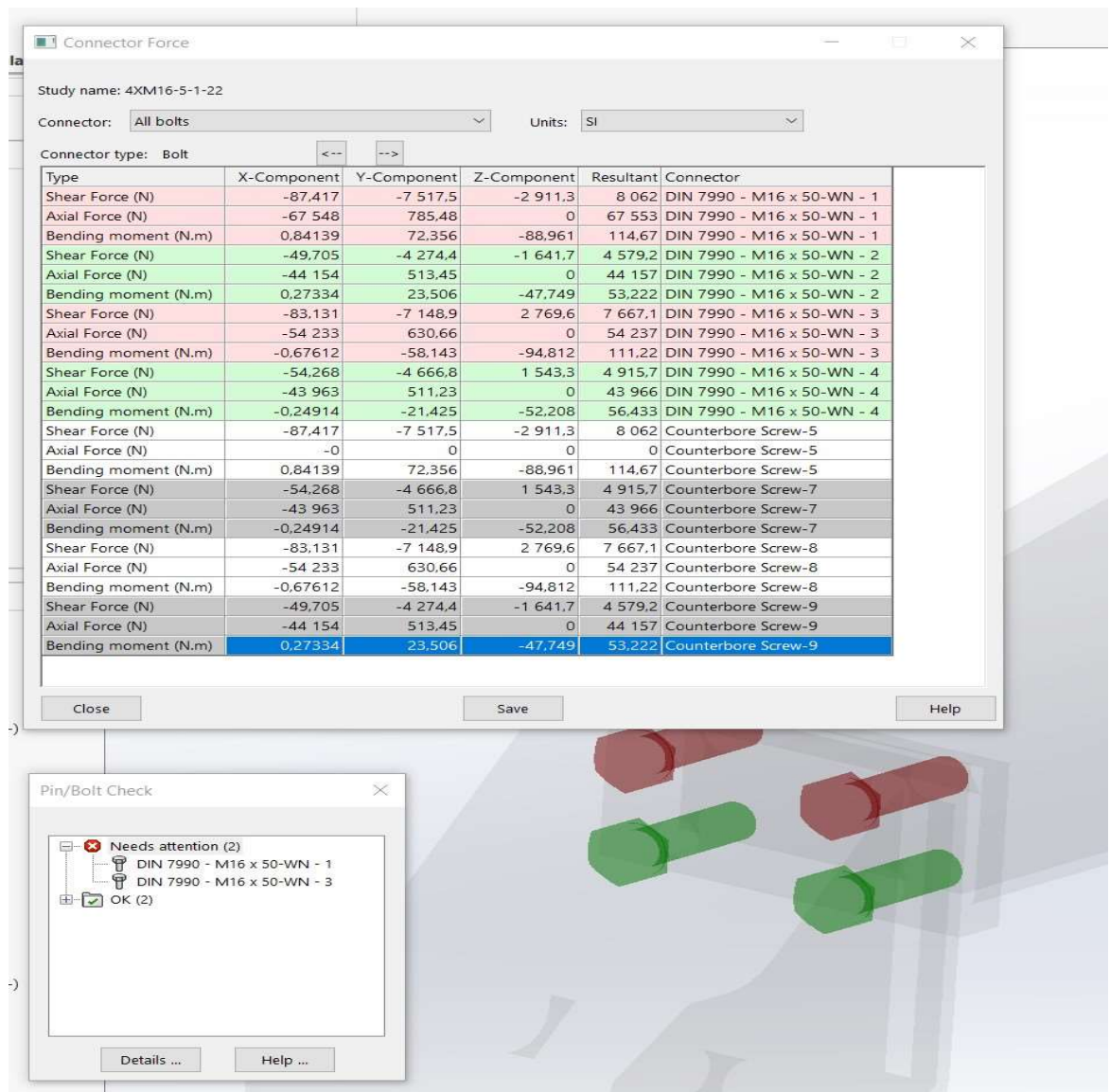


Kuva 24. Nostopuomin siirtymät

(Järvi 2023)

4.3 Pulttien kestävyuden varmistus

Solid Works simuloinnilla saadaan tehtyä myös pulttien lujuuden tarkistus. Laskennassa on tärkeää, että pultattavat pinnat on aseteltu contact asetuksella, ohjelma ei muuten näytä oikeita tuloksia. Pulttien laskentatulokset saa näkyviin painamalla results valikosta pin/bolt aktiiviseksi. Kuvasta 25 nähdään että ylempät pultit ovat liian suuressa rasituksessa. 8.8 lujuusluokan 640 N/mm^2 0,2 % venymisrajalla eivät riitä. Tässä tapauksessa helpointa oli vaihtaa pultit 10.9 lujuusluokan pultteihin joiden 0,2 % raja on 900 N/mm^2 .



Kuva 25. Pulttien rasitukset

(Järvi 2023)

Kuvasta 26 nähdään että pulttien vaihdolla 10.9 lujuuteen päästään kaksinkertaiseen varmuuteen.

Connector Force

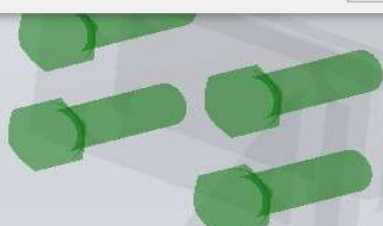
Study name: 4XM16-5-1-22

Connector: All bolts Units: SI

Connector type: Bolt

Type	X-Component	Y-Component	Z-Component	Resultant	Connector
Shear Force (N)	-87,417	-7 517,5	-2 911,3	8 062	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 1
Axial Force (N)	-67 548	785,48	0	67 553	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 1
Bending moment (N.m)	0,84139	72,356	-88,961	114,67	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 1
Shear Force (N)	-49,705	-4 274,4	-1 641,7	4 579,2	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 2
Axial Force (N)	-44 154	513,45	0	44 157	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 2
Bending moment (N.m)	0,27334	23,506	-47,749	53,222	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 2
Shear Force (N)	-83,131	-7 148,9	2 769,6	7 667,1	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 3
Axial Force (N)	-54 233	630,66	0	54 237	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 3
Bending moment (N.m)	-0,67612	-58,143	-94,812	111,22	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 3
Shear Force (N)	-54,268	-4 666,8	1 543,3	4 915,7	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 4
Axial Force (N)	-43 963	511,23	0	43 966	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 4
Bending moment (N.m)	-0,24914	-21,425	-52,208	56,433	DIN 7990 - M16 x 50-WN - 4
Shear Force (N)	-87,417	-7 517,5	-2 911,3	8 062	Counterbore Screw-5
Axial Force (N)	-0	0	0	0	Counterbore Screw-5
Bending moment (N.m)	0,84139	72,356	-88,961	114,67	Counterbore Screw-5
Shear Force (N)	-54,268	-4 666,8	1 543,3	4 915,7	Counterbore Screw-7
Axial Force (N)	-43 963	511,23	0	43 966	Counterbore Screw-7
Bending moment (N.m)	-0,24914	-21,425	-52,208	56,433	Counterbore Screw-7
Shear Force (N)	-83,131	-7 148,9	2 769,6	7 667,1	Counterbore Screw-8
Axial Force (N)	-54 233	630,66	0	54 237	Counterbore Screw-8
Bending moment (N.m)	-0,67612	-58,143	-94,812	111,22	Counterbore Screw-8
Shear Force (N)	-49,705	-4 274,4	-1 641,7	4 579,2	Counterbore Screw-9
Axial Force (N)	-44 154	513,45	0	44 157	Counterbore Screw-9
Bending moment (N.m)	0,27334	23,506	-47,749	53,222	Counterbore Screw-9

Close Save Help

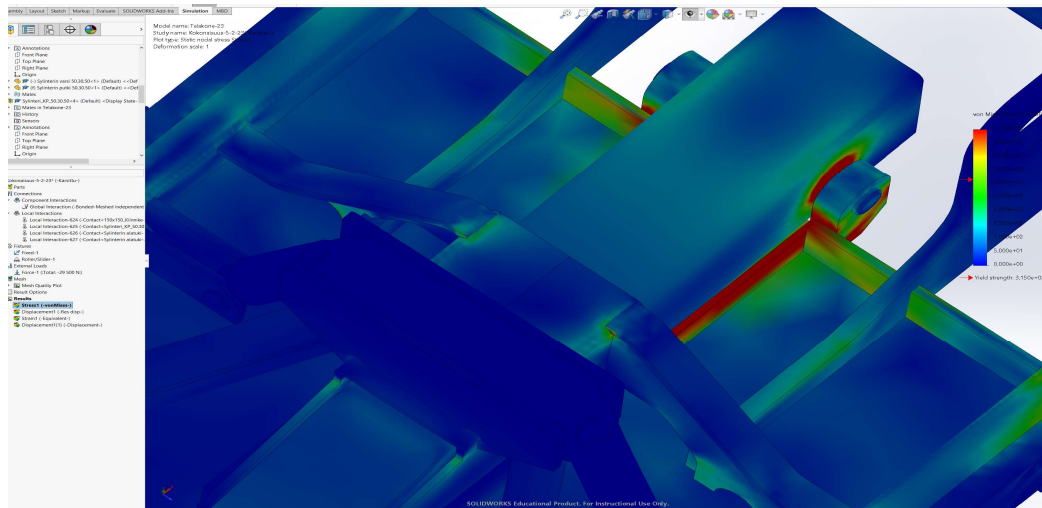


Kuva 26. Pulttien rasitukset 10.9 vahvuudella.

(Järvi 2023)

4.4 Kokonaisuuden laskenta

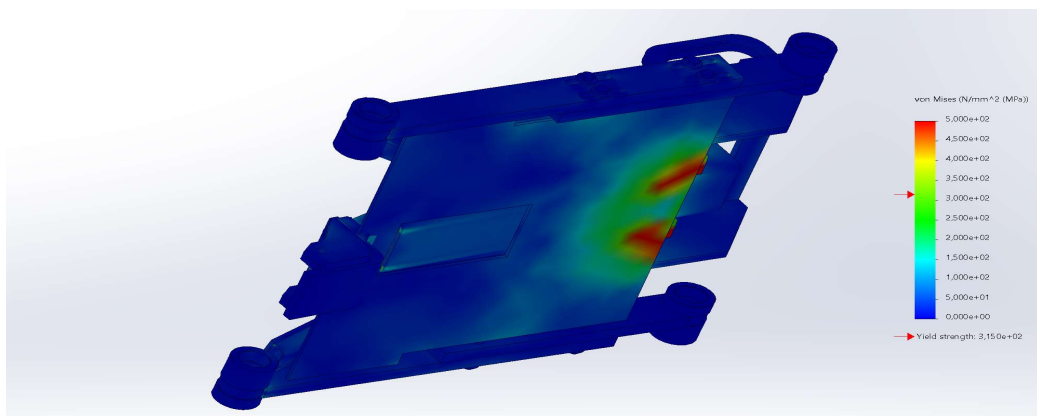
Lopuksi laskettiin valmis kokoonpano kerralla. Kuva 27 on nostupuomin takaosan laakeritappien läheisyydessä on myötörajan ylittäviä alueita, jotka vaativat vahvistusta, myös pohjalevyyn pystyyn kiinnitettyt levyt kaipaavat huomiota.



Kuva 27. Ylitetty myötöraja.

(Järvi 2023)

Kuvassa 28 näkyy pohjalevy alapäin kuvattuna. Myötörajan ylityt alueet näkyvät punaisella.

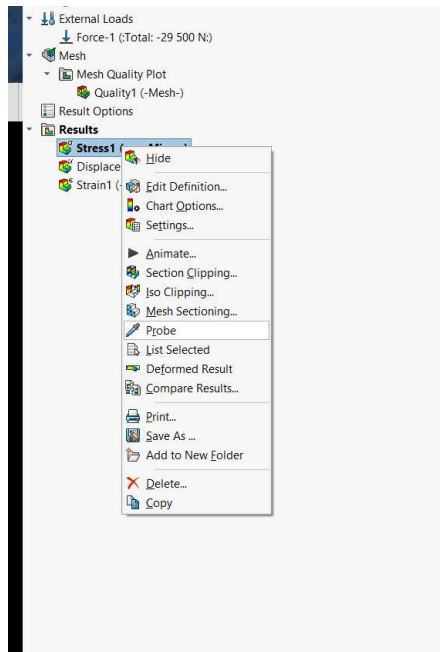


Kuva 28. Pohjalevy alapäin kuvattuna.

(Järvi 2023)

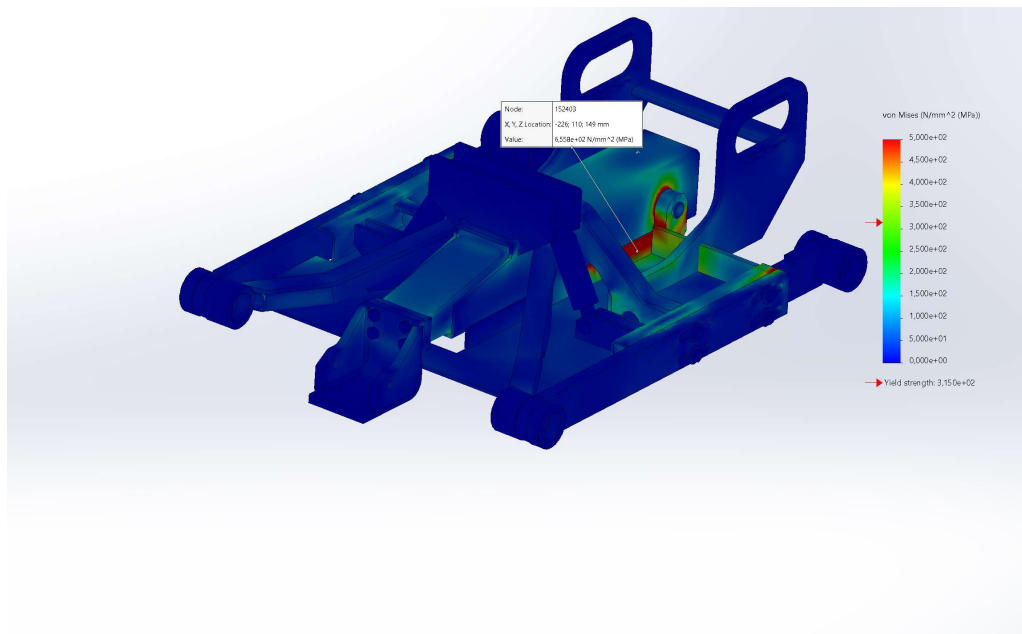
Ohjelmistossa on probe-toiminto, jonka avulla nähdään paikallisia

Jännityksiä sekä siirtymiä (kuva 29).



Kuva 29. Probe
(Järvi 2023)

Kuvassa 30 näkyy probe-toiminnolla otettu paikallinen jännitys punaiselta alueelta, joka on 655 N/mm^2 .



Kuva 30. Paikallinen jännitys

(Järvi2023)

4.5 POHDINTA

Opinnäytetyön tuloksena saatiin luotettavaa tietoa kuljetusrobotin osien kestävydestä. Kuljetusrobotin kaltaisessa koneessa on hyvä varmistua osien riittävästä varmuudesta, tärkeän osan hajoaminen kuorma päällä voi johtaa ainakin taloudellisiin tai henkilövahinkoihin.

Opinnäytetyössä saatiin myös paljon tietoa Solid Works:lla tapahtuvaan osien lujuuslaskentaan, mitä voidaan hyödyntää myös muiden valmistajien ohjelmistoissa. FEM -laskenta on tehokas keino analysoida osien lujuutta, silti on tärkeää muistaa, että mikäli ohjelmalle antaa esimerkiksi väärää tietoja liitoksesta esimerkiksi Bonded vs Contact, antaa se vääristyneitä tuloksia mikä voi johtaa osien rikkoutumiseen.

LÄHTEET

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

Lähteenmäki, M.n.d. K-12120 Elem. perusteet. Viitattu 2.12.2022
<https://mlahteen.fi/yleiset/arkisto.htm>

Mustapha, K. 2022. Practical Finite Element Simulation with SOLIDWORKS 2022. Packt Publishing.

Salmi, T. & Pajunen, S. 2018. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.