



Arttu Peuranen

Kuorma-auton merikuljetukseen tarkoitettujen sidontapisteiden suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

5.12.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Arttu Peuranen
Otsikko:	Kuorma-autojen merikuljetukseen tarkoitettujen sidontapisteiden suunnittelu
Sivumäärä:	53 sivua
Aika:	3.12.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikan insinööri
Ammatillinen pääaine:	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja:	Lehtori Pekka Salonen

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi Veho Oy Ab:lle suunniteltuja kuorma-autojen kiinnityspisteitä. Tavoitteena oli suunnitella standardin SFS-EN 29367-1 mukaiset sidontapisteet merikuljetuksia varten. Työ toteutettiin kokonaisuudessaan Solidworks 2025 -ohjelmistolla ja sen simulaatiotyökalulla.

Opinnäytetyössä käsitellään FEM-laskennan perusideaa ja käyttöä Solidworks-ohjelmistossa. FEM-laskennan numeerinen teoria ei kuulu tämän opinnäytetyön aiheeseen ja lukijalta odotetaan osaamista lujuusopin perusteista.

Projektin kiireellisen aikataulun takia projektissa suunniteltua tuotetta ei ollut mahdollista todentaa laboratoriossa. Standardi edellyttää, ettei tuotteessa tapahdu pysyvää muodonmuutosta, jonka todentamiseen voitiin käyttää FEM-laskentaa. FEM-laskennan avulla todennettiin, etteivät sidontapisteet ylitä myötörajaa eikä muodonmuutosta tapahdu. FEM-laskennan perusteella kappaleen suurin Von Mises -arvo oli 285 MPa, joka alittaa valmistuksessa käytetyn S355JR -rakenneteräksen myötörajan. Standardin SFS-EN 10025-2:2019 mukaan kyseisen teräksen myötöraja 345 MPa, kun kappaleen ainevahvuus on enemmän kuin 16 mm:ä ja enintään 40 mm:ä. Tietokoneavustetun lujuuslaskennan avulla pystyttiin tekemään eri variaatioita ja vertailemaan niin välillä. FEM-laskenta oli myös kustannustehokkain ja nopein menetelmä, jonka ansioista projekti saatiin määräajassa valmiiksi

Avainsanat: FEM, Solidworks 2025, Solidworks, Solidworks FEM, Solidworks simulointi, kuorma-autot

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Arttu Peuranen
Title: Design of Truck Lashing Points for Ro-Ro Transport
Number of Pages: 52 pages
Date: 3 December 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Design
Professional Major: Vehicle Design Engineering
Supervisor: Pekka Salonen, Senior Lecturer

This thesis is an overview of a design project commissioned by Veho Oy Ab. The objective of this project was to design standard compliant lashing points for trucks to transport safely via Ro-Ro vessel. The project was completed using a CAD program and its static simulation tool.

This thesis includes essentials of FEM and how to configure and use it in Solidworks environment. This thesis does not include numerical theory of FEM. The reader is expected to have basic knowledge of materials strengths.

FEM was used to ensure that the product does not surpass the maximum yield strength and, therefore, have any deformation under load. The test result indicated that the product met all the requirements for the SFS-EN 29367-1 standard.

Keywords: FEM, Solidworks 2025, Solidworks, Solidworks FEM, Solidworks simulations, semi-trucks, Finite Element Method

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Varustelu ja tuotesuunnittelu Veho-konsernissa	1
3	Projektisuunnitelma ja lähtötilanne	2
3.1	Lopputuotteen tavoitteet ja kriteerit	2
3.2	Kuorma-autojen merikuljettamiseen liittyvät säädökset	3
4	Tuotteen suunnittelu Solidworksillä	5
4.1	Solidworks 2025:n hyödyntäminen projektissa	5
4.2	Rakennevaihtoehtojen mallinnus ja vertailu	5
5	FEM-analyysi	12
5.1	FEM-analyysin perusteet ja perusidea	12
5.2	Verkon luonti ja tarkastaminen	13
5.3	Kiinnityspisteiden ja kuormien määrittely	24
5.3.1	Virtuaaliseen	24
5.3.2	Ruuviliitosten määrittely	27
5.3.3	Kiertymisen rajoittaminen	28
5.3.4	Painovoima	29
5.3.5	Testivoima	30
5.4	Tulosten tulkinta	33
5.5	FEM-mallin korjaus	41
5.6	Design study -työkalun hyödyntäminen	44
6	Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen	46
	Lähteet	47

Lyhenteet

FEM: *Finitive Element Method* eli elementtimenetelmä.

IMO: Kansainvälinen merenkulkujärjestö.

MB: Mercedes Benz.

RO-RO-alus: *Roll on Roll off* -alus tai laiva, joka lastataan rampeja pitkin eikä lastaamiseen tarvita nostureita.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä suunnitellaan ja toteutetaan Veho Oy Ab:lle kuorma-autojen merikuljetukseen tarkoitetut sidontapisteet. Työn tavoitteena on tuottaa taloudellinen ja turvallinen ratkaisu kuorma-autojen merikuljetukseen standardin SFS-EN 29367-1 mukaisesti. Tuote suunnitellaan ja todennetaan konelaskennan avulla Solidworks-ohjelmistolla.

2 Varustelu ja tuotesuunnittelu Veho-konsernissa

Pohjoismaissa ja Baltiassa Mercedes Benz -logolla ympäröity Veho on varmasti monelle hyvinkin tuttu. Mercedes Benzin maahantuojaksi perustettu perheyritys Veho Oy Ab on toiminut jo lähes 90 vuotta ja noussut autoalan yrityksissä Suomen suurimpien joukkoon. Maahantuonnin lisäksi Veho harjoittaa myös ajoneuvojen myyntiä sekä huolto- ja vuokrauspalveluita. Niihin kuuluvat Daimlerin valmistamia MB, Smart, Setra, Fuso ja lisäksi BYD. [1; 2.]

Vehon yksi suurimpia vetovoimia autoalan yrityksenä on asiakasläheisyys ja asiakkaiden toiveiden toteuttaminen. Vehon uusimassa toimipisteessä Vehkalassa varustellaan vuoden aikana satoja autoja. Yleisimpiä varustelutöitä ovat pakettiautojen kuormatilojen vanerointi, kuorma-autojen kalustonhallinta-asennustyöt, ja molemmissa pienimuotoiset sähkökytkennät kuten invertteri, lisäkaivovalot ja työvalot. Varustelussa tehdään sähkötöiden lisäksi usein muutoksia ajoneuvoihin kuten polttoainetankkien ja paineilmasäiliöiden lisäyksiä ja siirtoja sekä kuorma-auton rungon pituuden ja akselivälin muutoksia. Pohjoismaissa ja etenkin Suomessa teillä liikkuu paljon persoonallisia, näyttäviä ja räätälöityjä ajoneuvoja, jotka ovat saaneet alkunsa Vehkalasta.

Kuten monissa ajoneuvokorjaamoissa, myös Veholla on valmistettu metallituotteita, kuten työvalojen kiinnikkeitä käsityökaluilla metallista. Vuonna 2021 alkoi kuitenkin muutos, kun käyttöön otettiin Solidworks. Solidworksin avulla pystyttiin suunnittelemaan ja tuottamaan alihankinnan avulla metallikappaleita, mikä

nopeutti ajoneuvon valmistumista ja vähensi metallitöistä johtuvia mahdollisia vaaratilanteita.

Viime vuosikymmen aikana kovasti kasvussa ollut 3D-tulostus kiinnitti yrityksen huomion, ja vuonna 2023 Veho teetätti alihankinnan avulla ensimmäisen 3D-tulostetun tuotteen. Tämän tuotteen myötä yritys hankki myöhemmin oman 3D-tulostimen. Vuosien saatossa yritys on hankkinut useamman 3D-tulostimen, -skannerin ja laserkaivertimen vahvistaakseen asemaansa automarkkinoilla.

3 Projektisuunnitelma ja lähtötilanne

Projektia varten ei laadittu erillistä kirjallista projektisuunnitelmaa, mutta sen läpivienti oli kuitenkin harkittu. Lopullinen tuote oli asennettava viikon sisällä, joten projektilla oli poikkeuksellisen tiukka aikataulu. Projektin keskeinen haaste oli tekijän rajallinen kokemus tietokoneavustetusta lujuuslaskennasta.

3.1 Lopputuotteen tavoitteet ja kriteerit

Tavoitteena oli muodostaa jyrkevä ja kestävä kiinnityspiste kuorma-autoon, jolla ajoneuvo voidaan kiinnittää laivaan merikuljetuksen ajaksi. Lopputuotteen oli täytettävä raskaan kaluston merikuljetusta varten laadittu standardi SFS-EN 29367-1, sekä ajoneuvovalmistajan asettamat rajoitteet. SFS-EN 29367-1 edellyttää, ettei kiinnityspisteessä ilmene pysyvää muodonmuutosta staattisen testin seurauksena. [3.]

Aluksi kartoitettiin kaikki projektiin mahdollisesti vaikuttavat säädökset ja rajoittavat tekijät. Projektin kiireellisyys tarkoitti myös sitä, että lopputuotteen tuli olla yksinkertainen ja nopea valmistaa, mikä sulki pois useita valmistusmenetelmiä sekä kiinnitysratkaisuja.

Ajoneuvovalmistajan säädöskirja rajoitti ainoastaan, kuinka lopputuote voidaan kiinnittää ajoneuvon runkoon. Hitsaus on sallittu ainoastaan akseliväliä tai

rungon pituutta muutettaessa, joten lopputuote tuli kiinnittää ajoneuvon runkoon ruuviliitoksella käyttäen 4–6 kappaletta M16 10.9 -ruuveja.

3.2 Kuorma-autojen merikuljettamiseen liittyvät säädökset

Standardi SFS-EN 29367-1 eli ajoneuvojen sitomis- ja kiinnitysjärjestelyt ro-ro -aluksilla tapahtuvia merikuljetuksia varten määrittelee minivaatimukset tehokkaalle ajoneuvojen sitomiselle ja kiinnitykselle. Standardissa käsitellään myös Kansainvälisen Merenkulkujärjestön (IMO) antamia suosituksia, joita suunnittelijoiden tulisi noudattaa. Tätä sovelletaan ajoneuvoille, joiden suurin sallittu kokonaismassa, eli ajoneuvon ja kuorman yhteenlaskettu massa on 3.5–40 tonnia. Tätä ei sovelleta henkilöautoille, linja-autoille, rekkavetureille tai hyötyajoneuvoille, joita kuljetetaan vain siirtotarkoituksissa. Erikoistapauksessa, jossa ajoneuvo poikkeaa yleisistä arvoista mittojen tai rakenteen kannalta vaaditaan erityistä tarkkaavaisuutta kiinnityspisteiden sijainnin ja määrän suhteen tai parempia kiinnitysjärjestelyitä. [3.]

Kiinnityspisteiden vähimmäislukumäärä ja niiden lujuuslaskentaan tai testaukseen käytettävä kuormitus määritetään standardissa annetun taulukon ja laskentakaavan mukaan. Ajoneuvolla, johon sidontapisteet suunnitellaan, on suurin sallittu kokonaismassa 18 tonnia. Standardin mukaan kyseisellä kokonaismassalla pitää ajoneuvossa olla kiinnityspisteitä vähintään 2 ja enintään 6 ajoneuvon kummallakin sivulla. [3.]

Taulukko 1. Kiinnityspisteiden lukumäärä ajoneuvossa suurimman sallitun kokonaismassan mukaan [3].

Suurin sallittu kokonaismassa	Kiinnityspisteiden lukumäärä ajoneuvon kummallakin sivulla	
	MIN	MAX
3.5 t ≤ 20 t	2	6
20 t ≤ 30 t	3	6
30 t ≤ 40 t	4	6

Lujuuslaskennan kuormituksenä käytettävän voiman määrittelemiseen käytetään annettua laskentakaavaa (kaava 1).

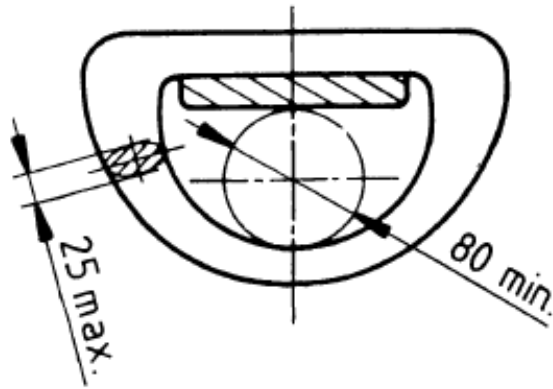
$$F = \frac{1,2(\text{suurin sallittu kokonaismassa} \cdot g)}{n} \quad (1)$$

Kaavassa 1 n merkkää kiinnityspisteiden lukumäärää ajoneuvon kummallakin sivulla ja g maanvetovoiman kiihtyvyyttä $\frac{m}{s^2}$.

Tavoitteena oli kaksi kiinnityspistettä sivua kohden, mutta lopuksi päädyimme kolmeen kiinnityspisteeseen sivua kohden pienemmän kuormitusluvun takia. Kun laskentakaavaan 1 sijoitetaan tarvittavat arvot, niin saadaan F arvoksi 70 607,88 N.

$$F = \frac{1,2(18\,000\text{ kg} \cdot 9,80665 \frac{m}{s^2})}{3} = 70\,607,88\text{ N}.$$

Standardi myös määrittää, että jokaisessa sidontapisteessä on oltava aukko, jonka on sallittava vähintään halkaisijaltaan 80 mm ympärimuotoisen kappaleen läpimeno. Aukon tai sidontapisteen ei tarvitse olla pyöreä, mutta sidontapisteen materiaali ainevahvuudeltaan tai paksuudeltaan ei voi ylittää 25 mm:ä.



Kuva 1. Standardissa annettu esimerkki sidontapisteestä [3].

4 Tuotteen suunnittelu Solidworksillä

Projektin kiireellisen aikataulun ja kustannustehokkuuden takia lopputuote päätettiin valmistaa plasmaleikkaamalla standardin EN 10025 mukaisesta rakenneteräslevystä.

EN 10025:n mukaista rakenneterästä on saatavilla useampaa eri laatua eri mekaanisilla ominaisuuksilla. Tähän projektiin valikoitiin niistä kolme eri laatua, S235JR, S275JR ja S355JR. Rakenneteräksen nimessä oleva luku kertoo teräslaadun myötörajan ainevahvuuden ollessa 16 mm. Nämä kolme laatua valikoitui siksi, koska niitä oli heti saatavilla alihankkijalla.

4.1 Solidworks 2025:n hyödyntäminen projektissa

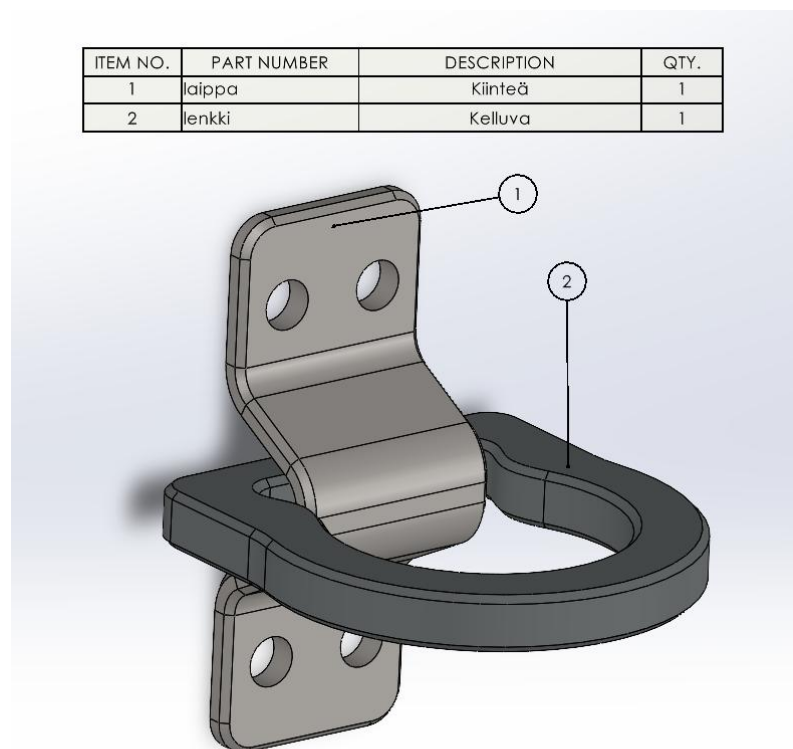
Tuote toteutettiin kokonaisuudessaan uusimalla Solidworks-ohjelmistolla. Solidworksin sisäänrakennetut simulaatiotyökalut nopeuttivat ja helpottivat projektin läpivientiä, koska ei tarvittu erillisiä sovelluksia.

4.2 Rakennevaihtoehtojen mallinnus ja vertailu

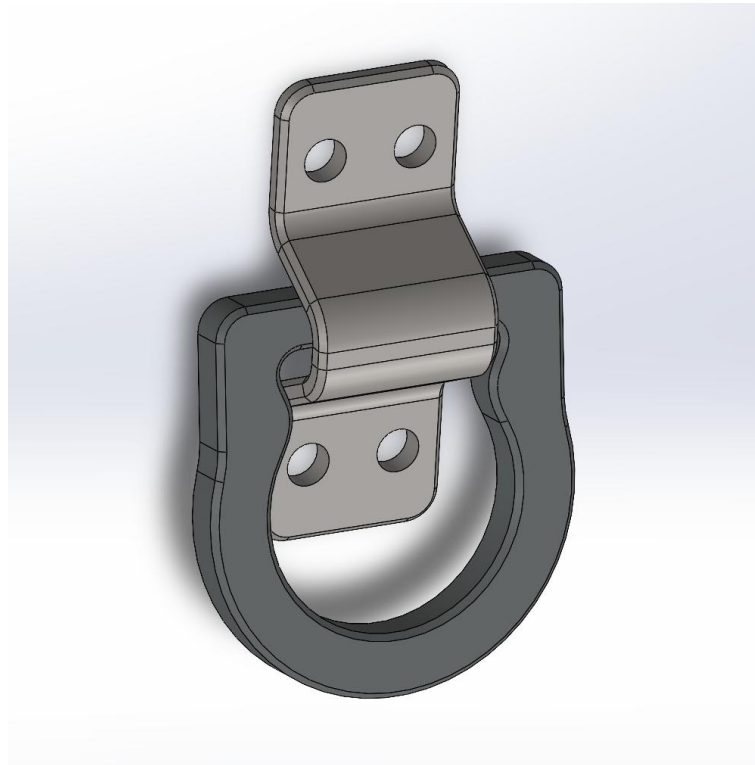
Mallinnus aloitettiin tekemällä luonnosviivat rajoittavista piirteistä. Ainoana rajoittavana mittana oli standardissa annettu 80 mm ympärimuotoisen kappaleen

läpimenoaukko. Tuotteen ulkomuodossa pyrittiin välttämään teräviä kulmia yleisen turvallisuuden takia.

Sidontapisteestä mallinnettiin yksi- ja kaksiosainen versio. Kaksiosainen versio (kuva 2) koostui laipasta, joka kiinnitetään ajoneuvon runkoon ja irrallisesta lenkistä, joka pääsee liikkumaan ja kääntymään laipan sisällä. Tämä muistutti kuormatiloissa käytettyjä sidontapisteitä ja tavoitteena oli saada sidontapiste pois edestä, kun se ei ole käytössä. Toinen versio oli täysin kiinteä ratkaisu, joka mallinnettiin yhdestä polttoleikatusta levyn palasta.



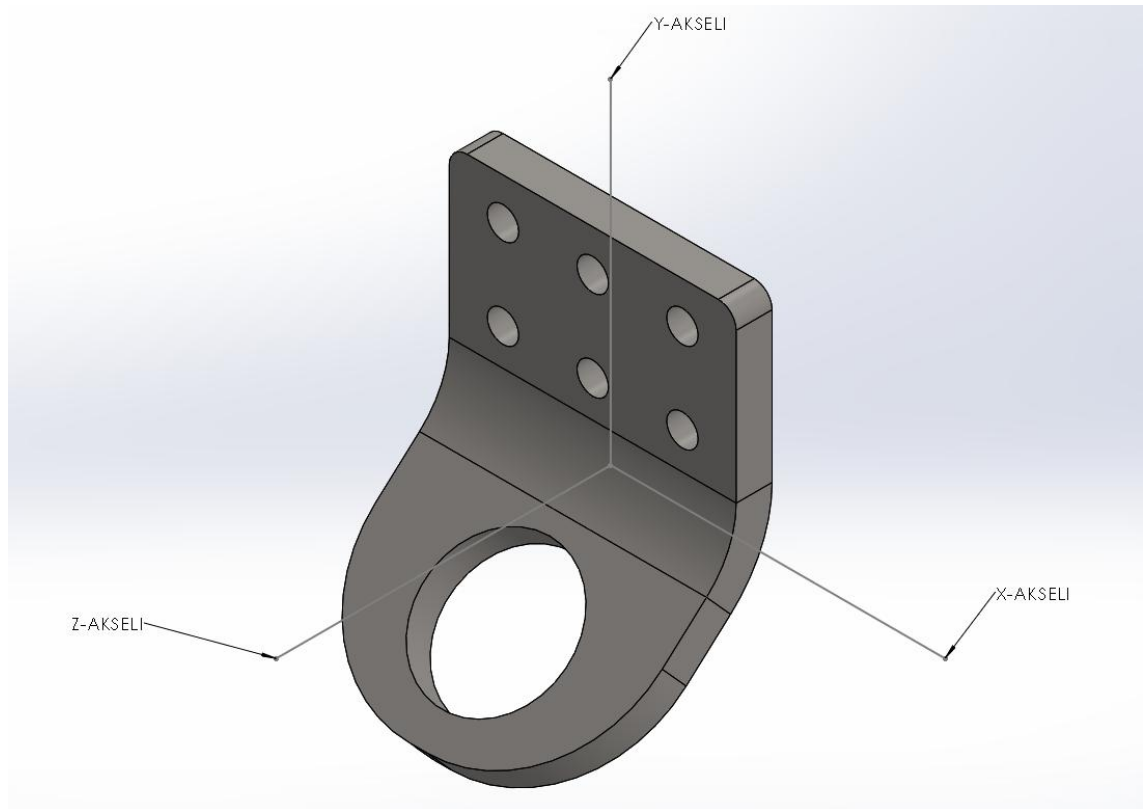
Kuva 2. Kaksiosainen versio.



Kuva 3. Kaksiosainen versio lepoasennossa.

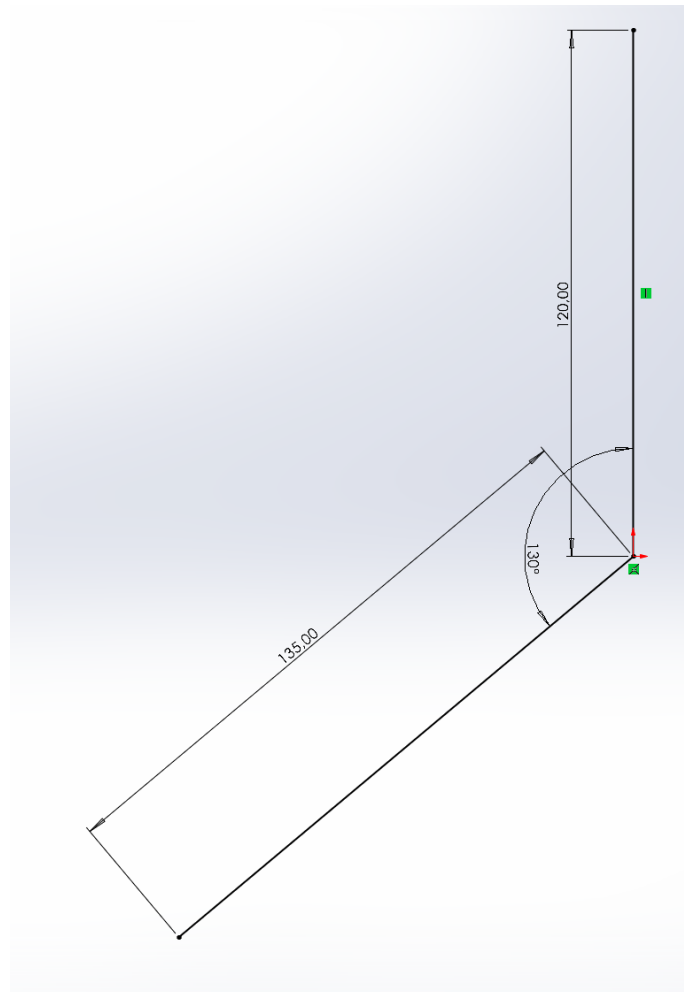
Kaksiosaista versiota pyrittiin jatkokehittämään lopputuotteeksi, mutta valikoidulla valmistusmenetelmällä tämä ei onnistunut annetussa aikataulussa. Niivelletyn version FEM-analyysissä ilmeni suuria määriä jännityskeskittymiä, koska rakennetta ei saatu täysin pyöreäksi tai tasaiseksi tietyistä kohdista. Jännityskeskittymien minimointi ja korjaus olisi vaatinut toisenlaisen valmistusmenetelmän, kuten valamisen tai taonnan. Yksi vaihtoehto olisi ollut käyttää rakenteena pyörötankoa. Pyörötangon taivuttaminen suunniteltuun muotoon olisi kuitenkin ollut työlästä ja lisännyt kustannuksia. Lisäksi taivutettu kappale olisi pitänyt lopuksi hitsata yhtenäiseksi kappaleeksi, mikä olisi lisännyt kustannuksia. Kiinnityslaipan särmääminen mallinnettuun muotoon oli myös haastavaa saatavilla olevilla välineillä.

Näistä syistä parhaaksi ratkaisuksi valittiin yksiosainen versio. Rasituksien ja kätevyuden takia tuotteeseen suunniteltiin kanttaus z-akselin mukaisesti pois päin ajoneuvon rungosta. Tämä vähentää tuotteeseen kohdistuvia rasituksia, koska vetovoimat ovat levyn suuntaisia eivätkä kohtisuoraan kiinnityspinnasta.



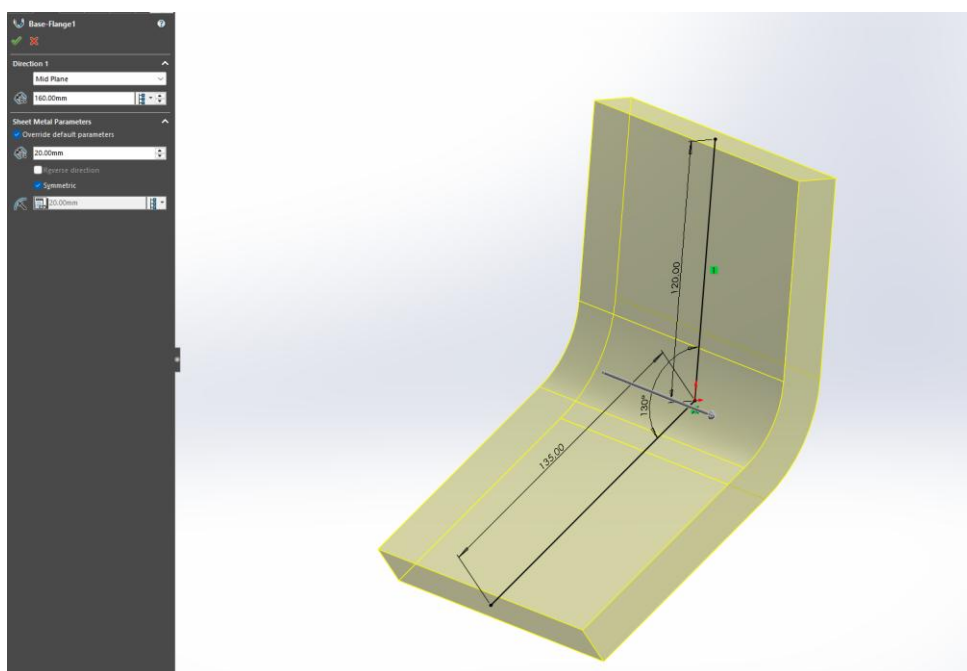
Kuva 4. Yksiosainen versio ja koordinaatisto isometrisesti kuvattuna.

Malli mallinnettiin hyödyntämällä Solidworksin levytallityökalua. Aluksi luonnosteltiin mallista 1D-malli, joka on esitetty kuvassa 5.

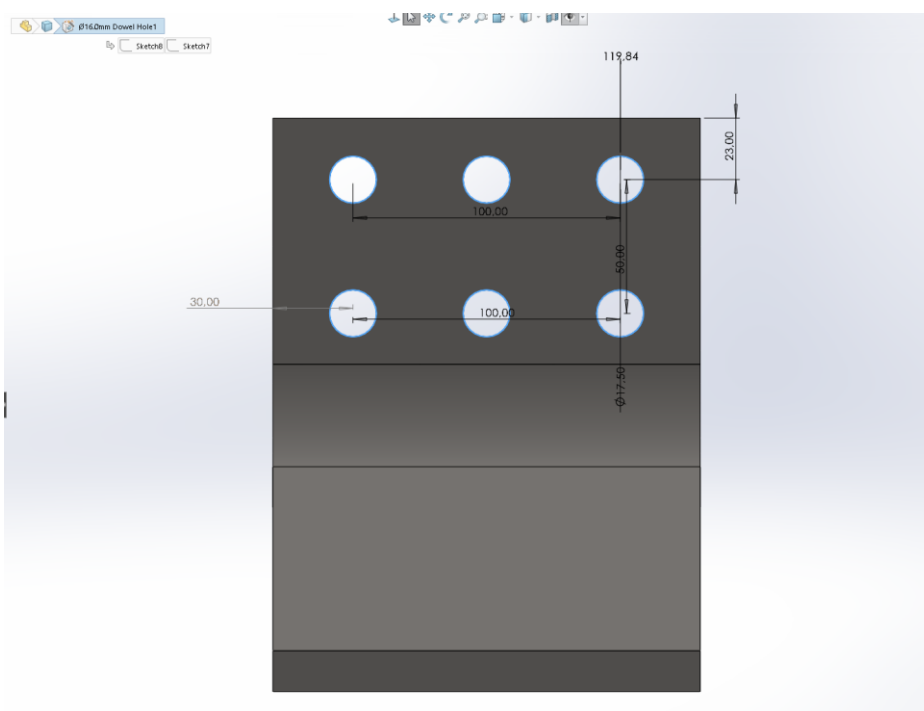


Kuva 5. Mallin luonnos.

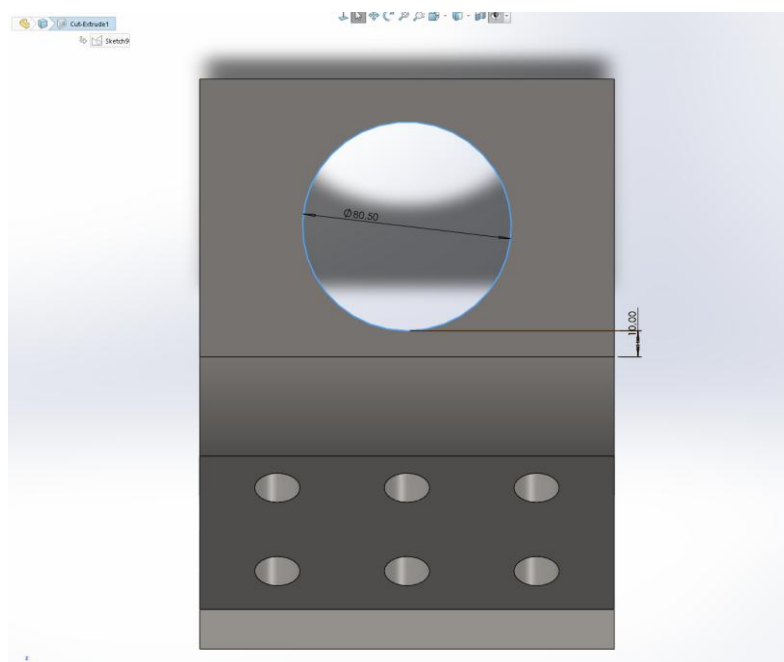
Luonnoksen pohjalta tehtiin malli. Mallin materiaaliksi valittiin S355JR, jonka korkeampi myötöraja mahdollisti liikkumavaraa. Ainevahvuudeksi mallinnettiin 20 mm, koska sitä oli alihankkijan varastossa. Mallin leveys ja pituus mallinnettiin siten, että kappale oli mahdollista kiinnittää kuudella ruuvilla. Taivutussäteeksi mallinnettiin 50 mm, koska standardissa SFS-EN 10025-2:2019 on määritelty pienin suositeltu sisäpuolinen taivutussäde. S355JR:lle tätä ei ollut annettu, mutta S355J0C:lle on annettu kyseiselle ainevahvuudelle 50 mm. Tätä valintaa tukee tuotteen alihankkijan suositus, joka on ainevahvuus kertaa 2–2.5.



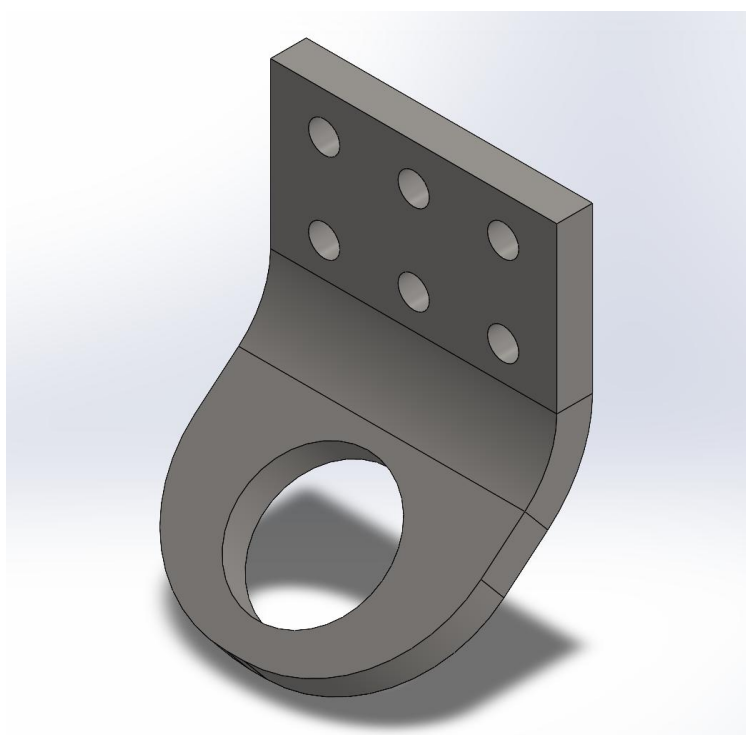
Kuva 6. Luonnoksen pohjalta tehty malli.



Kuva 7. Ruuvinreiät.



Kuva 8. Standardissa vaadittu vähintään 80 mm aukko.



Kuva 9. Simuloitava malli.

5 FEM-analyysi

5.1 FEM-analyysin perusteet ja perusidea

Kappaleiden tai kokoonpanojen rakenteellisen kestävyuden ja muodonmuutoksen simulointiin voidaan käyttää *Finite Element Methodia* eli elementtimenetelmää. Tästä käytetään yleisesti termiä FEM myös muissa kielissä. FEM on fyysikaalisten ilmiöiden simulointia tietokoneella käyttämällä numeerista matemaattista tekniikkaa. [4.]

Mallin rakenteellista muodonmuutosta ja rasitusta on vaikeaa laskea kokonaisuutena kerralla. Elementtimenetelmässä simuloitava malli jaetaan pieniin osiin eli elementteihin. Elementit kiinnittyvät toisiinsa solmujen avulla ja näin muodostavat mallin mukaisen verkon. Verkosta usein käytetään englanninkielistä termiä *mesh* ja solmuista *nodes*. Verkolla on suuri vaikutus laskennan tarkkuuteen ja kuluvaan aikaan. Tiheämmällä verkolla voi saada tarkempia tuloksia, mutta se on myös vaativampi ja enemmän aikaa vievä. Elementit ovat yleisesti joko kaksiulotteisia ja muodoltaan kolmioita tai neliöitä, tai kolmiulotteisia tetraedreja tai kuutioita. [5.]

Eri elementtejä on kuitenkin paljon ja ei ole yhtä parasta, vaan on valittava tapauskohtaisesti se sopiva saatavilla olevista. Elementtityypit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: 1D-malli eli keskiviivamalli, 2D-malli eli keskipintamalli ja 3D-malli eli solidimalli. Näillä kolmella on alaryhmiä, joita voidaan soveltaa tarpeen mukaan. Simulaatiota tehdessä on huomioitava käytetyn verkon solmuissa olevat vapausasteet. 1D-mallilla ei voida simuloida taipumista, sillä nodeilla on vain 1 liikkumisen vapausaste. Taipumisen simulointiin tarvitaan jo 2D-mallia, jolla on 2 liikkumisen ja 1 kiertymisen vapausaste. Eniten vapausastetta on 3D-malleilla, joilla on 6 vapausastetta, joista 3 on liikkumisen vapausastetta ja 3 kiertymisen vapausastetta. [6.]

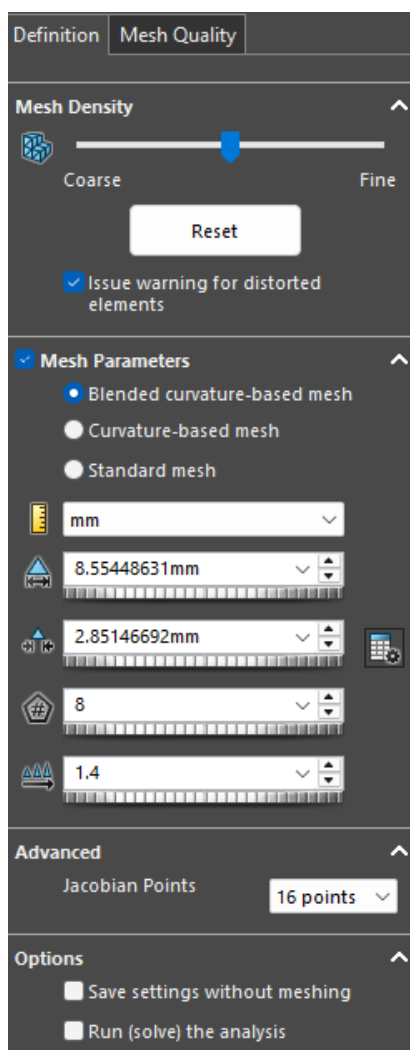
Solidworks valitsee automaattisesti neljän eri elementtityypin väliltä:

- solidielementti, jossa käytetään kolmiulotteisia tetraedreja
- kuorielementti levymetallimalleille keskipinnan mukaan
- palkkielementti
- sekaverkko, jos mallissa on erilaisia geometrioita.

Tähän valintaan vaikuttavat mm. mallin piirteet ja simulaation asetukset. [7.]

5.2 Verkon luonti ja tarkastaminen

Verkko voidaan luoda ja tarkistaa Solidworksissä eli ei tarvita erillistä ohjelmistoa. Verkon luonti tapahtuu Solidworksin simulointityökalulla. Kuvassa 10 on esitetty verkon luontiin määriteltävät asetukset.

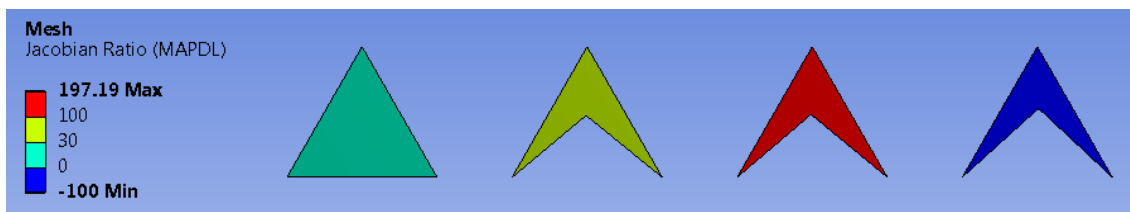


Kuva 10. Verkon luonnin asetukset.

Ensimmäinen asetus on *Mesh Density*, joka määrittää verkon tiheyden. Tiheyttä voi joutua säätämään karkean ja tiheän välillä virheiden korjaamiseksi ja oikean lopputuloksen saamiseksi. Seuraavana asetuksena on verkon parametrien asettelu, jossa voidaan hienosäätää verkkoa. Automaattisesti adaptoituva *Blended curvature-based* -verkko on oletusasetuksena. Tämä voidaan vaihtaa *Curvature-based* -verkkoon, jos simuloidaan kokoonpano tai kappaleiden välisiä reaktioita.

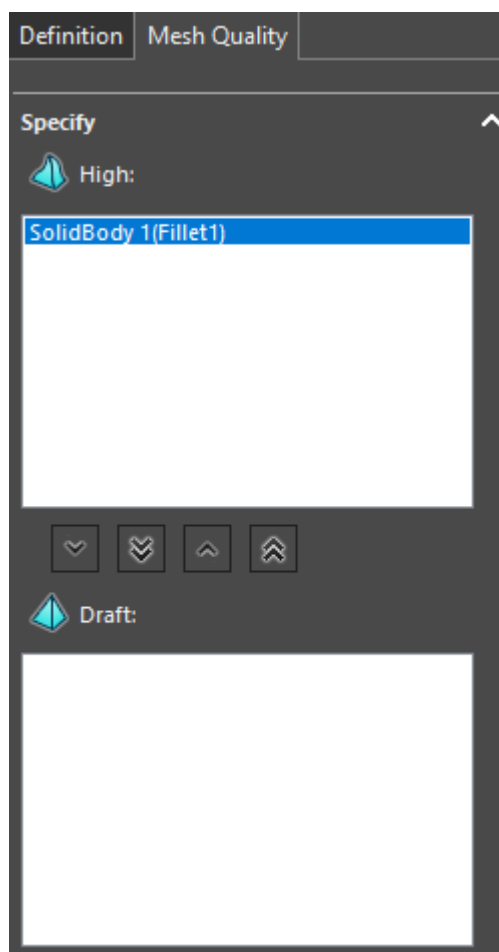
Yksi verkon laaduntarkastamiseen käytetty tapa on *Jacobian ratio* eli Jacobian suhdeluku. Jacobian suhdeluku perustuu elementin poikkeamaan sen ideaali-muodosta. Poikkeaman laskentaan käytetään *Jacobian points* eli Jacobian-

pisteitä. Näitä pisteitä voidaan lisätä tai vähentää tarkemman arvon saamiseksi. Jacobian suhdeluvun ihanteellinen arvo on 1, jolloin elementin reunat ovat suoriat ja saman pituiset. [8.]



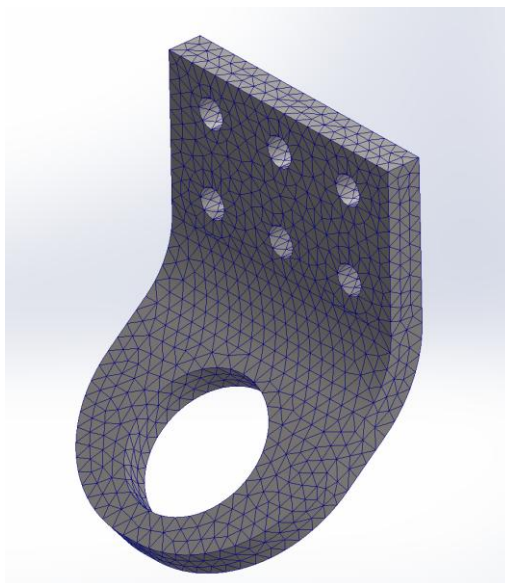
Kuva 11. Jacobian suhdeluvun havainnekuva kolmion avulla [9].

Pikaisten testausten takia voidaan verkosta tehdä *draft* eli luonnos, joka nopeuttaa laskentaa mutta ei ole läheskään yhtä tarkka. Tämä voidaan valita verkon luonnin valikon toiselta välilehdeltä. On suositeltua käyttää korkealaatuista verkkoa tarkemman lopputuloksen saamiseksi. [10; 11.]

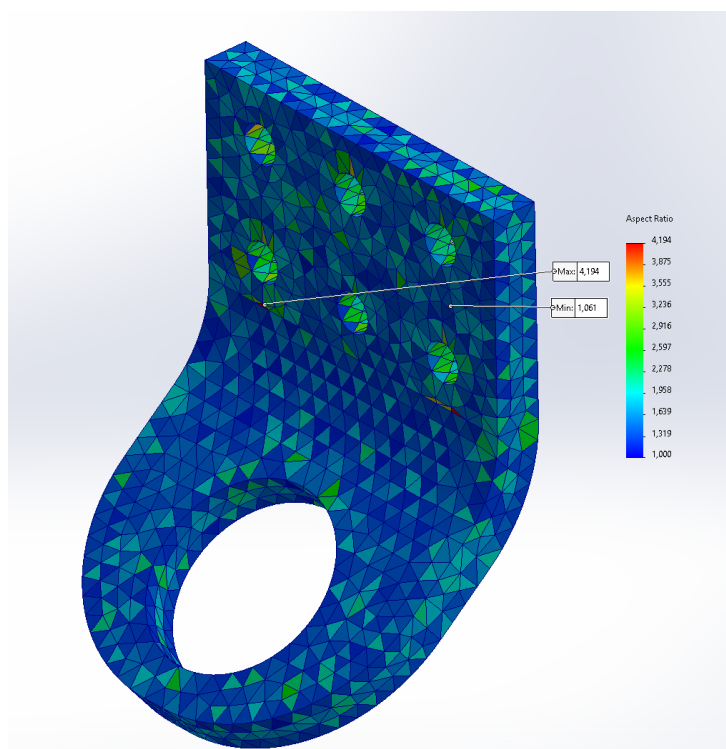


Kuva 12. Verkon laadun määrittely.

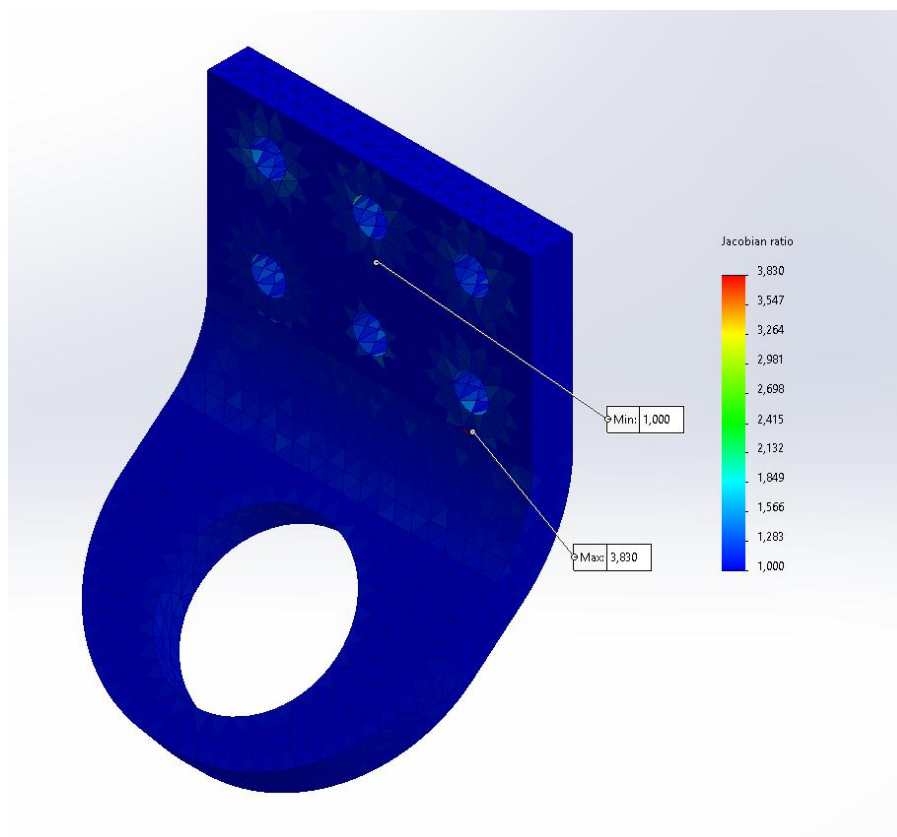
Aluksi käytettiin oletusasetuksia. Verkkoa voidaan ensimmäiseksi tarkastella silmä­mää­reisesti tekemällä *Mesh*-kuvaaja kuten kuvassa 13. Suurimmat epäkohdat on mahdollista huomata jo silmällä, mutta apuna voidaan käyttää *aspect ratio* eli muotosuhde ja Jacobian suhdeluvun kuvaajia.



Kuva 13. Mesh-kuvaaja.



Kuva 14. Verkon laadun tarkistus muotosuhdekuvaajan avulla.

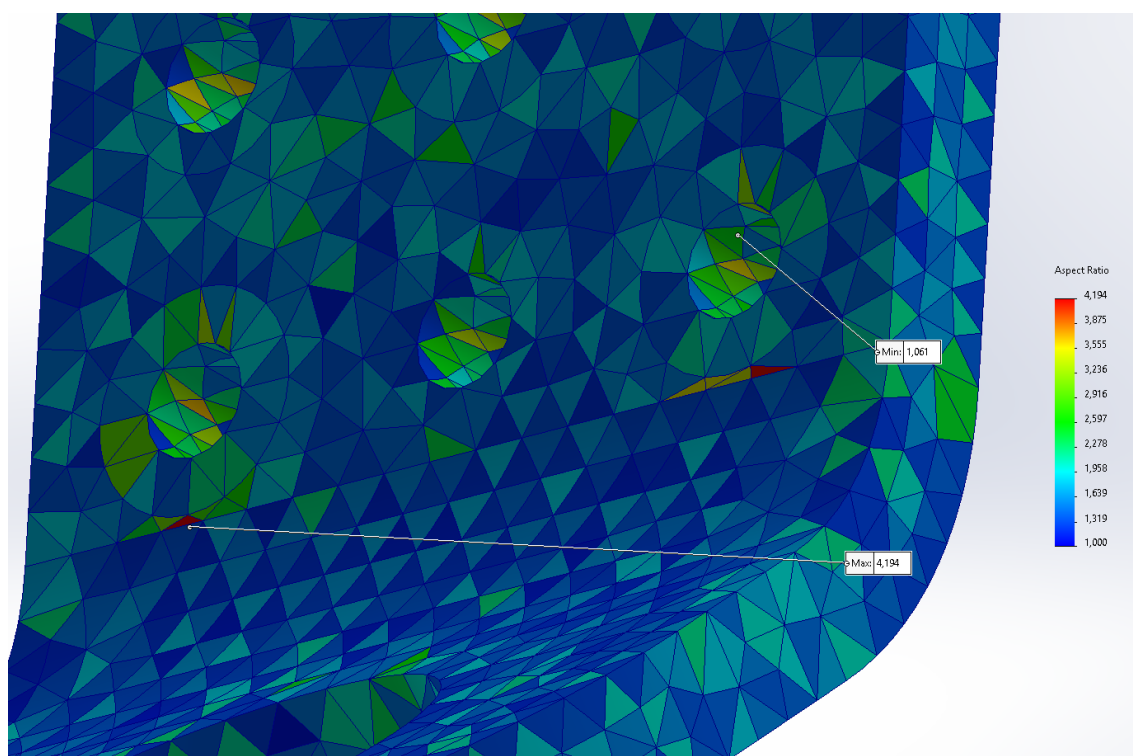


Kuva 15. Verkon laadun tarkistus Jacobian suhdeluvun kuvaajan avulla.

Koska kappale on 3D-malli ja Solidworks loi verkon, joka on tehty tetraedrejä käyttäen, virheitä voi esiintyä kappaleen sisällä olevissa elementeissä. Näiden löytämiseen voidaan hyödyntää lohkaisutyökalua ja kommentteja, kuten kuvissa 14 ja 15 on käytetty maksimi- ja miniarvoille. Kuvassa 14 on esitetty muotosuhdekuvaajan avulla verkon laatu.

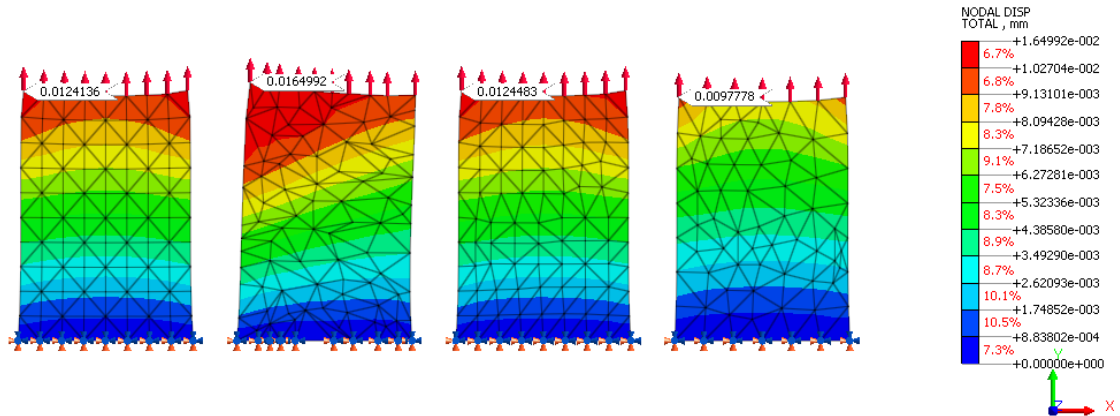
Muotosuhde eroaa Jacobin suhdeluvusta siten, että muotosuhteella vertaillaan muutosta ideaalimuotoon. Toisin sanoen muotosuhteella vertaillaan elementin reunojen pituuksia toisiinsa. Suurella muotosuhteen elementillä jotkin reunoista ovat muita pidempiä. Ideaali muotosuhteen suhdeluku on 1, jolloin kaikki reunat ovat saman mittaisia. Tarkoituksena on muotosuhdeluvulla löytää poikkeamat ja saada verkosta yhdenmukainen. Kuvassa 16 on tarkennettu elementteihin, joilla on korkea muotosuhdelukuarvo. Epäyhdenmukaisuuden lisäksi elementit sijoituvat taitoksen piirteen reunaan, mikä voi aiheuttaa virheellisiä tuloksia. Tällaisia

tapauksia voidaan luulla jännityskeskittymiksi, mutta todellisuudessa ne ovat vain virheitä verkon huonon laadun takia.

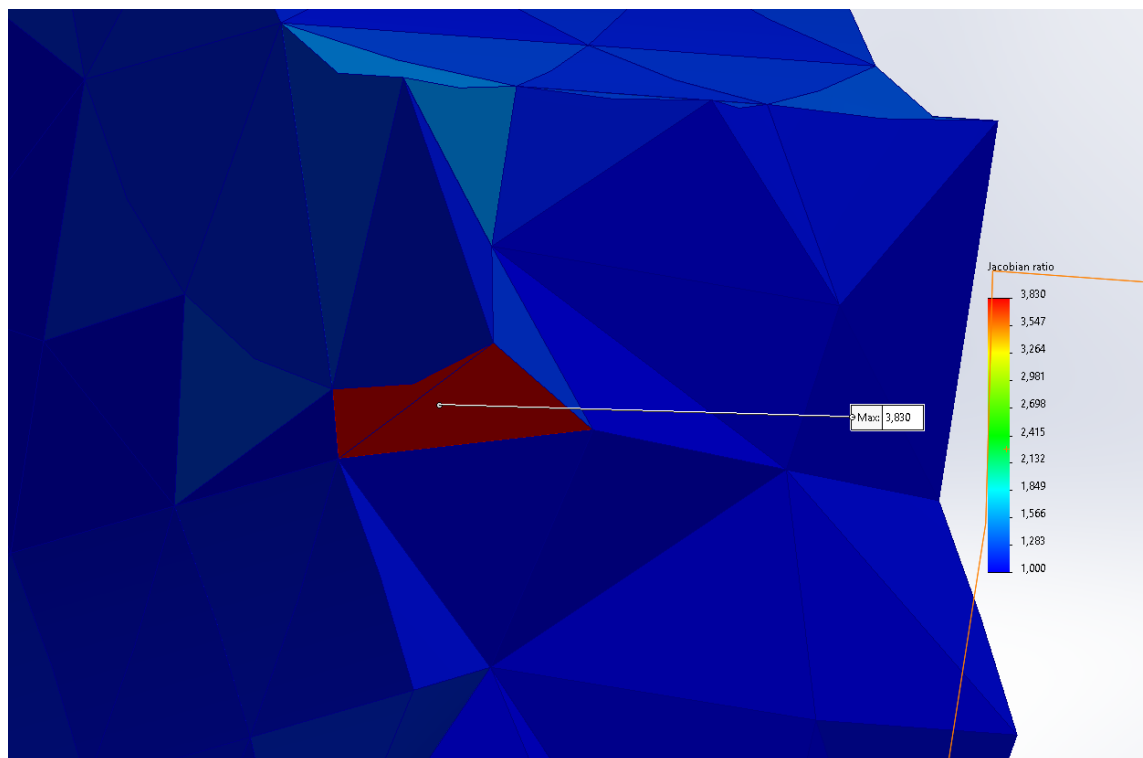


Kuva 16. Elementti, jolla on suurin muotosuhdeluku.

Epäyhdenmukaisuuden vaikutus simulaatiosta saatuihin tuloksiin on esitetty kuvassa 17. Kuvassa identtiset kappaleet on simuloitu samoilla asetelmilla, mutta ainoana erona on verkon yhdenmukaisuus. Mittaustuloksista nähdään, kuinka kappaleen venymä ja jännitys vaihtelee verkon rakenteen takia. Vasemmalla reunimmainen verkko on yhdenmukainen ja tuloksetkin ovat todenmukaisia.



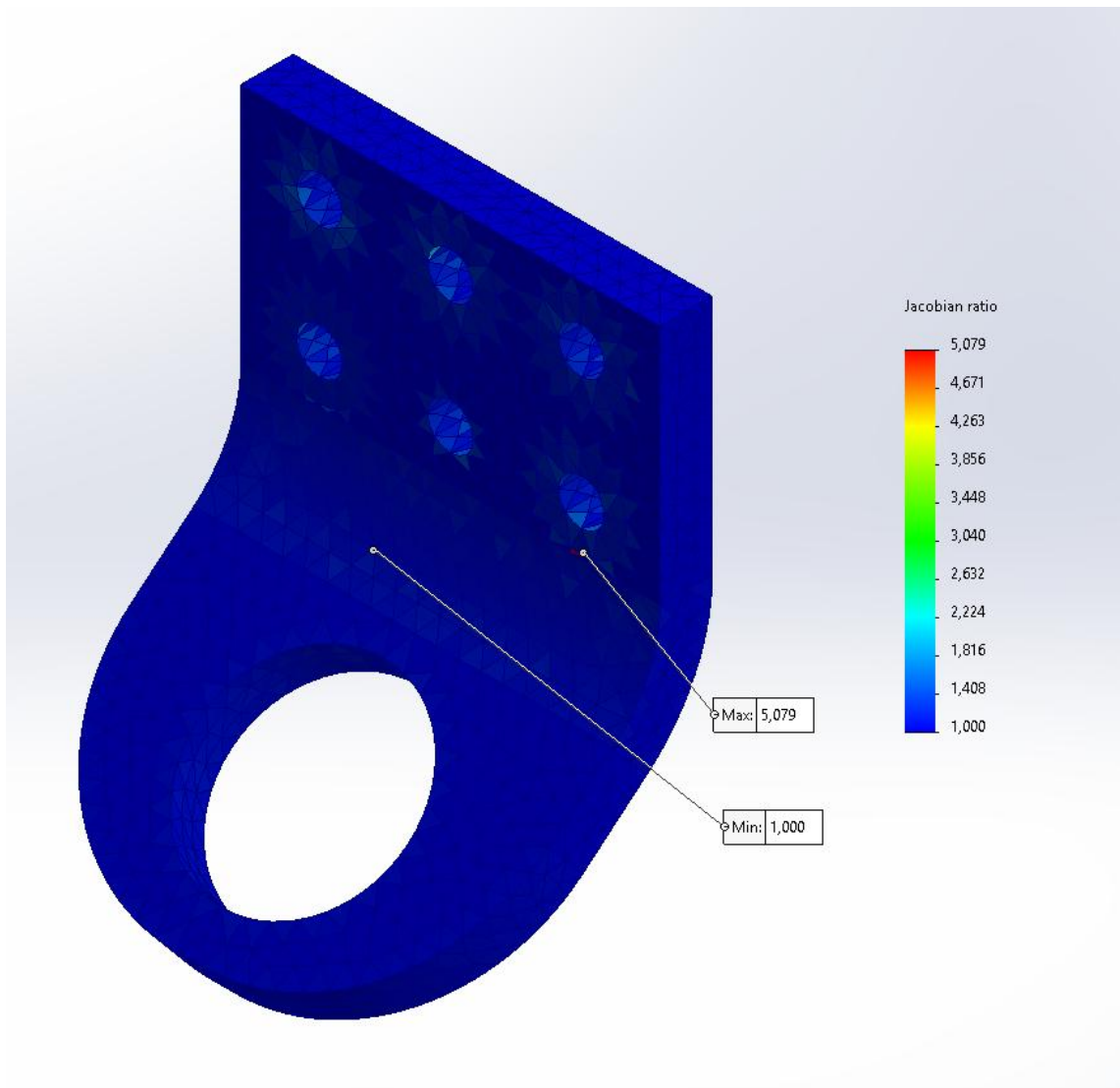
Kuva 17. Verkon epäyhdenmukaisuuden vaikutus mittatuloksiin [12].



Kuva 18. Jacobian suhdelukuvaajan mukaan elementti, jolla on suurin Jacobian suhdelukuarvo.

Kuvassa 18 on elementti, jolla on suurin Jacobian suhdelukuarvo. Elementin ulkopinta poikkeaa jo ideaalista, mutta verkon lohkaus paljastaa elementin olevan myös ohut. Ohut elementti voi aiheuttaa sen, että elementistä tulee käänteinen ja itsensä leikkaava. Tällaisten takia Solidworks ei välttämättä pysty suorittamaan simulaatiota.

Jacobian suhdelukua voidaan tarkentaa nostamalla Jacobian pisteitä oletusarvosta 16 arvoon 29. Kuvassa 19 on esitetty verkko suuremmalla Jacobian-piste arvolla. Oletusarvolla suurin arvo oli 3,830 ja 29 Jacobian-pisteellä arvo oli 5,079.



Kuva 19. Jacobian suhdelukuarvo 29 Jacobian-pisteellä.

- *maximum aspect ratio*
- *percentage of elements with aspect ratio < 3*
- *percentage of elements with aspect ratio > 10.*

Suurin muotosuhdelukuarvo olisi hyvä olla korkeintaan 10–30 riippuen verkon monimutkaisuudesta. Alle kolmen muotosuhdelukuarvon elementtejä pitäisi olla vähintään 90 %, mutta helpommissa malleissa jopa 99 %. Yli 10:n suhdelukuarvon elementtejä olisi oltava mahdollisimman vähän ja ideaalisti 0 %. [10.]

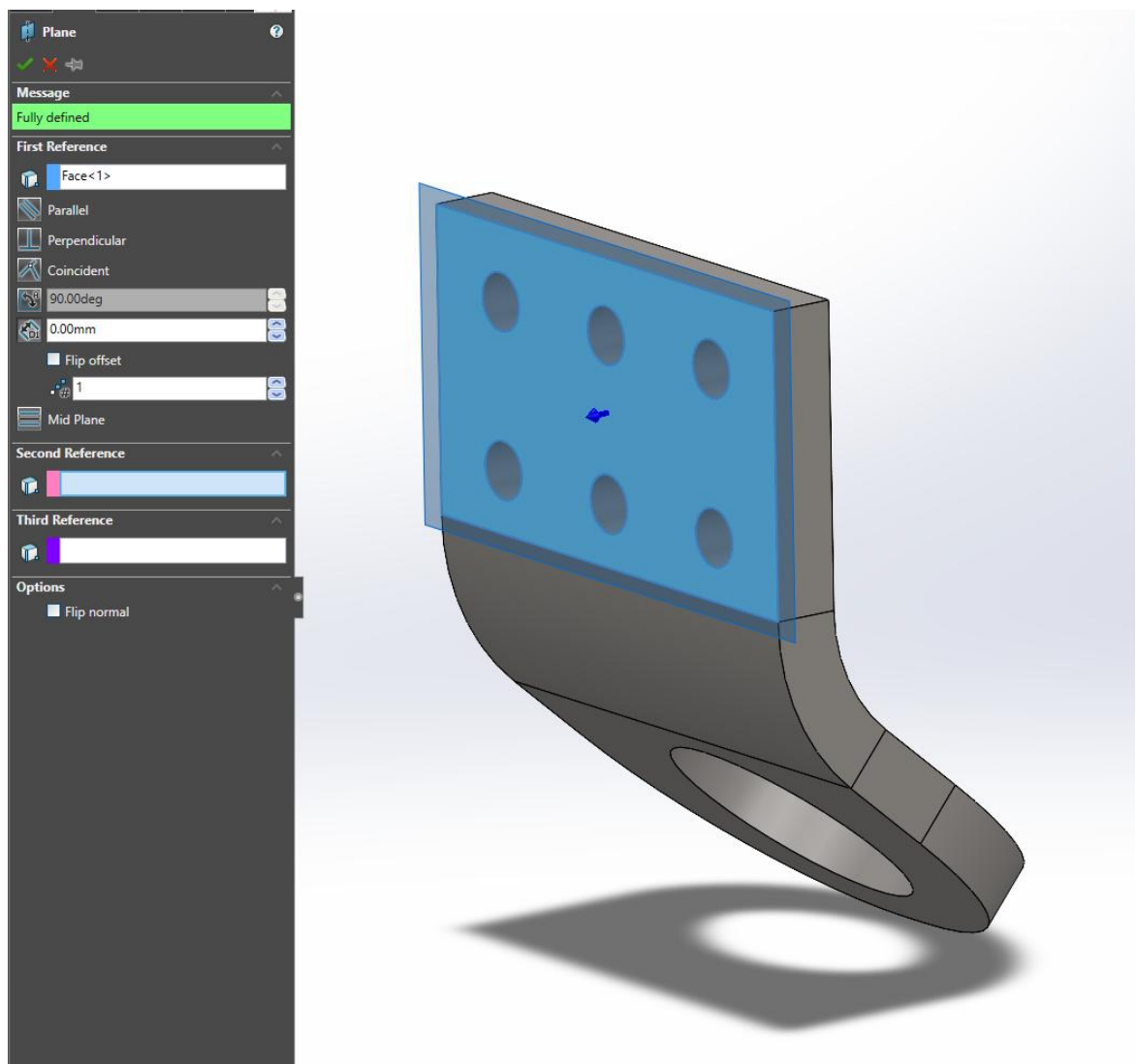
Mesh Details	
Study name	RORO-lenkki* (-Default-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	8,55449 mm
Min Element Size	2,85147 mm
Mesh quality	High
Total nodes	16507
Total elements	9968
Maximum Aspect Ratio	4,194
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99,5
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Reuse mesh for identical bodies	Off
Number of bodies that have reused mesh	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:02
Computer name	

Kuva 21. Oletusasetuksilla luodun verkon tarkentavat tiedot.

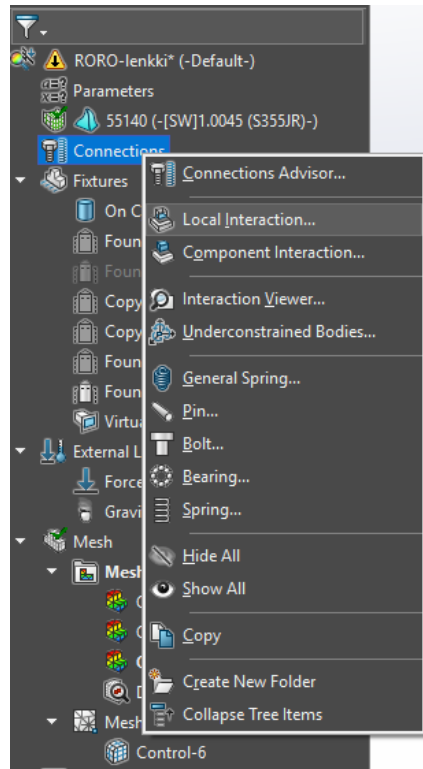
5.3 Kiinnityspisteiden ja kuormien määrittely

5.3.1 Virtuaaliseen

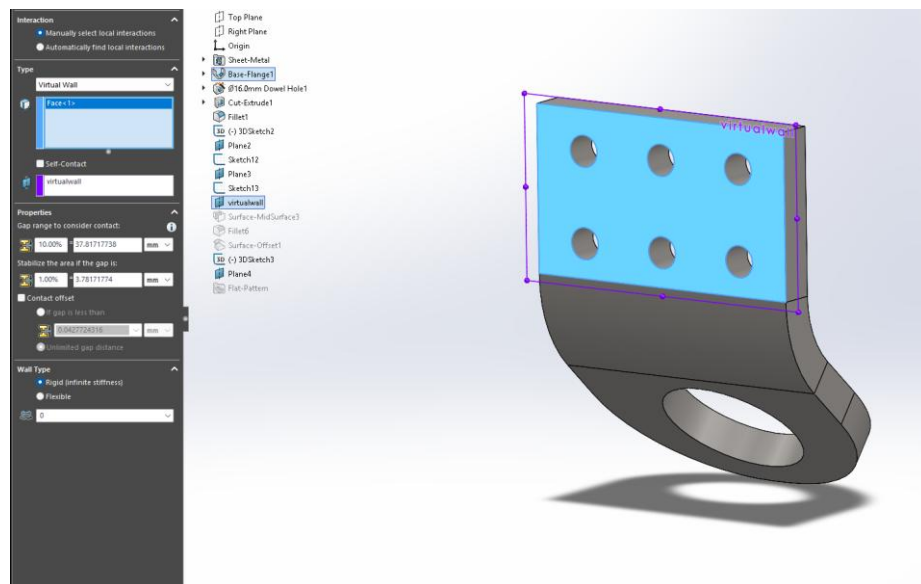
Simulointia varten kappale on kiinnitettävä jollain tavalla. Väärin asetetut kiinnityspisteet tai niiden puuttuminen johtavat väärin tuloksiin. Tässä simulaatiossa kappale kiinnitetään ruuviliitoksella kiinteään pintaan. Ruuviliitoksien vastakappaleena voitaisiin käyttää mallinnettua runkoa. Yksinkertaisuuden vuoksi kiinnityspintana käytetään virtuaalista seinää, joka on osatasolla oleva taso ja on siten määritelty kiinteäksi *virtuaaliseksi* simulaatiossa. Virtuaaliseen tehdään pintaan, joka tulee ajoneuvon runkoa vasten.



Kuva 22. Virtuaaliseinän luonti.



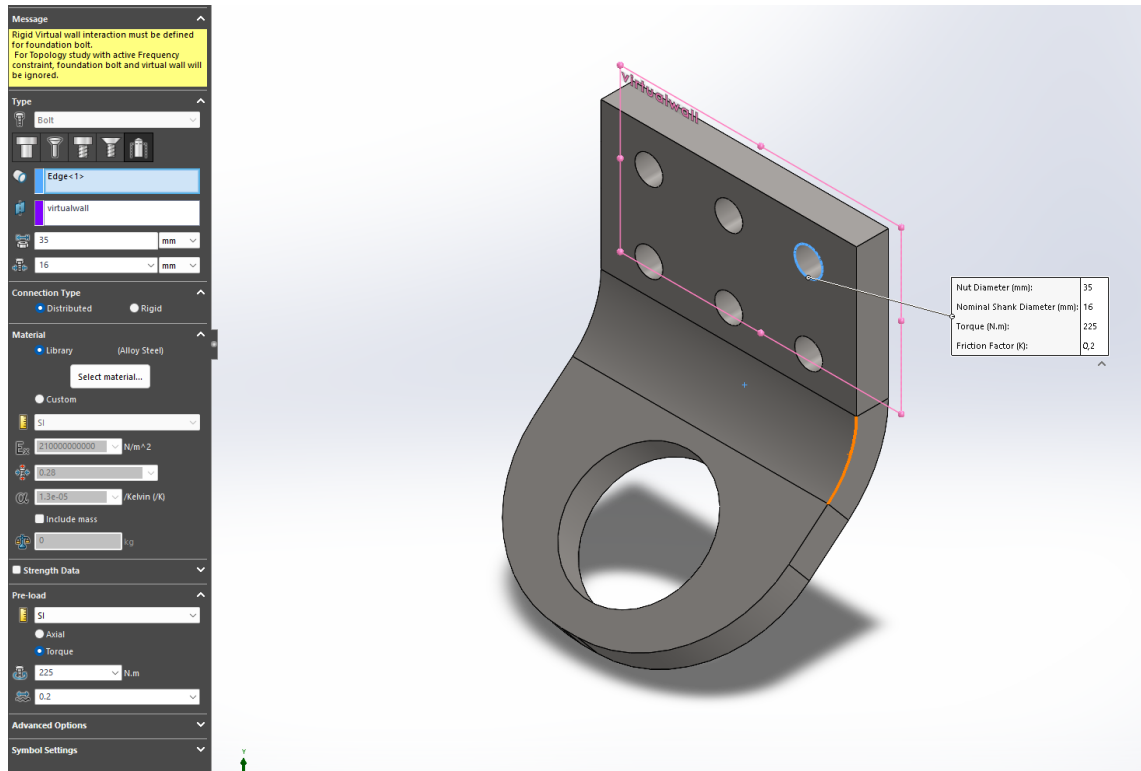
Kuva 23. Virtuaaliseen määrittely tehdään *Local Interactions* -valikossa.



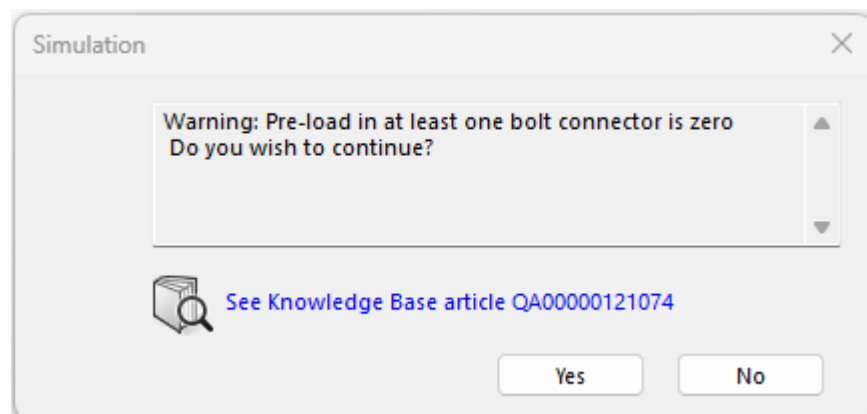
Kuva 24. Virtuaaliseen määrittely.

5.3.2 Ruuviliitosten määrittely

Ruuviliitoksien määrittely tehdään *Connections*-alavalikosta. Ruuviliitoksen tyyppiä valittiin *foundation bolt*. Mutteripuoleksi valittiin halutun virtuaaliseen vas-takkainen ruuvireiän reuna ja ruuvin kiinnitystasoksi virtuaaliseen. Näiden pohjalta Solidworks ehdottaa jo arvoja mutterin kannalle ja ruuvin halkaisijalle. Näitä voidaan muokata tarpeen mukaan. Sidontapisteet kiinnitetään ajoneuvon-runkoon M16 ruuveilla, joiden halkaisija on 16 mm. Lopputuotteen kiinnityk-sessä käytetään 35 mm aluslevyjä, joita voidaan käyttää simulaation mutterin halkaisijana. Ruuvin asetuksista on mahdollista muuttaa materiaaliominaisuuksia, kitkakertoimia ja muita yksityiskohtia. Oleellista on antaa ruuviliitokselle esi-jännitys. Tähän käytetään ajoneuvovalmistajan ohjekirjassa annettua kiristys-momenttia runkoon kiinnitettävien lisälaitteiden ruuveille, joka on M16-ruuveille 225 Nm. Tämä toistetaan kaikkiin ruuvireikiin. Kuvan 26 mukainen huomautus keskeyttää simulaation heti alussa, jos esijännityksen jättää määrittelemättä. Si-mulaatio on mahdollista jatkaa loppuun tai lopettaa huomautuksen ilmaantu-essa. Esijännityksen vaikutusta lopputulokseen ei tässä työssä ole tutkittu.



Kuva 25. Simulaatiossa käytetyt ruuviliitosten arvot.

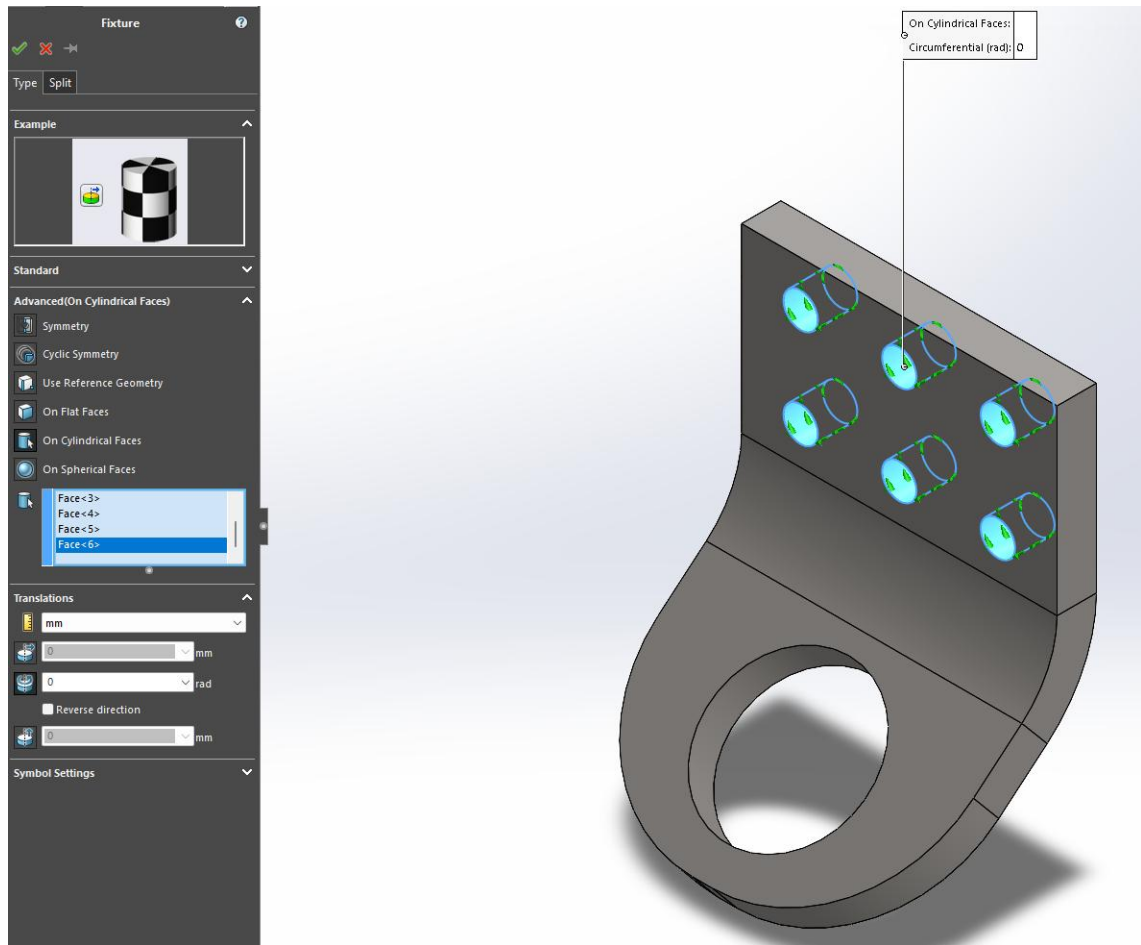


Kuva 26. Huomautusikkuna, jos esijännitystä ei määritellä.

5.3.3 Kiertymisen rajoittaminen

Kolmiulotteisilla verkoilla on kaikki kuusi vapausastetta. Virtuaalisinällä ja ruuviliitoksilla näistä on lukittu kolme eli liikkeen vapausasteet. Kiertymisen rajoittaminen tehtiin *Advanced fixtures* -valikosta *On Cylinder Faces*. Kiertyminen

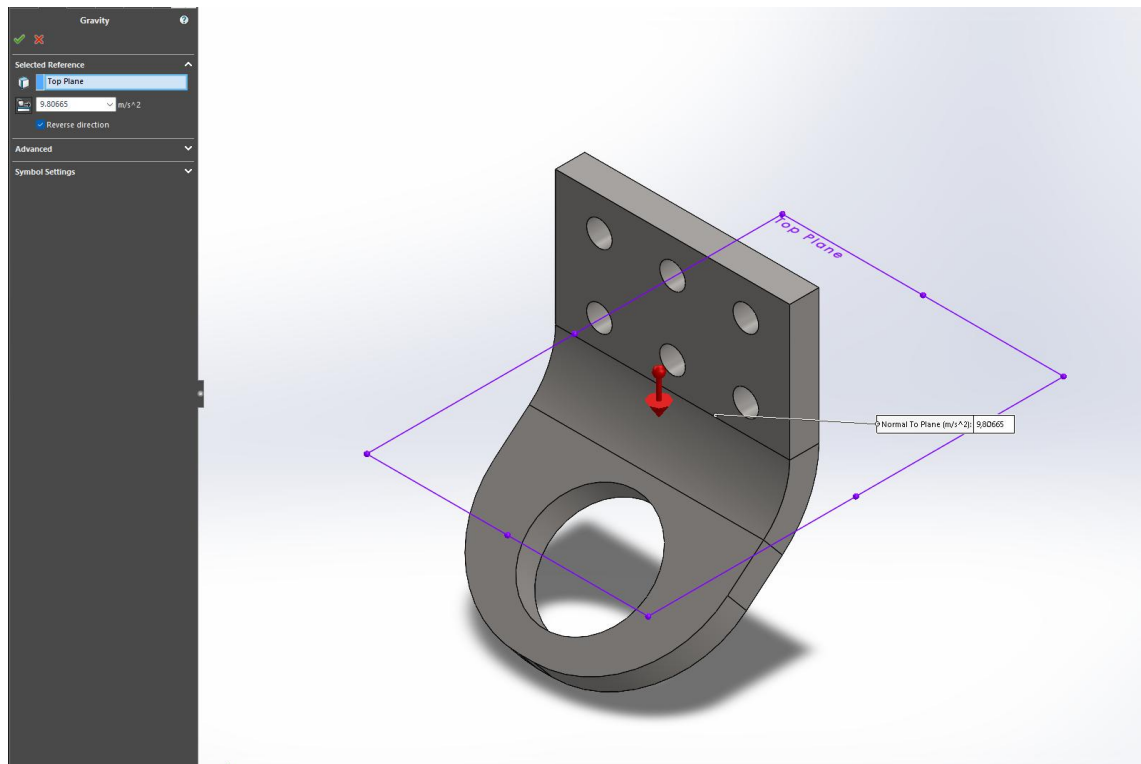
estettiin ruuvinreikien sisäpinnasta kuvan 27 mukaisesti. Liike on rajoitettu 0 rad:ksi ulkokehän myötäisesti.



Kuva 27. Advanced fixtures -valikossa määritelty kiertymisen rajoitus.

5.3.4 Painovoima

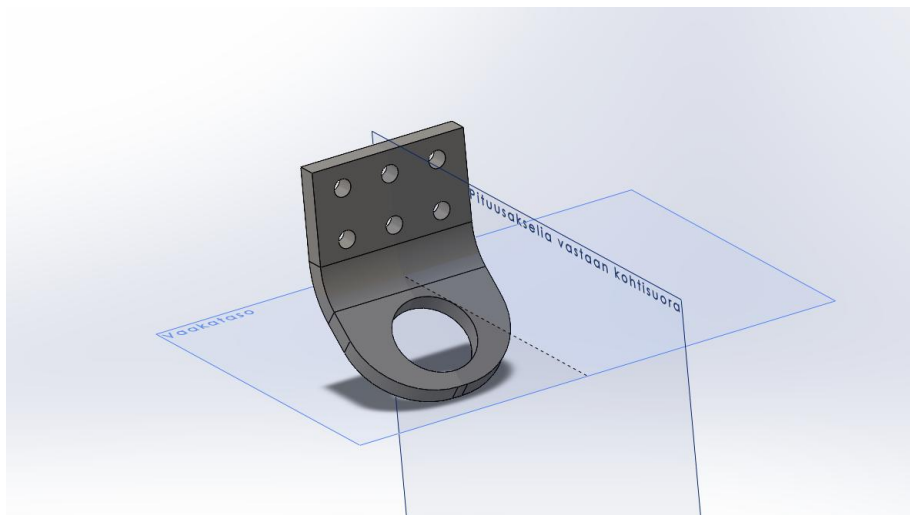
Simulaatiossa huomioitiin painovoima, joka määriteltiin kohtisuoraan kiinnityspinnasta eli z-akselista. Painovoiman kiihtyvyytenä käytettiin standardissa annettua painovoiman arvoa eli $9,80665 \frac{m}{s^2}$. Kappaleen asennon takia painovoima on jouduttu esittämään negatiivisena lukuna.



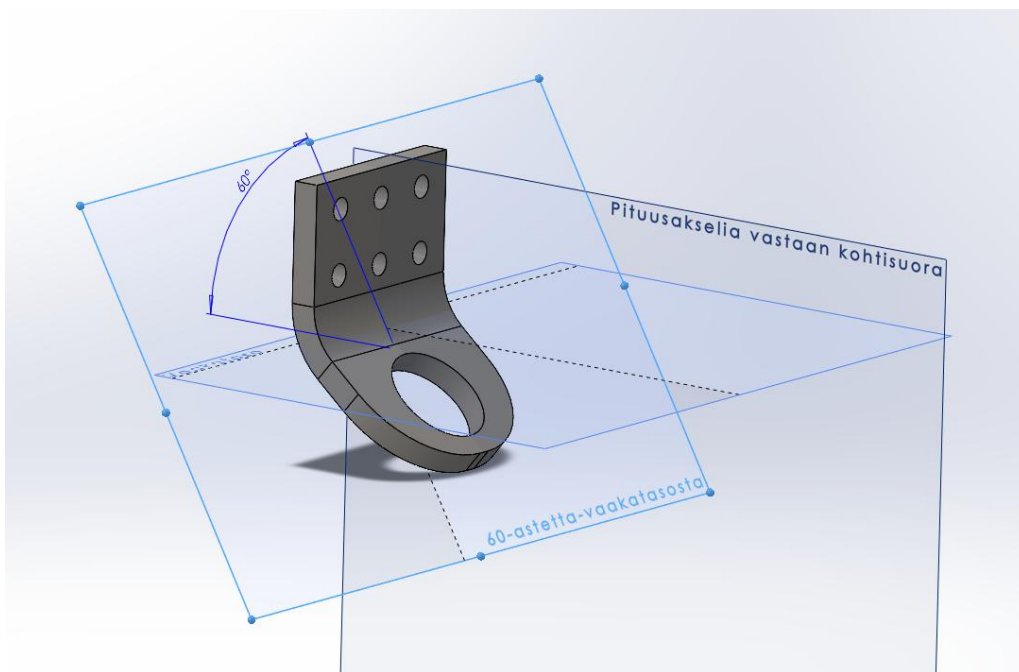
Kuva 28. Painovoiman määrittely.

5.3.5 Testivoima

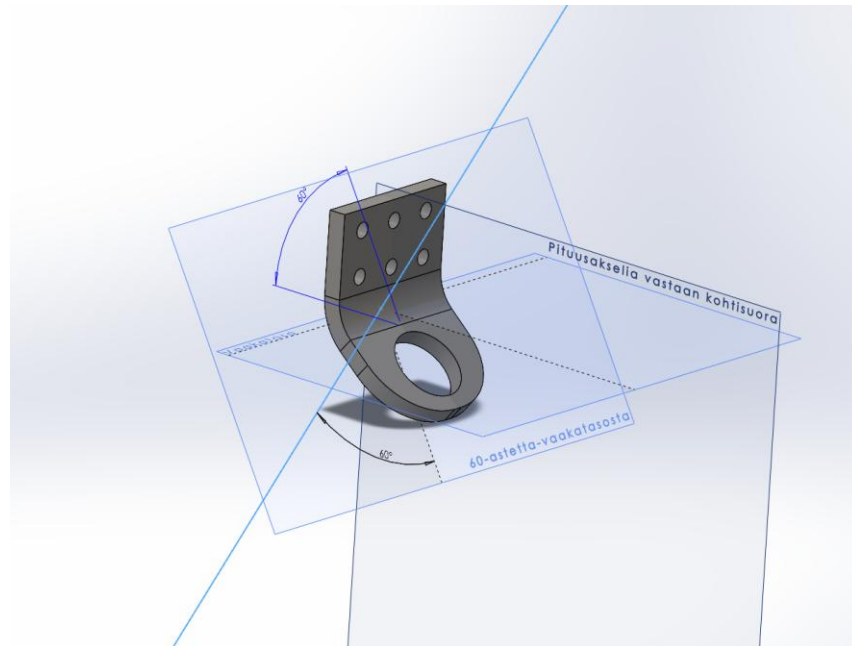
Standardissa on määritelty testivoiman suuntaus sidontapisteeseen. Testivoima tulee suunnata suoraan siten, että se lävistää sidontapisteen ja muodostaa 60° :n kulman sekä vaakasuoran että ajoneuvon pituusakselia vastaan kohtisuoran tason kanssa. Aluksi määritettiin tasot, joiden mukaan testivoima voidaan suunnata. Testivoima on kuvattu standardissa molemmille puolille pituusakselia vastaan kohtisuoriin tasoihin, mutta tässä opinnäytetyössä esitetään vain yhden puolen tulokset ja oletetaan tulosten olevan peilikuvia toisistaan. Standardissa ei ole määritelty kummalta puolen tasoa testi tulee suorittaa, joten simulointi tehdään niin, että kuormitus tulee vasemmalta.



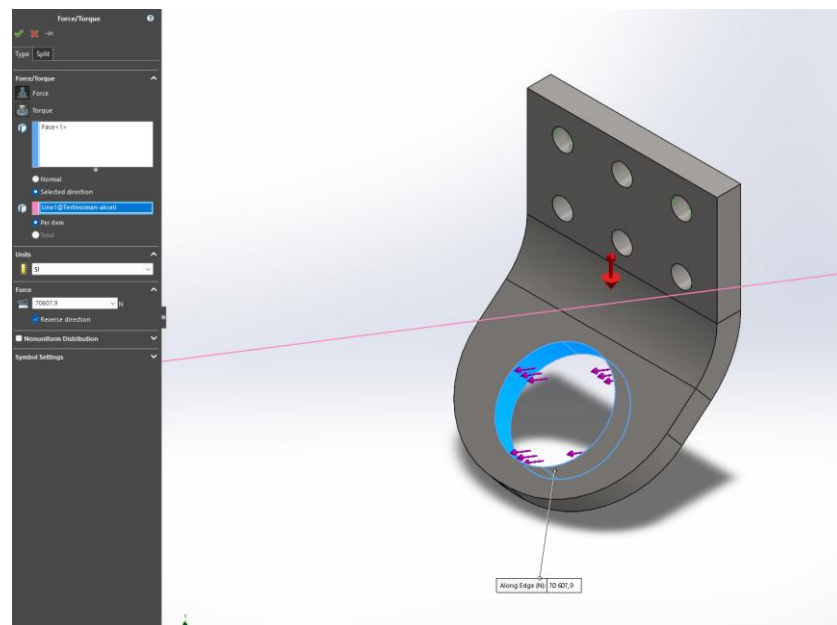
Kuva 29. Tasojen asettelu malliin.



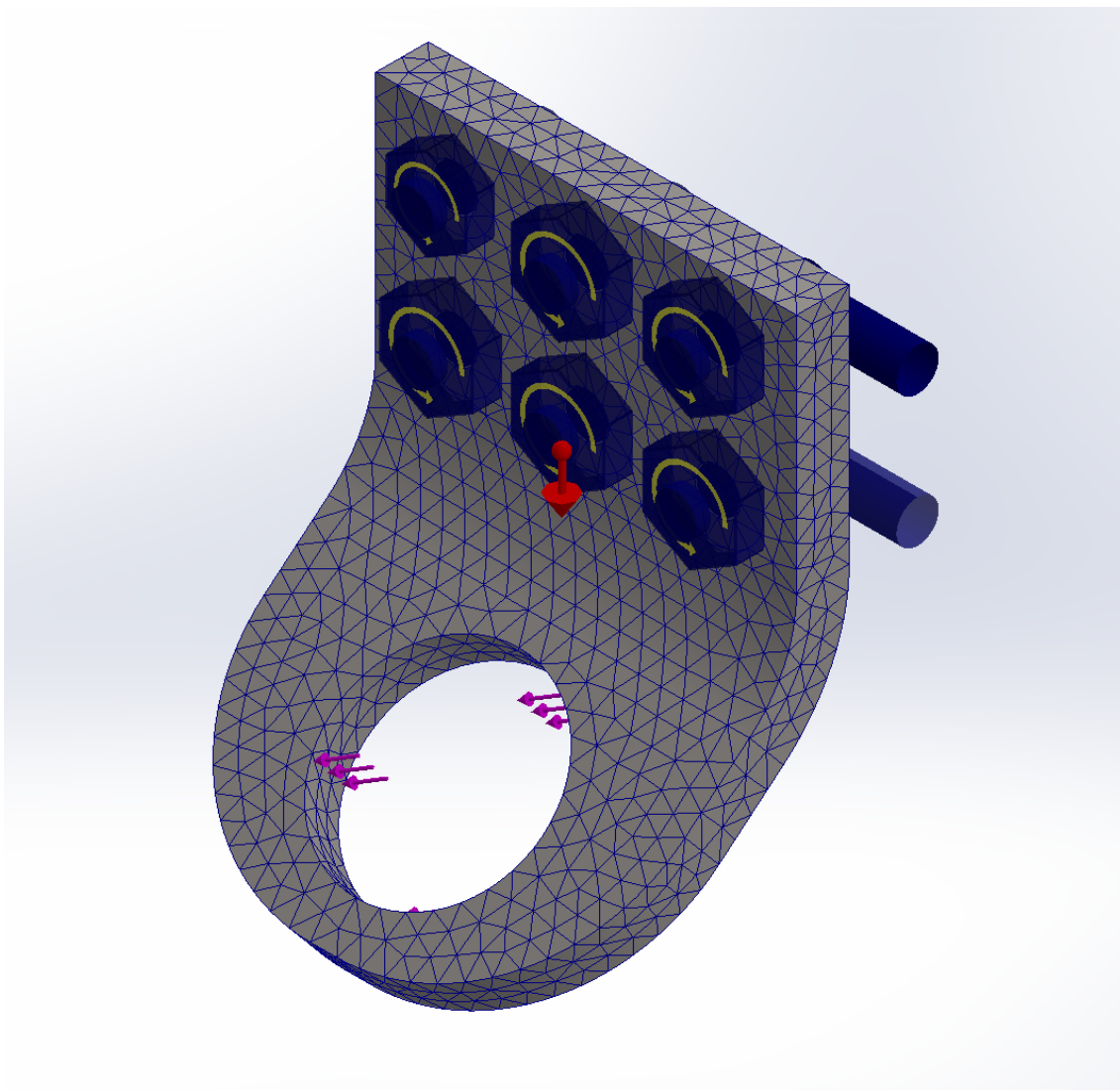
Kuva 30. Taso 60 astetta vaakatasosta.



Kuva 31. Testivoiman akseli, joka on 60°:n kulmassa vaakatasoon nähden sekä 60°:n kulmassa pituusakselia vastaan kohtisuoraa tasoa vastaan.



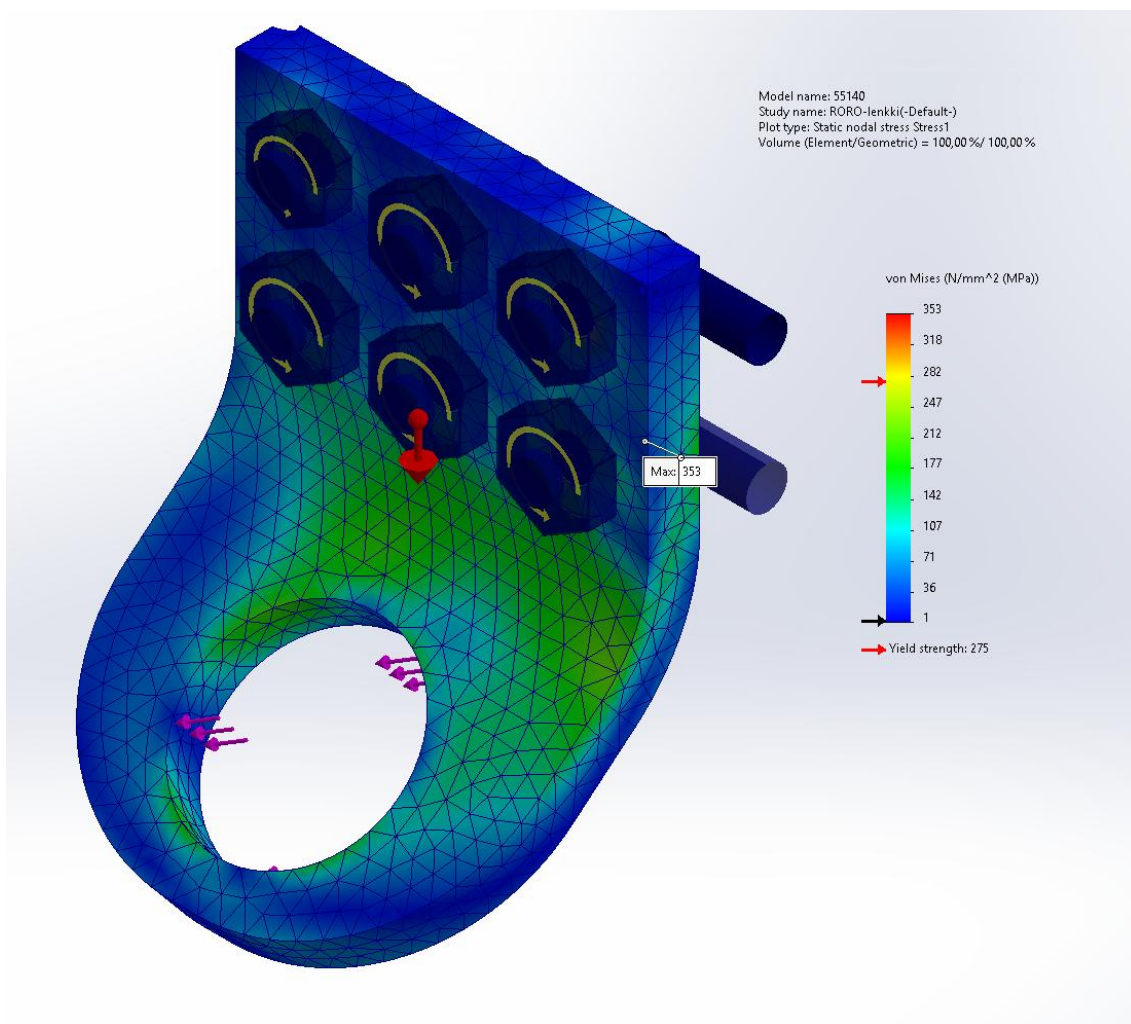
Kuva 32. Testivoiman määrittely simulaatioon.



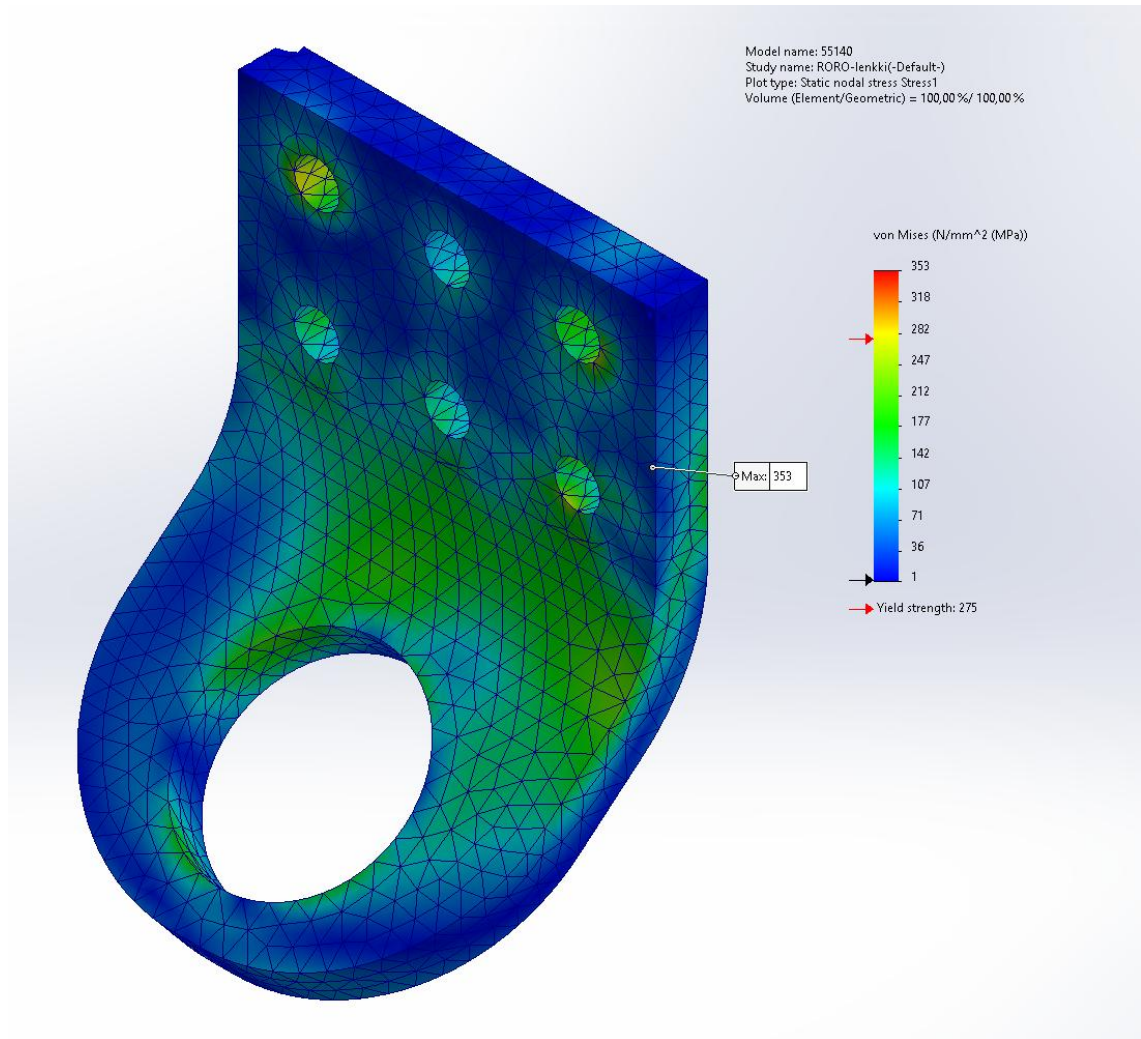
Kuva 33. Valmis FEM-malli.

5.4 Tulosten tulkinta

Tulosten tulkintaa helpottamiseksi mallista piilotetaan kuormat, liitokset ja rajoitteet.



Kuva 34. Ensimmäinen simulaatiotulos.



Kuva 35. Ensimmäinen simulaatiotulos esitettynä ilman liitoksia, kiinnityksiä tai kuormia.

Solidworks ilmoittaa S355JR -rakenneteräksen myötörajaksi 275 MPa:ta. Standardin SFS-EN 10025-2:2019:n taulukon, joka on esitetty kuvassa 36, mukaan huoneenlämpöisen S355JR:n ylempi myötöraja nimellispaksuudella > 16 ja ≤ 40 on vähintään 345 MPa. Tämä muutos huomioiden kuitenkin simulaatiosta saatu suurin jännitys ylitti suurimman myötörajan.

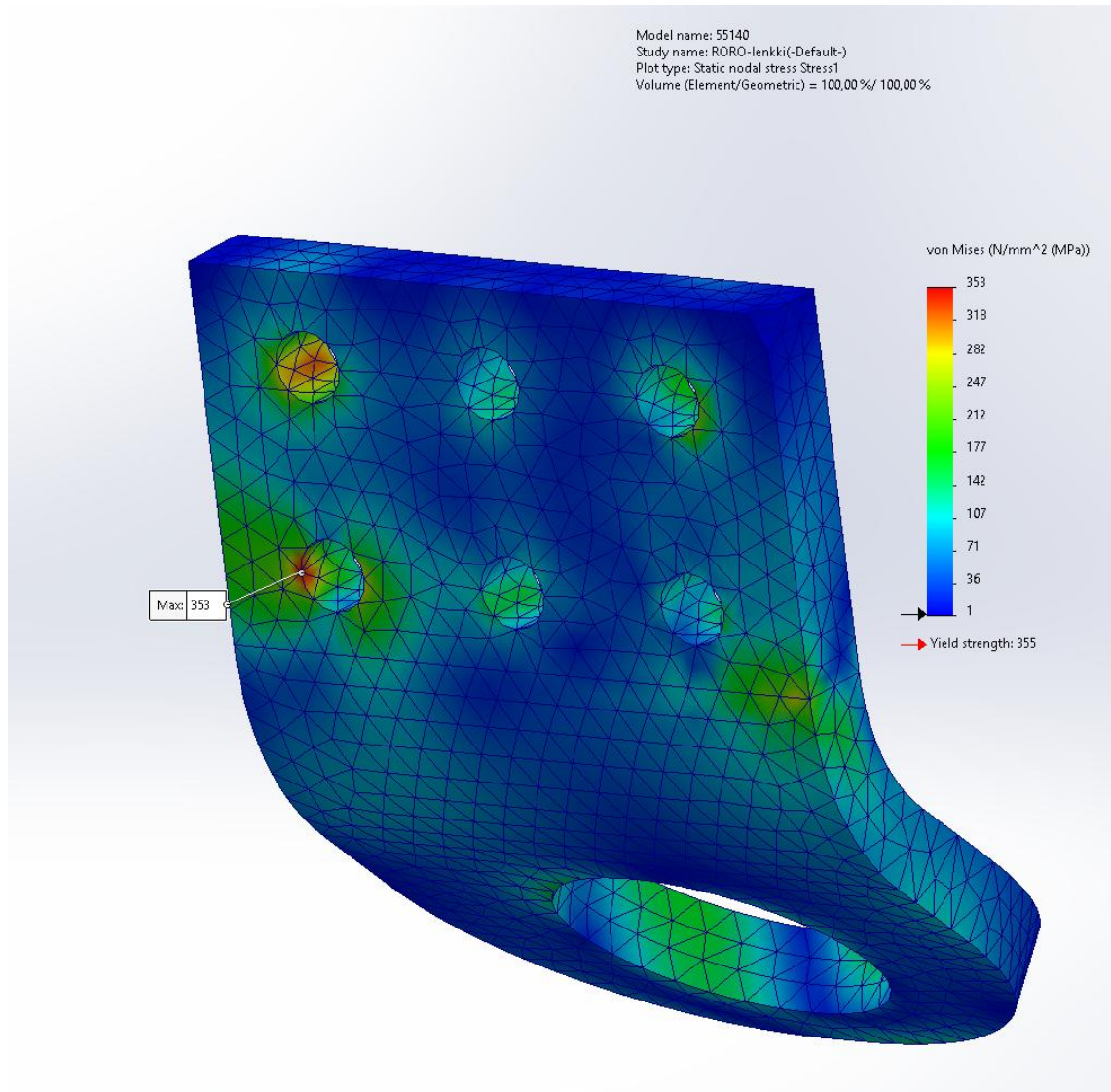
Teräslaji		Ylempi myötöraja R_{eH} vähintään ^a								
Nimike	Numero-tunnus	MPa								
		Nimellispaksuus								
		mm								
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	165
S235J0	1.0114									
S235J2	1.0117									
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	195
S275J0	1.0143									
S275J2	1.0145									
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S355J0	1.0553									
S355J2	1.0577									
S355K2	1.0596									
S460JR ^b	1.0507	460	440	420	400	390	390	-	-	-
S460J0 ^b	1.0538									
S460J2 ^b	1.0552									
S460K2 ^b	1.0581									
S500J0 ^b	1.0502	500	480	460	450	450	450	-	-	-

^a Levyille, nauhoille ja leveille latoille, joiden leveys on ≥ 600 mm, käytetään valssaussuuntaan nähden poikki valssaussuuntaan nähden pitkittäin (l) otetuille koesauvoille.

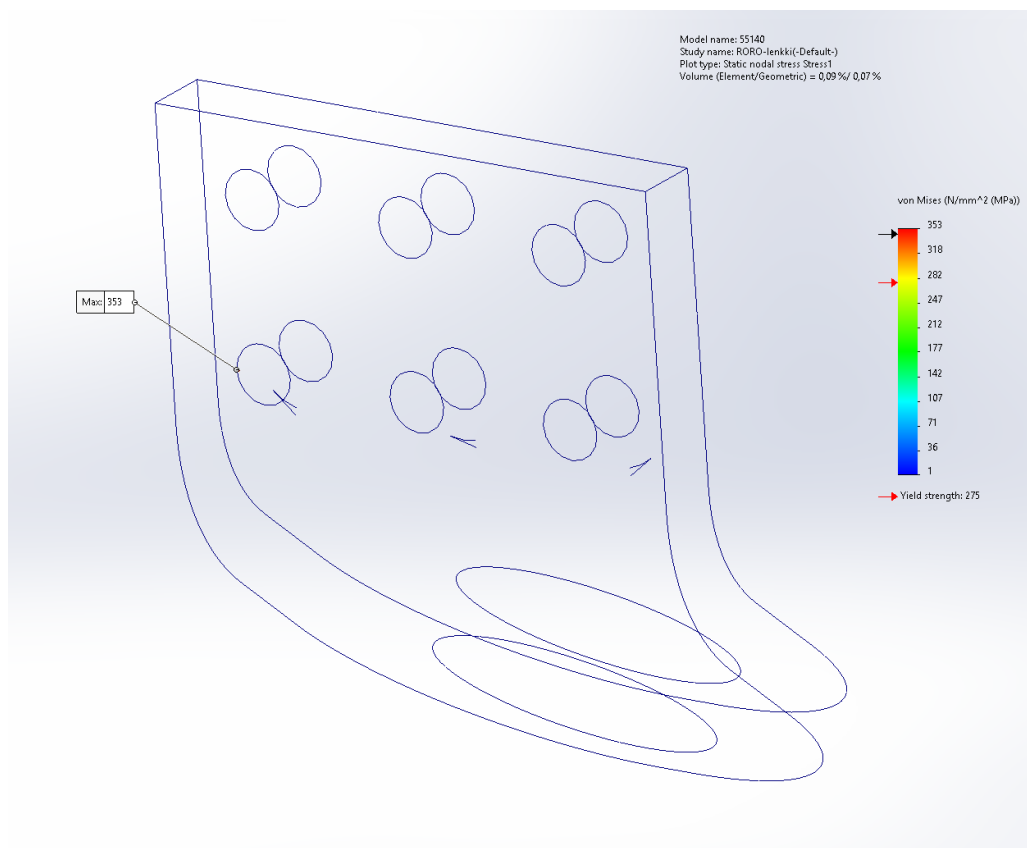
^b Vain pitkät tuotteet.

Kuva 36. Standardissa 10025–2:2019 esitetty myötörajan taulukko nimellispaksuuden mukaan [13].

Kuvassa 37 on esitetty suurin jännitys, joka esiintyy ruuvinreiän reunalla. Tähän voi olla syynä terävä reuna, joka voi aiheuttaa jännityskeskittymiä. Jännityskeskittymiä voidaan lieventää ja välttää pyöristyksillä tai muokkaamalla verkkoa. Solidworksissä on mahdollista esittää vain tietyn MPa-ajan ylittävät, alittavat tai väliin jäävä osio verkosta. Kuvassa 38 on esitetty verkon osiot, jotka ylittävät 345 MPa:n myötörajan ja kuvan mukaan kyse oli hyvin pienestä osasta verkkoa. Solidworks ilmoittaa osuudeksi 0,09 % simuloidusta verkosta. [8.]

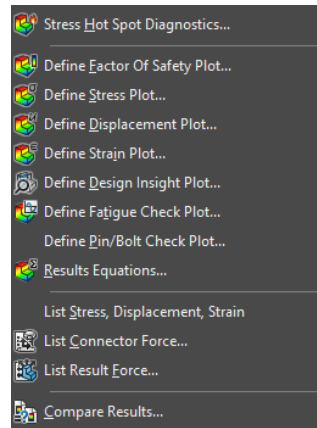


Kuva 37. Suurin jännitys von Mises -kuvaajan mukaan.



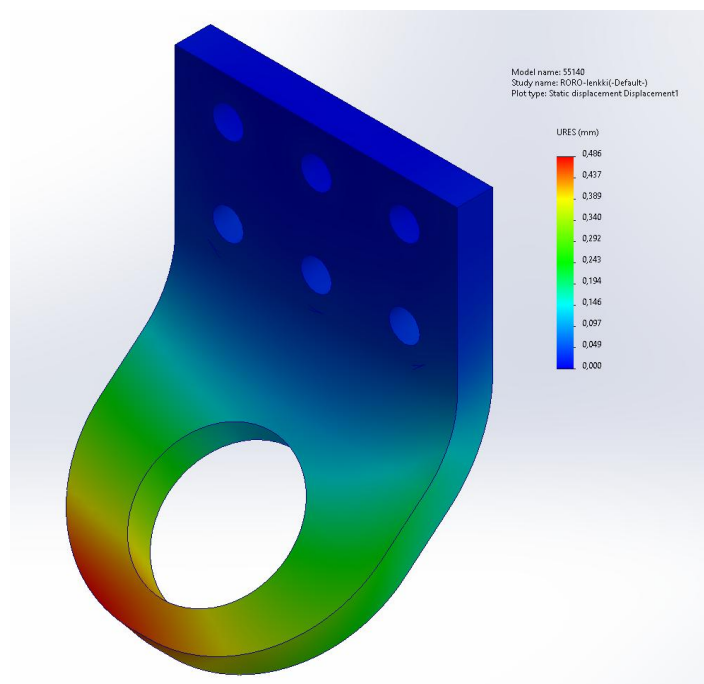
Kuva 38. Von Mises -kuvaaja, josta on suodatettu kaikki alle 345 MPa.

Ennen kuin muutoksia tehtiin, tarkistettiin muutkin simulaation tulokset. Solidworksin simulaatiotyökalulla voidaan simuloida useita eri tilanteita ja näille on eri kuvaajia, jotka on esitetty kuvassa 39. Tässä projektissa oleellimmat von Mises -kuvaajan lisäksi olivat siirtymän ja varmuuskertoimen kuvaajat, sillä niistä voidaan tulkita hyvin kappaleen käyttäytymistä kuormitettuna.



Kuva 39. Mahdolliset kuvaajat simulaatio tuloksista.

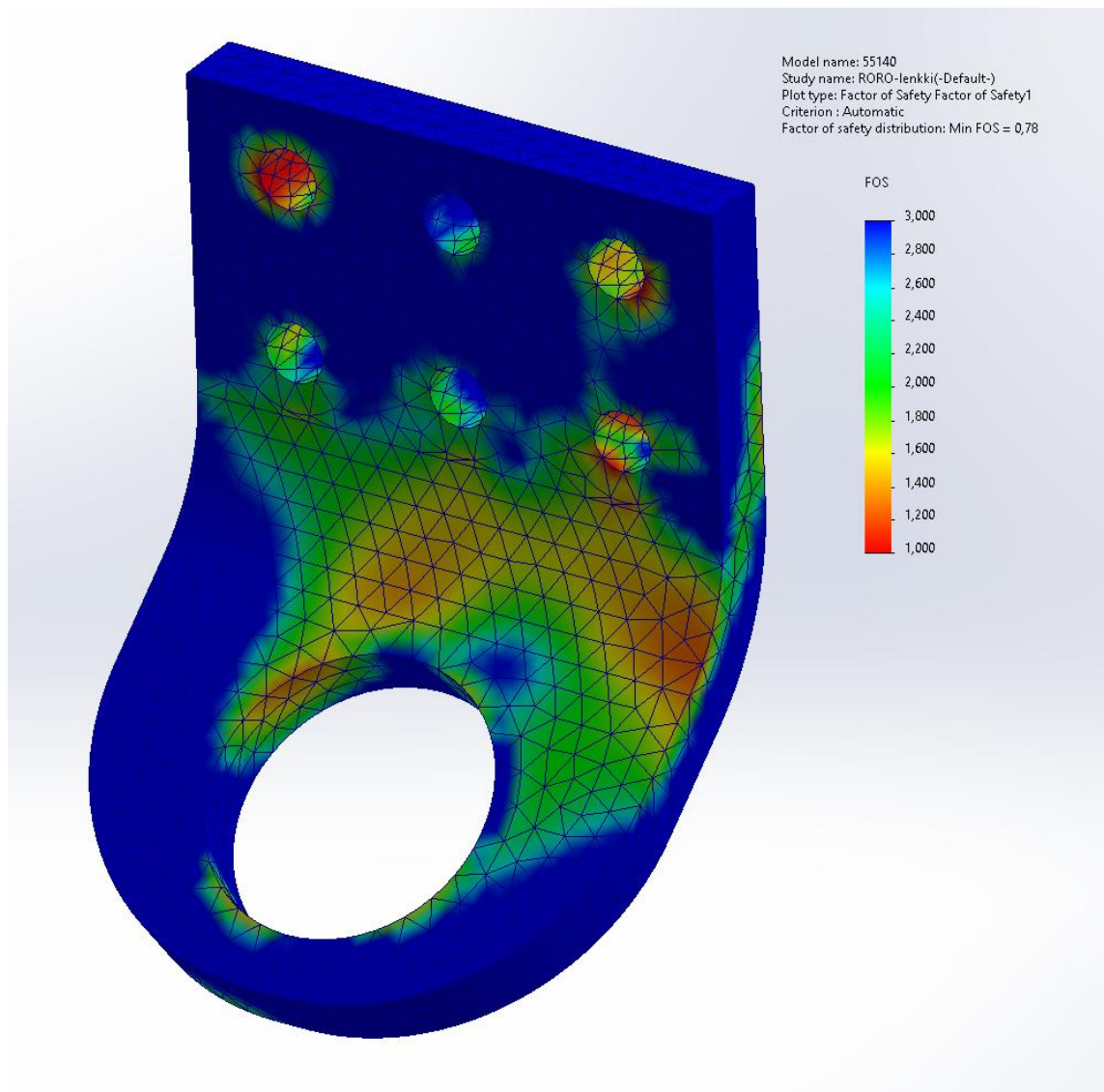
Kuvassa 40 on esitetty siirtymä millimetreinä. Kuvaajasta nähdään, missä suurin siirtymä on ja tulokset näyttävän hyvinkin mahdolliselta ja todenmukaiselta.



Kuva 40. Siirtymän kuvaaja millimetreinä.

Kuvassa 41 esitetyssä varmuuskertoimen kuvaajassa on huomattavissa jotain odotetusta poikkeavaa. Kuvassa ylemmän ruuvirivin vasemmassa reunassa olevan ruuvin sisäpinnassa on hyvin pieni varmuuskerroin. Tämä ei ole odotettua siksi, koska testivoima on samalla puolella kuin kuvaajassa näkyvä

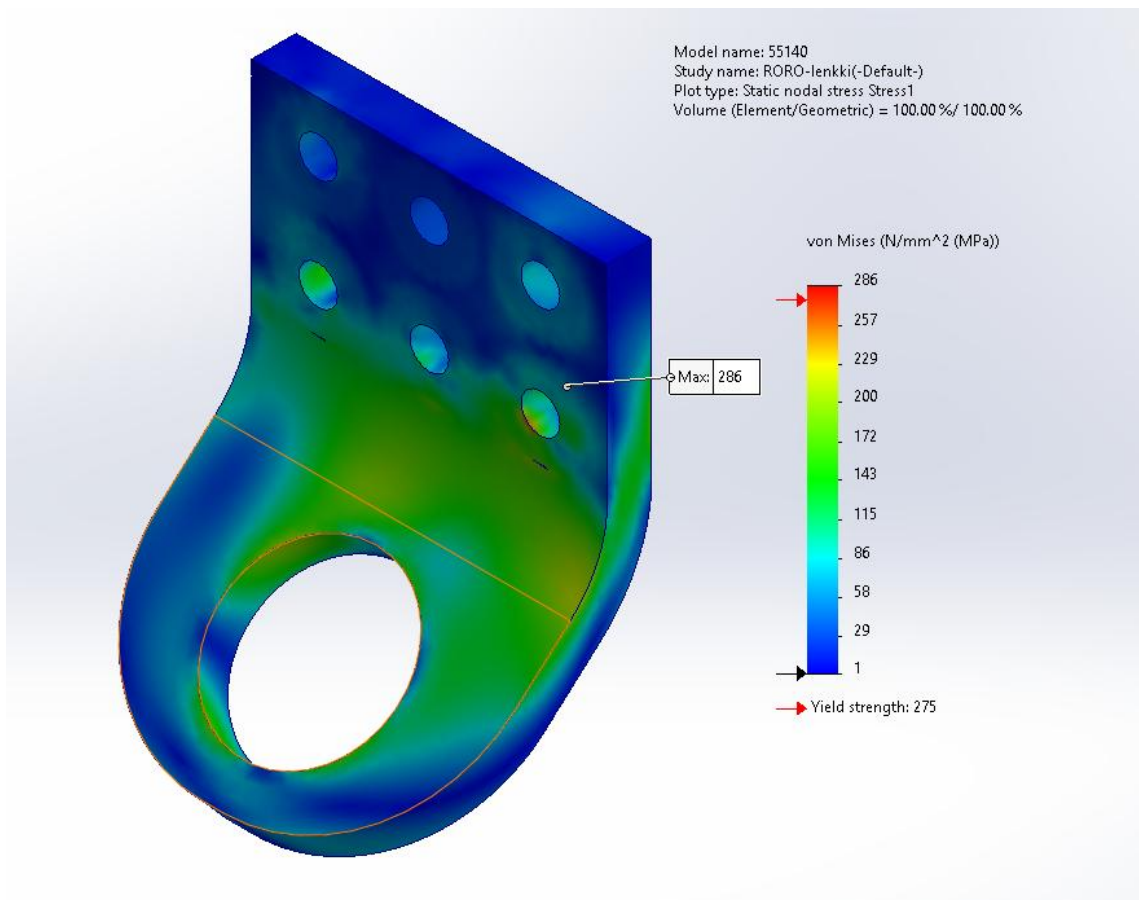
punainen alue. Odotettua olisi huomata pieni varmuuskerroin kuvassa alimmais-
sen ruuvirivin oikeassa reunassa olevassa ruuvinreiässä. Kyseissä ruuvin rei-
ässä on havaittavissa pieniä varmuuskerroin lukemia, mutta ei yhtä laajalti.
FEM-mallin kiinnityksissä oli siis jotain väärin. Tätä tukee myös ruuvinreiän ja
halkaisijan välinen toleranssi, joka on 1,5 mm. Toleranssi on riittävä eivätkä ruu-
vit aiheuta jännitystä kappaleeseen. Näin suurta siirtymää ei tapahdu taitoksen
yläpuolella, ja se voidaan todistaa kuvasta 40.



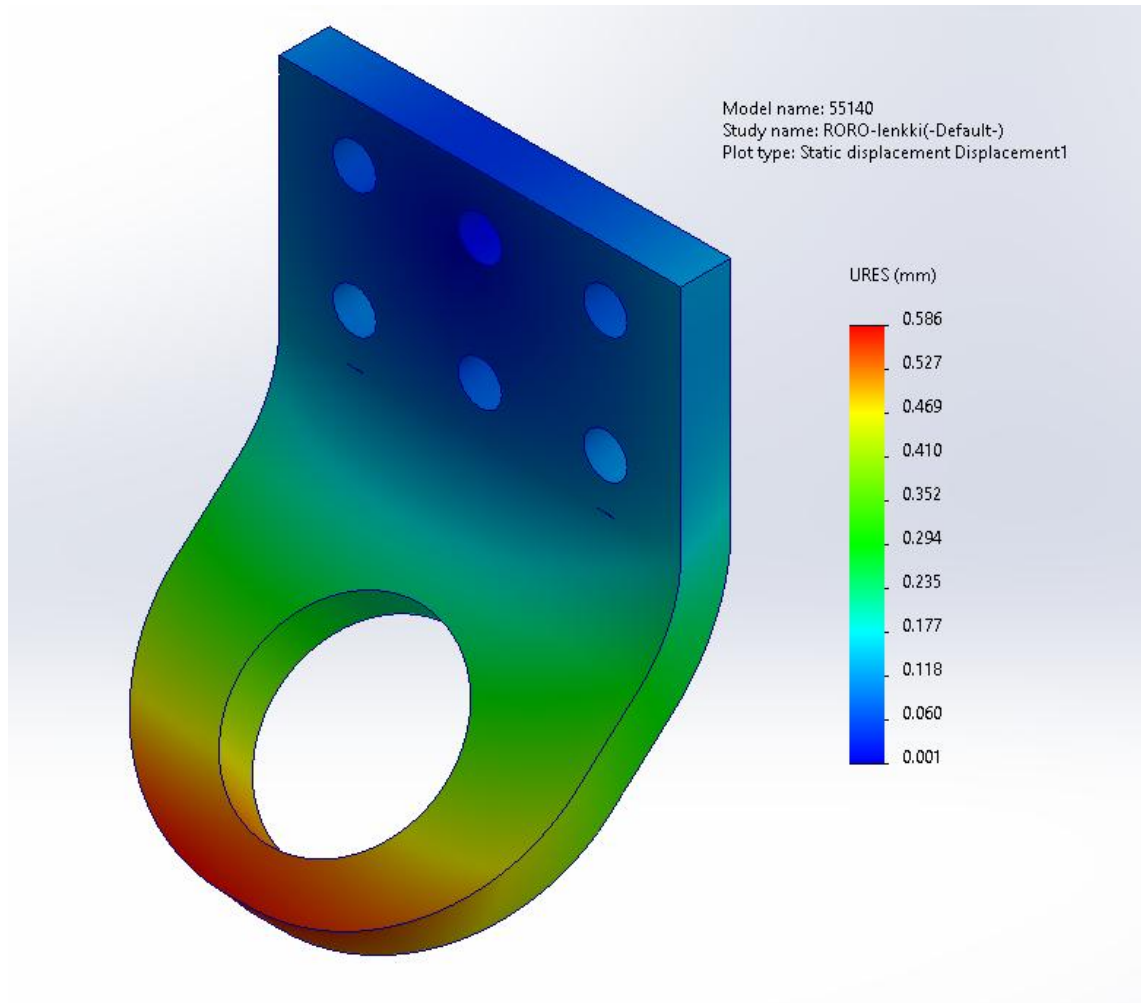
Kuva 41. Varmuuskertoimen kuvaaja.

5.5 FEM-mallin korjaus

Ainoa ruuvinseinämiin vaikuttava asetus on aiemmin asetettu rajoitus kiertymälle. Tämän rajoituksen poistamisen jälkeen aiemmin havaittua jännitystä ruuvien reikien seinämällä ei enää ole. Jännityslukematkin putosivat reilusti alle myötörajan, kuten kuvasta 42 voi nähdä. Kuvassa 43 on korjatun FEM-mallin siirtymän kuvaaja, joka poikkeaa aiemmasta kuvassa 40 esitetystä kuvaajasta siten, että myös kiinnityspinnassa on siirtymää.

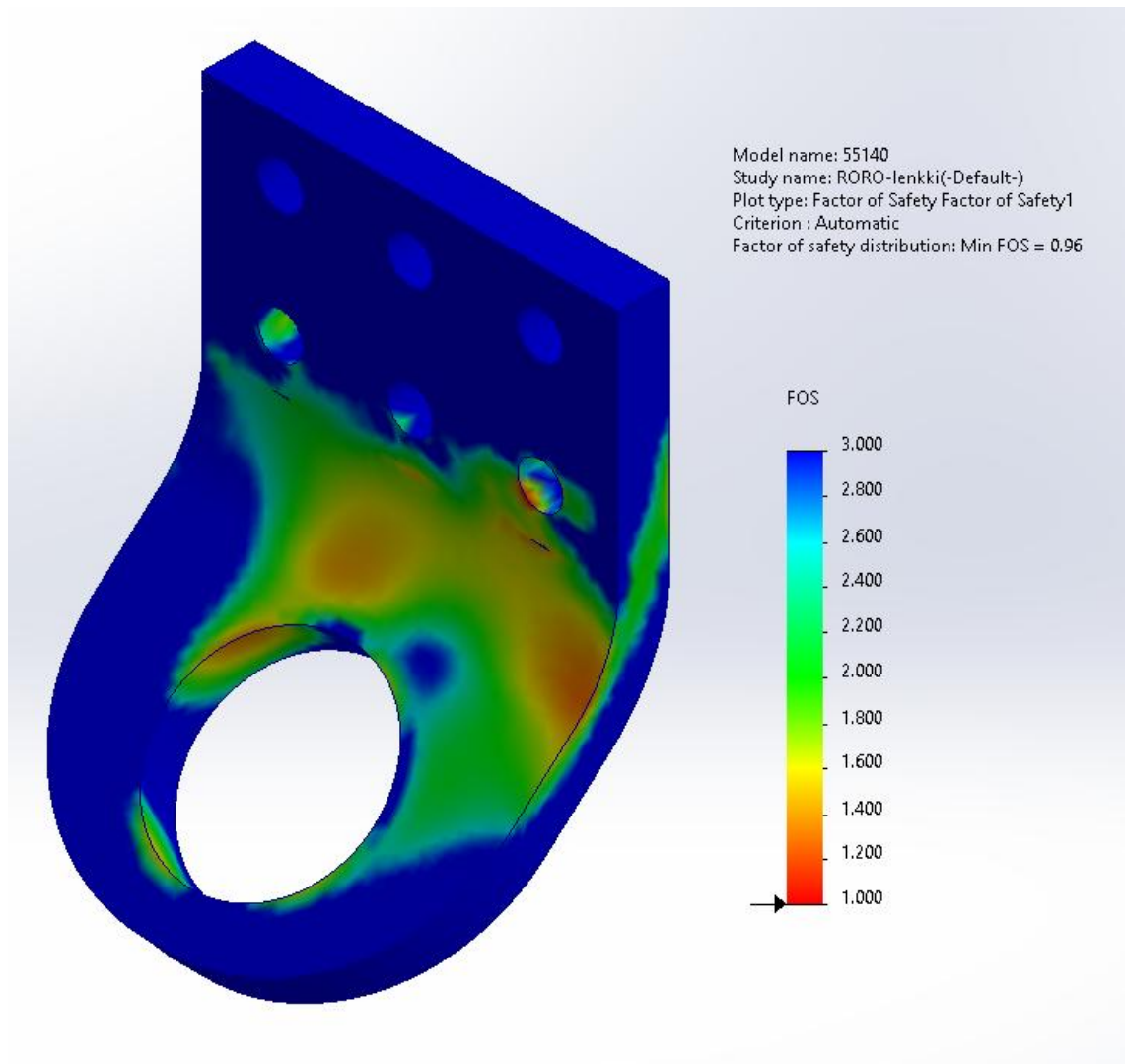


Kuva 42. Von Mises eli jännityksen kuvaaja korjatulla FEM-mallilla.

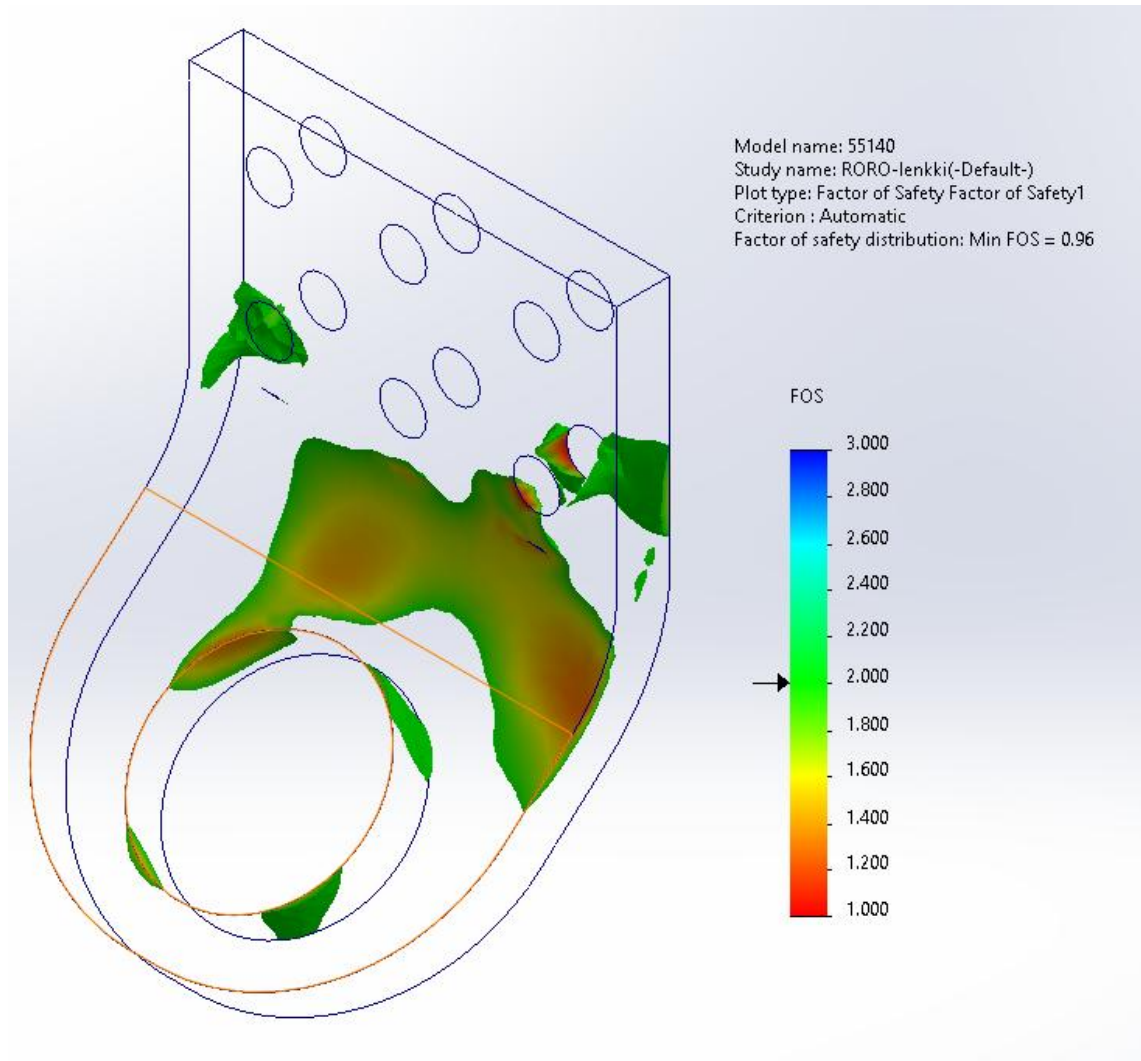


Kuva 43. Siirtymän kuvaaja korjatulla FEM-mallilla.

Korjatun FEM-mallin varmuuskertoimen kuvaaja on myös todenmukaisempi kuin aikaisemmin. Kuvassa 44 on esitetty kyseinen kuvaaja. Kuvaajan tulokset vastaavat odotettuja tuloksia enemmän kuin aikaisemmin. Kuvassa 45 on suodatettu kaikki yli toisen kertaluvun omaavat elementit ja tällä tavalla voidaan tarkastella kriittiset kohdat mallista. Varmuuskerrointa olisi voitu parantaa lisäämällä ainevahvuutta tai muutamalla mallin rakennetta. Esimerkiksi B-revisiossa voitaisiin muuttaa kiinnityspisteen 80 mm keskireikää D-malliseksi jännitystason pienentämiseksi. [4.]



Kuva 44. Korjatun FEM-mallin varmuuskertoimen kuvaaja.

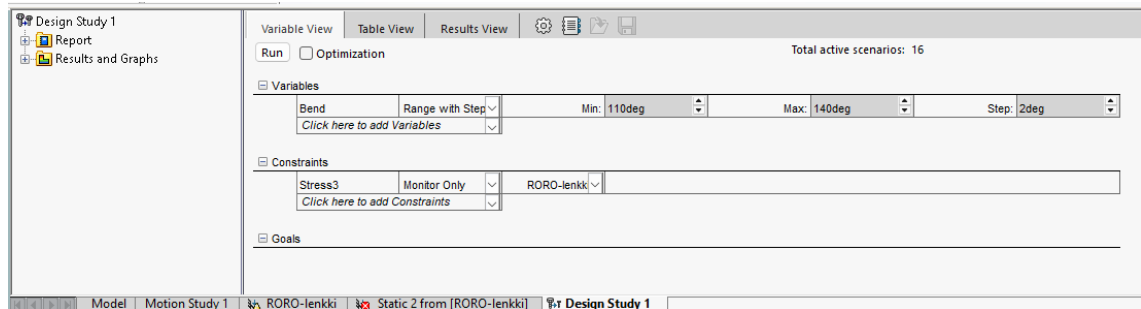


Kuva 45. Korjatun FEM-mallin varmuuskertoimen kuvaaja suodatettuna pois yli toisen kertaluvun elementit.

5.6 Design study -työkalun hyödyntäminen

Mallin parantamiseen hyödynnettiin Solidworksin *Design study* -työkalua. Käytännössä työkalulla voidaan tehdä sarjoittain simulaatioita eri skenaarioista. Skenaario on uusi simulaatio, jossa malliin tai simulaatioon on tehty muutos. Skenaarioiden tulosten pohjalta voidaan tehdä parantavia muutoksia simulaatioon tai malliin. *Design study* -työkalua voidaan tässä työssä hyödyntää esimerkiksi eri taivutuskulmien tai taivutussäteiden vertailuissa. Skenaarioita voidaan simuloida kymmeniä tai satoja peräkkäin. Kuvassa 46 on mallin taivutuskulman

analyysi, jossa simuloidaan kahden asteen välein eri taivutuskulmat 110°:sta 140°:seen.



Kuva 46. *Design study* -taivutuskulman vaikutuksesta FEM-tuloksiin.

Kuvassa 47 on esitetty *design studyn* tulokset. Tulokset osoittavat, kuinka taivutuskulma vaikuttaa kappaleen suurimpaan jännitysarvoon. Tuloksista voidaan myös tulkita, kuinka verkon uudelleenluonti voi muuttaa lopputulosta. *Design studyssä* taivutuskulman lähtöarvona oli 132°, jolla saatiin suurimmaksi jännitykseksi 286 MPa. Skenaariossa 12 on sama taivutuskulma, mutta uudelleen luotu verkko. Verkon uudelleenluonti pudotti jännitystä 285 MPa:iin. Parhaaksi taivutuskulmaksi osoittautui jo mallinnettu 132°.

Study Results

17 of 17 scenarios ran successfully.

Component name	Units	Current	Initial	Optimal	Scenario1	Scenario2
Bend	deg	132°	132°	-	110°	112°
Stress3	N/mm ² (MPa)	286.02	286.02	-	698.38	563.35

Component name	Units	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7
Bend	deg	114°	116°	118°	120°	122°
Stress3	N/mm ² (MPa)	505.39	443.03	453.56	426.69	369.89

Component name	Units	Scenario8	Scenario9	Scenario10	Scenario11	Scenario12
Bend	deg	124°	126°	128°	130°	132°
Stress3	N/mm ² (MPa)	337.75	316.85	328.69	321.66	285.44

Component name	Units	Scenario13	Scenario14	Scenario15	Scenario16	<L_iter5/>
Bend	deg	134°	136°	138°	140°	<SR_iter5/>
Stress3	N/mm ² (MPa)	294.92	295.91	300.27	312.58	

Kuva 47. Design studyn tulokset.

6 Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen

Projekti ja tuotteet saatiin ajoissa valmiiksi. Työtä helpotti Solidworksin suoraviivainen ja helppokäyttöinen käyttöliittymä, jota tukee alusta loppuun auttava Solidworksin *Simulation Advisor*. Projekti oli kokonaisuutena mielenkiintoinen ja antoisa. Opinnäytetyön avulla pystyin palaamaan projektiin yksityiskohtaisemmin ja pohtimaan tehtyjä valintoja.

Kyseisen työ oli mahdollista edetä pienin askelein ja tämä teki työstä sopivan haastavan. FEM-analysointi oli mielestäni oikea työkalu kyseiseen projektiin. Solidworksin helposti tulkittavat kuvaajat autoivat hahmottamaan kappaleen käyttäytymistä ja parantamista.

Projektin tiukka aikataulu ei mahdollistanut tulosten todentamista laboratoriossa. Tämä tullaan varmasti tekemään lähitulevaisuudessa, mutta sitä ei ollut mahdollista tehdä tätä opinnäytetyötä varten. Tämä projekti on innostanut minua tutkimaan lisää elementtimenetelmää ja sen käyttöä suunnittelutyökaluna.

Lähteet

1. Von Bell, Clas. 2018. Liikevaihto kasvoi 2017, vaikka Veho luopui PSA-merkeistä. Verkkoaineisto. Autotoday. <<https://autotoday.fi/liikevaihto-kasvoi-2017-vaikka-veho-luopui-psa-merkeista/>>. Luettu 10.10.2025.
2. Veho – Historia. Verkkoaineisto. Veho Oy Ab. <<https://veho.fi/etusivu/tata-on-veho/historia/https://veho.fi/etusivu/tata-on-veho/historia/>>. Luettu 10.10.2025.
3. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS-EN 29367-1. Ajoneuvojen sitomis- ja kiinnitysjärjestelyt Ro-Ro -aluksilla tapahtuvia merikuljetuksia varten. Yleiset vaatimukset. Osa 1: Hyötyajoneuvot ja ajoneuvoyhdistelmät, poislukien puoliperävaunut. Standardi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavilla SFS Online -palvelu.
4. SOLIDWORKS käsikirja. Assessing stress hot spots. Verkkoaineisto. <https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/r_assessing_stress_hot_spots.htm?id=26.20.0.12>. Luettu 30.10.2025.
5. Acin, Marcos. 2015. Verkkoaineisto. <<http://www.acin.net/2015/05/23/what-is-finite-element-analysis-fea/>>. Luettu 30.10.2025.
6. Skotny, Łukasz. 2024. Enterfea. What are nodes and elements in finite element analysis? Verkkoaineisto. <<https://enterfea.com/what-are-nodes-and-elements-in-finite-element-analysis/>>. Luettu 30.10.2025.

7. SOLIDWORKS käsikirja. Verkkoaineisto. <https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/c_Meshing.htm?id=26.4.9Z>. Luettu 30.10.2025.
8. SOLIDWORKS käsikirja. Mesh quality checks. Verkkoaineisto. <https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/c_mesh_quality_checks.htm?id=26.16.10>. Luettu 30.10.2025.
9. Ansys käsikirja. Jacobian Ratio. Verkkoaineisto. <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/wb_msh/msh_jacobian_ratio.html?q=jacobian>. Luettu 3.12.2025.
10. Petrock, Stephen. 2017. SOLIDWORKS Blog. A good FEA mesh – here’s the answer! Verkkoaineisto. <<https://blogs.solidworks.com/tech/2017/08/good-fea-mesh-heres-answer-yes-no-need-know-meshing-infographic.html>>. Luettu 30.10.2025.
11. SOLIDWORKS käsikirja. Meshing options. Verkkoaineisto. <https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/c_meshing_options.htm?id=26.16.4>. Luettu 30.10.2025.
12. Rusu, Cyprien. 2016. Can a wrong mesh impact your simulation results? Verkkoaineisto. <<https://feaforall.com/wrong-mesh-impact-results/>>. Luettu 30.10.2025. Luettu 30.10.2025.
13. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS-EN 10025-2:2019. Rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Standardi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavilla SFS Online -palvelu