



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Joonas Hoffrén

# Olka-akselin uudelleensuunnittelu eri valmistusmenetelmää varten

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

2.2.2021

Tekijä Otsikko	Joonas Hoffrén Olka-akselin uudelleensuunnittelu eri valmistusmenetelmää varten
Sivumäärä Aika	34 sivua + 1 liite 2.2.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella uudelleen henkilöajoneuvon erillistetun taka-akselin olka-akseli hyödyntäen kohdeajoneuvon alkuperäisen komponentin takaisinmallinnusta. Komponentin suunnittelun lisäksi tässä insinööriyössä tarkastellaan komponentin toiminnallisuuden ja takaisinmallinnuksen teoriaa.</p> <p>Uuden komponentin suunnittelun apuna käytettiin alkuperäisen komponentin takaisinmallinnusta. Takaisinmallinnuksen tärkeimpänä työkaluna käytettiin 3D-skannausta, joka suoritettiin strukturoituun valoon perustuvalla 3D-skannerilla. Takaisinmallintamalla alkuperäinen komponentti saatiin tehokkaasti selvitettyä uuden komponentin suunnittelussa tarvittavat osien kolmiulotteiset sijainnit ja etäisyydet. Uusi ja alkuperäinen komponentti mallinnettiin tietokoneavusteisella mekaniikkasuunnitteluohjelmistolla.</p> <p>Komponentin monimutkaisen muodon johdosta päädyttiin suunnittelemaan komponentti valmistettavaksi kokoonpanona, jonka osat valmistetaan osittain levytyönä ja koneistamalla. Komponentin osissa käytettävien materiaalien paksuus arvioitiin alustavien laskelmien perusteella.</p> <p>Suunnittelun apuna ja lopullisen komponentin kestävyuden todentamiseksi käytettiin apuna elementtimenetelmään perustuvaa tietokoneavusteista lujuuslaskentaa. Alkuperäisen ja uudelleen suunnitellun komponentin ominaisuuksia vertailtiin lujuuslaskentojen tulosten perusteella.</p> <p>Työn tuloksena syntyi olka-akselikokoonpano, joka täyttää komponentin ominaisuuksilta vaaditut kriteerit. Olka-akseli kokoonpanon osien kolmiulotteisten mallien perusteella olisi mahdollista tehdä työkuvat osien valmistamista varten.</p>	
Avainsanat	Uudelleensuunnittelu, 3D-skannaus, olka-akseli, CAD

Author Title	Joonas Hoffrén Redesigning Passenger Car Suspension Upright for a Different Manufacturing Process
Number of Pages Date	34 pages + 1 appendix 2 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Vehicle Design Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to redesign a passenger car suspension upright for a different manufacturing process. The redesigned component had to keep the same properties within suspension kinematics, and the strength had to be in line with the original component. In addition to designing the suspension upright this Bachelor's thesis examines the theory behind the functionality of the component, reverse engineering and discusses the methods that were part of the engineering and designing process.</p> <p>The use of 3D scanning was an invaluable asset for reverse engineering the part. 3D scanning of the original suspension upright was carried out by using structured-light 3D scanning technology. Precise dimensions required to 3D model the new suspension upright was effectively obtained by first reverse engineering the original suspension upright.</p> <p>The manufacturing process was determined based on the complex shape of the component the component had to be manufactured as an assembly. The assembly was decided to be fabricated with a mixture of CNC machined and bended sheet metal parts. The important three-dimensional locations and features that were kept from the original component largely defined the rough shape of the new component.</p> <p>3D models of the redesigned and the original suspension upright were created using a CAD program. The new component was compared to the original with the data acquired from the FEM analysis of both models.</p> <p>The end result was a redesigned suspension upright model that met the criteria set for it. Production drawings for manufacturing and fabrication could have been drawn based on the 3D models of the assembly parts of the component, however fabrication of the component was excluded from this Bachelor's thesis.</p>	
Keywords	Redesign, 3D scanning, upright, CAD

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn rajaukset	1
1.2	Menetelmät	1
2	Teoriaa suunnittelun tueksi	2
2.1	Takaisinmallinnus	2
2.2	Strukturoituun valoon perustuva 3D-skannaus	2
2.3	Rangevision Spectrum	9
2.4	FEM	10
2.5	Solidworks	14
2.6	Erillistuettu pyöräntuenta	15
3	Lähtötiedot	17
4	Toteutus	19
4.1	Alkuperäisen olka-akselin mallintaminen	19
4.1.1	Alkuperäisen olka-akselin 3D-skannaus	19
4.1.2	Alkuperäisen olka-akselin kolmiulotteinen mallintaminen	21
4.2	Uudelleensuunnittelu eri valmistusmenetelmää varten	22
4.2.1	Uudelle olka-akselille valittu valmistusmenetelmä	22
4.2.2	Olka-akselin rakenne ja kolmiulotteinen mallintaminen	23
4.2.3	Materiaalin valinta	26
5	Tulokset	26
5.1	Voimien tarkastelu	26
5.2	Lujuuslaskennassa käytetyt voimat	27
5.3	Ominaisuuksien vertailu	30
	Lähteet	34
	Liitteet	
	Liite 1. Pyöräntuentaan vaikuttavat sivuttaisvoimat	

## Lyhenteet

FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
3D	Three-dimensional space, kolmiulotteinen
MIT	Massachusetts Institute of Technology
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CNC	Computer Numerical Control, numeerinen ohjaus

## 1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään jo olemassa olevan tuotteen uudelleensuunnitteluun 3D-skannauksen ja takaisinmallinnuksen avulla. Insinööriyössä suunnitellaan uudelleen vuosimallin 1993 Nissan Silvia -henkilöauton takapyöräntuennan olka-akseli (engl. upright) eri valmistusmenetelmää varten.

Tavoitteena oli suunnitella olka-akseli, jolla olisi samat alustageometriset ja kinemaattiset ominaisuudet. Lujuuslaskennoissa uuden olka-akselin täytyy kestää vähintäänkin samansuuruinen kuormitustila kuin alkuperäisen olka-akselin. Olka-akseli tuli kuitenkin suunnitella niin, että se on mahdollista ja kustannustehokasta valmistaa itse. Lisätavoitteena oli saada uudesta olka-akselista kevyempi kuin alkuperäinen.

### 1.1 Työn rajaukset

Insinööriyö rajataan uuden olka-akselin suunnitteluun, tarvittavaan teoriaosuuteen sekä vanhan ja uuden olka-akselin ominaisuuksien vertailuun. Uuden olka-akselin valmistus jätetään insinööriyön ulkopuolelle. Tavoitteena on luoda 3D-mallit vanhasta ja uudesta olka-akselista sekä suorittaa niille FEM-lujuuslaskennat.

Työhön sisältyy suunnittelun eri vaiheita, tarvittavan teoriaosuuden laatiminen sekä lopputuloksen arviointi. Suunnittelun kannalta työn aikana oli tärkeä myös tutustua valittavaan valmistusmenetelmään ja materiaalin ominaisuuksiin.

### 1.2 Menetelmät

Tässä insinööriyössä käytettiin pääasiallisena suunnittelutyökaluna Solidworks-mekaniikkasuunnitteluohjelmistoa. Mekaniikkasuunnitteluohjelmiston valintaan vaikuttivat ensisijaisesti insinööriyön aiheen kannalta tärkeät ja kattavat työkalut sekä se, että Solidworksia käytettiin jo opintojen aikana paljon, jolloin ohjelmiston käyttöä ei tarvinnut opella täysin alusta alkaen. Insinööriyön aikana päästiin kuitenkin tutustumaan uusiin mekaniikkasuunnitteluohjelmiston lisäosiin, joita ei vielä opintojen aikana ollut kokeiltu.

Alkuperäisen olka-akselin takaisinmallinnusta varten käytettiin strukturoituun valoon perustuvaa 3D-skannausmenetelmää. 3D-skannauksen suoritti AN-Cadsolutions-yritys Rangevision Spectrum -3D-skanneria käyttäen.

Uudelleensuunnittelua sekä uuden ja vanhan osan ominaisuuksien vertailua varten oli selvitettävä, minkälaisia kuormituksia olka-akselin tulee kestää. Olka-akseliin kohdistuvat kuormitukset selvitetään lujuuslaskentojen avulla. Lisäksi lujuuslaskentaa käytetään lopuksi kappaleiden ominaisuuksien vertailuun.

## 2 Teoriaa suunnittelun tueksi

### 2.1 Takaisinmallinnus

Takaisinmallinnus on prosessi, jolla pyritään saamaan yksityiskohtaista tietoa jo olemassa olevasta tuotteesta ja jonka avulla saadaan selvitettyä tuotteen toiminnallisuus sekä valmistusmenetelmät. Mekaanisille kokoonpanoille tämä tyypillisesti tarkoittaa kokoonpanon purkua, mitä seuraa osien analysointi, mittaukset sekä dokumentaatio. [1.] Usein ensimmäinen askel mekaanisen tuotteen takaisinmallinnuksessa on fyysisten ulottuvuuksien selvittäminen mittaamisen avulla. Tuotteen ulottuvuuksien mittaamiseen on olemassa useita sovelluksia, joista tässä insinööriyössä käytetään strukturoituun valoon perustuvaan 3D-skannaustekniikkaa. 3D-skannaus valittiin mittaustekniikaksi sen nopeuden ja tarkan mittaustuloksen johdosta.

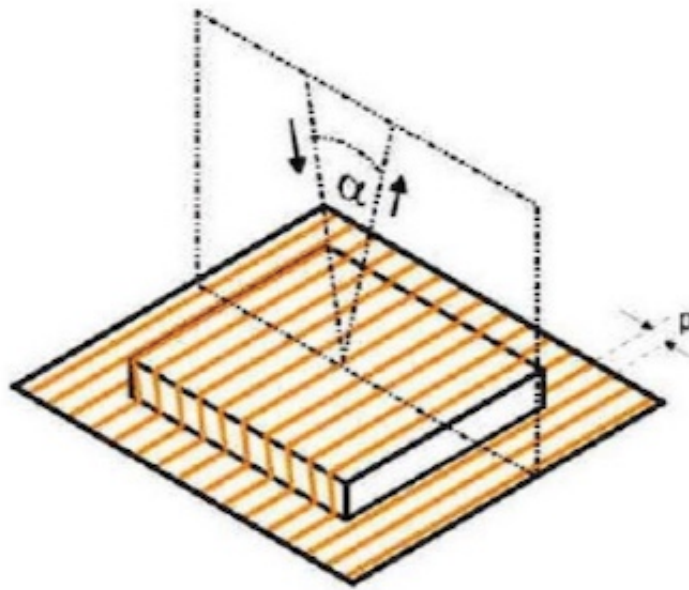
### 2.2 Strukturoituun valoon perustuva 3D-skannaus

3D-skannaus on mittaustekniikka, jolla voidaan mitata ja analysoida olemassa olevia kappaleita erittäin tarkasti. 3D-skannaus voidaan jakaa kahteen alakategoriaan: koskettaviin ja ei-koskettaviin mittaustapoihin. Tässä insinööriyössä päädyttiin käyttämään ei-koskettavaa 3D-skannaustekniikkaa sen nopeuden, helppouden ja tarkkuuden takia.

Strukturoituun valoon perustuva 3D-skannaus on ilman kontaktia tehtävä skannausmenetelmä, jossa skanneri käyttää kappaleen skannaukseen strukturoitua valoa ja kameraa. Skannausmenetelmässä skannattavan kappaleen pinnalle projisoidaan kalibroitu valokuvio, jonka muodonmuutokset skanneri havaitsee ja tallentaa kappaleen pintana. Projisoinnissa käytetään yleisesti valkoista valoa. Uusimmalla tekniikalla skannerit käyttävät sinistä valoa, jonka avulla pystytään minimoimaan heijastuksesta ja läpikuultavuudesta aiheutuvaa virhettä. [2.] Skannattavan kappaleen pinta tallennetaan skannerissa olevalla yhdellä tai useammalla kameralla.

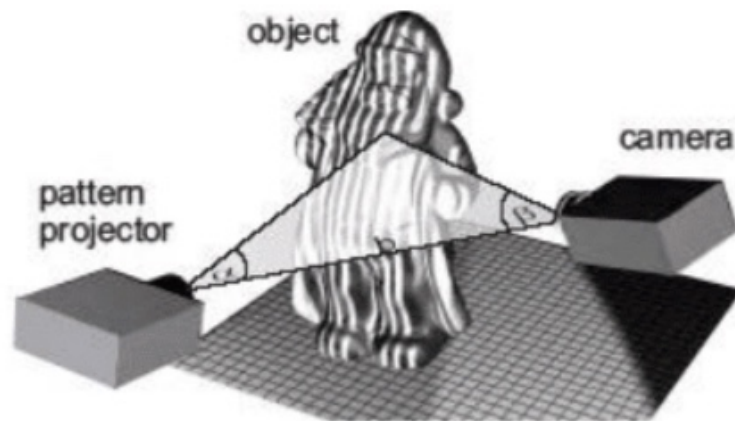
Heijastettava valokuvio voi olla yksi- tai kaksiulotteinen. Esimerkkinä yksiulotteisesta kuviosta on viiva, joka projisoidaan kappaleen pinnalle. Viiva voidaan muodostaa myös käyttäen laseria. Kuviota projisoivasta projektorista sivuun ja tiettyyn kulmaan asetettu kamera, tallentaa viivan muodonmuutokset tiedetyssä kulmassa. Tekniikka muistuttaa kolmiomittaukseksi kutsuttua 3D-skannausmenetelmää, jossa kamera tallentaa viivan kaikki pisteet yhden pisteen etäisyys ja kulma kerrallaan. Kuvassa 1 mitataan yhtä pistettä ja kulmaa  $\alpha$  kolmiomittaus menetelmällä. Yksiulotteista valokuviota käyttävä menetelmässä siis tallennetaan tiedot kappaleen pinnalle projisoidusta kuviosta viiva kerrallaan.





Kuva 1. Kolmiomittaus periaate [3].

Kaksiulotteisena valokuviona käytetään esimerkiksi ruudukkoa tai rinnakkaisista viivoista muodostettua kuviota. Kameralla tai kameroilla tallennetaan kappaleen pinnalle heijastetun valokuvion epämuodostumat. Valokuvion jokaisen pisteen etäisyydet lasketaan käyttäen apuna monimutkaista algoritmia. Strukturoituun valoon perustuvan 3D-skannauksen etuna on skannauksen nopeus. Sen sijaan, että skannattaisiin piste kerrallaan, strukturoituun valoon perustuvat skannerit skannaavat useat pisteet tai jopa koko näkökenttä (field of view) kerralla. Tämä puolestaan vähentää tai jopa poistaa kokonaan kappaleen liikkeestä johtuvan häiriön. Strukturoituun valoon perustuvalla skannerilla onkin mahdollista skannata myös liikkuvia kappaleita reaaliajassa. Monissa tapauksissa liikkuvia kohteita skannaavissa 3D-skannereissa on suhteellisen kapea näkökenttä, jonka leveys vaihtelee muutamasta senttimetrinä pariin metriin. [3.] Kuvassa 2 kaksiulotteinen valokuvio skannattavan kappaleen pinnalla.



Kuva 2. Kaksiulotteinen valokuvio skannattavan kappaleen pinnalla [3].

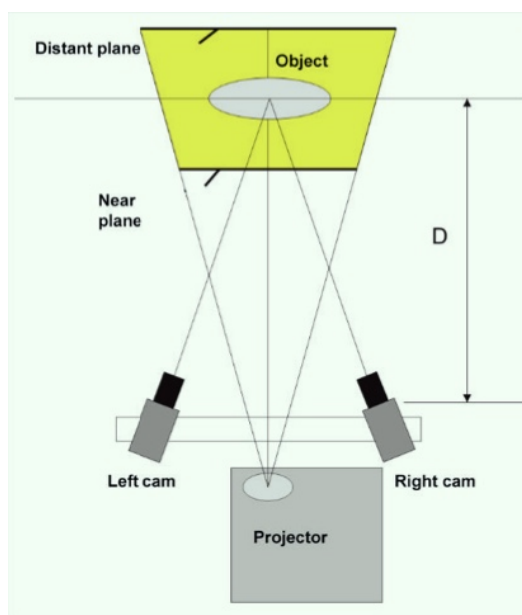
3D-skannerin kalibrointi on tärkeä ennen skannausta suoritettava toimenpide, jolla taataan tarkka skannauksen lopputulos. 3D-skannereiden kalibrointiin on olemassa varmasti useita tapoja ja sovelluksia, tässä insinööriyössä kuitenkin puhutaan nimenomaisesti insinööriyössä käytetyn laitteiston kalibroinnista laitteen valmistajan ohjeistuksen mukaisesti.

Kalibrointitoimet on suoritettava aina, kun 3D-skanneria tai sen komponentteja on siirretty, esimerkiksi skannausalue on vaihtunut tai kameroiden asentoa on muutettu. Skannerin kalibrointi on myös tehtävä, jos skannauksen tarkkuuden epäillään huonontuneen. Kalibrointi on myös hyvä suorittaa, jos skannattava kappale vaihtuu ja kappaleen koko muuttuu merkittävästi. Lisäksi kalibrointi on suoritettava, jos skannauksessa apuna käytettävä kääntöpöytä on vaihtanut asemaa skanneriin nähden. Tämä tarkoittaa sitä, että 3D-skanneri on kalibroitava aina ennen skannausta lukuun ottamatta tilannetta, jossa skanneri ja sen apulaitteet ovat pysyneet liikkumattomina skannausten välillä sekä skannattavat kappaleet ovat samaa kokoluokkaa. On syytä huomioida myös, että skannaus on myös suoritettava samassa valossa, jossa kalibrointi on suoritettu. [4.]

Strukturoituun valoon perustuvien 3D-skannerien kalibrointiin käytetään kalibrointilevyjä. Kalibrointilevyissä on erikokoisia pisteitä tietyssä muodostelmassa ja tarkkaan mitatulla

etäisyydellä toisistaan. Rangevisionin kalibrointiohjeen mukaan kalibrointilevyjä on neljää kokoa erikokoisten kappaleiden skannauksen kalibrointia varten. 3D-skannerin käyttöohjeesta tulee tarkistaa, mikä kalibrointilevy on valittava minkäkin kokoisen kappaleen skannausta varten. Kalibrointilevyt nähtävissä kuvassa 5. Lisäksi 3D-skanneri voidaan kalibroida ns. 0-skannausalueelle ilman kalibrointilevyä, kun skannattava kappale on suuri. [4.]

Skannausalue on kameroiden linssien ja kalibroinnissa käytettävän kalibrointilevyn yhdistelmä, ja se on säädettävissä laitteen asetuksilla. Skannerilla on tietty työetäisyys  $D$ , joka säädetään kalibroinnin aikana. 3D-skanneri rajaa skannauksen skannausalueeseen varmistaakseen skannauksen laadun. Kuvassa 3 on merkittynä keltaisella värillä skannausalue. Optimaalisessa skannauksessa skannausalue on syvyydeltään suunnilleen samankokoinen kuin kalibroinnissa käytetyn kalibrointilevyn halkaisija. [4.] Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että laadukkaan skannauksen aikaansaamiseksi skannattavan kappaleen tulisi mahtua kalibroinnissa käytettävän kalibrointilevyn pinnalle.

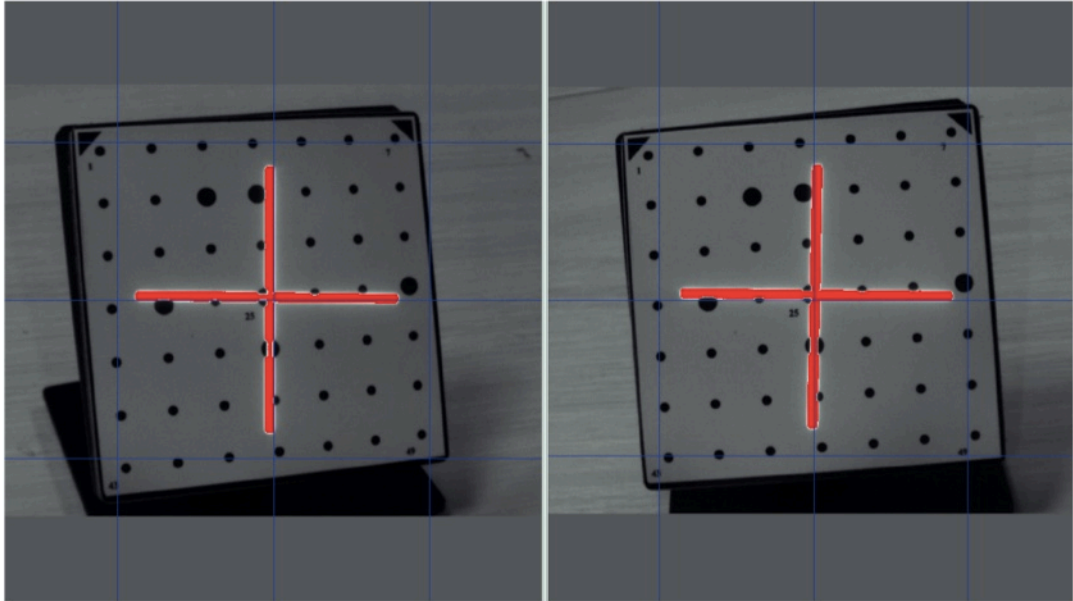


Kuva 3. Havainnekuva skannausalueesta [4].

Kalibrointi aloitetaan valitsemalla skannaukseen sopiva skannausalue. Valittu skannausalue riippuu skannattavan kappaleen fyysisestä koosta. Skannausalue määrittää skannauksessa käytettävät kameroiden linssit ja kalibrointilevyn sekä skannerin työtäisyyden. Kalibroinnin aloitetaan kalibroimalla kamerat. Kameroiden kalibroinnin aluksi etsitään oikea työtäisyys asettamalla toinen kameroista samansuuntaisesti projisoidun valon kanssa ja asettamalla kalibrointilevy kameran eteen tietylle etäisyydelle. Työtäisyyden tiedetään olevan oikea, kun skannerin kuvaruudun apuruudukon pystyviivat kohtaa kalibrointilevyn nurkkapisteiden kanssa. Projektori säädetään työtäisyydelle sopivaksi, niin että strukturoitu valo on mahdollisimman terävä. [4.]

Kamerat kohdistetaan osoittamaan samaan pisteeseen. Kameroiden kohdistus suoritetaan projisoimalla ristikuvio, projektorin eteen kohtisuoraan edellä määritetylle työtäisyydelle asetetun kalibrointilevyn keskelle. Kohdistettujen kameroiden kuva nähtävissä kuvasta 4, jossa projisoitu ristikuvio on näkyvissä punaisena. Punainen väri ilmaisee ylivalaistut alueet, mutta siihen ei kiinnitetä huomiota vielä tässä vaiheessa.

Kameroiden kuva säädetään teräväksi, mikä on helppo tehdä esimerkiksi suurentamalla kalibrointilevyn keskellä näkyviin numeroihin. Kun kameroiden kuva on säädetty teräväksi, säädetään aukon koko. Aukon säädön ajaksi projisoidaan koko kalibrointilevyn alatyöteen viivakuviota. Aukon tiedetään olevan oikeassa säädössä, kun kuvassa ei ole enää havaittavissa punaista ylivalaistua aluetta, mutta kuva on mahdollisimman kirkas sekä molempien kameroiden kuvat ovat yhtä kirkkaita keskenään. [4.] Kalibrointi suoritetaan loppuun kuvaamalla kalibrointilevy eri kulmissa ja asemoissa ohjelman ohjeiden mukaisesti.



Kuva 4. Kameroiden kohdistus käyttäen strukturoitua valoa. Punainen väri ilmaisee, että projekti ristikuvio kalibrointilevyn pinnalla on liian kirkas [4].

Kalibrointilevyjen lämpölaajeneminen on otettava myös huomioon, mikäli skannauksen ja kalibroinnin aikana vallitseva lämpötila eroaa merkittävästi. Lämpötilan muutoksesta aiheutuva kalibrointilevyjen lämpölaajeneminen, voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta L = L + b * C$$

jossa

- $\Delta L$  on kalibrointilevyn koon muutos
- $L$  kalibrointilevyn koko
- $C$  on kalibroinnin ja skannauksen välinen lämpötilaero
- $b$  on lämpötilakerroin, jossa yhden celsiusasteen muutos lämpötilassa aiheuttaa tasaisen muutoksen kalibrointilevyn koossa. Rangevisionin kalibrointiohjeessa on taulukoituna  $b$ -arvot kalibrointilevyille [4, s. 28].

## 2.3 Rangevision Spectrum

Rangevision Spectrum -3D-skanneri on korkearesoluutiainen, strukturoidun valon tekniikkaan perustuva 3D-skanneri. Laite on suunniteltu skannaamaan pienestä suuriin kappaleisiin, ja skannattavan kappaleen koko voi olla yhdestä senttimetristä kolmeen metriin. Laite pystyy monimutkaisten muotojen tarkkaan skannaukseen, kun 3D-pisteiden tarkkuus laitteella on jopa 0,04 mm. Laite on varustettu kahdella 3,1 Megapikselin kameralla ja automaattisella kääntöpöydällä. [5.] Kameran linssit on varustettu sinivalosuodattimilla, mitkä ovat pakollisia 3D-skannereissa, jotka käyttävät sinistä strukturoitua valoa. Kuvasta 5 tarkasteltavissa Spectrum-3D-skanneri osina.

Tarkkuutensa ansiosta laitteella on mahdollista skannata myös liikkuvia kappaleita. Skannaus suoritettiin käyttäen kääntöpöytää, jonka avulla skannattava olka-akseli pyöri skannauksen aikana. Kääntöpöydän ansiosta olka-akselia ei tarvinnut itse siirtää kuin kerran, silloin kun olka-akseli käännettiin ylösalaisin kääntöpöydän päällä.



Kuva 5. Rangevision Spectrum -3D-skanneri ja myyntipakkauksessa toimitettavat lisälaitteet [5].

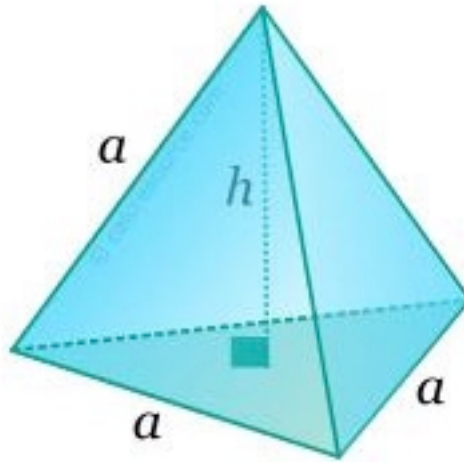
## 2.4 FEM

Finite Element Method, suomeksi elementtimenetelmä, on lujuuslaskennassa käytetty numeerinen ratkaisumenetelmä. Elementtimenetelmästä käytetään englannin kielessä lyhennettä FEM ja usein myös lyhennettä FEA, joka tulee sanoista Finite Element Analysis.

Elementtimenetelmän käyttö alkoi Yhdysvalloista lentokoneiteollisuudesta 1950-luvulla ja levisi sieltä kone- ja rakennusteollisuuden käyttöön, rakenteiden statiikan ja dynamiikan käsittelyyn. Elementtimenetelmän menestys perustuu tietokoneisiin, jotka mahdollistavat suurten numerolaskumäärien käsittelyn kohtuullisessa ajassa. Menetelmä kehittyi tietokoneiden mukana 1960-luvulta lähtien mutta oli hankalakäyttöinen, sillä ohjelmistot toimivat keskustietokoneilla ja tiedot piti syöttää manuaalisesti. 1980-luvulta lähtien FEM-ohjelmistoihin on kehitetty esi- ja jälkikäsitteilyohjelmistoja, joiden ansiosta elementtimenetelmän käytöstä on tullut käyttäjäystävällisempää. FEM-ohjelmistojen käyttö mikrotietokoneilla tuli mahdolliseksi tietokoneiden laskentakapasiteetin kehittyttyä riittävälle tasolle. Nykyään FEM-ohjelmistoja on osana mekaniikkasuunnitteluohjelmistoja lisäosien muodossa, mikä on erittäin käyttäjäystävällinen ominaisuus, sillä tietoja ei tarvitse enää siirtää ollenkaan eri ohjelmistojen välillä. [6.] Myös tässä insinööriyössä käytetään lujuuslaskentaan elementtimenetelmää Solidworks Simulation -lisäosan muodossa. Tavallisimmin CAD-ohjelmiston lisäosa tekee rakenteen lineaarisen staattisen analyysin ja ratkaisee ominaistajuudet ja -muodot.

Elementtimenetelmässä geometrisesti monimutkainen kappale jaetaan pieniin osiin, jotka ovat geometrialtaan tarpeeksi yksinkertaisia. Näitä osia sanotaan elementeiksi. Elementtien koko voi vaihdella paljon tarkasteltavan ongelman luonteesta riippuen, minkä lisäksi saman kappaleen eri elementeissä voi esiintyä suuria kokovaihteluja. Kappaleen elementtijaossa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä ja -muotoisia sekä erilaiset geometriset ja materiaaliominaisuudet sisältäviä elementtejä, minkä takia elementtimenetelmä on joustava ratkaisu käsitellä yhdistettyjä ja monimutkaisia rakenteita. Solidworksin lujuuslaskennassa elementit ovat nelitahokkaita, mutta elementit voivat olla myös viisi- tai kuusitahokkaan muotoisia kolmiulotteisten kappaleiden mallinnuksessa.

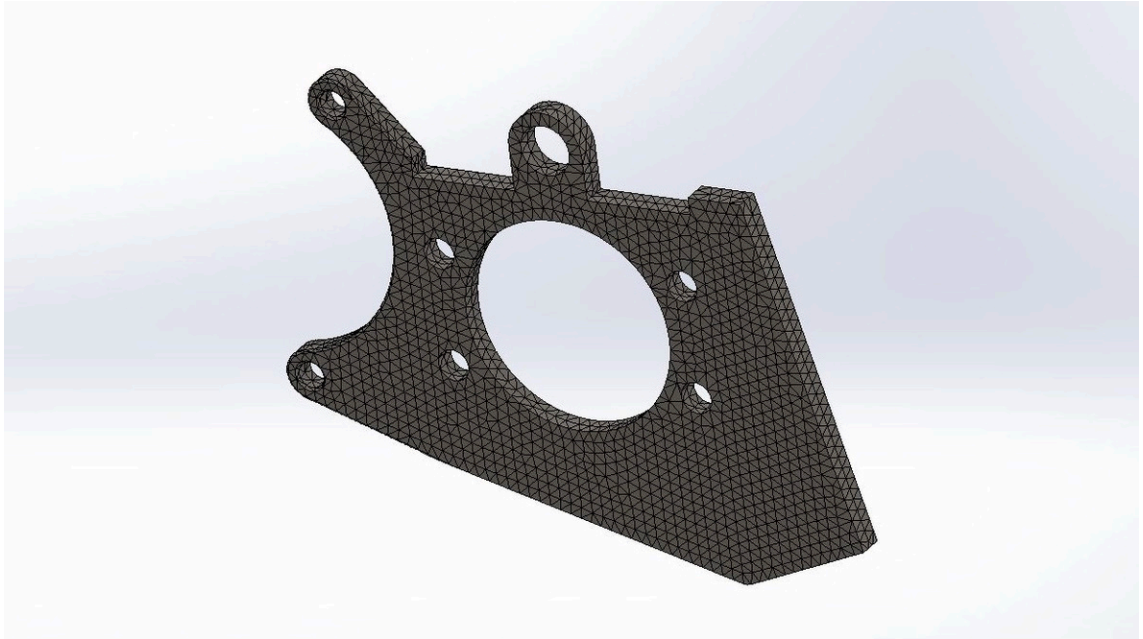
[6.] Nelitahokkaassa eli tetraedrissä on neljä kolmion muotoista tahkoa. Kuvassa 6 säännöllinen tetraedri.



Kuva 6. Säännöllinen tetraedri [7].

Kappale kuvataan elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Laskentamalli kuvaa kappaletta vain likimääräisesti, mikä aiheuttaa saataviin tuloksiin virhettä. Tämä mallinnusvirhe ei ole lujuuslaskennassa merkittävä, mikäli laskentamalli on muodostettu riittävän pienistä elementeistä. Vierekkäiset elementit kiinnittyvät solmuissa. Elementtiverkko muodostuu elementeistä ja solmuista, jotka kiinnittävät elementit toisiinsa. [6.] Kuvasta 7 voi tarkastella erään kappaleen laskentamallia.





Kuva 7. kolmiulotteisen kappaleen elementtiverkko eli laskentamalli

Elementtityyppjä on laaja valikoima, FEM-ohjelmistosta riippuen kymmenistä jopa satoihin erityyppisiin elementteihin. Useimmat laskennat tapahtuvat muutaman kymmenen peruselementtityypin avulla, ja loppuja elementtityyppjä voidaan pitää erityistilanteisiin suunniteltuina. Samassa laskentamallissa voidaan käyttää yhtäaikaisesti erityyppisiä elementtejä, mikä tekee elementtimenetelmästä joustavan työkalun ja mahdollistaa mutkikkaidenkin rakenteiden analysoinnin. [6.]

Elementtityypit jaoteltuna erään lujuusopin teorian rakennetyyppijaottelun mukaisesti:

- **2D-solidielementti**

Tämä elementtityyppi on tarkoitettu tasojännitystilän, tasomuodonmuutos-tilan tai pyörähdyssymmetrisen solidirakenteen tarkasteluun. Kolmi- ja nelisivuiset tasoelementit sekä näitä vastaavat rengaselementit ovat yleisimpiä elementtejä. Elementtien reunat voivat olla suorat tai paraabelin kaaria, jolloin elementti on joko lineaarinen tai kvadraattinen.

- **3D-solidielementit**

Tätä elementtityyppiä käytetään kolmiulotteisten kappaleiden mallinnukseen. Elementtien reunapinnat voivat olla tasoja lineaarisilla elementeillä tai toisen asteen tasoja, jolloin elementti on kvadraattinen. 3D-solidielementit ovat neli-, viisi- tai kuusitahokkaita.

- **Erityiselementit**

Erityiselementtien valikoima vaihtelee ohjelmistoittain, joten tarkkaa luetteloa tästä elementtityypistä ei voida laatia. Yleisimpiä erityiselementtejä ovat särön kärjen-, kosketus- ja puoliäärettömät solidielementit. Erityiselementit on luotu tilanteisiin, joissa peruselementeillä ei pystytä mallintamaan riittävän tarkasti.

- **Kuorielementit**

Kuorielementit ovat kolmi- tai nelisivuisia kuoren keskipinnan elementtejä, tavallisimmin tasapaksuja. Nämä elementit soveltuvat kaarevien pintarakenteiden tarkasteluun.

- **Laattaelementit**

Laattaelementit ovat tasopintarakenteiden taivutuksen ja jännityksen käsittelyyn tarkoitettuja elementtejä. Elementit ovat kolmi- tai nelisivuisia ja yleensä vakiopaksuisia laatan keskitason elementtejä. Ohuelle sekä paksulle laatalle on käytettävissä elementtejä, joista jälkimmäinen ottaa huomioon leikkausvoimien vaikutuksen laatan taipumaan.

- **Palkkielementit**

Palkkielementit ovat tasapaksuja kaksisolmuisia elementtejä, jotka ottavat leikkausvoiman vaikutukset huomioon. Sovelletaan suorien ja käyrien palkkien sekä kehärakenteiden tarkasteluun.

- **Sauvaelementit**

Sauvaelementit ovat kaksisolmuisia tasapaksuja taso-ristikon ja avaruusristikon elementtejä. Ristikkorakenteiden analysointiin soveltuvia elementtejä. [6.]

Elementtityypit sisältävät oletuksia ja rajoituksia, mistä johtuen valituilla elementtityypeillä onnistunut laskenta ja tuloksien oikeintulkinta vaativat taustalla olevan lujuusopin ja elementtimenetelmän teorian tuntemista. Käytössä olevien elementtien teoriaan pystyy tutustumaan esimerkiksi käytössä olevan ohjelmiston oppaasta.

FEM-laskentamallit voidaan jakaa 1D-, 2D- ja 3D-malleihin, joista 1D- eli keskiviivamalleja käytetään palkki- ja sauvarakenteille. Geometrinen malli on tällöin rakenteen poikkileikkauksen keskellä kulkeva viiva, jonka lisäksi on määritettävä poikkileikkauksen pinta-alueet. 2D- eli keskipintamalleja käytetään laatta-, levy- ja kuorirakenteille, joissa geometrinen malli on rakenteen keskipinta, lisäksi on määritettävä ainepaksuudet. 3D- eli solidimalleja käytetään kolmiulotteisilla kappaleilla, joiden geometrian mallinukseen ei voida käyttää edellä mainittuja yksinkertaisempia mallinnustapoja. Voidaan myös käyt-

tää yhdistettyä mallia, jolloin rakenteen eri osissa voidaan käyttää erityyppistä geometrian mallinnusta. Jo laskennan alussa on kiinnitettävä huomiota laskentamallin sekä elementtityyppien valintaan. [6.]

Kappaleen geometrian luonnissa ei siis ole kyse pelkästään mallin piirtämisestä, vaan geometrialle on myös pystyttävä luomaan laskennan kannalta tehokas elementtiverkko. Lujuuslaskennassa voitaisiin periaatteessa käyttää aina 3D-malleja analysoitavan kappaleen tarkkaan geometriaan perustuen, mutta laajojen 3D-mallien ratkaisu on raskasta varsinkin kotitietokoneille. Lujuuslaskenta voidaankin usein suorittaa helpommin ja riittäväällä tarkkuudella käyttäen yksinkertaistettuja malleja. [6.]

## 2.5 Solidworks

Solidworks on vuonna 1993 perustettu Windows-pohjaista parametristä mekaniikkasuunnitteluohjelmistoa valmistava yritys. Solidworks perustettiin Massachusettsissa Yhdysvalloissa, MIT- teknillisestä korkeakoulusta valmistuneen maisterin John Hirschtickin toimesta. Solidworks suunniteltiin alun perin helppokäyttöiseksi, edulliseksi ja Windows-tietokoneilla käytettäväksi. Ensimmäinen versio Solidworks-ohjelmistosta julkaistiin vuonna 1995. [8.] Solidworks on ollut ranskalaisen Dassault systèmekin omistuksessa 1997 vuodesta alkaen [9].

Solidworks -mekaniikkasuunnitteluohjelmisto tarjoaa laajan valikoiman 3D-työkaluja, joiden avulla voi kappaleiden suunnittelun lisäksi myös simuloida, julkaista ja hallita tietoja. Suunnittelutyön helpottamiseksi työkalut toimivat saumattomasti yhdessä laajempaa kokonaisuutena. [9.]

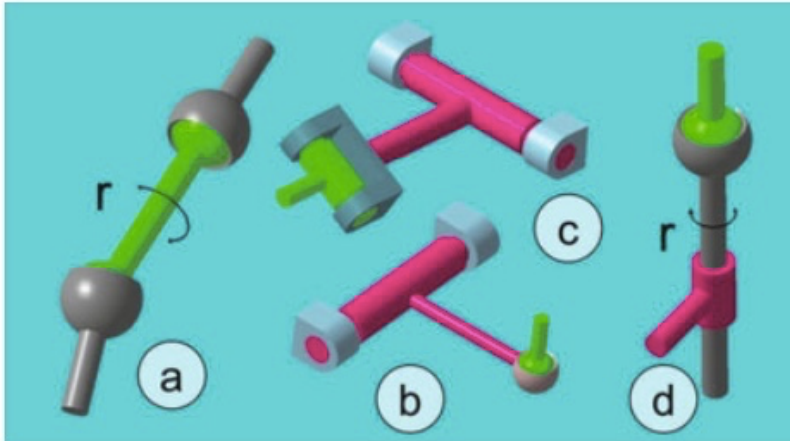
Tässä insinööriyössä käytettiin Solidworks 3D -CAD-ohjelmistoa osien mallinnuksessa sekä ScanTo3D-lisäosaa skannatun kappaleen mallinnuksessa. Kappaleiden lujuuslaskenta suoritettiin Solidworks Simulation -lisäosan avulla. Solidworks valittiin tässä insinööriyössä käytettäväksi mekaniikkasuunnitteluohjelmistoksi sen käyttökokemukseen perustuen. Insinööriyön aikana Solidworks havaittiin oikeaksi valinnaksi sen sisältämien työkaluvalikoiman ja lisäosien johdosta. Skannatun mallin käsittely, uuden mallin piirtäminen ja lujuuslaskenta oli mahdollista suorittaa käyttäen ainoastaan yhtä mekaniikkasuunnitteluohjelmistoa, eikä mallia täytynyt siirtää ohjelmistosta toiseen.

## 2.6 Erillistuettu pyöräntuenta

Tässä insinööriyössä tarkasteltava alustakomponentti on peräisin henkilöauton erillistuetusta taka-akselista. Taka-akselin pyöräntuenta sallii pyörälle yhden kuudesta vapausasteesta, koriin nähden pystysuuntaisen liikkeen. Pystysuuntainen liike on tuettu jousella ja iskunvaimentimella. Kiinnitettäessä pyörä auton koriin niin, että pyörän on mahdollista liikkua pystysuunnassa, se pystyy mukailemaan kuljettavan pinnan muotoja. Pyörän pystysuuntainen liike auttaa eristämään auton korin värähtelyiltä, joita tienpinnan epätasaisuudet aiheuttavat. Pyörän pystysuuntainen liike on siis merkittävä tekijä ajomukavuuden kannalta. [10.]

Erillistuetussa pyöräntuennassa pyörää kannatteleva olka-akseli on yhdistetty auton koriin käyttäen päistään nivellettyjä tukia. Pyörä ja olka-akseli on yhdistetty toisiinsa laakerilla, mikä on yhteistä kaikille pyöräntuentaratkaisuille. Olka-akselin kiinnittämiseen tarvittavien tukien määrä riippuu siitä, minkä tyyppisiä tukia alustaratkaisussa käytetään. Käytettävien tukien on kiinnitettävä yhteensä viisi kuudesta vapausasteesta.

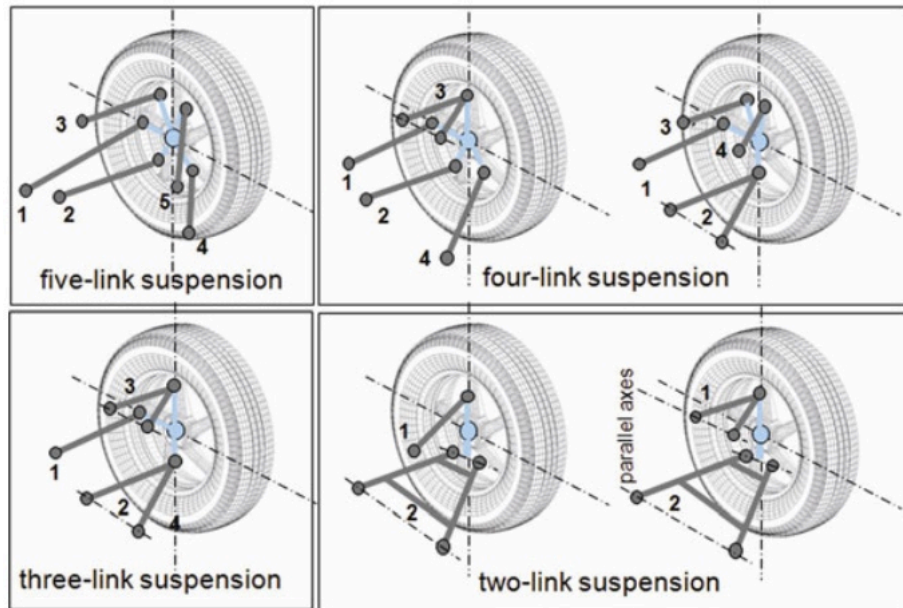
Yksinkertaisin tuki tyyppi on kahden pisteen tuki, joka kiinnittää yhden vapausasteen. Yleisimmin kahden pisteen tuki on päistään nivelöity joko pallonivelillä tai kumilaakeroinnilla. Mikäli alustaratkaisu on toteutettu käyttäen pelkästään kahden pisteen tukia, tarvitaan viiden vapausasteen lukitsemiseen viisi kahden pisteen tukea. Kuvassa 8a on havainnollistettu kahden pisteen tuki. Kolmen pisteen tuki, joka tunnetaan yleisesti nimellä wishbone, kiinnittää yhteensä kaksi vapausastetta. Wishbone tuki nähtävissä kuvassa 8b.



Kuva 8. Tukityypit [10].

Mikäli alustaratkaisussa käytetään yhtä wishbone-tukea ja kolmea kahden pisteen tukea, tämäntyyppistä alustaratkaisua kutsutaan vastedes nimellä nelilinkkituenta (eng. four-link suspension). Tässä alustaratkaisussa neljällä tuella on kiinnitetty kaikki viisi haluttua vapausastetta. [10.] Tässä insinööriyössä tarkasteltava olka-akseli on peräisin juuri alustaratkaisultaan tämäntyyppisestä ajoneuvosta. Kuvassa 9 on nähtävissä nelilinkkituenta, minkä lisäksi samassa kuvassa tarkasteltavissa myös muita erillistuenta ratkaisuja.

Nissan Silvia -henkilöauton takapyörät on tuettu nelilinkkierillistuennalla, jossa alatukivarsi on wishbone-tuki. Muut kolme tukea ovat kahden pisteen tukia, joista kaksi on toisiinsa nähden eri kulmiin asetettuja ylätukivarsia ja yksi tuki on raidetankona. Silvian takapyöräntuennassa on jäykät raidetangot, joiden tehtävänä on pitää takapyörien auras haluttuna. Silvian takapyöräntuennassa iskunvaimennin ja jousi on yhdistetty joustintukirakenteeksi, joka on alapäästään kiinnitetty olka-akseliin ja yläpäästään koriin. Nissan Silvian sisarmalleja on valmistettu myös nelipyöräohjauksella, jossa taka-akselilla on jäykkien raidetankojen tilalla ohjausvaihte, mikä mahdollistaa takapyörille muutaman asteen kääntyvyyden.



Kuva 9. Erillistuentaratkaisut [10].

Erillistuenta on toteutettavissa myös muilla tukityypeillä ja yhdistelmillä. Erillistuenta on toteutettavissa käyttäen yhdestä viiteen tukea. Yhdellä tuella toteutettu erillistuenta kutsutaan heiluritueksi sen heilurimaisesta luonteesta johtuen. Heilurituennassa on yksi vino, pituus- tai poikittaissuuntaan asetettu heilurituki, joka lukitsee viisi vapausastetta. Muista erillistuentaratkaisuksista ei tässä insinööriyössä kerrota enempää, sillä ne eivät ole oleellisia työn kannalta.

### 3 Lähtötiedot

Tarkastelun kohteena oleva olka-akseli oli peräisin vuosimallin 1993 Nissan Silvia -henkilöauton takapyöräntuennasta. Tiedossa oli, että kohdeautossa on käytössä erillistuenta takapyöräntuennassa. Tämän voi myös nopeasti todeta tarkastelemalla alkuperäistä olka-akselia. Kuvassa 10 alkuperäisen olka-akselin solidimalli kuvattuna viistosti takaa ja sisäpuolelta päin kuvitellen osan olevan omalla paikalla pyöräntuennassa.



Kuva 10. Alkuperäisen olka-akselin solidimalli

Olka-akselin tukivarsien kiinnityksen oli toteutettu niin, että wishbone-tyyppinen alatuki- varsi kiinnitetään pallonivelellä olka-akseliin, solidimallissa näkyvään alimpaan kiinnitys- kohtaan. Molempien ylätukivarsien ja raidetangon kiinnitys on toteutettu kumilaakeroin- neilla. Pyörä kiinnitetään olka-akseliin pyöränlaakerilla, jonka kiinnityspultteja varten olka-akselissa neljä reikää keskimmäisen suuren reiän ympärillä. Oikealla näkyvät kaksi uloketta ovat jarrusatulan kiinnitystä varten, mutta kuvassa 10 solidimalliin ei ole tehty jarrusatulan kiinnityksille reikiä. Kuvan 10 solidimallissa vasemmalla alhaalla näkyvä reikä on tarkoitettu iskunvaimentimen kiinnitykselle, mutta tässä vaiheessa siihen ei vielä mallinnettu iskunvaimentimen kiinnikettä.

Alkuperäinen olka-akseli on valmistettu valamalla. Lujuuslaskentaa varten alkuperäisen olka-akselin materiaaliset ominaisuudet täytyi määrittellä. Alkuperäisen olka-akselin las- kentamallin materiaaliksi asetettiin pallografiittivalurauta ja myötölujuudeksi oletettiin 300 MPa.

## 4 Toteutus

### 4.1 Alkuperäisen olka-akselin mallintaminen

Alkuperäinen olka-akseli oli mallinnettava uuden ja vanhan olka-akselin ominaisuuksien vertailua varten. Lisäksi vanhan olka-akselin lujuuslaskennan tulokset antoivat uuden olka-akselin suunnittelussa suuntaa, mitkä kohdat kappaleessa tarvitsevat erityisesti jännityksien kestoja.

#### 4.1.1 Alkuperäisen olka-akselin 3D-skannaus

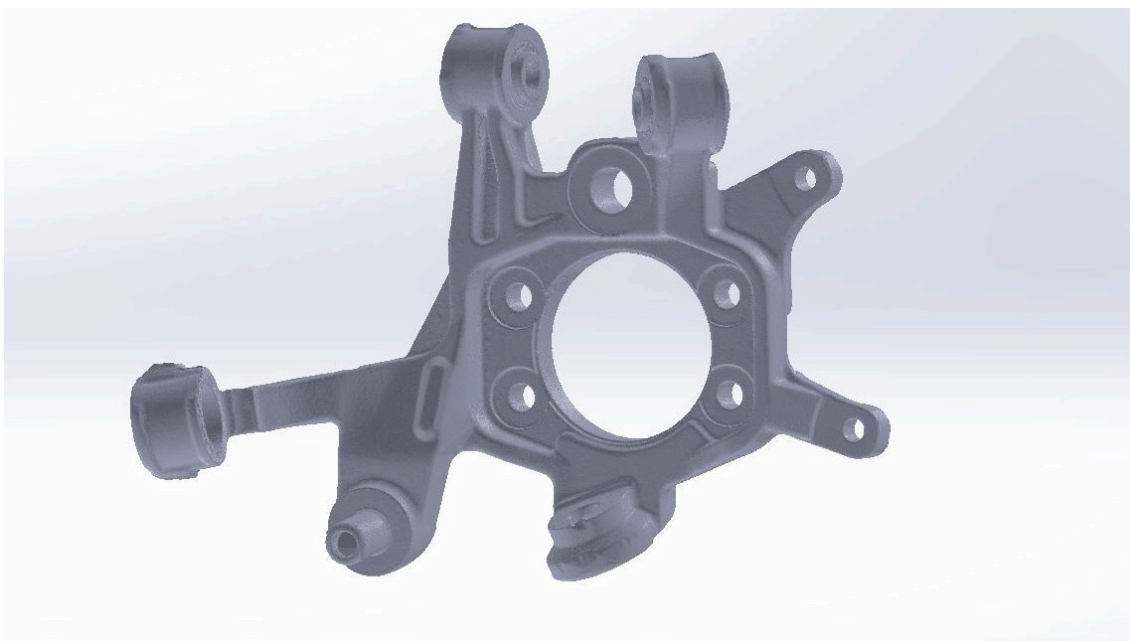
Tässä insinööriyössä tehty 3D-skannaus suoritettiin Spectrum-laiteella AN-Cadsolutions -yrityksen toimesta. Skannaus suoritettiin strukturoituun valoon perustuvalla menetelmällä kaksiulotteisesti projisoidulla valokuviolla. Skannausta varten vanha olka-akseli suihkutettiin kauttaaltaan MR 2000 -pinnoitusaineella, joka on tarkoitettu käytettäväksi optisessa 3D-mittauksessa skannaustuloksen parantamiseksi. Kuvassa 11 pinnoitettu olka-akseli kääntöpöydällä kesken skannauksen.



Kuva 11. Pinnoitusaineella käsitelty olka-akseli kääntöpöydällä valmiina 3D-skannausta varten



3D-skannattu malli oli erittäin tarkka; mittatarkkuutta vaativimmat kohdat kuitenkin myös tarkistusmitattii perinteisin mittausmenetelmin vanhasta olka-akselista. 3D-skannattu malli oli STL-tiedostomuodossa eli verkkomallina. Verkkomalli määrittää ainoastaan kapaleen ulkopinnan muodon, eikä näin ollen verkkomallia pysty suoraan muokkaamaan tai käyttämään lujuuslaskennassa Solidworksillä. Verkkomalli tuli muuttaa kiinteäksi kapaleeksi (solid body). Kuvassa 12 skannatusta olka-akselista alkuperäisessä tarkkuudessa graphics bodynä verkkomallin tarkastelua varten. Kuvassa on huomattavissa skannauksesta johtuvaa virhettä muutamissa kohdissa, mutta kokonaisuutena skannauksen lopputulos oli laadukas. Verkkomalliin syntyneitä virhettä on helpoiten havaittavissa alatukivarren ja raidetangon kiinnityksen alueella.



Kuva 12. 3D-skannattu alkuperäinen olka-akseli verkon tarkastelussa. Verkosta voi havaita paikoitellen virhettä.

#### 4.1.2 Alkuperäisen olka-akselin kolmiulotteinen mallintaminen

Solidworksissä on automatiikka, joka pystyy muuttamaan pienet ja yksinkertaisen muotoiset STL-tiedostomuotoiset verkkomallit kiinteäksi kappaleeksi jo tiedoston avausvaiheessa muutamalla klikkauksella. Skannattu verkkomalli kuitenkin koostui lähes kolmesta miljoonasta tasokolmiosta, ja näin ollen tiedostokoko oli todella suuri, eikä Solidworksillä pystynyt automaattisesti muuttamaan näin suurta verkkomallia kiinteäksi kappaleeksi.

Kiinteän kappaleen mallinnuksessa työkaluna käytettiin Solidworksin lisäosaa ScanTo3D, jota jo nimestä päätellen käytetään muuttamaan skannattua verkkomallia kolmiulotteiseksi kiinteäksi kappaleeksi. ScanTo3D sisältää erilaisia automaattisesti ohjauttavia toimintoja (engl. wizard, lyhyemmin toiminto), joiden avulla verkkomallia pystyy muokkaamaan ja asemoimaan uudelleen. ScanTo3D lisäosa on rakennettu suoraviivaiseksi. Aloittaen ensimmäisestä Prep Wizard -toiminnosta saa verkkomallista muutettua kiinteään kappaleen vaiheittain seuraava painiketta painamalla.

Verkkomalli uudelleen orientoitiin ScanTo3D:n Mesh Edit -toiminnolla. Verkkomalli orientoitiin niin, että alkuperäisten top, right ja front -tasojen risteämien piste sijaitsee pyöränlaakerin porauksen pyörähdysakselilla samalla tasolla, jossa pyöränlaakerin kiinnityksen koneistettu pinta sijaitsee.

Mesh Prep -toiminnolla verkkomallia yksinkertaistettiin ja näin saatiin tasokolmioiden määrää pienennettyä, jolloin kiinteäksi kappaleeksi muuttamisen laskenta helpottui. Yksinkertaistettaessa verkkomallia siitä poistettiin virheitä ja täytettiin reikiä, joita skannauksessa oli syntynyt ja joita ei haluttu kiinteään kappaleeseen. Verkkomallista poistettiin myös koneistetut reiät, jotka lisättiin lopulliseen malliin myöhemmin käyttäen perinteisiä Solidworksin työkaluja. Koneistettujen reikien tarkat sijainnit saatiin verkkomallista. Alkuperäisessä olka-akselissa on myös koneistettuja tasoja, näiden tasojen tarkat asemat saatiin verkkomallista käyttäen useaa verkosta otettua pistettä ja tasotyökalua.

Kun verkkomalli oli saatu valmisteltua, käytettiin Surface Prep -toimintoa kiinteän kappaleen luomisessa. Kiinteän kappaleen luomista yritettiin aluksi manuaalitoiminnon avulla, mutta se osoittautui erittäin haastavaksi muodoltaan näin monimutkaisessa kappaleessa. Manuaalitoiminnolla luotavien pintojen määrä ja monimutkaisuus oli niin suuri,

ettei haluttuun lopputulokseen päästy ja päädyttiin käyttämään automaattista toimintoa. Automaattistakin toimintoa käyttäessä kappaleen pinnoissa olevista risteämistä johtuen jouduttiin pintojen ominaisuusviivoja vielä muokkaamaan, poistamaan ja lisäämään tässä vaiheessa. Surface Prep Wizard -työkalun automaattitoiminnon lopuksi oli verkkomalli muutettu kiinteäksi kappaleeksi. Viimeisenä vaiheena kiinteään kappaleeseen tehtiin koneistetut reiät ja pinnat Extruded Cut -työkalulla, verkkomallista saatuihin tarkkoihin sijainteihin.

## 4.2 Uudelleensuunnittelu eri valmistusmenetelmää varten

Uudelleensuunnittelun tarkoituksena oli, että olka-akseli on valmistettavissa eri valmistusmenetelmällä kuin alkuperäinen, säilyttäen kuitenkin samat ominaisuudet. Alkuperäinen olka-akseli oli valmistettu valamalla. Uuden valmistusmenetelmän tuli olla sellainen, että olka-akseli olisi valmistettavissa joko täysin tai osittain itse ja kustannustehokkaasti. Alkuperäisten ominaisuuksien tuli kuitenkin säilyä uudessa olka-akselissa niin kestävyys kuin kinemaattisten ominaisuuksienkin osalta. Tukivarsien ja iskunvaimentimen kiinnityspisteitä ei näin ollen muutettu alkuperäisiin nähden. Kiinnityspisteiden ennalta määritellyt sijainnit helpottivat suunnittelua, sillä sijaintien muutosten vaikutusta kinematiikkaan ei tarvinnut huomioida.

### 4.2.1 Uudelle olka-akselille valittu valmistusmenetelmä

Uudeksi valmistusmenetelmäksi ajateltiin alun perin koneistusta yhdestä tai kahdesta aihioista. Koneistus kuitenkin pois suljettiin jo työn alkupuolella ennen suunnittelutyön aloittamista. Olka-akselin kiinnityspisteitä muuttamatta sen muoto tulisi olemaan sellainen, ettei koneistus olisi hyvä vaihtoehto valmistusmenetelmäksi. Kappaleen monimutkaisesta muodosta johtuen sen koneistuksessa olisi tarvittu useita ja haastavia uudelleenkiinnityksiä. Näin ollen päädyttiin valmistusmenetelmään, jossa kokoonpanotyö voitaisiin suorittaa itse ja kappaleiden valmistus ulkoistettaisiin vain osittain.

Uudeksi valmistusmenetelmäksi valittiin koneistuksen ja ohutlevytyön yhdistelmä. Lopputuloksesta tulee osista koottu kokoonpano, niin kutsuttu laatikkorakenteinen olka-ak-

seli. Tukivarsien laakerointeja varten suunnitellaan koneistettavat kappaleet. Ylätukivarsia varten koneistetaan kaksi saman muotoista sylinterimäistä kappaletta. Alatukivarren kiinnitystä varten koneistetaan yksi sylinterimäinen kappale, jonka sisäreikä on kartio, alapallonivelen kiinnityksestä johtuen. Aorausvartha varten koneistetaan ulkoisesti täysin omanlaisensa kappale, jossa on samankokoinen poraus kuin ylätukivarsia varten koneistetuilla sylinterimäisillä kappaleilla. Olka-akselin runko rakentuu useasta teräsosasta, jotka ovat muotoon leikattuja ja särmättyjä. Lopullinen kokoonpano kootaan hitsaamalla osat yhteen. Olka-akselin kokoonpanohitsausta varten tulisi suunnitella myös hitsausjigi kokoonpanohitsauksen mahdollistamiseksi. Hitsausjigin suunnittelu kuitenkin rajattiin tämän insinööriyön ulkopuolelle kuten olka-akselin lopullinen valmistaminenkin.

#### 4.2.2 Olka-akselin rakenne ja kolmiulotteinen mallintaminen

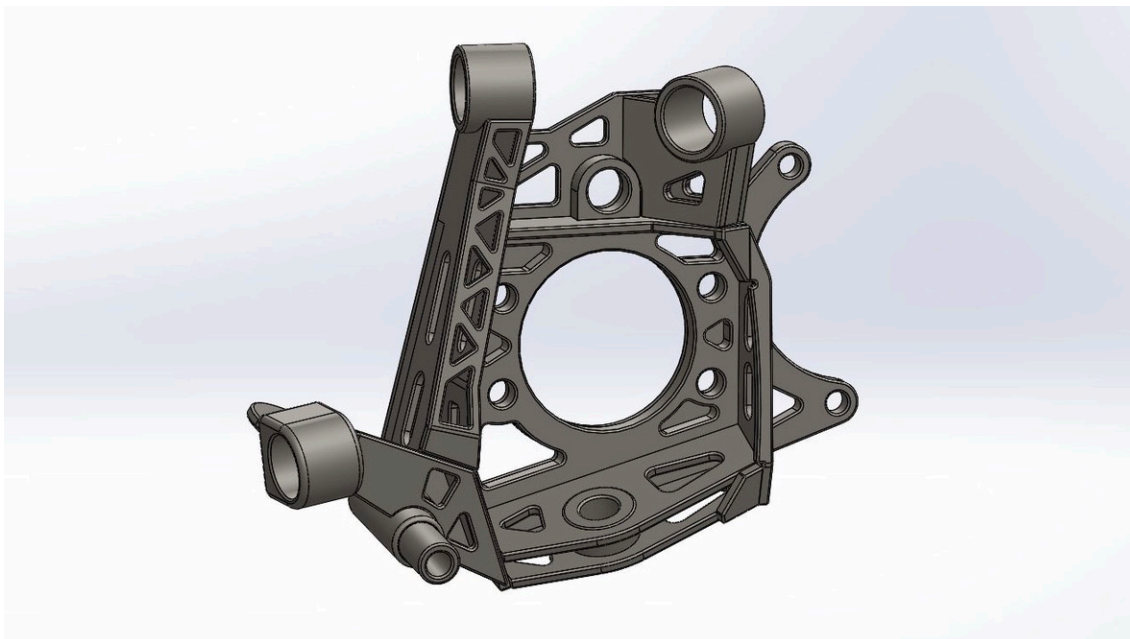
Myös uuden olka-akselin mallintamiseen käytettiin Solidworks -mekaniikkasuunnitteluohjelmistoa. Mallinnus tehtiin Assembly -tiedostona, joka koostui useammasta Part -tiedostosta toisin kuin alkuperäisen olka-akselin kolmiulotteinen malli, joka mallinnettiin yhtenä Part -tiedostona. Myöhempänä nämä ovat mainittuna lyhyemmin kokoonpanona ja osana. Uudelleen suunniteltu olka-akselikokoonpano rakentui muotoon leikatuista ja tarvittaessa särmätyistä teräslevyistä sekä tukivarsien kiinnityksen nivellaakereita varten koneistetuista laakerinkannattimista.

Olka-akselikokoonpanon 3D-mallinnus aloitettiin mallintamalla tukivarsien kiinnityspisteiden nivellaakereita varten sylinterimäiset laakerinkannattimet. Joustintuen kiinnitystä varten suunniteltiin pitkä sylinterimäinen kappale, joka tulisi olemaan koko pituudeltaan kiinni olka-akselin rungossa tukien samalla koko kokoonpanon rakennetta. Olka-akselikokoonpanon pääpiirteinen muoto alkoi hahmottua, kun laakerienkannattimet ja joustintuen kiinnike asetoitiin paikoilleen kolmiulotteiseen avaruuteen. Laakerinkannattimet ja joustintuen kiinnitys pystyttiin asemoimaan 3D-skannatusta alkuperäisestä olka-akselista saatujen tarkkojen sijaintien ja asentojen perusteella.

Tässä vaiheessa suunnittelutyötä oli tehty alustavia lujuuslaskentoja alkuperäiselle olka-akselille ja tulosten perusteella päädyttiin suunnittelemaan olka-akselin rungon osat 5

mm:n paksuisesta teräsohutlevystä. Tiedossa oli myös minkä suuntaisia voimia laakerinkannattimiin tulisi kohdistumaan, jolloin ohutlevyistä valmistetut osat saatiin asemoitua niin, että ne ovat vastaanottamassa jännityksiä mahdollisimman hyvin. Ohutlevyiset osat piirrettiin ja mallinnettiin suoraan kokoonpanoon yksittäisinä osina, käyttäen Solidworksin Sheet metal -työkalua.

Olka-akselin rungoksi muodostui ulkoisilta mitoiltaan suurin 5 mm:n paksuisesta teräsohutlevystä leikattu kappale, joka yhdistää koko olka-akseli rakenteen ja johon on suoraan sijoitettu pyöränlaakerin kiinnitysreiät. Pyöränlaakerin kiinnityksen vahvistamiseksi ja koko olka-akselin tukemiseksi runkolevyyn lisättiin 10 mm:n paksuisesta teräsohutlevystä leikattu kappale. Olka-akselin rungoksi muodostunut kappale piirrettiin suoraan kokoonpanoon pyöränlaakerin kiinnityksen tasolle, laakerinkannattimien sijaintien asettamissa rajoissa. Kappaleen muotoa muokattiin tarvittaessa muiden osien mallintamisen ohella. Jarrusatulan kiinnitystä varten 10 mm:n paksuiseen ohutlevyyn lisättiin ulokkeet ja reiät niiden alkuperäisiin sijainteihin. 10 mm:n paksuista tukilevyä ja koneistettavia laakerinkannattimia lukuun ottamatta kaikki olka-akselin kokoonpanossa käytettävät osat suunniteltiin valmistettavaksi 5 mm:n paksuisesta teräsohutlevystä Sheet metal -työkalulla. Rungon ja laakerinkannattimet toisiinsa yhdistävät pienemmät ohutlevy osat piirrettiin myös suoraan kokoonpanoon yksittäisinä osina. Laakerinkannattimiin kiinnittyviin osiin tehtiin juuri oikean kokoiset leikkaukset Extruded cut -työkalulla hyödyntäen laakerinkannattimien ja rungon geometrioita. Uuden olka-akselin lopullinen kokoonpano on tarkasteltavissa kuvassa 13.



Kuva 13. Uudelleen suunnitellun olka-akselin lopullinen kokoonpano

Uuden olka-akselin kolmiulotteinen mallintaminen oli melko pitkä prosessi. Mallintaminen ei onnistunut yhdeltä istumalta, kuten oli jo alkuun epäilty. Olka-akselikokoonpano mallinnettiin riittävän useista osista, jotta yksittäiset osat pysyivät tarpeeksi yksinkertaisina niiden valmistettavuutta silmällä pitäen. Kun uuden olka-akselin malli alkoi hahmottua, hiottiin se lopulliseen kokoonpanoonsa muutamien FEM-lujuuslaskentakierrosten jälkeen.

Suunnittelutyön aikana tehtyjen lujuuslaskentojen tulosten avulla olka-akselin rakennetta pystyttiin optimoimaan. Lujuuslaskentojen avulla olka-akselin kestävyttä ja painoa saatiin säädettyä haluttuun suuntaan, jolloin olka-akselista saatiin huomattavasti kestävämpi ja kevyempi ensimmäisiin kokoonpanoihin verrattuna. Uuden olka-akselin kestävyys oli suurimmassa arvossa olka-akselia suunnitellessa, sillä sen tuli vastata ominaisuuksiltaan alkuperäistä. Suunnittelun aikana tehdyistä lujuuslaskennoista havaittujen epäkohtien avulla saatiin olka-akselin kestävyttä parannettua lisäämällä rakenteeseen tukielementtejä paikkoihin, joissa havaittiin suurimpia jännityksiä.

Olka-akselin massaa ei pidetty yhtä suuressa arvossa kuin sen kestävyyttä. Suunnittelun ohjeena kuitenkin pidettiin, ettei uusi olka-akseli saisi olla alkuperäistä painavampi, minkä johdosta ajoneuvon jousittamaton massa ei kasvaisi olka-akselista johtuen. Uuden olka-akselin massaa pystyttiin kontrolloimaan tekemällä rakenteisiin kevennyksiä osiin, jotka säilyttivät tarvittavan kestävyuden kevennyksistä huolimatta. Lujuuslaskennoista saatujen tulosten myötä lisättyjen tukielementtien mukanaan tuomaa massaa saatiin minimoitua, tekemällä myös lisättyihin tukirakenteisiin kevennyksiä ja näin olka-akselin kokonaismassa saatiin pysymään alkuperäistä olka-akselia alhaisempana.

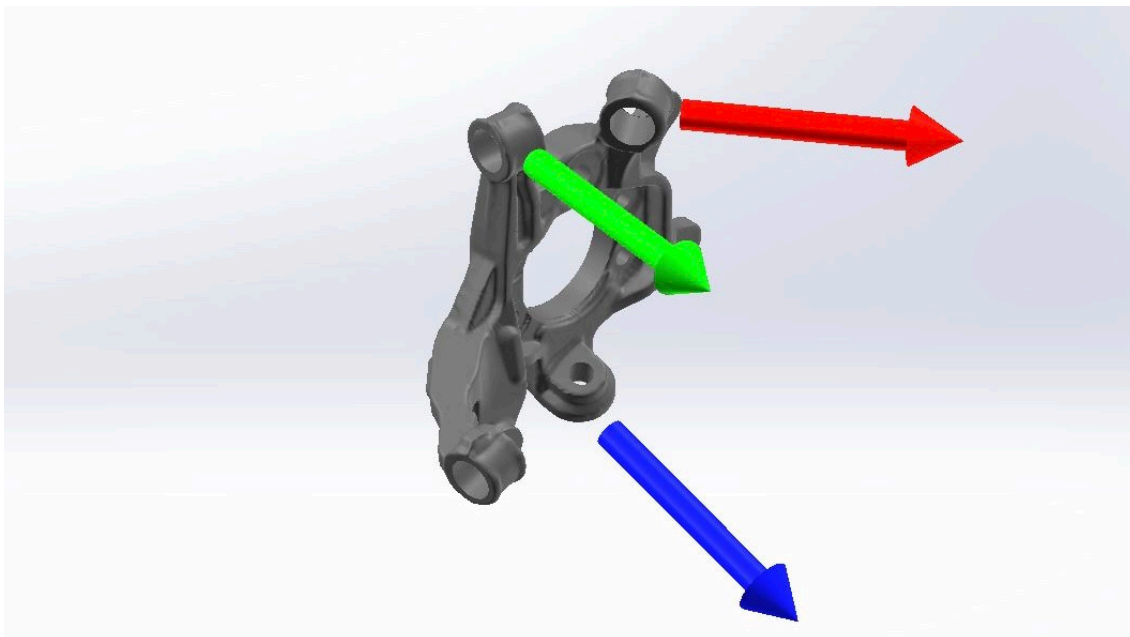
#### 4.2.3 Materiaalin valinta

Uuden olka-akselin materiaaliksi valittiin AISI 4130 -teräs, joka löytyy valmiiksi konfiguroituna Solidworksin materiaaliluettelosta. Materiaalin valintaan ei käytetty erityisemmin aikaa vaan materiaali valittiin ohjelmistoon valmiiksi konfiguroiduista materiaalivaihtoehdoista se, joka olisi todellisuudessaakin potentiaalinen valinta tämäntyyppisen olka-akselin valmistuksessa. Materiaalin valintaan vaikuttivat lisäksi sen ominaisuudet kestävyuden ja työstettävyyden osalta.

## 5 Tulokset

### 5.1 Voimien tarkastelu

Uuden olka-akselin suunnittelua sekä uuden ja vanhan olka-akselin ominaisuuksien vertailua varten täytyi olka-akseliin kohdistuvat voimat selvittää. Ensimmäinen tarkasteltiin tukivarsien tehtäviä ja niiden kiinnityskulmia, jotta saatiin käsitys, minkä suuntaisia voimia olka-akseliin kohdistuu. Kuvassa 14 on nuolilla esitettyä ala- ja ylätukivarsien tukisuunnat. Alatukivarsi on esitetty yhdellä sinisellä, taaempi ylätukivarsi vihreällä ja etummainen ylätukivarsi punaisella nuolella.



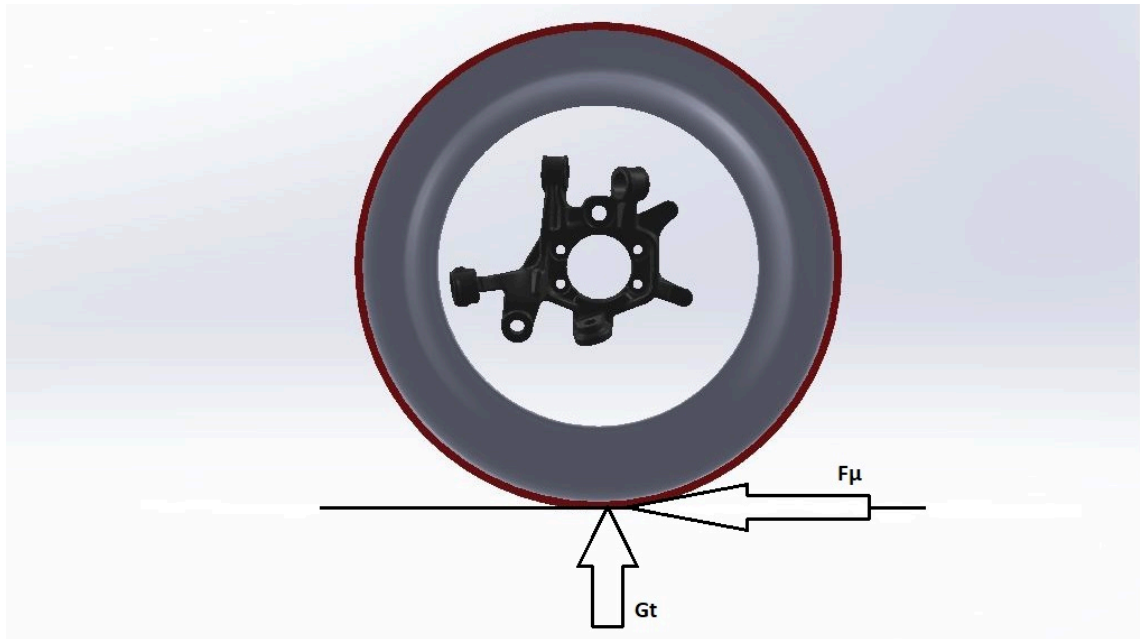
Kuva 14. Pyöräntuentaan kohdistuvia voimia

Tukivarsien asentoja tarkastellessa ajateltiin, että sivuttaisvoimia vastaanottamassa ovat alatukivarsi ja molemmat ylätukivarret. Ylätukivarsista taaemman ajateltiin ottavan suurempi osa sivuttaisvoimasta vastaan kuin etummaisena. Etummainen tukivarsi on suunnattu enemmän pituus kuin sivuttaissuunnassa. Taaempi ylätukivarsi on puolestaan lähes suoraan kohtisuoraan ajoneuvon pituus suuntaan nähden. Raidetangon kiinnitykseen kohdistuva sivuttaisvoima jätettiin huomiotta lujuuslaskennan yksinkertaistamiseksi.

## 5.2 Lujuuslaskennassa käytetyt voimat

Olka-akselien ominaisuuksia vertailtiin äärimmäisessä ajotilanteessa olka-akseliin sivusuunnassa vaikuttavien voimien avulla. Laskelmien mukainen äärimmäinen ajotilanne voi olla esimerkiksi tilanne, jossa auto ajetaan sivusuunnassa renkaan kylki edellä kiinteään esteeseen. Kuvassa 15 esitettynä renkaaseen vaikuttavia voimia. Laskut suoritettiin MATLAB-laskentaohjelmalla.





Kuva 15. Renkaan kosketuspinnalla vaikuttavat voimat

Takareenkaaseen vaikuttavaa painovoimaa laskettaessa ajateltiin ajotilanteen olevan sellainen, että puolet taka-akselilla olevasta massa kohdistuu törmäyksessä olevaan renkaaseen. Lisäksi oletettiin, että auton painojakauma on 55/45, jolloin taka-askelilla kohdistuu 45 % auton kokonaismassasta. Renkaaseen vaikuttava painovoima  $G_t$  laskettiin kaavalla

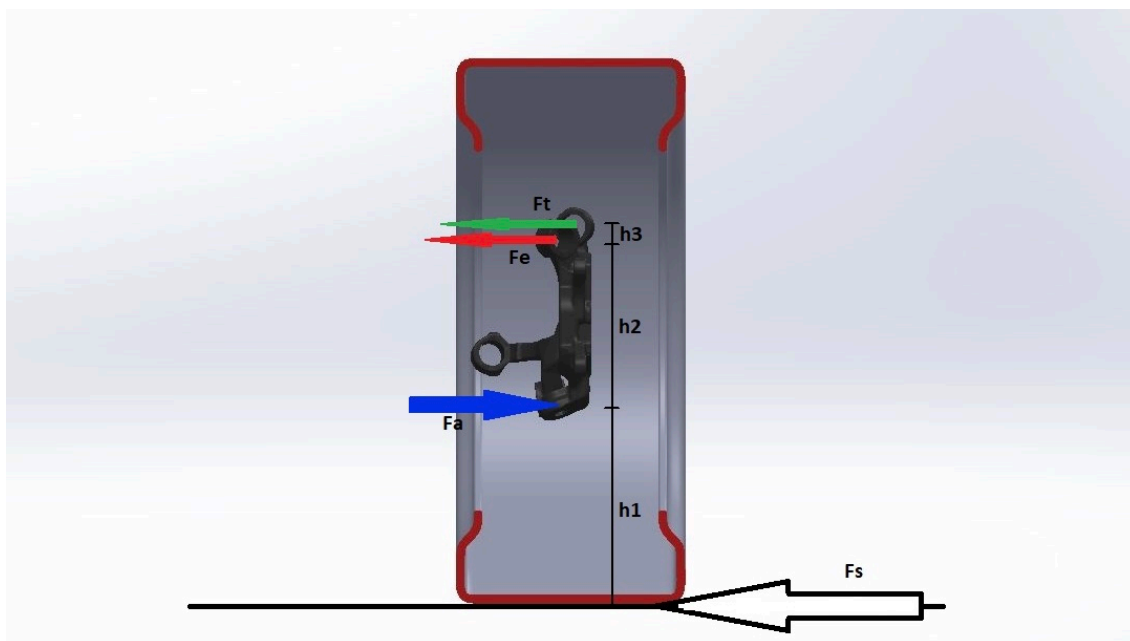
$$G_t = \frac{m * 0,45 * g}{2}$$

Kitkavoimaa laskettaessa oletettiin kitkakertoimen olevan 1, sillä renkaan ajateltiin olevan juuri luiston rajalla. Renkaaseen vaikuttava kitkavoima  $F_\mu$  laskettiin kaavalla

$$F_\mu = G_t * \mu$$

Takarenaan kosketuspinnalla vaikuttavaa sivuttaisvoimaa laskettaessa ajateltiin sivuttaiskiihtyvyyden olevan 3 G-voimaa pahimman mahdollisen ajotilanteen omaisesti. Sivuttaisvoima saatiin laskettua edellä lasketun renkaaseen vaikuttavaa kitkavoimaa käyttäen. Kuvassa 16 esitettynä renkaaseen ja pyöräntuentaan kohdistuvia voimia sivuttaisuunnassa. Sivuttaisvoima  $F_s$  laskettiin kaavalla

$$F_s = F_{\mu} * 3$$



Kuva 16. Renkaaseen ja pyöräntuentaan vaikuttavia voimia sivusuunnassa

Kun renkaaseen vaikuttava sivuttaisvoima  $F_s$  oli tiedossa, oli mahdollista selvittää pyöräntuentaan sivusuunnassa vaikuttavat voimat momenttiyhtälöiden avulla. Momenttiyhtälöissä kappale on täysin staattisessa tilassa, jolloin kappaleeseen vaikuttava kokonaismomentti on 0Nm. Laskelmia myös yksinkertaistettiin niin, että tukivarsien kiinnityspisteisiin vaikuttavien momenttien oletettiin olevan myös 0Nm. Momenttiyhtälöt tehtiin kaikkien kolmen tuntemattoman voiman pisteisiin eli ala- ja ylätukivarsien kiinnityspisteisiin. Pyöräntuentaan kohdistuvaa kuormitusilannetta tarkastellen tehtiin myös oletus, että raidetangon kiinnitykseen ei kohdistuisi merkittäviä voimia ja jätettiin se kokonaan lujuuslaskennan ulkopuolelle.

Momenttiyhtälöt olivat seuraavat:

- Pisteessä A vaikuttava momentti

$$M_A = F_e * h_2 + F_t * (h_2 + h_3) - F_s * h_1$$

- Pisteessä T vaikuttava momentti

$$M_t = F_a * (h_2 + h_3) - F_e * h_1 - F_s * (h_1 + h_2 + h_3)$$

- Pisteessä E vaikuttava momentti

$$M_e = F_t * h_3 + F_a * h_2 - F_s * (h_1 + h_2)$$

Kun momenttiyhtälöistä saatiin ratkaistua tukivarsien kiinnityspisteisiin vaikuttavat voimat, voitiin todeta, että ainoastaan ala- ja taaemman ylätukivarren kiinnityspisteeseen vaikuttaa komponenttien lujuuslaskennan kannalta merkittäviä voimia sivusuunnassa.

Olka-akselien lujuuslaskelmissa käytettiin laskuista saatuja voimia. Lujuuslaskelmissa määritettiin alatukivarren kiinnityspisteeseen kohdistumaan 17 kN:n voima ja taaemman ylätukivarren kiinnityspisteeseen 9 kN:n voima sivuttaissuunnassa.

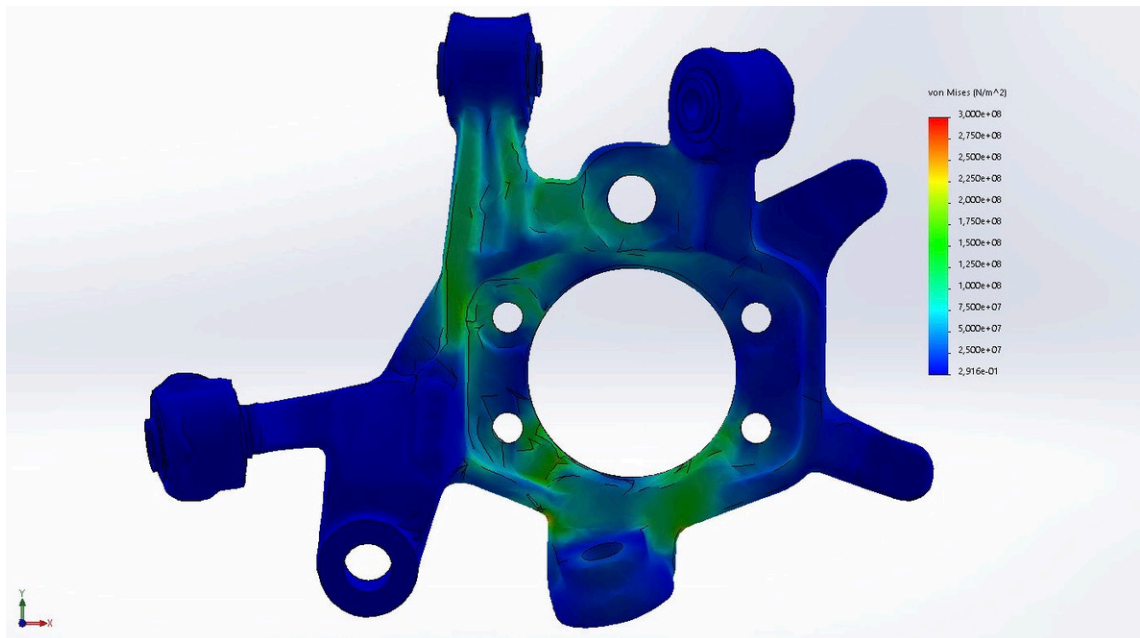
### 5.3 Ominaisuuksien vertailu

Olka-akselien ominaisuuksia vertailtiin lujuuslaskennan tuloksien avulla. Kappaleille tehdyt lujuuslaskennat suoritettiin elementtimenetelmällä Solidworksin Simulation -lisäosalla staattisella analyysillä. Edellä lasketut voimat määritettiin kohdistumaan taaemman ylätukivarren sekä alatukivarren kiinnityspisteisiin. Uuden ja vanhan olka-akselin lujuuslaskennassa käytettiin samalaista kuormitusta. Käytetty kuormitustilanne ei vastaa täysin

todellista törmäystilannetta, mutta tämäntyyppistä kuormitusta voidaan käyttää kahden vertailtavan kappaleen ominaisuuksien vertailussa.

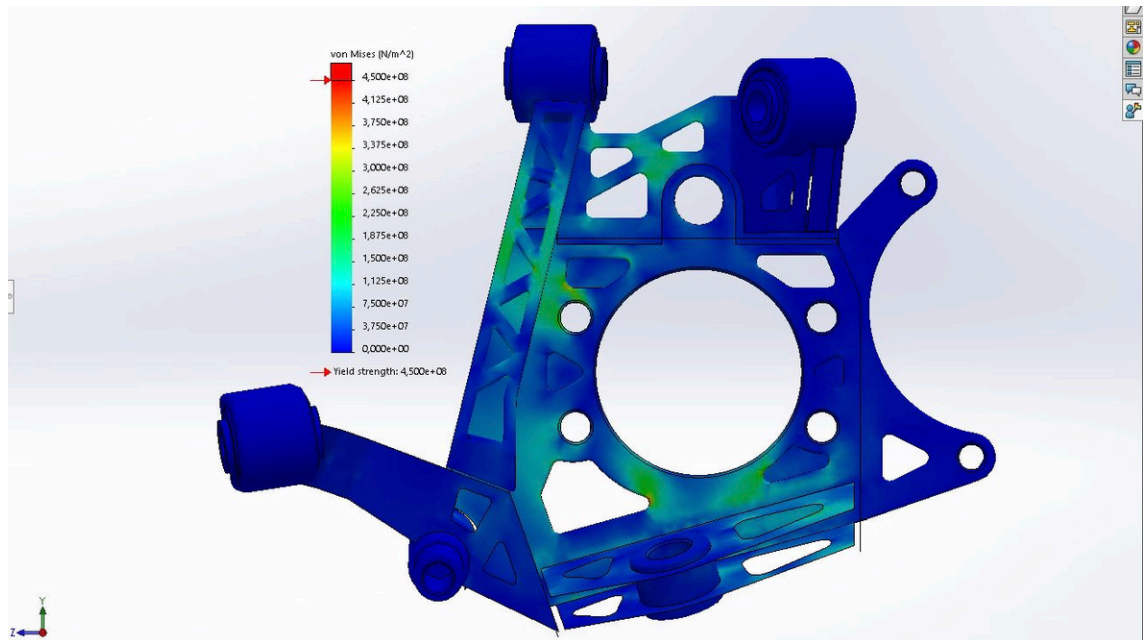
Lujuuslaskentaa varten ylätukivarren kiinnityspisteeseen mallinnettiin kiinteä kappale, jäljittelemään nivellaakeria. Nivellaakerit ovat yleisesti kilpa-autokäytössä käytettyjä, tukivarsien alkuperäisten kumilaakerointien tilalle asennettavia metallisia laakerointeja. Nivellaakerien avulla alustan säädöt pysyvät ajon aikana haluttuina sekä alustan käyttäytymisestä tulee ennustettavampaa ja vakaampaa.

Molempien olka-akselin laskentamalleille suoritettiin lujuuslaskennat käyttäen samoja kuormituksia. Lujuuslaskennoissa olka-akseleihin määritettiin kiinnitys pyöränlaakerin kiinnityksen kohdalle. Pyöräntuentaan kohdistuvat voimat määritettiin kohdistumaan tukivarsien kiinnityspisteisiin. Lujuuslaskennoissa määritettiin taaemman ylätukivarren kiinnityspisteeseen kohdistumaan 9 kN:n voima ja alatukivarren kiinnityspisteeseen 17 kN:n voima sivuttaissuunnassa. Olka-akselien kestävyttä vertailtiin enimmäkseen Von Mises -jännitystilojen perusteella. Vertailussa tarkasteltiin myös tukivarsien kiinnityspisteiden enimmäissiirtymiä. Kuvassa 17 on tarkasteltavissa alkuperäisen olka-akselin Von Mises -jännitystila määritetyllä kuormituksella.



Kuva 17. Alkuperäisen olka-akselin laskentamallin jännitystila

Lujuuslaskentojen tuloksien jännitystilojen tarkastelun perusteella oltiin tyytyväisiä uudelleen suunniteltuun olka-akseliin. Jännitystilat olivat melko samantyyppisiä vanhan ja uuden olka-akselin laskentamalleissa. Jännitykset olivat selkeästi suurempia uuden olka-akselin laskennoissa, mutta jännitykset pysyivät kuitenkin selkeästi alle uuden materiaalin myötölujuuden. Uuden olka-akselin Von Mises -jännitystila nähtävillä kuvassa 18. Uuden olka-akselin jännitystilassa on havaittavissa kolmessa pisteessä suuri pistemäinen jännitys. Nämä pistemäiset jännityksen kohdistuvat kappaleeseen tehtyjen kevennyksien nurkkiin, ja nämä suuret pistemäiset jännitykset saataisiin luultavasti poistumaan kevennyksien muotoja ja reunapyöristyksiä muuttamalla.



Kuva 18. Uuden olka-akselin laskentamallin jännitystila

Uuden olka-akselin mallille suoritettiin lujuuslaskenta useaan kertaan ja mallia muutettiin tuloksista saatujen tietojen avulla. Uuden olka-akselin malli oli lujuuslaskentojen alkupuolella hyvin erinäköinen, ja suurimpana muutoksena lujuuslaskentoja edeltävään mal-

liin pidetään kuvassa 18 näkyvän vasemmanpuoleisen ylätukivarren kiinnityksestä alaspäin suuntaavan tukilevyn lisäämistä olka-akseliin. Tuen lisääminen tähän kohtaan muutti olka-akselin kestävyyttä merkittävästi.

Lopputulena uudelleen suunniteltuun olka-akseliin ollaan tyytyväisiä. Mikäli olka-akselia ryhdytään valmistamaan, on tarkoituksena jatkokehittää olka-akselia valmistuksen ja käytännön testauksen myötä huomattavien puutteiden ja kehitysideoiden avulla.

## Lähteet

- 1 Thayer, Ken. 2017. How does reverse engineering work?. Verkkoaineisto. Engineering360. <https://insights.globalspec.com/article/7367/how-does-reverse-engineering-work> >. 8.12.2017. Luettu 1.5.2020.
- 2 Flynt, Joseph. 2020. Structured light 3D scanning: What is it and how does it work?. Verkkoaineisto. 3dinsider. <https://3dinsider.com/structured-light-3d-scanning/>>. 10.1.2020. Luettu 2.12.2020.
- 3 Georgopoulos A.; Ioannidis Ch. & Valanis A. 2010. Assessing the performance of a structured light scanner. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 38, s. 250-255.
- 4 Rangevision ScanCenter 2016.2. Verkkoaineisto. Rangevision. [https://www.rangevision.eu/wp-content/uploads/2016/08/Scan\\_Center\\_Pro\\_eng.pdf](https://www.rangevision.eu/wp-content/uploads/2016/08/Scan_Center_Pro_eng.pdf)>. Luettu 7.12.2020.
- 5 RangeVision Spectrum. Verkkoaineisto. Rangevision. <http://www.rangevision.eu/rangevision-spectrum/>>. Luettu 13.5.2020.
- 6 Lähteenmäki, M. Elementtimenetelmän perusteet. Verkkoaineisto. [https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/johdanto.pdf](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf)>. Luettu 16.11.2020
- 7 Lemonis, M. 2020. Properties of tetrahedron. Verkkoaineisto. Calcresource. <https://calcresource.com/solid-tetrahedron.html>>. Päivitetty 4.5.2020. Luettu 1.12.2020.
- 8 Haltherman, TE. 2015. Hawk Ridge Systems and ATR soft create xBOM tool for SOLIDWORKS. Verkkoaineisto. 3Dprint. <https://3dprint.com/44267/xbom-tool-for-solidworks/>>. 13.2.2015. Luettu 11.10.2020.
- 9 Tietoja Solidworksista. Verkkoaineisto. Solidworks. [https://www.solidworks.fi/sw/6453\\_SVF\\_HTML.htm](https://www.solidworks.fi/sw/6453_SVF_HTML.htm)>. Luettu 11.10.2020.
- 10 Heiing B. & Ersoy M. 2011. Chassis handbook fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives. Berlin: Springer Fachmedien.

## Pyöräntuentaan vaikuttavat sivuttaisvoimat

Määritetään tiedetyt arvot:

```
format shortG
h1 = 222.89 * 10^(-3); % m
h2 = 202.56 * 10^(-3); % m
h3 = 13.56 * 10^(-3); % m

m = 1250; % kg
g = 9.82; % m/s^2
myy = 1;
x = 3; % Paatetty kerroin kiihtyvyydelle
b = 0.45; % Taka-akseliin kohdistuva massan osuus

Ma = 0;
Mt = 0;
Me = 0;
```

Yhdellä takarenkaalla vaikuttava painovoima:

$$G_t = (m * b * g) / 2$$

$$G_t = 2761.9$$

Lasketaan renkaan kosketuspinnalla vaikuttava kitkavoima:

$$F_{myy} = G_t * myy$$

$$F_{myy} = 2761.9$$

Lasketaan renkaan kosketuspinnalla vaikuttava sivuttaiskitkavoima päätetyllä kiihtyvyyden kertoimella:

$$F_s = F_{myy} * x$$

$$F_s = 8285.6$$

```
syms Fe;
syms Fa;
```



```
syms Ft;
```

Pisteessä A vaikuttavat momentit:

```
eq1 = Ma == Fe * h2 + Ft * (h2 + h3) - Fs * h1;
```

Pisteessä T vaikuttavat momentit:

```
eq2 = Mt == Fa * (h2 + h3) - Fe * h1 - Fs*(h1 + h2 + h3);
```

Pisteessä E vaikuttavat momentit:

```
eq3 = Me == Ft * h3 + Fa * h2 - Fs * (h1 + h2);
```

Ratkaistaan pisteisiin A, T ja E vaikuttavat voimat

```
sol = solve(eq1, eq2, eq3);  
Fa = double(sol.Fa)
```

```
Fa = 16831
```

```
Ft = double(sol.Ft)
```

```
Ft = 8545.2
```

```
Fe = double(sol.Fe)
```

```
Fe = -2.2084e-12
```

Pyöristettynä:

Fa = 17kN

Ft = 9kN

Fe = 0kN