



Azat Salikov

# Metrover-robotin suunnittelu, lujuus- analyysi ja valmistuksen simulointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

1.12.2024

# Tiivistelmä

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Tekijä:               | Azat Salikov  |
| Otsikko:              | Metrover-robotin suunnittelu, lujuusanalyysi ja valmistuksen simulointi |
| Sivumäärä:            | 36 sivua + 0 liitettä   |
| Aika:                 | 1.12.2024   |
| Tutkinto:             | Insinööri (AMK)   |
| Tutkinto-ohjelma:     | Konetekniikka   |
| Ammatillinen pääaine: | Koneensuunnittelu   |
| Ohjaajat:             | Yliopettaja Jyrki Kullaa<br>Projekti-insinööri Niko Hutri               |

---

Tämän työn tavoitteena on Metrover-robotin uudelleensuunnittelu, jossa pyritään korjaamaan edellisen version virheet ja puutteet, jotka johtivat sen rikkoutumiseen. Metrover on Mars Roverin kaltainen robotti, jonka omistaja on RoboGarage – Metropolian robotiikkapaja. Robottia käytetään eri kisoihin osallistumiseen, opiskelijoiden osaamisen kehittämiseen ja Metropolia AMK:n maineen levittämiseen.

Työtä tehdään käyttämällä 3D CAD -suunnittelua, lujuusanalyysia eri ohjelmilla ja robotin osien koneistuksen simulointia. Lopuksi saatiin parannettu versio, joka on valmistettavissa ja jota voi hyödyntää kilpailuissa.

Fyysinen prototyyppi luodaan seuraavassa vaiheessa yhteistyössä RoboGaragen muiden jäsenten kanssa.

|             |  |
|-------------|--|
| Avainsanat: | Mars Rover, lujuusanalyysi, CAD-suunnittelu, NX koneistus, robotti |
|-------------|--|

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Azat Salikov  
Title: Metrover Robot design, structural analysis and machining simulation  
Number of Pages: 36 pages  
Date: 1 December 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Mechanical Engineering  
Professional Major: Machine Design Engineering  
Supervisors: Jyrki Kullaa, Principal Lecturer  
Niko Hutri, Project Engineer

---

The objective of this thesis project is to redesign the Metrover robot, addressing the faults and weaknesses of the previous version that led to its breakdown and made it unusable. Metrover, a Mars Rover-type robot, is owned by RoboGarage – the robotics workshop at Metropolia University of Applied Sciences. The robot is used for participating in various competitions, enhancing students' skills, and promoting the reputation of Metropolia University of Applied Sciences.

This work involves 3D CAD design, strength analysis using different software, and machining simulation for the robot's parts. The result is an improved version that can be produced and utilized in competitions.

In the next phase, the physical model will be created with the assistance of other members of RoboGarage.

Keywords: Mars Rover, structural analysis, CAD design, NX manufacturing, robot

# Sisällys

## Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto  | 1  |
| 2     | Edellinen versio                                | 3  |
| 3     | Mallintaminen                                   | 4  |
| 3.1   | Rocker-bogien rakenne                           | 4  |
| 3.2   | Runkorakenne                                    | 8  |
| 3.2.1 | Ensimmäinen versio                              | 8  |
| 3.2.2 | Toinen versio                                   | 9  |
| 3.2.3 | Kuori   | 11 |
| 4     | Lujuusanalyysi                                  | 11 |
| 4.1   | Runkorakenteen analyysi                         | 12 |
| 4.1.1 | Yläkannen kuormitus                             | 12 |
| 4.1.2 | Rungon kuormitus                                | 14 |
| 4.2   | Rocker-bogien analyysi                          | 17 |
| 4.2.1 | Rockerin kuormitus                              | 17 |
| 4.2.2 | Bogien kuormitus                                | 19 |
| 4.2.3 | Pyörivän renkaan rakenteen kuormitus            | 21 |
| 4.2.4 | Topologinen optimointi                          | 23 |
| 4.3   | Tuloksien arviointi                             | 24 |
| 5     | Valmistus                                       | 25 |
| 5.1   | Laserleikkaus                                   | 25 |
| 5.2   | Runkorakenteen ja kuoren metallilevyjen särmäys | 25 |
| 6     | Koneistus                                       | 25 |
| 7     | Yhteenveto                                      | 31 |
|       | Lähteet   | 32 |

## Lyhenteet

CAD: *Computer-aided design* on tietokoneen käyttöä apuvälineenä etenkin insinöörien ja arkkitehtien harjoittamassa suunnittelutyössä.

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*. Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto. Se on vastuussa Yhdysvaltain avaruusohjelmasta ja siviili-ilmailun tutkimuksesta.

FEA: *Finite Element Analysis* eli elementtimenetelmän analyysi. Numeerinen analyysi differentiaaliyhtälöiden, erityisesti osittaisdifferentiaaliyhtälöiden, ratkaisemiseen tietokoneella.

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja valmistella osat koneistusta varten Metrover-robottiin, parantaen ja korjaten sen edellisen version heikkouksia ja virheitä. Työtä tehdään Metropolia AMK:n RoboGarage-robotiikkapajalla, jossa opiskelijat osallistuvat tiiviissä yhteistyössä erilaisiin mekaniikka- ja sähkötekniikkaprojekteihin. Näiden projektien tavoitteena on kehittää opiskelijoiden osaamista ja ammatillisia taitoja, hankkia työkokemusta sekä osallistua kilpailuihin.



Kuva 1. Metroverin edellinen versio

Metrover on NASA:n kehittämän Mars Roverin kaltainen robotti, jota RoboGarage haluaa uudistaa, sillä edellinen versio, joka on näkyvässä kuvassa 1, on rikkoutunut. Syynä oli kääntymismekanismi, joka ei kestänyt rakenteen kuormitusta, sekä huonolaatuinen hitsaustyö. Uudella mekaniikan suunnittelulla halutaan lujittaa koko robotin rakennetta, lisätä veden- ja pölynsuojausta ja vaihtaa kääntymismekaniikka.

Työ sisältää sekä 3D CAD-suunnittelua ja FEA-analyysiä (ohjelmallinen suunnittelu), että osien valmistusta ja koneistusta, jotka muodostavat käytännön työvaiheen. Tämän vaiheen jälkeen robotti viimeistellään sähkötiimin työpanoksella valmiiksi fyysiseksi tuotteeksi.

Mars Rover on NASA:n kehittämä kauko-ohjattava ajoneuvo, joka pystyy liikkumaan Marsin pinnalla. Sen rakenne koostuu rungosta, joka kantaa akkuja, antureita, kameroita ja muita laitteita, sekä kolmen osan jousitusjärjestelmästä, johon kuuluvat Rocker, Bogie ja tasauspyörästö (differentiaali). Jousitusjärjestelmä on selitetty kuvassa 2 [1].

|               |  |
|---------------|--|
| Differential: | A pivot in the top deck's center connects it to the left and right rockers and the rover body.           |
| Rocker:       | One on the left, one on the right. Connecting the front wheel to the differential and bogie in the rear. |
| Bogie:        | Connects middle and rear wheels to the rocker.   |

## Kuva 2. Jousitusjärjestelmä selityksineen

Tämä rakenne auttaa pitämään kaikki kuusi pyörää maan pinnalla, mikä takaa ajoneuvon tehokkaan liikkumisen pinnanmuodoista riippumatta.

RoboGaragen Metrover hyödyntää samaa periaatetta tarjotakseen kilpailukykyä kaikenlaisissa kilpailuissa. Tämän perusteella voidaan määrittää robotin suunniteltavat osat:

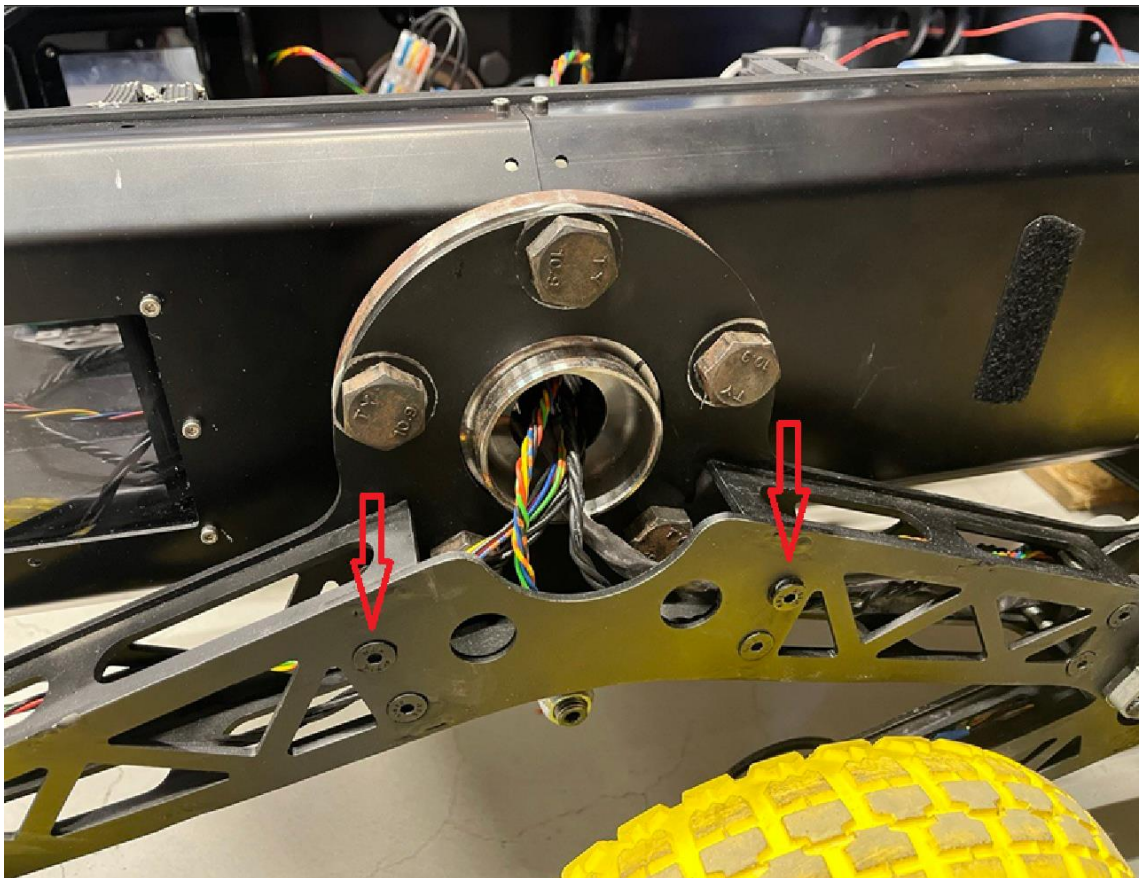
1. Runkorakenne eli robotin vartalo
2. Rocker-bogie eli jousitusjärjestelmä

Runkoon kuuluu myös kuorielementtejä, ja jousitusjärjestelmään sisältyy kääntyvien pyörien mekanismin suunnittelu. Mekaaniset osat, kuten laakerit, tasauspyörästö ja pyörät, pysyvät ennallaan myös uudessa versiossa.

Materiaalien toimittajaksi on valittu Metropolia ammattikorkeakoulun laboratorio-tilojen toimittaja. Mahdollisuus käyttää laboratoriossa olevia raaka-aineita sekä täydentää tarvittavia tuotteita koulun tilauksilla helpottaa materiaalien hankintaa ja nopeuttaa valmistus- ja koneistusprosesseja.

## 2 Edellinen versio

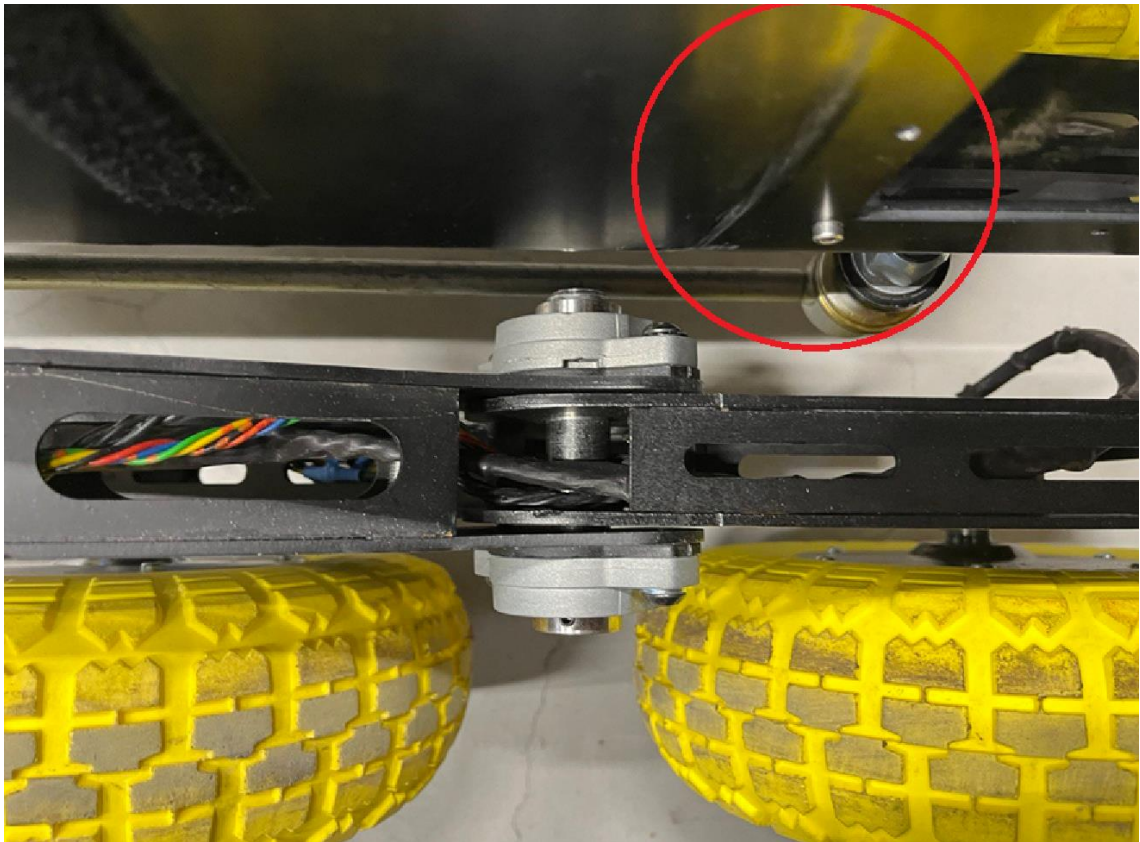
Edellisessä versiossa eniten korjattavaa oli jalkojen rakenteessa. Vaikka masaltaan se oli kevyt, puutteellinen hitsaustyö johti murtumiin. Esimerkiksi, kuvassa 3 näkyy murtamisen jälkeiset korjaustyöt, kun rakennetta vahvistettiin ruuveilla (kaksi mustaa ruuvia kummallakin puolella, osoitettu punaisilla nuolilla). Sen lisäksi suunnittelun puolelta oli tarkoitus vaihtaa rockerin rakennetta siten, että sen etu- ja takaosat, ns. putket, olisivat levittäneet laakerin yläpuolelta (Kuva 5). Näin saataisiin robotin runko asetettua lähemmäs maata. Sen myötä robotin painopiste olisi matalampi, ja robotti stabiilimpi. Lisättyjen ruuvien läheisyydessä rockeri meni kuitenkin rikki.



Kuva 3. Rockerin keskiosa, laakerin kiinnityskohta

Uudessa suunnittelussa on myös huomattava, että bogien laakerit törmäävät rungon kuoriosiin, jonka takia jousitusjärjestelmä ei voinut toimia kunnolla.

Tämä johtuu siitä, että bogien keinumisamplitudi oli rajoitettu. Kuvassa 4 näkyy jäljet (punaisen ympyrän sisällä), joita laakeri on jättänyt mustaan kuoreen.



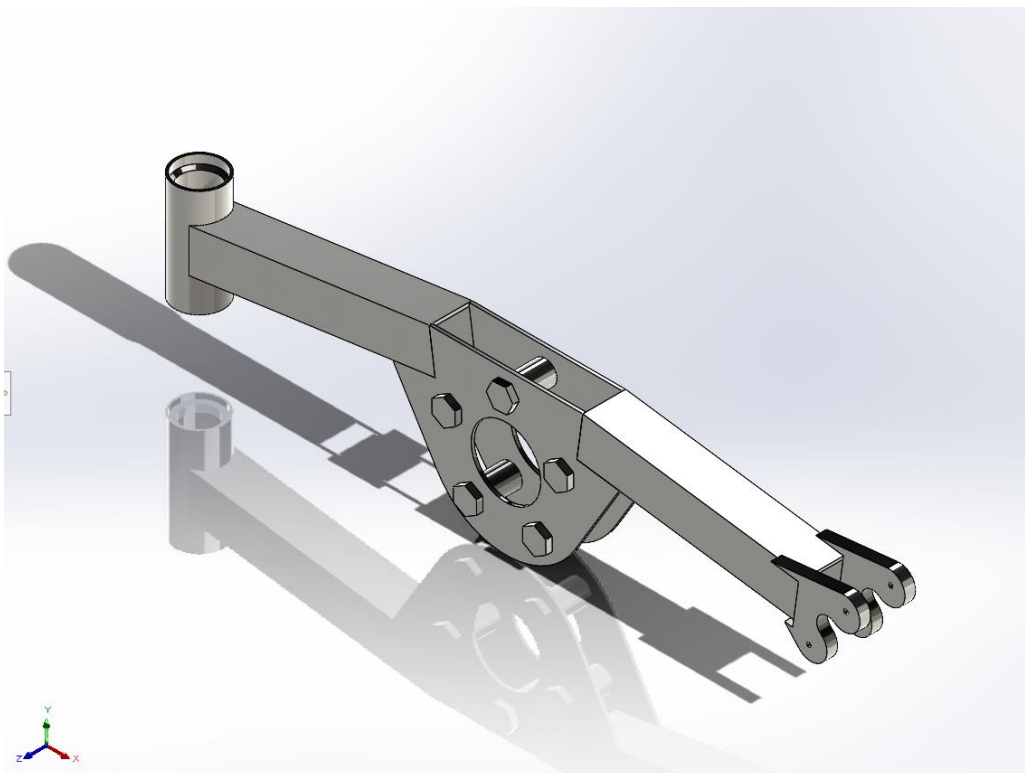
Kuva 4. Bogien laakerit

### 3 Mallintaminen

#### 3.1 Rocker-bogien rakenne

3D-mallintaminen tapahtuu Dassalut Systemsin SolidWorks -ohjelmalla.

Uudessa rakenteessa on otettu huomioon edellisen version hitsausvirheet ja uusi kääntymismekanismi. Laserleikatut osat on korvattu neliömäisillä teräsputkilla, joiden suljettu profiili ja vähäisempi hitsauskohtien määrä estävät vääntömomentista johtuvan ylikuormituksen. Vaikka laakereiden käyttö vaatii epätavallisten muotojen valmistamista metallilevyjen laserleikkauksella, tämä ratkaisu parantaa rakenteen kestävyyttä. Rockerin koko rakenne näkyy kuvassa 3.



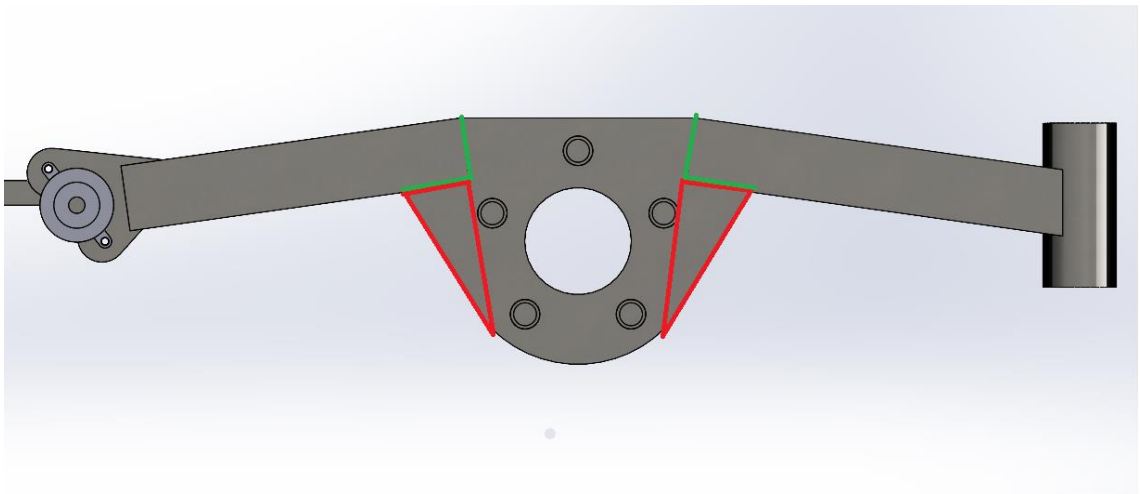
Kuva 5. Rokerin rakenne

Rakenteeseen on valittu 40 x 40 x 3 mm:n kokoiset neliöputket, jotka laskelmien mukaan kestävät 165 kg kuormituksen (puolet runkoon kohdistuvasta kuormituksesta) pituudeltaan 300 mm. Nämä putket ovat 8 asteen kulmassa, joten putkiin kohdistuu sekä taivutusmomentti että normaalivoima. Jännitys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\sigma = \frac{M}{I}y + \frac{N}{A}$$

jossa  $\sigma$  (sigma) on normaalijännitys,  $M$  on taivutusmomentti,  $I$  on hitausmomentti,  $y$  on pystysuuntainen poikkileikkauksen keskipisteestä maksimi etäisyys,  $N$  on normaalivoima,  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala. Lasketun jännityksen arvoksi saadaan 92,85 MPa. Materiaali on S355J2H/420MH, jonka ylempi murto-  
raja valmistajan ilmoittaman standardin SFS-EN 10219-1 mukaan on 355 MPa [2].

Tämä lujuusvara on suunniteltu vastustamaan robotin liikkeen aikana syntyvän kuormituksen suunnan muutoksia ajopinnan epätasaisuuden vuoksi. Esimerkiksi robotin ajaminen ylämäkeen kuormittaa Rockerin takapuolta enemmän kuin etupuolta. Kuvassa 6 näkyvässä rakenteen keskikohdassa on ruuviliitos M14-ruuveilla, joiden avulla Rocker kiinnitetään runkoon laakerin yhteydessä. Tämän osan metallilevyille on lisätty kolmionmuotoiset laajennukset siipiä (kuvassa 6 merkitty punaisella), eli neliöputkia, pitkin, jotta hitsausliitosten (kuvassa 6 merkitty vihreällä) jännitykset saadaan pienemmiksi.



Kuva 6. Rockerin parannukset

Ruuvien ympärille on asennettu 2 mm:n paksuiset holkit ilman kierteitä, jotka korvaavat ohuempiin metallilevyihin kohdistuvan ylikuormituksen ja estävät liialliset muodonmuutokset.



Kuva 7. Bogien rakenne

Kuvassa 7 näkyvä bogie, eli ajopinnan mukaan keinuva jousitusjärjestelmän osa, koostuu 30 x 30 x 3 mm neliöputkesta. Sen toisessa päässä on kääntyvän pyörän akseli ja toisessa päässä keskimmäisen pyörän kiinnitysalusta. Keskimmäisen pyörän putkirakenne on sijoitettu jousitusjärjestelmän keskelle niin, että bogien liikkuessa (eli keinuessa) jää vapaata tilaa, joka estää kosketukset ja törmäykset Rockeriin. Tämä mahdollistaa jousitusjärjestelmän oikean toiminnan ja liikevapauden.

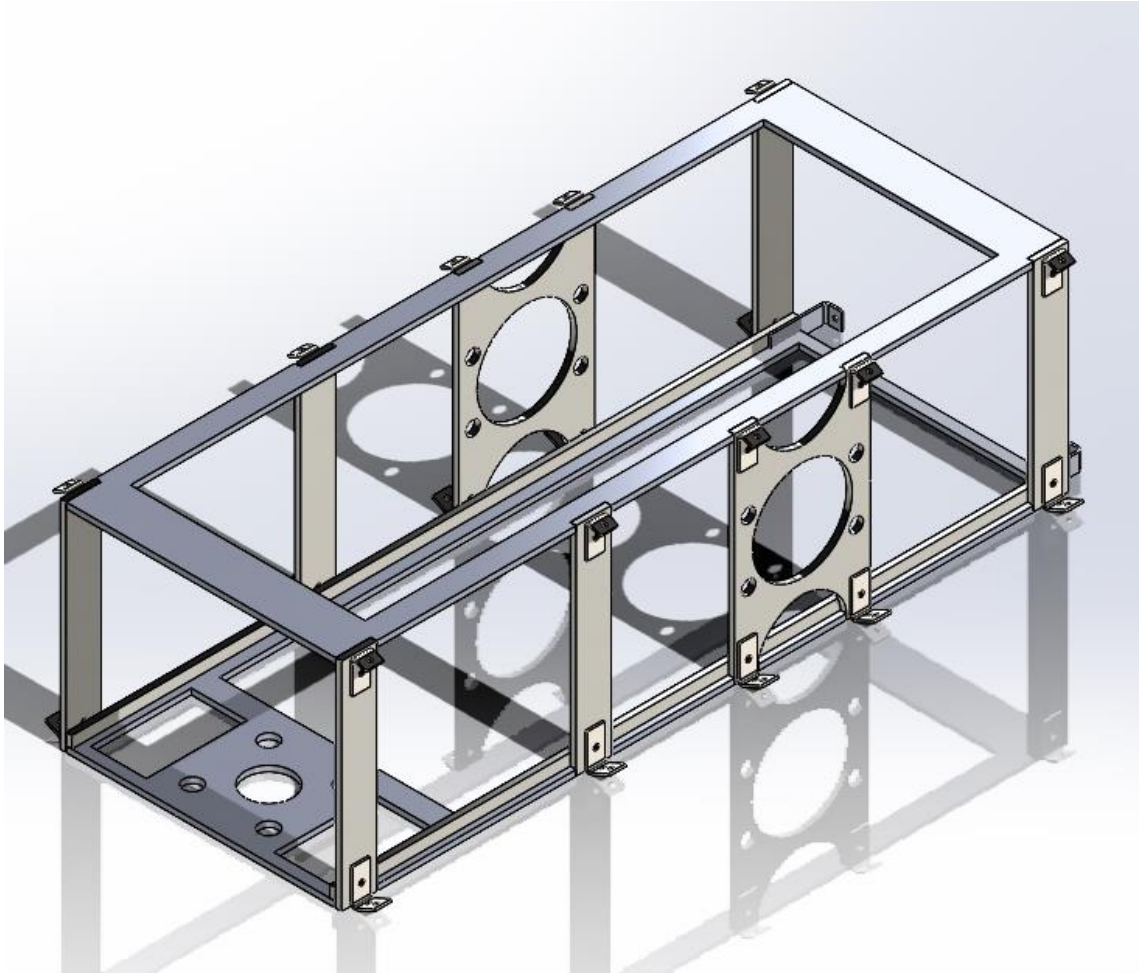
Alun perin keskimmäisen pyörän putki on suunniteltu kolmesta yhteen hitsattavasta osasta, mutta rakenne jaettiin kahteen osaan helpottamaan valmistusprosessia.

## 3.2 Runkorakenne

### 3.2.1 Ensimmäinen versio

Alkuvaiheessa on suunniteltu käytettäväksi toimittajan tarjoamia kulma- ja latta-tankoja mahdollisimman vähällä koneistuksella. Tällä periaatteella olisi tarkoitus käyttää 30 x 6 mm:n lattatankoja rungon suunnittelussa, jolloin runko kestäisi normaalikuormituksen.

Kuitenkin rungon kanteen kohdistuva voima aiheuttaa momenttia ruuviliitoksessa (eli tuennassa), johon alkuperäinen rakenne ei olisi riittävän vahva. Toisaalta koneistuksen välttämistä ei voida saavuttaa kokonaan: rungon muoto ja luotettavuuden varmistaminen edellyttävät vaikeiden muotojen ja osien kiinnittämistä toisiinsa, mikä vaatii porausta, jyrshintää tai sorvausta.



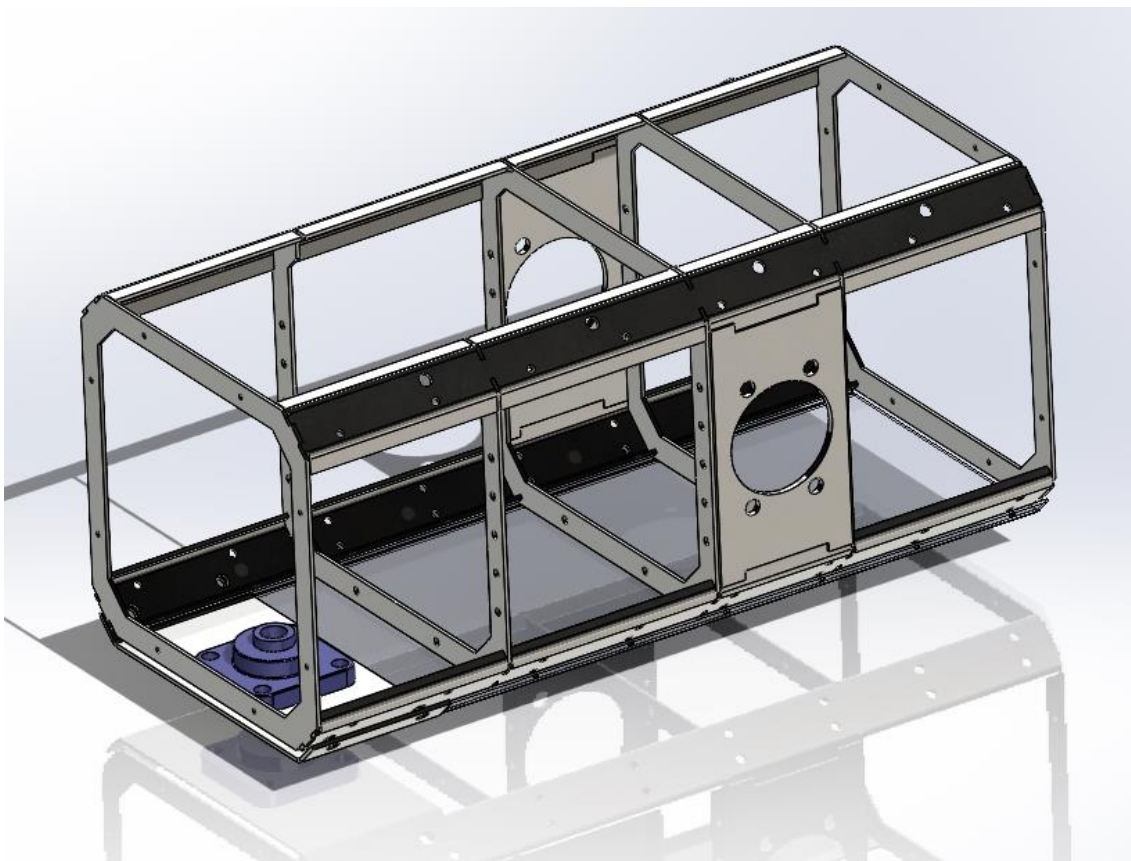
Kuva 8. Rungonrakenteen ensimmäinen versio

Kuvassa 8 näkyvä konstruktio päätettiin hylätä, ja sen sijaan käytetään taivutettuja metallilevyjä, joiden toteutukseen kuuluu levyjen laserleikkaus ja särmäys. Lujutta pyritään saavuttamaan muodon avulla, ei pelkästään materiaalin vahvuudella.

### 3.2.2 Toinen versio

3 mm:n paksuisen S355-teräksen käyttö vaatii lujuusvaran lisäämistä jäykisteillä, joiden järkevä suunnittelu keventää rakenteen massaa samalla säilyttäen saman lujuuden.

Uudessa suunnittelussa (kuva 9) hitsataan yhteen neljä C-profiilista vaakapalkkia, ja poikittain asennetaan viisi O- ja yksi U-muotoista levyä. Palkit asennetaan 45 asteen kulmassa, mikä helpottaa poikittaisten O- ja U-muotoisten levyjen hitsaamista ja suunnittelua sekä kuorilevyjen liittämistä runkoon. Tämä myös tasoittaa vaaka- ja pystysuuntaisia jäyhyysmomenteja, mikä on hyödyllistä momenttikuormituksessa.

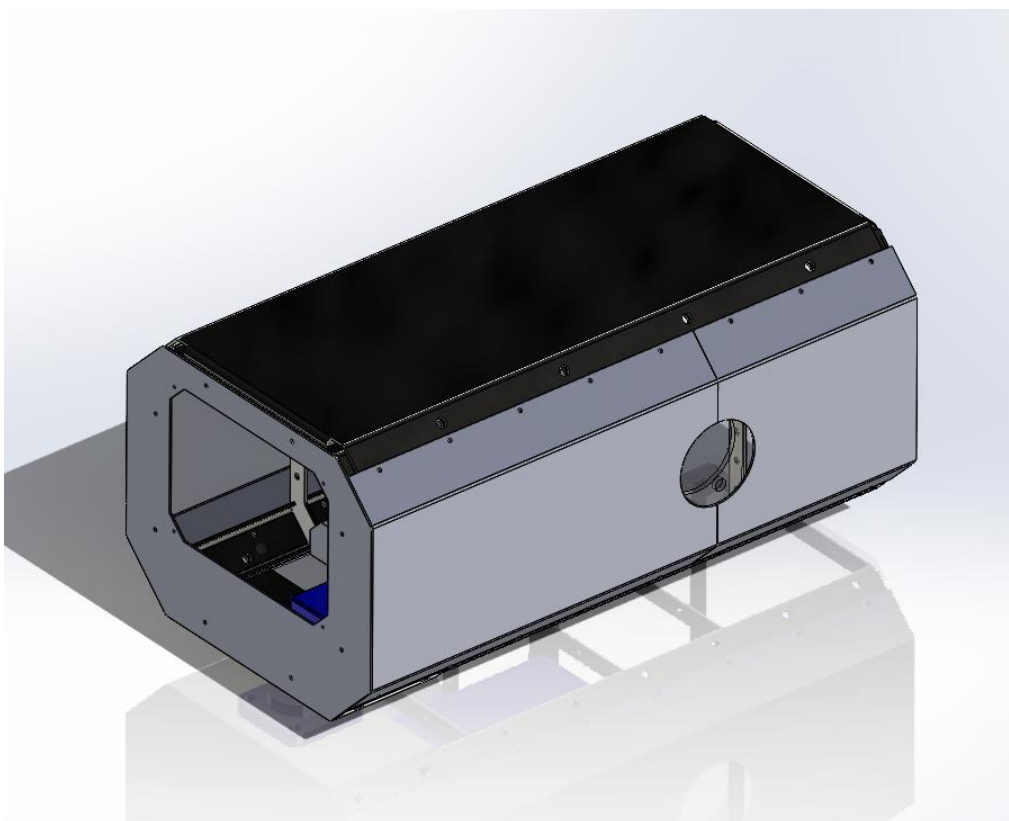


Kuva 9. Runkorakenteen toinen versio

U-muotoinen levy (kuvassa 9 vasemmalta toinen poikittainen levy) lisättiin useimpien lujuusanalysien jälkeen, kun jännityksen ja siirtymän arvot palkin pidemmässä vapaassa osassa paljastuivat liian suuriksi. U-muoto on valittu erityisesti sen tarjoaman tyhjän tilan vuoksi, johon voidaan sijoittaa sisäosia.

### 3.2.3 Kuori

Kuoriosat (kuva 10) suunnitellaan tällä kertaa tiiviimmiksi ja kokonaisemmiksi, mikä helpottaa vedenpitävyyden toteuttamista. Tavoitteen saavuttamiseksi uudessa suunnittelussa vähennetään alumiinilevyjen taivutuskertoja ja lisätään 3 mm:n etäisyys rungon ja kuoriosien väliin, johon mahtuu helposti tiivistelevy. Materiaalina käytetään terästä kevyempää 2 mm:n paksuista alumiinilevyä.



Kuva 10. Rungon kuoriosat

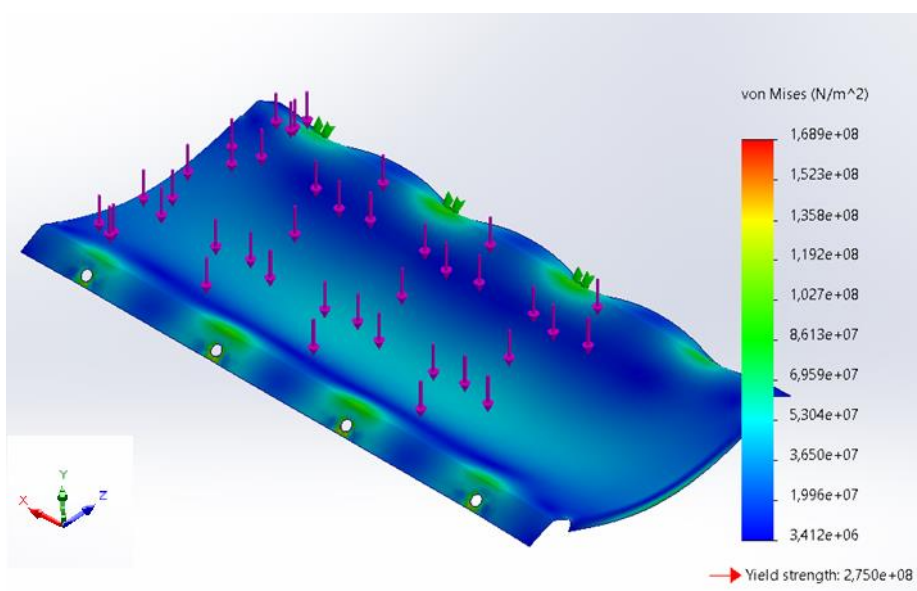
## 4 Lujuusanalyysi

Lujuusanalyysi (FEA) suoritetaan aluksi SolidWorks Simulation -ohjelmalla ennakkotarkastuksena ja lopullinen tarkastus tehdään Abaqus CAE -ohjelmalla. Analyysi on lineaarinen staattinen.

## 4.1 Runkorakenteen analyysi

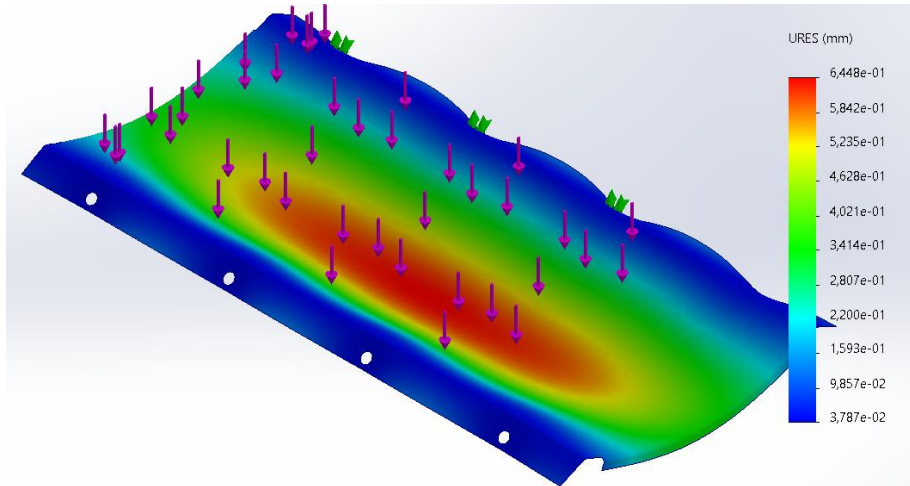
### 4.1.1 Yläkannen kuormitus

Robotin päälle pantujen tavaroiden tai muiden asetettujen robottien aiheuttama kuorma on tehtävänannon mukaan enintään 330 kg. Näin ollen kanteen kohdistuu 330 kg:n massaa, mikä vastaa 3 237,3 N painovoimaa, joka mallinnettiin tasaisena kuormana. Simulaation avulla voidaan määrittää runkorakenteeseen vaikuttavat voimat (Kuva 13), kun kannen reuna-alueen voimat ovat tiedossa. Kannen puolet kiinnitetään Y- ja Z-akselissa. Sen FE-analyysi näkyy kuvassa 11, jossa violettinuolet tarkoittavat kanteen vaikuttavaa pystyvoimaa.

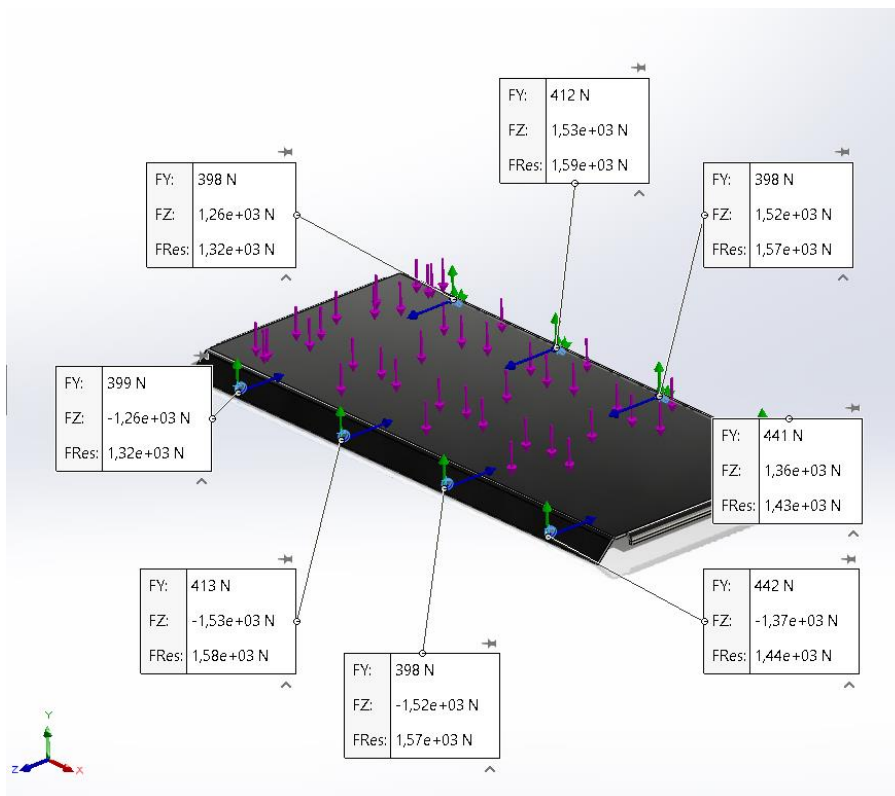


Kuva 11. Kannen FE-analyysi

Kanteen lisätyt jäykisteet vastustavat kuormitusta tehokkaasti. Niiden avulla saatiin tyydyttävät tulokset jännityksien (kuva 11) ja siirtymien (kuva 12) suhteen.



Kuva 12. Kannen siirtymät kuormituksen aikana



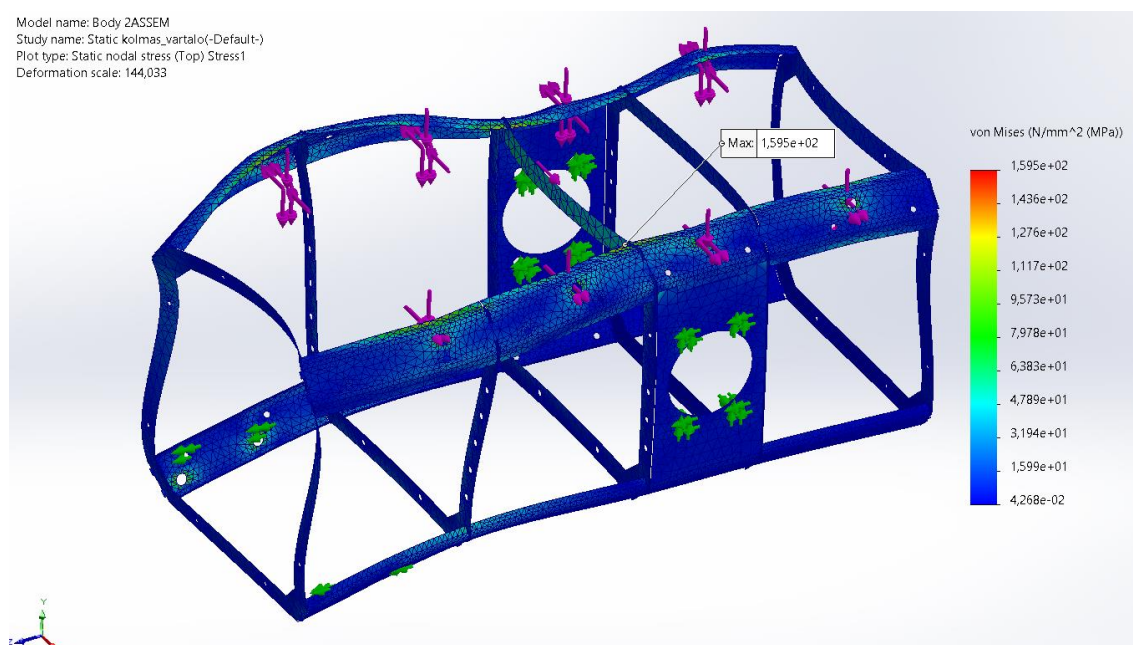
Kuva 13. Kannen reaktivoimat

Kuvassa 13 esitettyjen reaktiovoimien avulla saadaan selville runkoon kohdistuvat voimat, joiden arvot voidaan syöttää seuraavaan analyysiin.

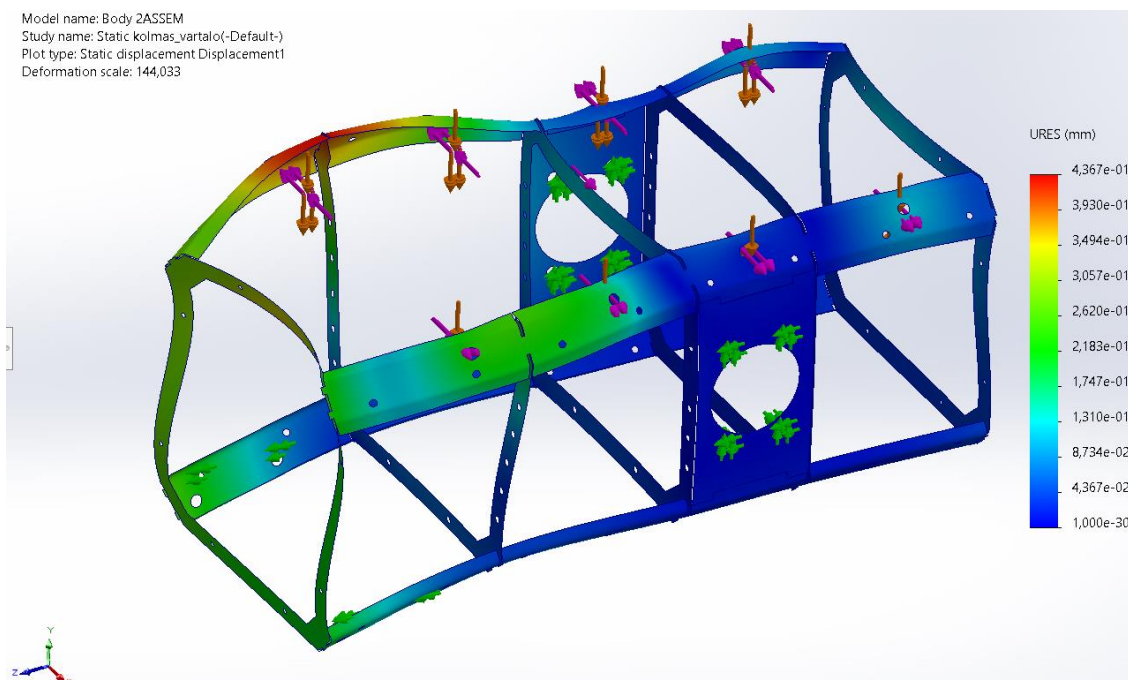
#### 4.1.2 Rungon kuormitus

Kannesta saadut kuormitukset siirretään runkorakenteeseen, sen analyysin tulokset näkyvät kuvissa 14 (jännitykset) ja 15 (siirtymät). Kuormitus kohdistuu reikiin, joihin kansi kiinnitetään. Rungon reunaehdot asetetaan laakereiden kiinnityspisteisiin, joissa liikkuminen on estetty. Kuvassa 14 ne näkyvät melkein rungon keskikohdassa ja ne on merkitty vihreillä nuolilla. Momenttireunaehtoa ei lisätä, ja toisen puolen kiinnityspisteiden ei sallita liikkua myöskään X-akselin suuntaisesti.

Rungon pohjalla on levy, johon asetetaan differentiaali. Tätä levyä ei oteta huomioon tässä analyysissä, koska se on 3 mm:n etäisyydellä rungosta. Sen sijaan reunaehto asetetaan kohtaan, johon levy on kiinnitetty (kuvassa 14 reiät vasemmalla puolella), ja se rajoittaa liikettä Z-akselin suuntaan. Maksimijännitys on 159.5 MPa ja maksimisiirtymä on 0.4367 mm.



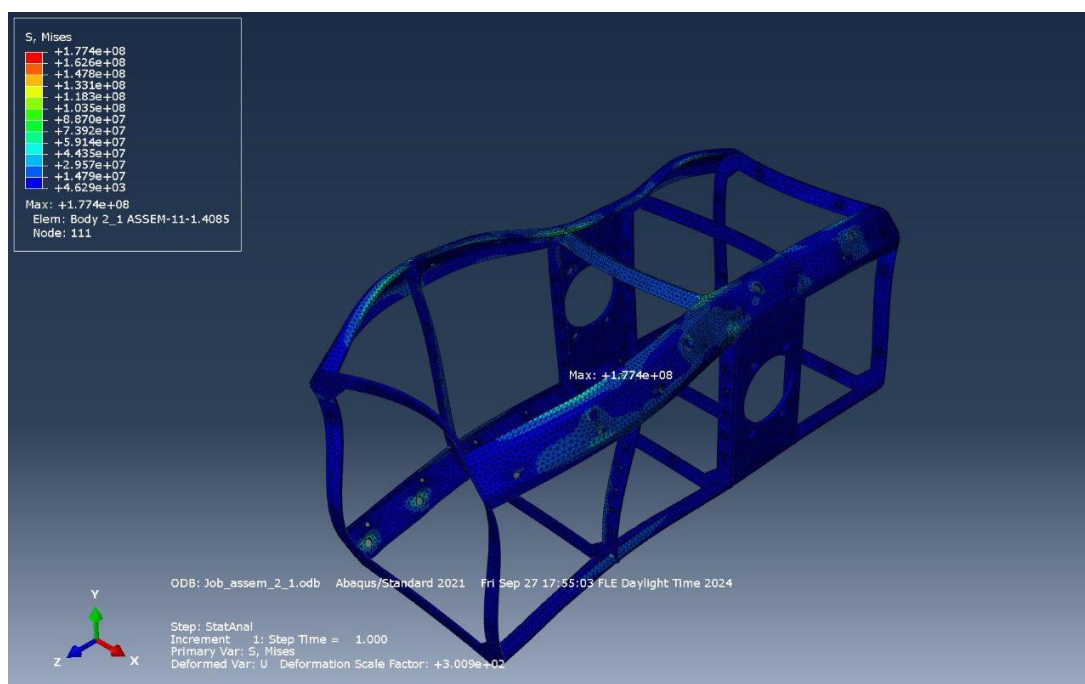
Kuva 14. Rungon FE-analyysi



Kuva 15. Rungon siirtymät

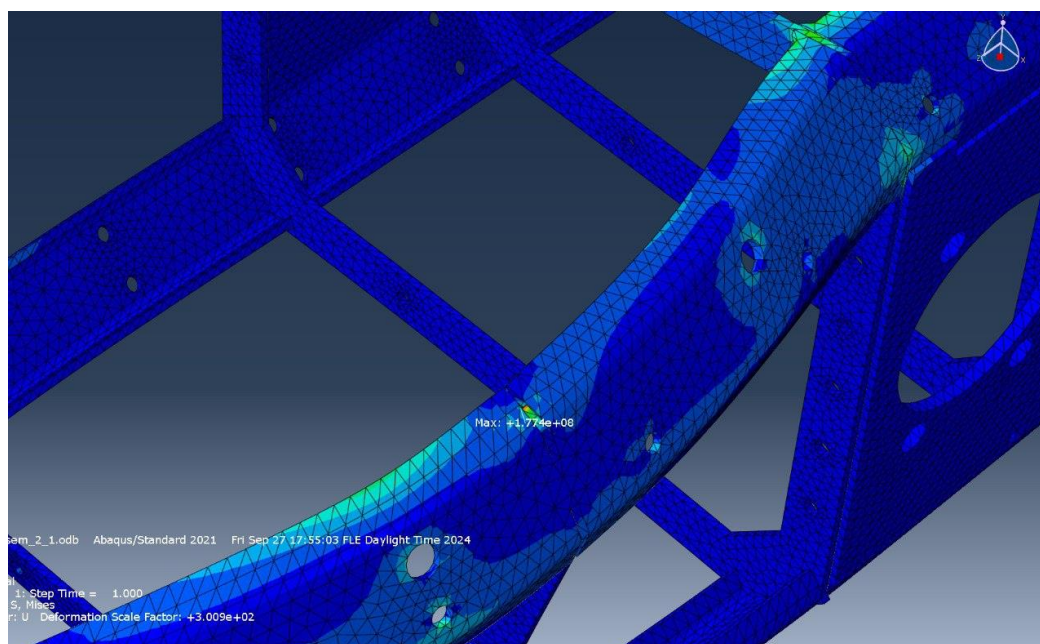
Vertailun vuoksi Abaqus-ohjelmalla suoritettu analyysi näyttää hieman suurempia jännityksiä. Kuormitukset kohdistuvat reikiin Reference Point -toiminnon avulla [2]. Jokainen Reference Point on asetettu vastaavan reiän keskelle ja liitetty reiän pintaan Coupling-asetuksella. Näin vältetään yhden elementin ylikuormitus ja kuormitus jakautuu tasaisesti koko reiän pinnalle, mikä on mahdollista myös esimerkiksi SolidWorks Simulation -ohjelmassa.

Simulointia tehtiin C3D4-elementtityypillä. Verkkoa on tehty kolmiomuotoiseksi, jotta se mahtuisi rungon monimutkaiseen muotoon. Jokaisen elementin koko on noin 5 mm. Verkko on hyvin näkyvässä kuvassa 17. Sillä saadaan kunnan luotettavat tulokset (jännitykset näkyvässä kuvassa 16 ja siirtymät kuvassa 18) ylikuormittamatta analysoivaa tietokonetta. Abaqus:n mukaan maksimijännitys on 177.4 MPa ja maksimisiirtymä on 0.211 mm.

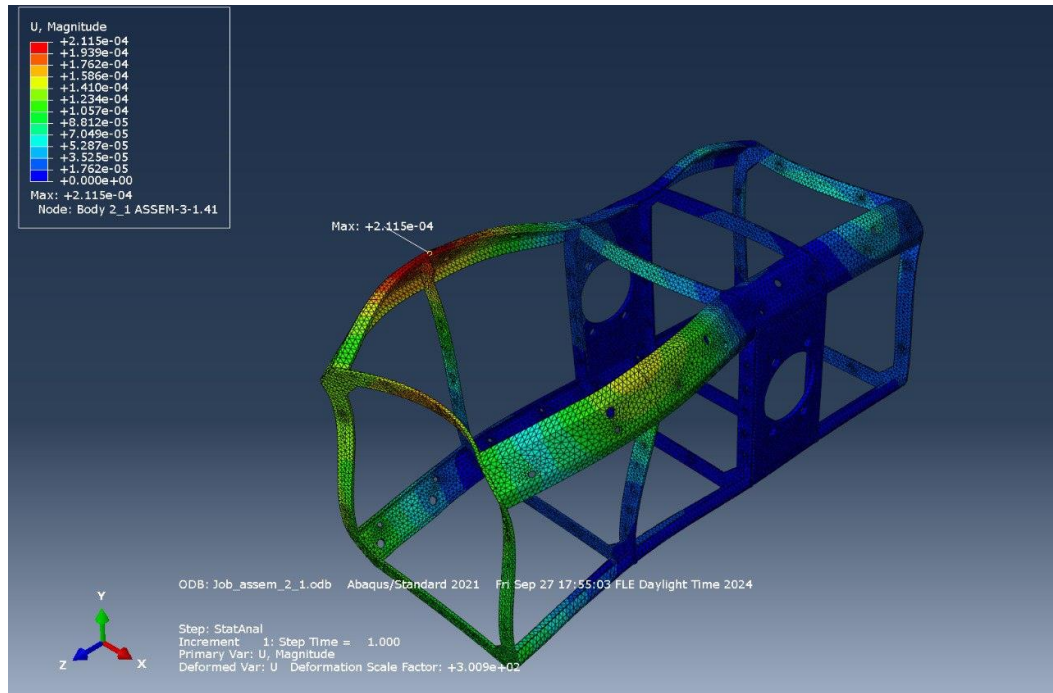


Kuva 16. Rungon analyysi Abaqus-ohjelmalla

On huomattava, että maksimijännitys, joka näkyy kuvassa 17, muodostuu rakenteen toisessa kohdassa (kun SolidWorks Simulationin mukaan tämä kohta näkyy kuvassa 14).



Kuva 17. Suurimman jännityksen paikka Abaqus-analyysin mukaan



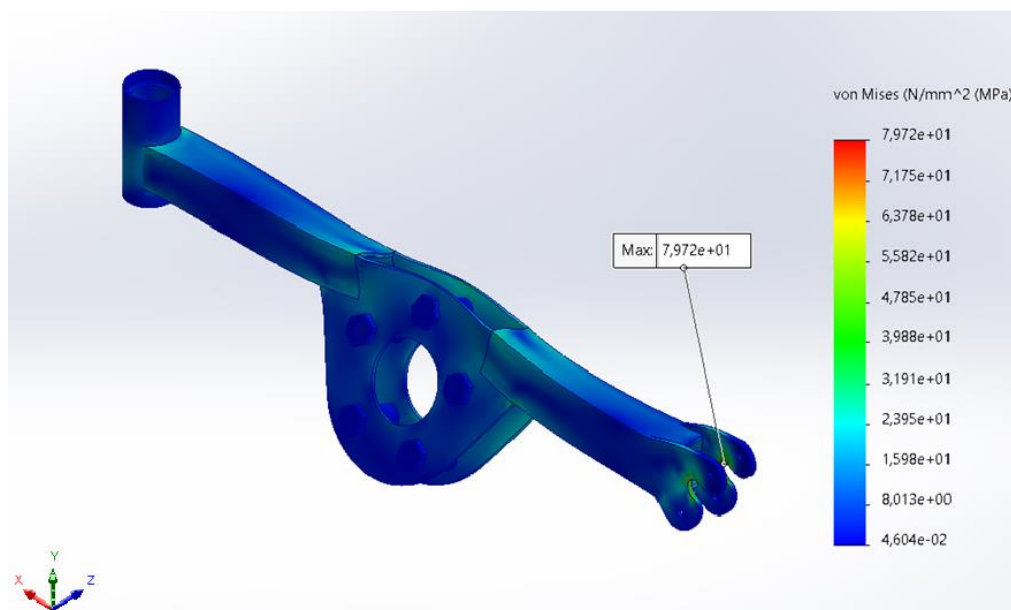
Kuva 18. Rungon siirtymät Abaqus:n mukaan

## 4.2 Rocker-bogien analyysi

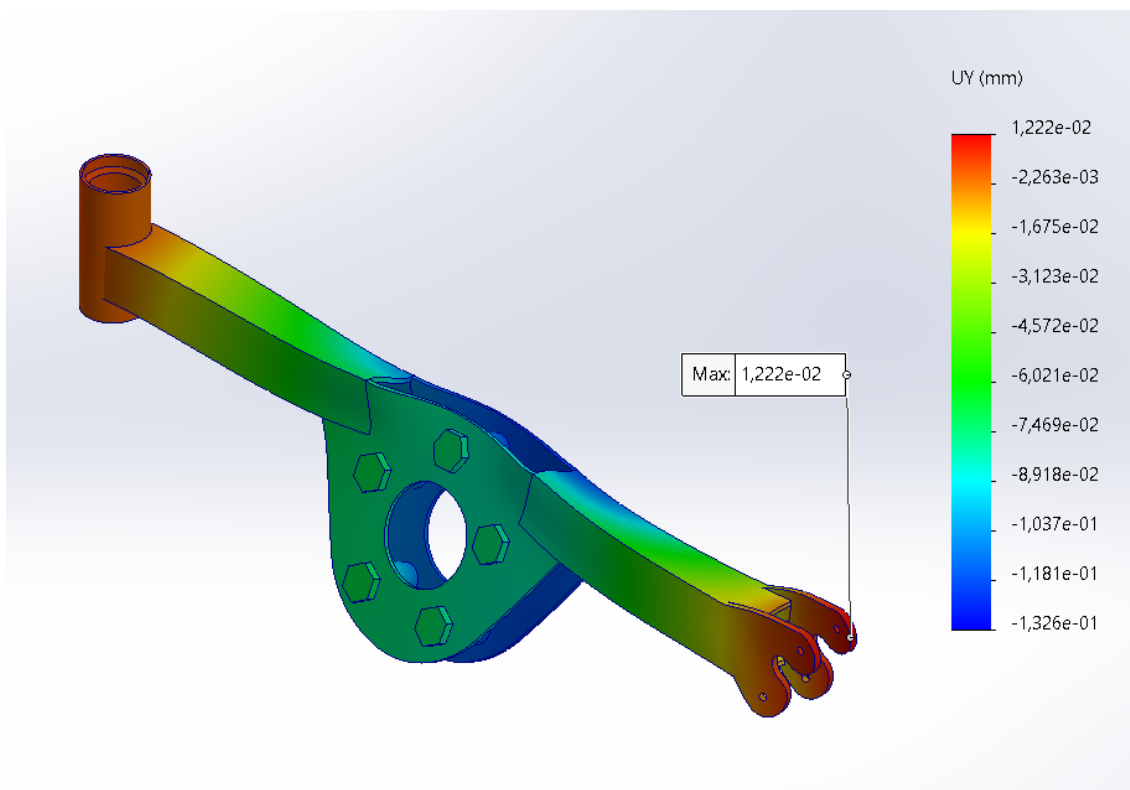
### 4.2.1 Rockerin kuormitus

Rockeria kuormitetaan ruuvien kautta. Robotin jokaiselle jalalle kohdistuu 1618 N kuormaa, joka jaetaan tasaisesti viidelle ruuville. Jalan toinen puoli kiinnitetään kokonaan ilman momenttikuormitusta, ja toinen puoli kiinnitetään siten, ettei se pysty taipumaan alas. Tulokset ovat näkyvissä kuvissa 19 (jännitykset)

ja 20 (siirtymät). Maksimijännitys on 79.72 MPa ja maksimisiirtymä on 0.0122 mm



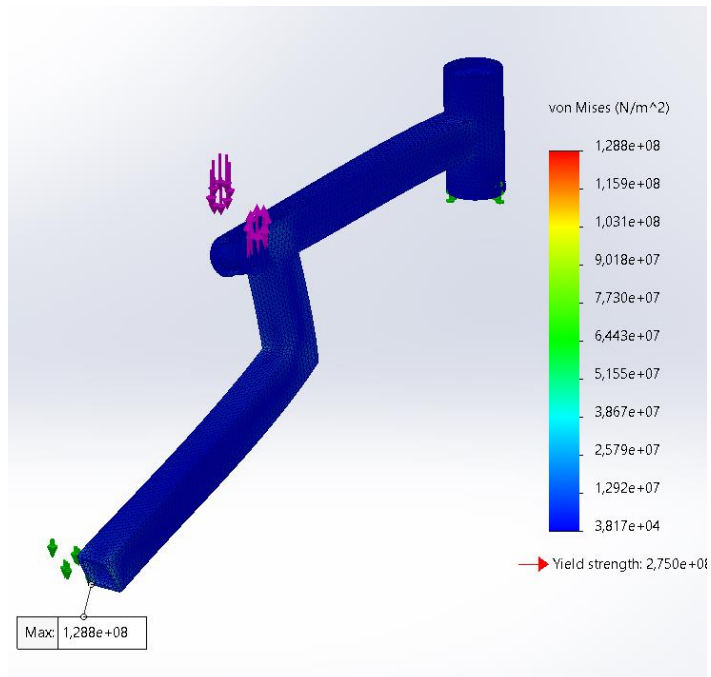
Kuva 19. Rockerin jännitykset



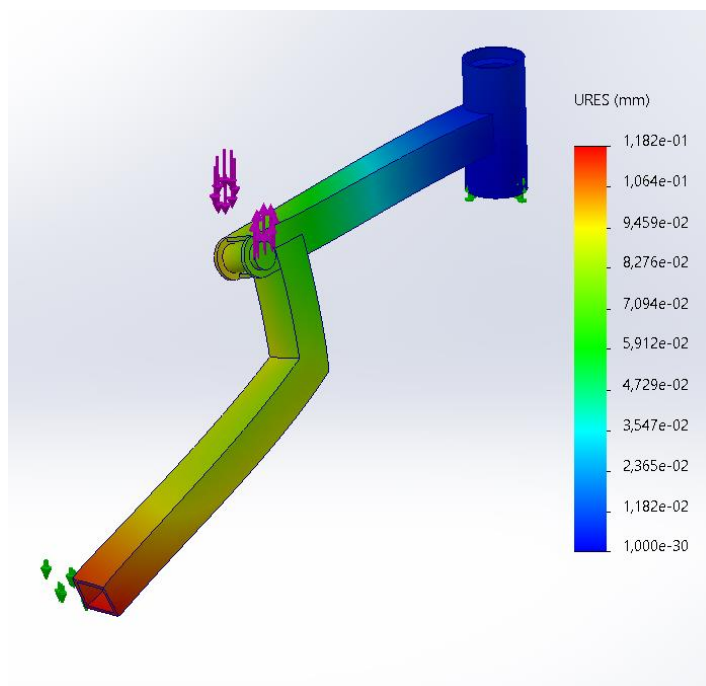
Kuva 20. Rockerin siirtymät

#### 4.2.2 Bogien kuormitus

Rockerista saadut reaktiovoimat kohdistetaan bogien akseliin, eli sen laakeriakseliin. Toisen puolen reunaehdot lukitsevat kaikki akselit ilman momenttikuormitusta, kun taas toisen puolen ei anneta taipua alas. Analyysin tulokset esitettyneen kuvissa 21 (jännitykset) ja 22 (siirtymät). Maksimijännitys on 128.8 MPa ja maksimisiirtymä on 0.118 mm.

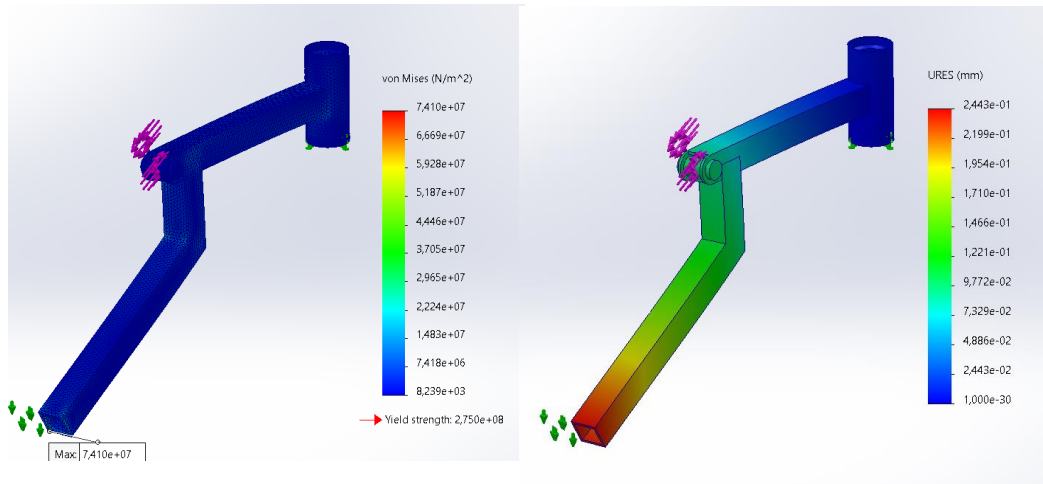


Kuva 21. Bogien rakenteen jännitykset



Kuva 22. Bogien rakenteen siirtymät

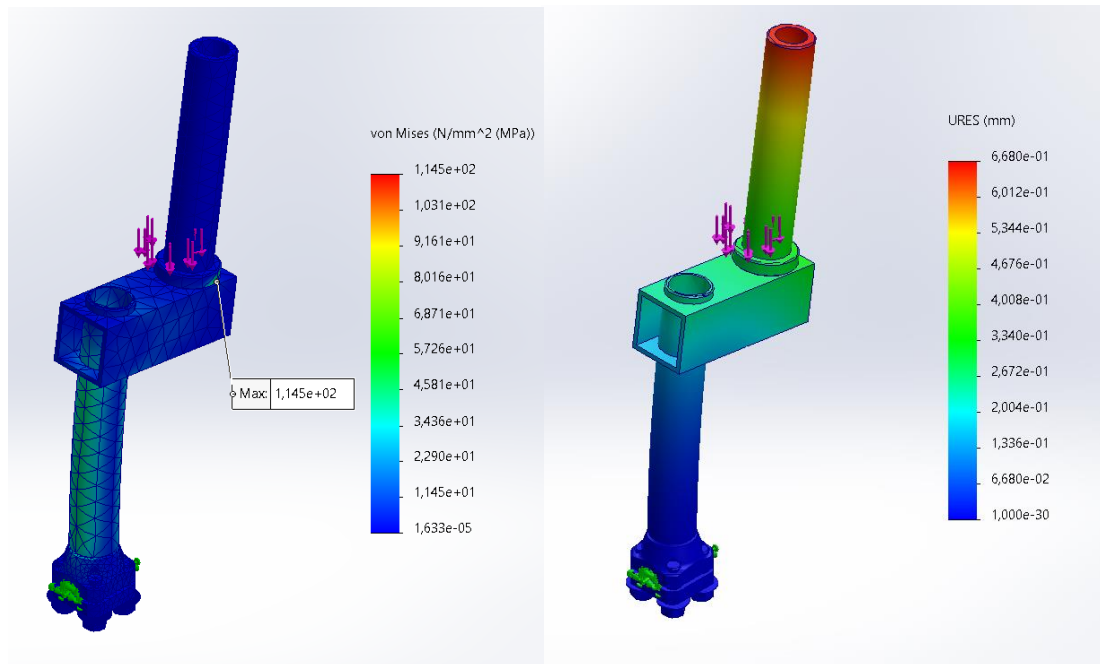
Bogie pääsee keinumaan pyörimisakselinsa ympäri, sillä sitä on analysoitu vinolla kuormituksella. Nyt kuormaa kohdistetaan samaan kohtaan, mutta suuntaa vaihtaan. Kuvassa 23 näkyy violetin väriset nuolet, jotka merkitsevät kuormituksen suuntaa. Samassa kuvassa näkyy analyysin yhtä tyydyttävät tulokset. Maksimijännitys on 74.1 MPa ja maksimisiirtymä on 0.244 mm.



Kuva 23. Bogien rakenteen jännitykset ja siirtymät vinolla kuormituksella

#### 4.2.3 Pyörivän renkaan rakenteen kuormitus

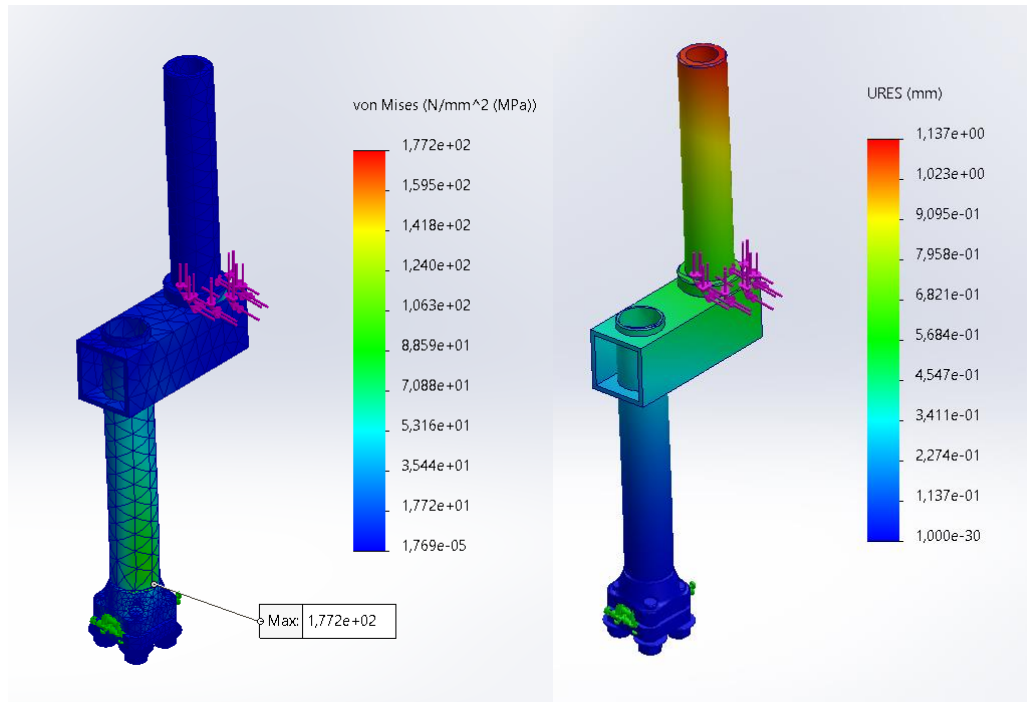
Kääntyvän renkaan rakenteeseen kohdistuva voima kulkee laakerin kautta, ja pohjalta se lukitaan kokonaan. Tämä toimii renkaan kiinnitysalustana. On huomattava, että rakenteen yläputki on lukittu myös yläpuolelta, joten kuvassa 24 näkyvään siirtymään kyseisessä kohdassa ei tarvitse kiinnittää huomiota. Maksimijännitys on 114.5 MPa ja maksimisiirtymä on noin 0.4 mm.



Kuva 24. Pyörivän renkaan rakenteen jännitykset ja siirtymät pystykuormituksella

Samalla kun bogien analyysi suoritetaan, kääntyvän renkaan rakennetta on tarkistettava eri asennoissa, kun rakenne pääsee pyörimään esimerkiksi bogien liikkeen mukaan (näky kuvassa 25). Maksimijännitys on 177.2 MPa ja maksimisiirtymä on noin 0.682 mm.

Analyysissa ei oteta huomioon pyörän kääntämisestä aiheutuvaa vääntömomenttia tai sen seurauksena syntyvää lisäkuormitusta. Tämä johtuu siitä, että rakenne on suunniteltu siten, että pyörän kääntymisakseli on sijoitettu tarkasti yläputkien keskelle, jolloin akseli ja yläputket ovat samalla linjalla. Tällä ratkaisulla kääntymisestä aiheutuvat kuormitukset pienenevät merkittävästi, ja niitä rajoittaa pääasiassa pyörän ja maan välinen kitkavoima. Koska robotti voi liikua monenlaisilla alustoilla, kitkakertoimen tarkkaa määrittämistä on haastavaa toteuttaa. Mahdolliset lisäkuormitukset otetaan huomioon varmuuskertoimen avulla. Lisäsuosituksena voidaan käyttää paksumpia putkia kuormituksen kestävyden lisäämiseksi.



Kuva 25. Pyörivän renkaan rakenteen jännitykset ja siirtymät 45 asteen kuorimituksella

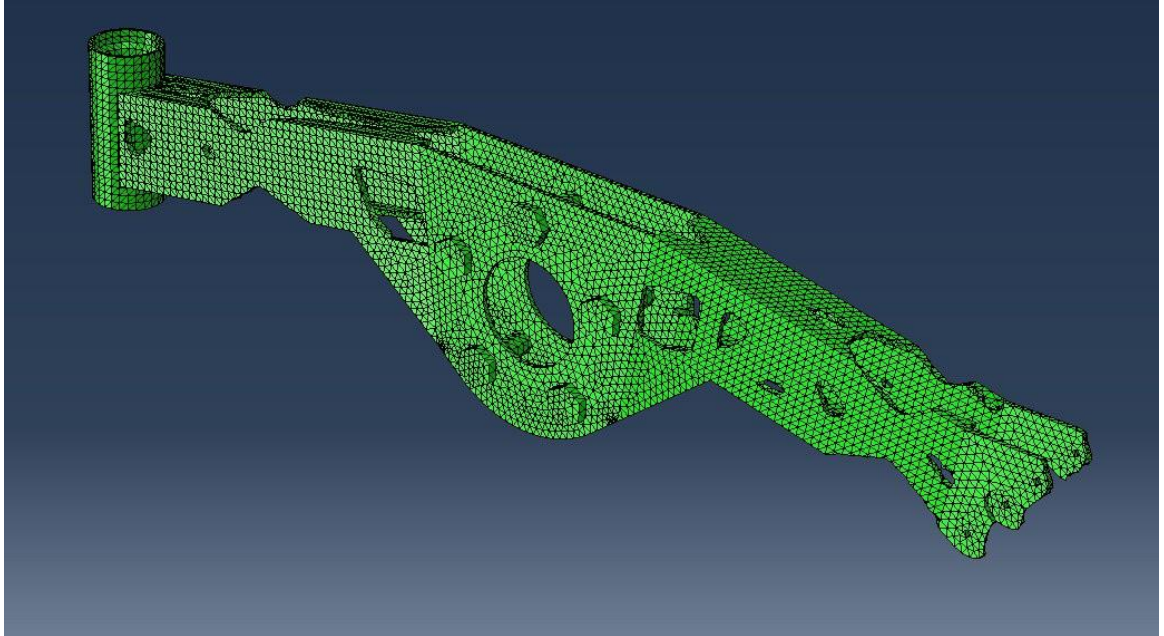
#### 4.2.4 Topologinen optimointi

Topologinen optimointi on tarkoitettu tehdä rockerin rakenteella, kun sillä on eniten materiaalia. Runkorakennetta, esimerkiksi, ei tarkisteta, koska mahdollinen poistettava materiaali on vaakarungoissa, jossa vedensuojauksen vuoksi ei ole poistettavaa materiaalia.

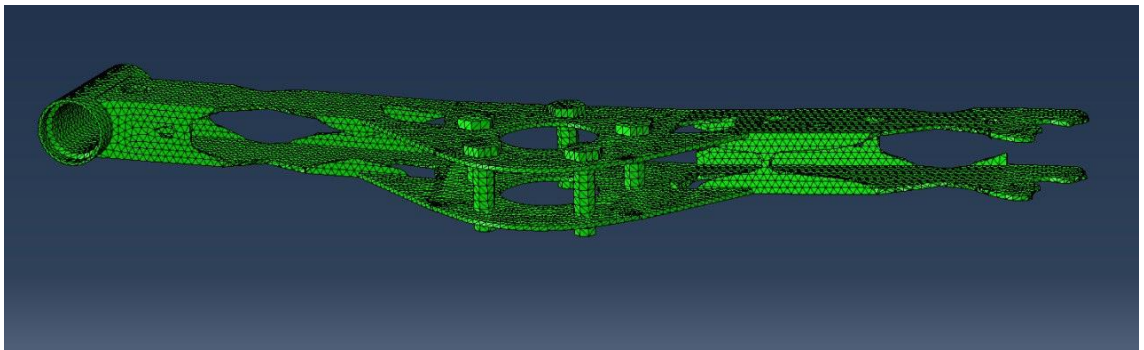
Optimointi suoritetaan Abaqus CAE -ohjelmalla. Tavoitteena on vähentää rakenteen tilavuutta 40 %, jotta massaa saadaan pienennettyä säilyttäen kuitenkin rakenteen kimmoenergian alkuperäisen taso. Optimoinnissa keskitytään ainoastaan etu- ja takaputkien optimointiin. Iterointikierrosten lukumääräksi on asetettu 80.

Kuvissa 26 ja 27 näkyvät optimoinnin tulokset.

Kuvan 27 mukaan eniten poistettavaa materiaalia on, ilmeisesti, putkien ala- ja yläpinnalta. Optimoinnin tulokset jaetaan mekaniikka- ja sähkötiimille jatkokäsittelyä varten. Tässä työssä niitä ei huomioida esim. koneistuksen simuloinnissa.



Kuva 26. Topologinen optimointi rockerin rakenteessa, isometrinen projektio



Kuva 27. Rockerin rakenteen topologinen optimointi, pohjaprojektio

#### 4.3 Tuloksien arviointi

Kaikki analyysit osoittavat tyydyttäviä tuloksia: jännitykset eivät ylitä materiaalin myötörajaa. Varmuusluku on noin 2.

## 5 Valmistus

### 5.1 Laserleikkaus

Käytettävät metallilevyosat leikataan koulun laboratorion laserleikkaukoneella. Koneen 30 kW:n teho ja laboratorion projekti-insinöörin kokemus takaavat tarvittavien 2, 3 ja 5 mm:n paksuisten levyjen tarkan ja virheettömän leikkauksen.

Valmistukseen tarvitaan dxf-tiedostot leikattavista osista.

### 5.2 Runkorakenteen ja kuoren metallilevyjen särmäys

Särmäys suoritetaan koulun laboratorion koneella. Terässärmäykselle on olemassa saksalainen standardi DIN 6935, jossa on lueteltu suositellut särmäyssäteet eri paksuuksille [4]. Sen mukaan 3 mm:n paksuuden taivutuksessa tulisi käyttää joko 3 mm:n tai 5 mm:n säteen työkalua. Koulun laboratorio kuitenkin esittää omat suosituksensa, joiden mukaan 3 mm:n paksuista S355-teräslevyä särmätään 4,08 mm:n säteellä [5]. Valitun työkalun mukaan särmättävän reunan pituus on ainakin 15 mm.

## 6 Koneistus

Koneistettavat osat valmistetaan HAAS-koneella. Osien koneistusta simuloidaan NX-ohjelmalla, josta saadaan koneelle sopiva N-koodi. Simuloinnissa otetaan huomioon koulun laboratoriossa käytettävät jyrsimet, porat ja sorvit. Työkalujen työstöarvot löytyvät joko koulun työkaluluettelosta tai valmistajan verkkosivuilta. Mikäli työkalun mallinumero on tuntematon, työstöarvot saadaan kaavoilla [6]:

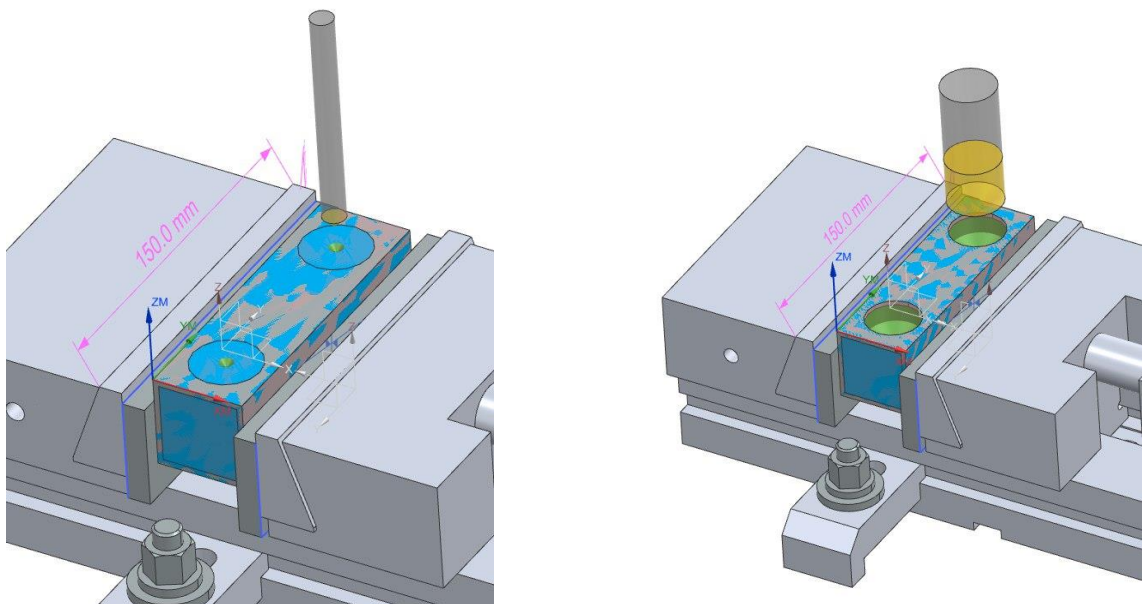
$$v_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000}$$

$$Q = v_c \times a_p \times f_n$$

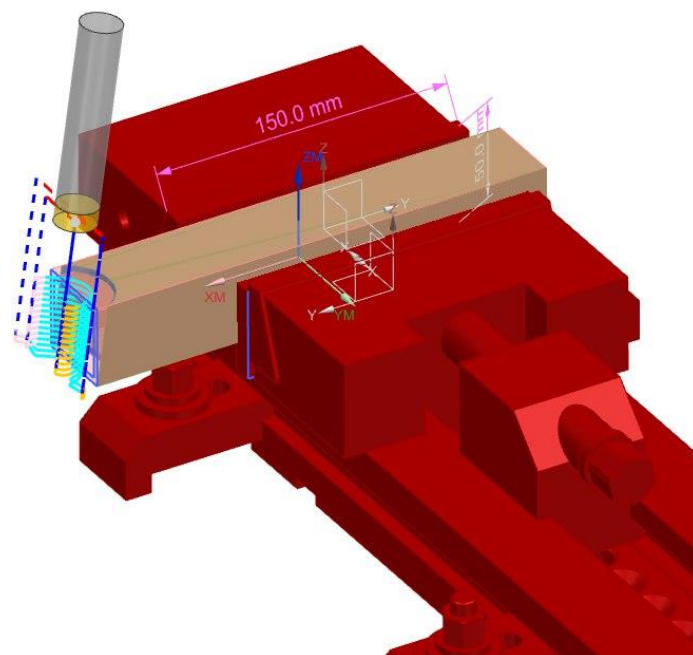
jossa:

$v_c$  on lastuamisnopeus, m/min  
 $D$  on terän halkaisija, mm  
 $n$  on karanopeus, kierrosta/min  
 $Q$  on lastuvirta,  $\text{cm}^3/\text{min}$   
 $a_p$  on lastuamissyvyys, mm  
 $f_n$  on syöttö, mm/kierros

Osien koneistuksessa käytetään porausta ja jyrshintää. Näin ollen, kuvassa 28 on esitetty pyörivän renkaan rakenteen porausta. Kaikki osat kiinnitetään samalla kiinnittimellä.

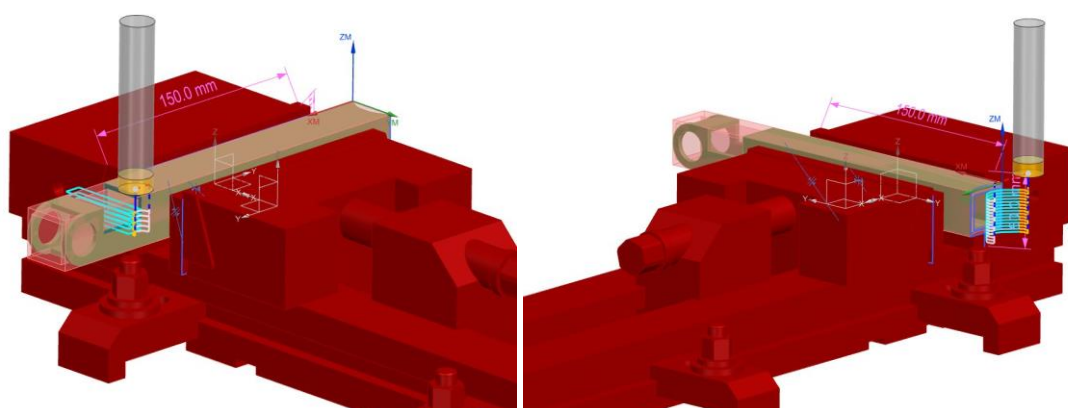


Kuva 28. 30 x 30 x 3 mm putken koneistus, käytössä pyörivän renkaan rakenteessa



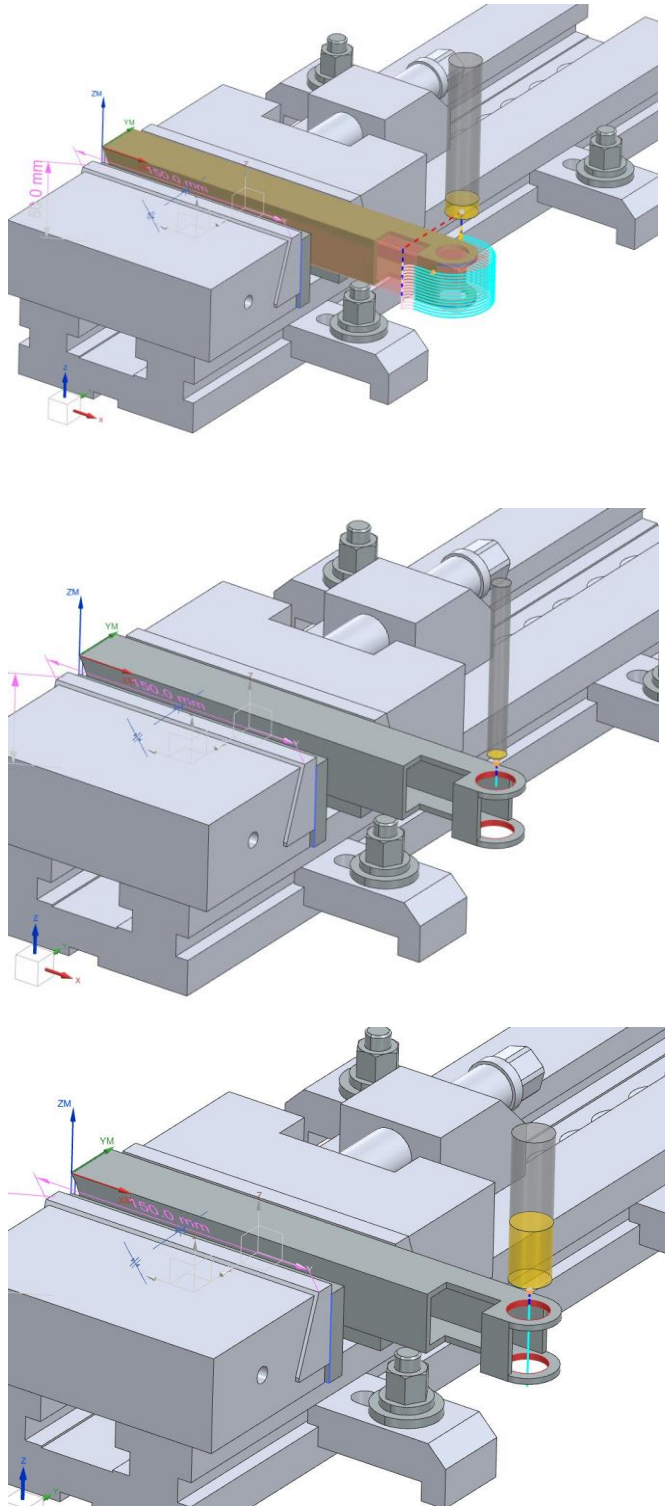
Kuva 29. 40 x 40 x 3 mm putken koneistus, käytössä rockerin rakenteessa

Kuvassa 29 rockerin osaa jyrsitään terän 8 asteen kulmassa.

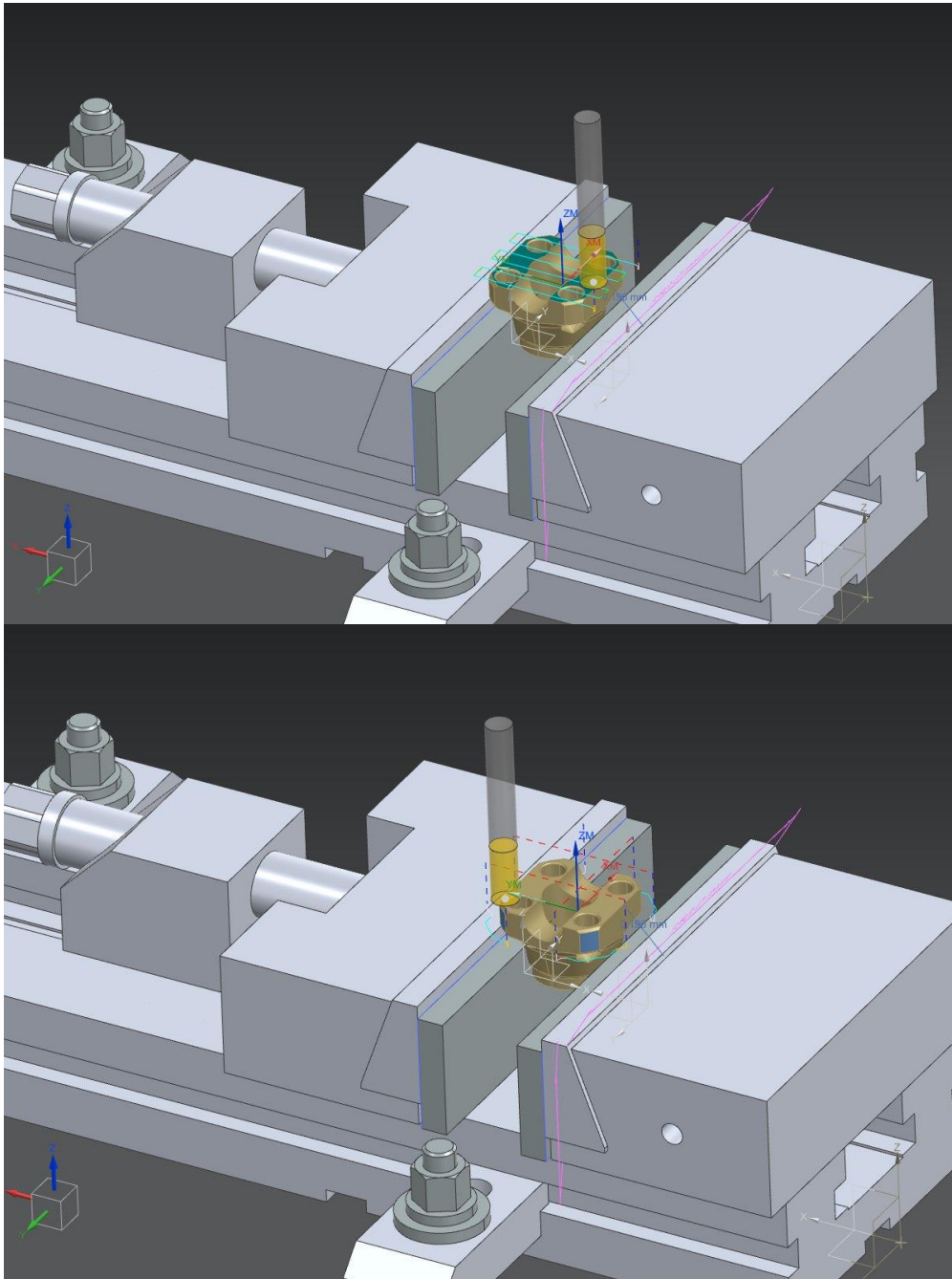


Kuva 30. Bogien takaputken koneistus. Vaihe 1

Bogien takaputkea koneistetaan kahdessa vaiheessa (kuva 30 ja 31). Kuvassa 30 vaiheena 1 on esitetty jyrsintä. Kuvassa 31 vaiheena 2 on esitetty jyrsintä ja poraus.

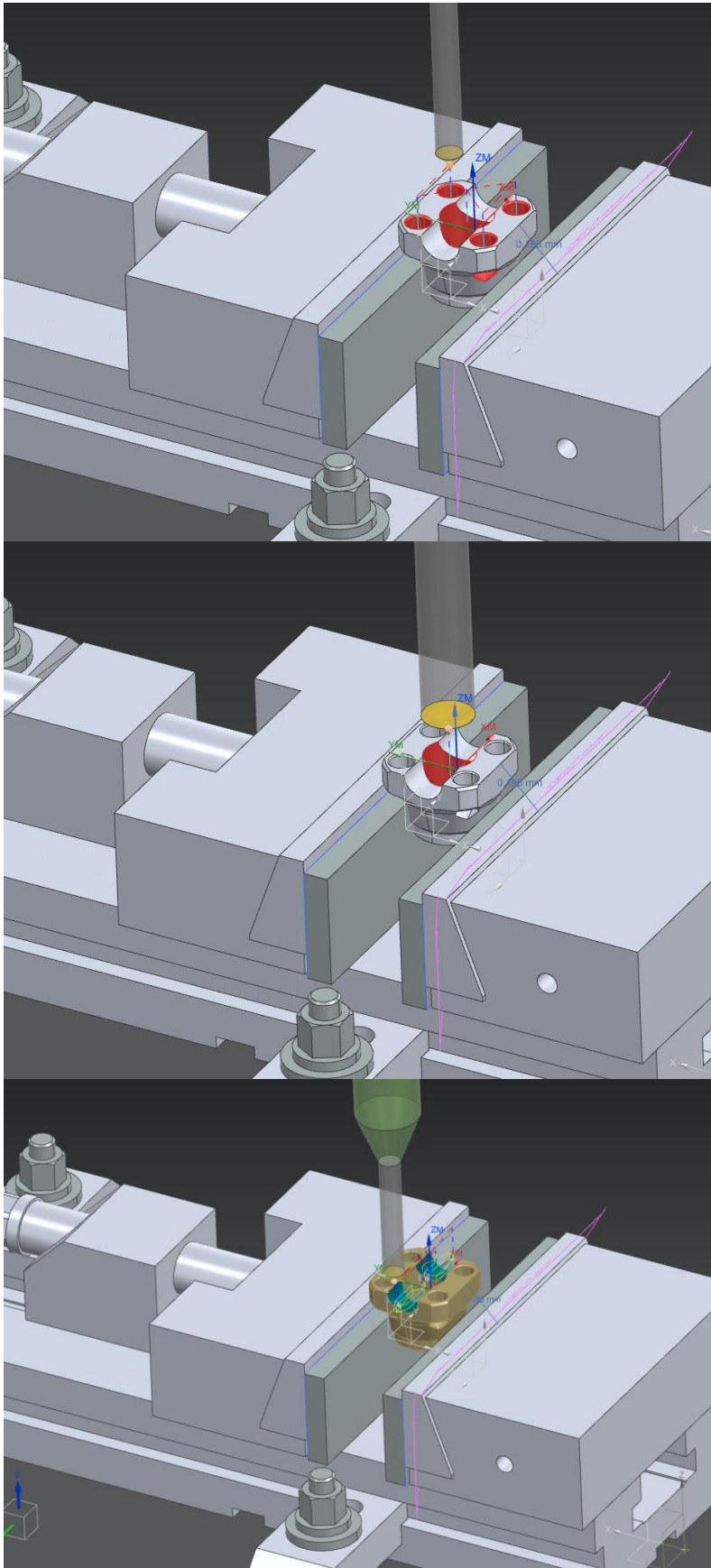


Kuva 31. Bogien takaputken koneistus. Vaihe 2



Kuva 32. Pyörän kiinnike. Sorvaus

Haastavinta koneistuksessa on kuvissa 32 ja 33 esitetty pyörän kiinnike. Käytössä on sorvaus ja jyrshintä (kuva 32), sekä poraus ja pallopääjyrshintä (kuva 33).



Kuva 33. Pyörän kiinnike. Poraus

## 7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön asettamat tavoitteet on saavutettu ja kaikkia vaatimuksia noudatettiin suunnittelun ja analyysin osalta. Työssä esitetty mekaaninen suunnittelu siirretään valmistus- ja sähkötiimille jatkotyöstöä ja heidän omien tavoitteidensa toteuttamista varten. Suunnitteluprosessi on huomioinut sekä käytännön valmistuksen että sähköjärjestelmien tarpeet, mikä mahdollistaa projektin sujuvan etenemisen kokonaisuudessaan.

Eryteisesti robotin rakenteen parannukset, kuten kestävämpi runko ja optimoitu kääntymismekaniikka, antavat vahvan pohjan tuleville kokoonpano- ja testausvaiheille. FEM-analyysien avulla varmistettiin, että valitut materiaalit ja ratkaisut täyttävät suunnittelulle asetetut lujuus- ja kestovaatimukset. Tämän työn myötä saavutetut tulokset luovat hyvät edellytykset robotin onnistuneelle valmistukselle ja käytännön soveltamiselle, esimerkiksi kilpailutilanteissa tai muissa vaativissa olosuhteissa.

Tämä on kuitenkin vain prototyyppi. RoboGaragen tiimi voi arvioida jatkokehityksen tarpeellisuutta, sillä erilaiset kilpailutavoitteet asettavat erilaisia vaatimuksia. Esimerkiksi rungon korkeutta voidaan pienentää, jos sähkötiimin valitsemien komponenttien määrä sallii sen ja rungossa on ylimääräistä tilaa. Rockerbogien rakenteeseen voisi myös lisätä onteloita, jotka helpottavat sähkökaapeliin sijoittelua. Topologinen optimointi tarjoaa suuntaviivoja onteloiden koneistukseen. On mahdollista käyttää laserleikatuista osista hitsattua rakennetta, jos korkealaatuinen hitsaus on toteutettavissa.

## Lähteet

1. Perseverance Rover Components. Verkkoaineisto <<https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/rover-components/>>. Luettu 02.05.2024
2. SFS-EN 10219-1: Kylmämuovattut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 1: Tekniset toimintusehdot.
3. Abaqus Version 6.5 Documentation. Verkkoaineisto. <<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/>>. Luettu 30.06.2024
4. DIN 6935 Bieblatt 1-2011: Cold Bending of flat rolled steel.
5. Särmäys. Joel Kontturi. Diaesitys
6. Airila, Mauri; Ekman, Kalevi; Hautala, Pekka; Kivioja, Seppo; Kleimola, Matti; Martikka, Heikki; Miettinen, Juha; Niemi, Erkki; Ranta, Aarno; Rininen, Jari; Salonen, Pekka; Verho, Arto; Vilenius, Matti & Välimaa, Veikko. 2010. Koneenosien suunnittelu. WSOYpro Oy