

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

JOUSTAVAN KAPPALEEN LUOMINEN VALMIISTA GEOMETRIASTA  
SIMULOINTIOHJELMISTOON  
CREATION OF A FLEXIBLE BODY FROM A RIGID BODY INTO A SIMULATION  
SOFTWARE

Lappeenrannassa 10.6.2014

Henri Laamanen

## SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTELO

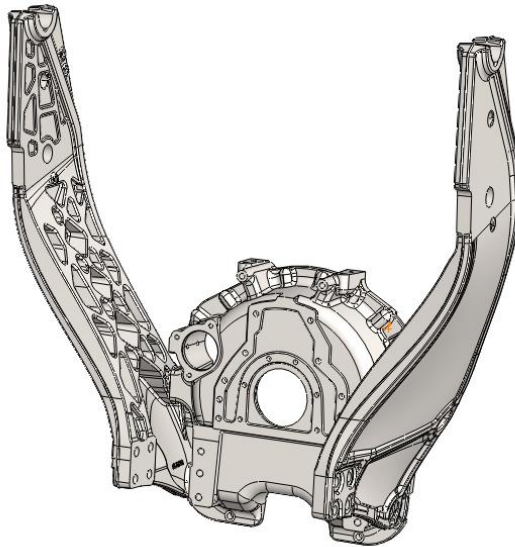
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>4</b>
1.1 Työn tausta .....	5
1.2 Työn tavoitteet.....	5
1.3 Työn rajaus .....	5
<b>2 MENETELMÄT.....</b>	<b>7</b>
2.1 Monikappalejärjestelmät .....	7
2.1.1 Joustavat monikappalejärjestelmät .....	9
2.2 Joustavuuden kuvausmenetelmiä.....	9
2.2.1 Keskittyneiden massojen periaate.....	10
2.2.2 Kelluvan koordinaatiston menetelmä.....	11
2.3 Elementtimenetelmä .....	12
2.3.1 3D-mallinnuksessa käytettäviä elementtejä .....	13
2.3.2 Ominaisarvot ja –taajuudet.....	15
2.4 Osarakennetekniikka.....	16
<b>3 TUTKITTAVA RAKENNE.....</b>	<b>18</b>
3.1 Tutkittavan rakenteen esittely.....	18
3.2 Käytettävät ohjelmistot ja työvaiheet.....	19
3.3 Geometrian yksinkertaistaminen .....	21
3.4 Joustavan kappaleen luominen .....	25
3.5 Ominaistaajuuksien määrittäminen.....	28
3.6 Simulointi .....	29
<b>4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....</b>	<b>32</b>
<b>5 YHTEENVETO.....</b>	<b>37</b>
<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>39</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>41</b>

## SYMBOLILUETTELO

$n_b$	Systeemin kappaleiden lukumäärä
$n_c$	Systeemin rajoitteiden yhteenlaskettu summa
$\mathbf{A}$	Transformaatiomatriisi, kiertomatriisi
$\mathbf{R}^i$	Kappaleen $i$ lokaalin koordinaatiston sijainti globaalissa koordinaatistossa
$\mathbf{r}^i$	Kappaleen $i$ sijaintivektori globaalissa koordinaatistossa
$\bar{\mathbf{u}}_0^i$	Kappaleen $i$ sisältämän pisteen sijaintivektori lokaalissa koordinaatistossa
$\bar{\mathbf{u}}_f^i$	Kappaleen $i$ aseman muutos deformaatiossa
$\mathbf{x}$	Paikkavektori ajan suhteen
$\ddot{\mathbf{x}}$	Kiihtyvyyksivektori
$M$	Massamatriisi
$K$	Jäykkyyssmatriisi
$\mathbf{q}$	Vakiovektori
$t$	Aika
$j$	Imaginääriyksikkö
$\tilde{K}$	Massanormeerattu jäykkyyssmatriisi
$\mathbf{v}$	Vakiovektori
$\mathbf{I}$	Yksikkömatriisi

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kuinka monimutkainen valukappale tulisi yksinkertaistaa ilman, että sillä on merkittävää vaikutusta laskentatuloksissa. Yksinkertaistettujen kokoonpanojen simuloinneista saatavien tulosten tulisi silloin olla riittävän lähellä alkuperäisen kokoonpanon simuloinneista saatuja tuloksia. Laskentatuloksia varten tulee alkuperäisistä ja yksinkertaistetuista kappaleista tehdä joustavat kappaleet ja verrata niiden simuloinnista saatuja tuloksia. Kandidaatintyössä tutkitaan kuvan 1 mukaista traktorin vauhtipyöräkotelon ja siihen liitettävien runkosovitteiden kokoonpanoa.



**Kuva 1.** Kandidaatintyössä tutkittava rakenne.

Elementtimenetelmällä voidaan luoda todellisia kappaleita ja ilmiötä kuvaava diskreetti malli. Elementtimenetelmällä luodun mallin analysointiin kuuluva aika on riippuvainen mallin verkotuksen suuruudesta ja verkotukseen käytetyistä elementeistä. Analyysistä saadun tuloksen tarkkuus on riippuvainen käytettyjen elementtien määrästä ja laadusta. Korkeamman asteluvun elementeillä saadaan tutkittavaa ilmiötä havainnollistettua tarkemmin, mutta samalla se nostaa ratkaisijalta vaadittavaa suorituskykyä. Simuloinnilla voidaan mallintaa systeemin toimintaa ja käyttäytymistä. Yksinkertaisimmillaan simuloinnissa käytetään jäykkiä kappaleita, joille asetetaan reunaehdoja, ja tarkastellaan niiden liikettä toistensa suhteen simuloinnin aikana. Tällöin voidaan esimerkiksi mitata yksittäisen kappaleen liikerataa. Yhdistämällä simuloinnin ja elementtimenetelmän,

voidaan perinteisestä jäykkien kappaleiden muodonmuutosten tarkastelusta jatkaa kappaleiden joustavuuden ominaisuuksien kuvaamiseen simuloinnissa. Käytännössä mekaanisen jäsenen joustoa ei tarvitse ottaa huomioon, mutta erityistapausten, kuten törmäysten ja ääritilanteiden, simuloinnissa mekaanisen jouston kuvaus antaa paljon lisätietoja systeemin käyttäytymisestä (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 3.).

### 1.1 Työn tausta

Kandityöaihe on Valtra Oy Ab:n tarjoama koneensuunnittelun kandidaatintyö LUT Koneelle. Valtra Oy Ab on Valtra-traktoreiden valmistaja, markkinoija ja toimittaja. Yrityksen juuret ovat lähtöisin vuodelta 1932 ja Valtra-traktoreita on valmistettu vuodesta 1951 (Valtra, 2014). Valtra Oy Ab toimitti CAD-mallit kappaleista yksinkertaistamista ja simulointia varten.

### 1.2 Työn tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on löytää tehokas tapa joustavien kappaleiden kuvaamiselle ADAMS simulointiohjelmistossa. Työssä selvitettiin kuinka monimutkainen geometria tulisi yksinkertaistaa ilman, että sillä on merkittävää vaikutusta laskennallisiin tuloksiin. Geometrian yksinkertaistamista varten käytettiin kaupallista 3D CAD ohjelmistoa. Geometrioista tehtiin joustavan kappaleen tiedostot eli MNF-tiedostot (Modal Neutral File) simulointia varten. MNF on joustavan kappaleen tiedosto, joka pitää sisällään oleelliset joustavan kappaleen tiedot kuten massan, inertian, ominaistajuudet ja ominaismuodot (Zhang, Zhong, Gao & He, 2010, s. 1.). Lisäksi selvitettiin eri parametrien vaikutusta MNF-tiedoston luonnissa mallin koon ja tarkkuuden kannalta. Selvitetään mitkä tekijät vaikuttavat MNF-tiedoston luomisessa ja kuinka tiedostokoot muuttuvat geometriaa yksinkertaistettaessa.

### 1.3 Työn rajaus

Työtä rajattiin yksinkertaistamisen osalta niin, että tehtiin kaksi yksinkertaistamisen tasoa vauhtipyöräkotelolle ja runkosovitteille, ja verrattiin kuinka suuret erot näiden analyysien välillä on. Geometrian yksinkertaistamista varten ei ole varsinaisia ohjeita tai kirjallisuutta vaan on ainoastaan nyrkkisääntöjä, jolloin varsinaista määrättyä tapaa yksinkertaistaa ei ole. Yksinkertaistamisessa pyrittiin keskittymään kohtiin, joissa suuria

elementtikeskittymiä syntyy kappaleita verkotettaessa. Näitä kohtia ovat erityisesti reiät, pyöristykset sekä pienet yksityiskohdat, johonka elementtiverkkoa automaattisesti verkotettaessa syntyy suuria elementtikeskittymiä.

Yksinkertaistamisen vaikutusta laskentatuloksiin rajattiin tutkimalla yksittäisten kappaleiden kymmenen ensimmäisen vapaan kappaleen ominaistuuksia ja vertailemalla niitä yksinkertaistustasojen kesken. Yksinkertaistamisen vaikutusta laskentatuloksiin rajattiin käsittämään simuloinnin yksinkertaisimmilla kokoonpanoilla simulointiohjelmistoissa, koska laskentakapasiteetti eri riittänyt raskaampien mallien simulointiin. Simuloinneissa kiinnitettiin erityisesti huomiota runkosovitteiden päiden siirtymiin.

## 2 MENETELMÄT

Kaupalliset simulointiohjelmit käyttävät yleisimmin monikappaledynamiikan mallintamisessa kelluvan koordinaatiston menetelmää. Kelluvan koordinaatiston menetelmässä kappaleen orientaatiota tarkastellaan globaalin koordinaatiston ja kappaleessa olevan kelluvan koordinaatiston suhteen. Kandidaatintyössä käytetään kappaleiden simuloimiseen ANSYS ja ADAMS –simulointiohjelmistoja. Näiden ohjelmistojen käyttämiä monikappadynamiikan teorioita käydään läpi tässä kappaleessa.

Joustavan kappaleen luominen simulointiohjelmiin tehdään yhteistyössä mallinnusohjelmiston ja elementtimenetelmän kanssa. Joustavan kappaleen luomista varten kappaleesta saatavilla oleva tietokonemalli verkotetaan, jonka jälkeen joustavan kappaleen luomista varten tarvittava ohjelma ajetaan. Kandidaatintyössä käytetään joustavan kappaleen luomiseen ANSYS –ohjelmistoa.

### 2.1 Monikappalejärjestelmät

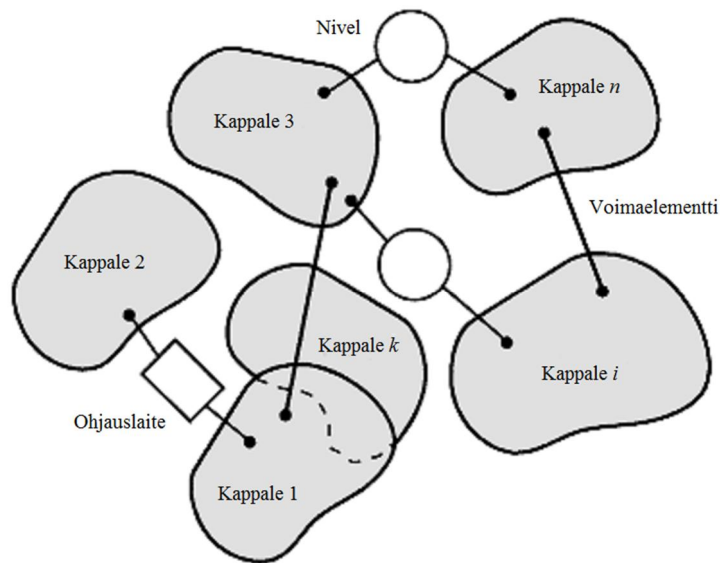
Monikappalejärjestelmiksi kutsutaan järjestelmiä, jotka koostuvat useista toisiinsa liitetystä jäykistä tai joustavista kappaleista. Monikappalejärjestelmiä ovat monet mekaaniset ja rakenteelliset järjestelmät, kuten ajoneuvot, robotit, mekanismit ja lentokoneet. Ne koostuvat useista toisiinsa kiinnitetyistä kappaleista, jotka läpikäyvät suuria siirtymiä ja kiertymiä. Yleisesti monikappalejärjestelmä määritellään koostumaan joukosta alijärjestelmiä. Näitä alijärjestelmiä ovat kappaleet, komponentit ja alirakenteet. Alijärjestelmien liike on kinemaattisesti rajoitettua. Rajoitteita aiheuttavat nivelet, joilla kappaleita liitetään toisiinsa. (Shabana, 1998, s. 1.)

Jäykän kappaleen aseman kuvaamiseen avaruudessa tarvitaan kuusi vapausastetta ja systeemin, joka koostuu  $n_b$  määrästä rajoittamattomia kappaleita, aseman kuvaamiseen tarvitaan  $6 \times n_b$  vapausasteita. Nivelet, kuten translaatio-, sarana-, tai sylinterinivelet, rajoittavat kappaleiden välistä liikettä. Translaationivel sallii kahden kappaleen välisen liikkeen vain yhteen suuntaan, jolloin translaationivel tuottaa viisi rajoitetta systeemiin, kuten myös sarananivel. Sylinterinivel sallii kappaleiden välisen liikkeen sekä kiertymisen liitoksen ympäri, jolloin rajoitteita on neljä. Systeemin rajoitteiden määrää kuvataan

skalaarilla  $n_c$ , joka kuvaa systeemin yhteenlaskettujen rajoitteiden summaa. Täten systeemin vapausteiden määräksi DOF (Degrees of freedom) saadaan:

$$DOF = 6 \times n_b - n_c \quad (1)$$

Yhtälöä 1 kutsutaan myös Kutzbachin kriteeriksi. (Shabana, 1998, s. 19.) Kuvassa 2 on esiteltyä esimerkki monikappalejärjestelmästä.



**Kuva 2.** Esimerkki monikappalejärjestelmästä (Shabana, 1998, s. 3, suomennos).

Monikappalejärjestelmien analyysit voidaan jaotella kahteen perustyyppiin, kinemaattiseen analyysiin ja kineettiseen analyysiin. Kinemaattinen analyysi koostuu käänteisen kinematiikan analyysistä. Kinemaattisissa analyyseissa tarkastellaan kappaleen liikettä geometrian pohjalta. Tällöin jätetään kappaleisiin vaikuttavat voimat huomioimatta. Kinemaattisissa analyyseissä tarkasteltavia suureita ovat kappaleiden liikeradat, liikenopeudet ja kiihtyvyydet ajan funktioina, kun kappaleiden geometria ja kappaleisiin kohdistuvat rajoiteyhtälöt tunnetaan. Kineettinen analyysi jakautuu staattiseen analyysiin, dynaamiseen analyysiin, linearisoituun dynaamiseen analyysiin ja käänteiseen dynaamiseen analyysiin. Kineettisissä analyyseissä tarkastellaan kappaleeseen vaikuttavien voimien ja niiden liiketilojen vuorovaikutusta. (Rouvinen, 2003, s 9-10)

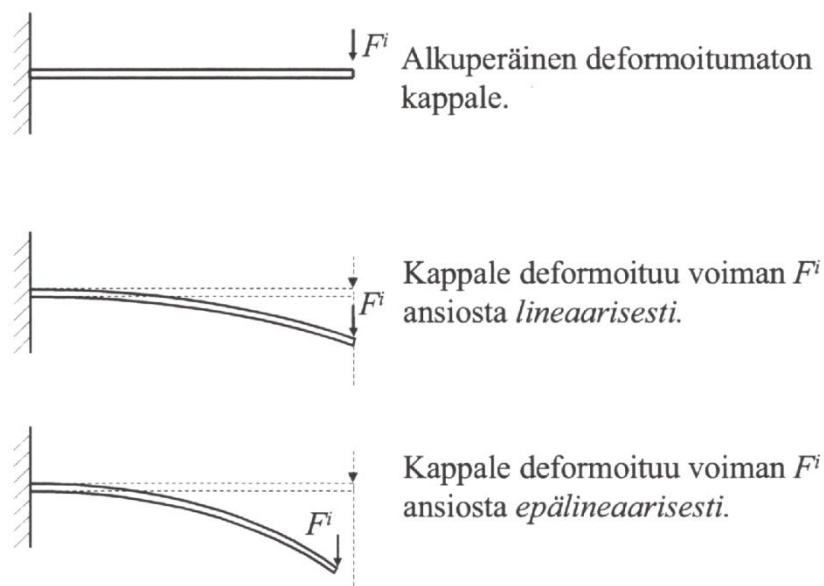


### 2.1.1 Joustavat monikappalejärjestelmät

Joustava monikappaledynamiikka liittyy sellaisten kappaleiden tietokonemallinnukseen, jotka läpikäyvät suuria siirtymiä ja kiertymiä sekä ovat rajoitetusti muuttuvia. Suuret siirtymät käsittävät jäykän kappaleen liikkeen kuten myös elastiset muodonmuutokset. Joustava monikappalejärjestelmä voi koostua elastisista ja jäykistä komponenteista, jotka ovat kiinnitettyinä toisiinsa nivelillä tai voimaelementeillä, kuten jousilla tai vaimentimilla. Nivelten rajoitteiden takia kappaleiden siirtymät systeemissä eivät ole täysin itsenäisiä. (Shabana, 1997, s. 1.)

### 2.2 Joustavuuden kuvausmenetelmiä

Mekanismien joustavuutta kuvattaessa oletetaan jouston olevan usein lineaarista, jolloin myös rakenteiden venymien oletetaan lineaarisesti riippuvaisiksi siirtymien suhteen. Tämä on toimiva periaate pienillä muodonmuutoksilla, jolloin esimerkiksi kuormitetun ja seinään jäykästi kiinnitetyn ulokepalkin taipuessa palkin vapaa pää pysyy sen alkuperäisessä vertikaalilinjassa. Suurilla muodonmuutoksilla samantyyppinen tilanne johtaisi epärealistiseen jouston kuvaukseen palkin pään pysyessä alkuperäisessä linjassa. Realistisempi joustavuuden kuvaus saadaan epälineaarilla jouston kuvauksella. Tällöin samanlaista palkkia kuormitettaessa palkki liikkuu sekä pysty- että vaakasuunnassa. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 3.) Epälineaaristen yhtälöryhmien ratkaisu on kuitenkin raskaampaa ja hankalampaa kuin lineaaristen yhtälöryhmien, jolloin ratkaisijalta vaaditaan enemmän laskentatehoa. Kuvassa 3 on esiteltyä esimerkkinä käytetyn palkin deformaatio lineaarisesti ja epälineaarisesti.



**Kuva 3.** Lineaarinen ja epälineaarinen deformaatio (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 3).

Joustavien systeemien dynaamiselle analyysille on olemassa vakiintuneita toimintamalleja. Yleisimmin käytettyjä ovat keskittyneiden massojen periaate ja kelluvan koordinaatiston menetelmä. Näiden lisäksi harvemmin käytettyjä menetelmiä ovat absoluuttisten solmukoordinaattien ja suurien kiertymävektorien menetelmät. Epälineaarisesti joustavien kappaleiden mallinnuksessa voidaan periaatteessa käyttää kaikkia edellä mainittuja menetelmiä. Keskittyneiden massojen menetelmä ottaa aina huomioon kappaleen epälineaarisen jouston, toisin kuin kelluvan koordinaatiston menetelmä, joka on vaikeasti laajennettavissa epälineaarisen jouston kuvaamiseen. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 4.)

### 2.2.1 Keskittyneiden massojen periaate

Yksinkertaisin tapa ottaa huomioon mekanismin jäsenen joustokäyttäytyminen on keskittyneiden massojen periaate. Periaatetta käytettäessä joustavana mallinnettava kappale jaetaan massapisteiksi ja niitä yhdistäviksi jousiksi. Massapisteiden väliin mallinnettavat jouset kuvaavat jäsenen joustoa. Jokaiselle massapisteelle luodaan jäykän kappaleen liikeyhtälöt. Avaruustapauksessa kahden massapisteen välille tarvittaisiin kuusi joustoa, kolme kuvaamaan massojen välistä translaatiojäykkyyttä ja kolme kiertojäykkyyttä. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 4.)

Joustavat jäsenet idealisoidaan kohtuullisen harvalla massapisteen joukolla, jolloin korkeita ominaistuuksia ei tule otettua huomioon. Keskittyneiden massojen periaate

sopiikin parhaiten palkkimaisille kappaleille, joilla on alhaisia ominaistuuksia. Menetelmä on sovellettavissa myös levymäisille kappaleille, mutta silloin ongelmaksi voi muodostua suuri massapisteiden määrä. Suuri määrä massapisteitä johtaa suureen differentiaaliyhtälöiden lukumäärään joka pitkittää simulointiaikoja. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 6.)

### 2.2.2 Kelluvan koordinaatiston menetelmä

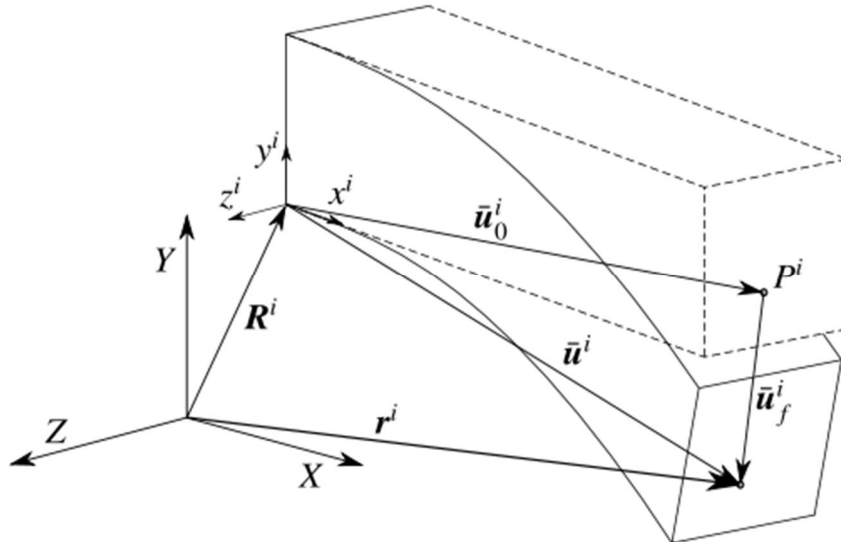
Kelluvan koordinaatiston menetelmässä mekaanisen jäsenen joustoa voidaan kuvata moodeja hyväksi käyttäen. Moodit ovat tyypillisesti kuvatun jäsenen ominaismuotoja, mutta voivat olla myös rakenteen oletettuja deformaatiomuotoja. Moodien avulla on periaatteessa mahdollista kuvata mielivaltaisen jäsenen joustava käyttäytyminen. Yleisin tapa jäsenen moodien muodostamiselle on elementtimenetelmä, jolloin hyödynnetään jäsenistä tehtyjä elementtimalleja. Tarvittavat moodit voidaan myös saada tekemällä valmiille rakenteelle moodianalyysi. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 7.)

Kelluvan koordinaatiston menetelmä on kaikkein yleisin menetelmä tietokoneavusteisessa joustavien monikappalejärjestelmien simuloinnissa. Sitä on käytetty useissa kaupallisissa kuin myös pelkästään tutkimukseen tarkoitetuissa tietokoneohjelmissa. Kelluvan koordinaatiston menetelmässä deformatuvien kappaleiden asetelmaa kuvataan kahdella vektorilla. Ensimmäinen vektori määrittelee valitun kappaleen sisäisen koordinaatiston sijainnin ja suuntautumisen. Toinen vektori määrittelee kappaleen deformaation suhteessa omaan koordinaatistoonsa nähden. Tätä kuvausta käyttäen deformatuvan kappaleen satunnaisen pisteen globaali paikkavektori,  $\mathbf{r}^i$ , voidaan lausua muodossa:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i(\bar{\mathbf{u}}_0^i + \bar{\mathbf{u}}_f^i), \quad (2)$$

jossa  $\mathbf{R}^i$  on kappaleen lokaalin koordinaatiston sijainti globaalissa koordinaatistossa ja  $\mathbf{A}^i$  on transformaatiomatriisi, joka määrittelee kappaleen sisäisen koordinaatiston aseman globaalissa koordinaatiston suhteen. Vektori  $\bar{\mathbf{u}}_0^i$  määrittelee kappaleen paikan lokaalissa koordinaatistossa deformatumattomassa tilassa ja vektori  $\bar{\mathbf{u}}_f^i$  kuvaa kappaleen aseman muutosta kappaleen deformatuessa. Transformaatiomatriisin parametrien määrittämistä varten on olemassa useita menetelmiä, joista yleisimmät ovat Eulerin kulmat, Eulerin

parametrit ja Rodriguezin yhtälö. (Shabana, 1997, s. 4-5.) Yhtälössä 2 esiintyvät vektorit on esiteltyä kuvassa 4.



**Kuva 4.** Kelluvan koordinaatiston menetelmä (Rantalainen, 2012, s. 32).

### 2.3 Elementtimenetelmä

Jotta tutkittavan rakenteen kappaleesta voidaan tehdä joustavan kappaleen tiedosto, täytyy sille tehdä ensin elementtiverkko. Elementtiverkon tekemiseen käytetään elementtimenetelmää. Elementtimenetelmän toimintaperiaatetta ja historiaa käsitellään tässä luvussa.

Elementtimenetelmää on ensimmäisen kerran sovellettu rakenteiden lujuusanalyyseissä 1950-luvun alkupuolella lentokoneolosuhteissa. Vuonna 1960 termi elementtimenetelmä (FEM, finite element method) otettiin ensimmäinen kerran käyttöön. Tuolloin pyrittiin jakamaan sauvarakenteet pienempiin tarkasteltaviin osasiin eli elementteihin. Tätä ”elementtikäsittelyä” laajennettiin myös muihin rakenteisiin. Mahdolliseksi tämän tyyppisten laskutoimitusten suorittaminen teki samaan aikaan tapahtunut tietokoneiden kehittyminen. (Hakala, 1980, s. 13.)

Elementtimenetelmä on analyyttinen työkalu, jota voidaan soveltaa tehokkaasti useiden matemaattisten ja fyysisten mallien analysoimiseen. Näitä fysikaalisia ja matemaattisia malleja voidaan tehdä esimerkiksi materiaalien rasituksiin, virtauksiin, lämmönsiirtoon,

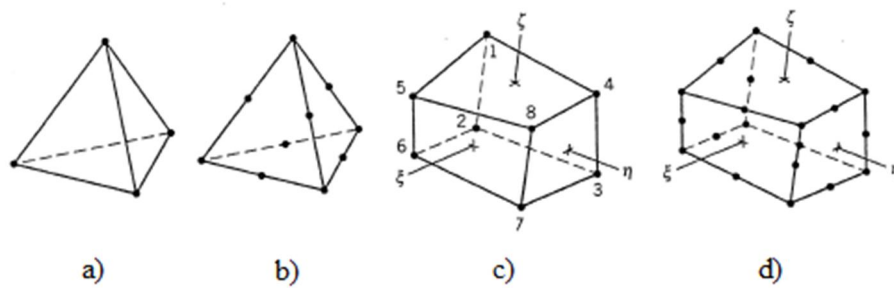
värähtelyyn tai sähkö- ja magneettikenttään liittyvien ongelmien ratkaisemista varten. Elementtimenetelmää on yleisesti käytetty analysoinnissa käytännössä kaikilla insinööritieteiden aloilla. Elementtimenetelmää käytetään usein myös differentiaaliyhtälöiden numeeriseen ratkaisuun. (Bickford, 1990, s. 4-7.)

Elementtimenetelmää voidaan kuvailla yksinkertaisesti siten, että se sisältää rakenteen jakamisen useisiin rakenteen palasiin, elementteihin, määritelmän elementtien käyttäytymisestä yksinkertaisesti sekä elementtien yhdistämisen solmuilla. Solmuja voidaan kuvailla liimapisaroina, jotka pitävät elementit yhdessä. Tämä prosessi johtaa samanaikaisten algebrallisten yhtälöiden joukkoon. Kuormitusanalyysissä nämä yhtälöt ovat solmujen tasapainoyhtälöitä. Lopputuloksena voi olla useita satoja tai tuhansia edellä mainittuja yhtälöitä, joka takia laskenta tietokoneilla on pakollista. (Cook, 1994, s. 1.)

Elementtimenetelmän vahvuutena on sen monipuolisuus. Tutkittava rakenteen muoto, tukipisteet ja kuormitukset voivat olla mielivaltaisia. Kuitenkin mallintaminen vaatii ongelman riittävän ymmärtämisen oikeanlaisten elementtien ja niiden riittävän määrän valitsemiseksi, jotta malli vastaa fyysistä tapausta riittävän tarkasti. Liian tiheään verkotetut mallit vaativat erittäin paljon laskenta-aikaa ja tehoa tietokoneelta. Elementit eivät kuitenkaan voi olla liian epäsäännöllisiä tai liian suuria mallin mielenkiintoisilla alueilla. (Cook, 1994, s. 2-6.) Mallien mielenkiintoisia alueita ovat yleensä kohdat, joita mallista halutaan tutkia ja niihin yleensä keskittyvät syntyvät jännityskeskittymät.

### 2.3.1 3D-mallinnuksessa käytettäviä elementtejä

Elementtimenetelmässä kappaleiden verkottamista varten on useita erilaisia elementtejä eri tilanteita varten. Tässä työssä käytetään vain 3D-tilavuuselementtejä kappaleiden verkottamiseksi, joten palkki- ja laattaelementtien teoria jätetään huomioimatta. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi yleisesti 3D-elementtejä ja niiden tyypillisimpiä muotoja. Kuvassa 5 on esiteltyä erilaisia elementtejä.



**Kuva 5.** Vasemmalta oikealle vakiovenymän tetraedrielementti, lineaarisen venymän tetraedrielementti, kuutioelementti ja neliöllinen kuutioelementti (Cook, 1994, s. 150).

Termiä ”3D-solid” käytetään kuvaamaan kolmiulotteisista kiinteää kappaletta, joka on rajaton muodon, kuormituksen, materiaaliominaisuuksien ja rajatilojen osalta. Tämän seurauksena täytyy ottaa kaikki kuusi mahdollista jännitystä huomioon. Mahdolliset jännitykset ovat kolme normaalijännitystä ja kolme leikkausjännitystä. Tämän lisäksi siirtymät ovat mahdollisia kaikkiin suuntiin. Tyypillisiä äärellisiä elementtejä 3D-solidille ovat tetraedrielementit ja kuusitahokaselementit, joissa kaikilla solmuilla on kolme siirtymän vapausastetta. Lisäksi on olemassa rotaatiosymmetrisiä tilavuuselementtejä, jotka muodostetaan pyöryttämällä tasokuva jonkin akselin ympäri. (Cook, 1994, s. 145.)

Vakiovenymän tetraedrielementti (Kuva 5a) koostuu neljästä solmusta tetraedrien kulmien päissä. jokaisella solmulla on kolme translaation vapausastetta eli yhteensä 12 vapausastetta. Vakiovenymäelementti on tarkka ainoastaan, kun venymät ovat lähes vakioita elementin alueen yli. Vakiovenymäelementti on huono kuvaamaan taivutusta tai vääntöä, jos taivutus- tai vääntöakseli leikkaa elementtejä tai on lähellä niitä. (Cook, 1994, s. 149-150.)

Lineaarisen venymän tetraedrielementti (Kuva 5b) koostuu kymmenestä solmusta, neljä tetraedrin kulmien päissä ja yksi solmu jokaisen särmän keskellä. Jokaisella solmulla on kolme translaation vapausastetta eli yhteensä 30 vapausastetta. Elementin särmien keskellä sijaitsevien solmujen ansiosta lineaarisen venymän tetraedrielementti kykenee kuvamaan taivutusta. (Cook, 1994, s. 150.)

Kuutioelementti (Kuva 5c) koostuu kahdeksasta solmusta ja kuudesta tahkosta, yksi solmu jokaisessa kuution kärjessä. Jokaisella solmulla on kolme vapausastetta, jolloin

yhteenlaskettu vapausasteiden lukumäärä on 24. Kuutioelementti ei kykene kuvaamaan palkin käyttäytymistä sen sivujen pysyessä suorina deformaatioissa. Venytettynä kuutioelementti kärsii leikkauslukkiutumuksesta, kun sitä taivutetaan. Kuutioelementistä korkeamman asteen elementti on neliöllinen kuutioelementti (Kuva 5d), jossa jokaisen särmän keskellä on yksi solmu, jolloin solmujen yhteismäärä on 20. Tällöin vapausasteiden lukumäärä on 60. Kuten lineaarisen venymän tetraedrielementillä, deformoitumattomat särmät voivat olla joko suoria tai käyriä. Suorakulmaisena neliöllinen kuutioelementti kykenee mallintamaan venymän tarkasti. (Cook, 1994, s. 150-151.)

### 2.3.2 Ominaisarvot ja –taajuudet

Moodianalyysillä tarkoitetaan tutkittavan kappaleen dynaamisten ominaisuuksien, ominaistaajuuksien, värähtelymuotojen ja muotojen vaimennussuhteiden, selvittämistä. Tutkittava rakenne asetetaan värähtelemään ulkoisen voiman avulla, jonka jälkeen kappaleen vastetta ja herätettä mitataan. Näiden mittausten perusteella voidaan määrittää taajuusvastefunktio, josta halutut dynaamiset ominaisuudet saadaan määritettyä. (Avitabile, 2007, s. 1.) Moodianalyysi on kokeellinen tapa kappaleen ominaistaajuuksien ja värähtelymuotojen määrittämiseen ja se vaatii aina erillisen koejärjestelyn. Kappaleen ominaisarvot ja –taajuudet voidaan laskea vaimentamattoman liikeyhtälön avulla, johon ei vaikuta ulkoisia voimia. Useamman vapausasteen vaimentamaton liikeyhtälö lausutaan tällöin matriisimuodossa

$$M\ddot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = 0, \quad (3)$$

missä  $M$  on massamatriisi,  $K$  jäykkyyismatriisi,  $\mathbf{x}$  asemavektori ajan suhteen ja  $\ddot{\mathbf{x}}$  on kiihtyvyyksivektori. Liikeyhtälön ratkaisua varten täytyy asemavektori  $\mathbf{x}$  korvata yhtälöllä

$$\mathbf{x} = M^{-1/2}\mathbf{q}, \quad (4)$$

missä  $M^{-1/2}$  on massamatriisin käänteinen neliönjuuri ja  $\mathbf{q}$  on vakiovektori. Kuten tavallinenkin massamatriisi, massamatriisin käänteinen neliönjuuri on myös diagonaalinen. Sijoittamalla yhtälö 4 yhtälöön 3 ja kertomalla yhtälö 3 vielä  $M^{-1/2}$ , saadaan liikeyhtälö muotoon

$$M^{-\frac{1}{2}}MM^{-\frac{1}{2}}\ddot{\mathbf{q}}(t) + M^{-\frac{1}{2}}KM^{-\frac{1}{2}}\mathbf{q}(t) = 0. \quad (5)$$

$M^{-\frac{1}{2}}MM^{-\frac{1}{2}}$  on yksikkömatriisi, jolloin yhtälö voidaan kirjoittaa muodossa

$$I\ddot{\mathbf{q}}(t) + \tilde{K}\mathbf{q}(t) = 0. \quad (6)$$

Matriisi  $\tilde{K} = M^{-\frac{1}{2}}KM^{-\frac{1}{2}}$ , kun matriisi  $K$ , on symmetrinen matriisi. Matriisia  $\tilde{K}$  kutsutaan massanormalisoiduksi jäykkyydematriisiksi. Yhtälön 6 ratkaisemista varten täytyy vakiovektorille  $\mathbf{q}$  asettaa seuraavanlainen ratkaisuyrite

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{v}e^{j\omega t}, \quad (7)$$

missä  $\mathbf{v}$  on vakiovektori. Yhtälö 7 saadaan supistettua muotoon,

$$\tilde{K}\mathbf{v} = \omega^2\mathbf{v} \quad (8)$$

josta ominaistajuudet  $\omega$  voidaan ratkaista. Ominaisajuuksien  $\omega$  arvoja on yhtä paljon kuin systeemillä on vapausasteita. Ominaisajuuksia vastaavat ominaismuodot saadaan, kun ominaistajuuksien arvot sijoitetaan takaisin yhtälöön 8 ja ratkaisemalla vektorit  $\mathbf{v}$ . (Inman, 2001, s. 255-257.)

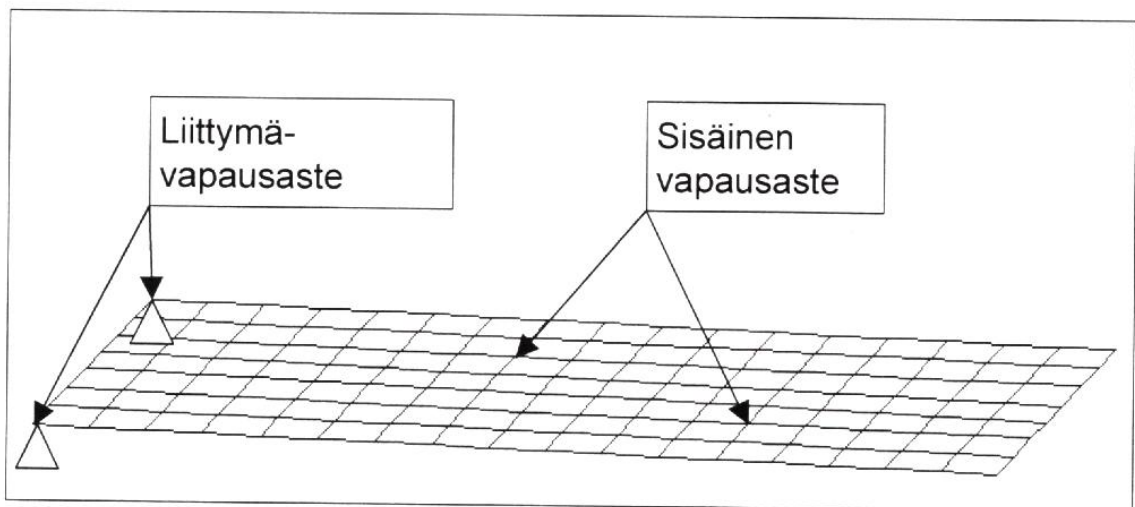
#### 2.4 Osarakennetekniikka

Monikappaledynamiikan ja elementtimenetelmän liikerajoitteiden kuvaukset ovat keskenään erilaiset, jolloin rajoitteiden kuvaaminen joustavassa jäsenessä on hankalaa. Monikappaledynamiikassa liikerajoitteet kuvaavat kappaleen liittymistä järjestelmän muihin jäseniin, kun taas elementtimenetelmässä liikerajoite tarkoittaa jäsenen liittymistä liikkumattoman globaalin koordinaatiston suhteen. Liikerajoitteiden huomioimiseen on kuitenkin olemassa kaksi eri menetelmää. Ensimmäisellä menetelmällä lasketaan suoraan tuetulle rakenteelle ominaismuodot ja –arvot. Toisella menetelmällä lasketaan ominaismuodot ja –arvot tukemattomalle kappaleelle, mutta rakenteelle lasketaan niiden lisäksi staattisia korjausmuotoja, joiden avulla reunaehdot otetaan huomioon. (Mikkola, Kerckänen, 2004, s. 16.)



Ensimmäistä menetelmää käyttämällä saadaan varmistettua, että elementtimenetelmässä asetetut reunaehdot ovat dynamiikan simuloinnissa käytettäviä nivelrajoitteita vastaavat koko simuloinnin ajan. Lähestymistapa on suoraviivainen, mutta sillä saadaan ulos ainoastaan ominaismuodot, jotka toteuttavat halutut reunaehdot automaattisesti. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 16.)

Toisessa menetelmässä tutkittava rakenne jaetaan osarakenteisiin, joita analysoimalla voidaan kehittää koko systeemistä matemaattinen malli. Staattisten korjausmuodot mahdollistavat kappaleen tuennan muuttamisen kesken dynaamisen analyysin sekä helpottavat usein tasapainotilan etsimistä simuloinnin alussa. Menetelmä onkin käytetympi kuin pelkästään tuetulle kappaleelle suoritettu ominaismuotojen laskenta. Kuvassa 6 on esiteltyä vapausasteiden määrittely osarakennetekniikassa. (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 16.)



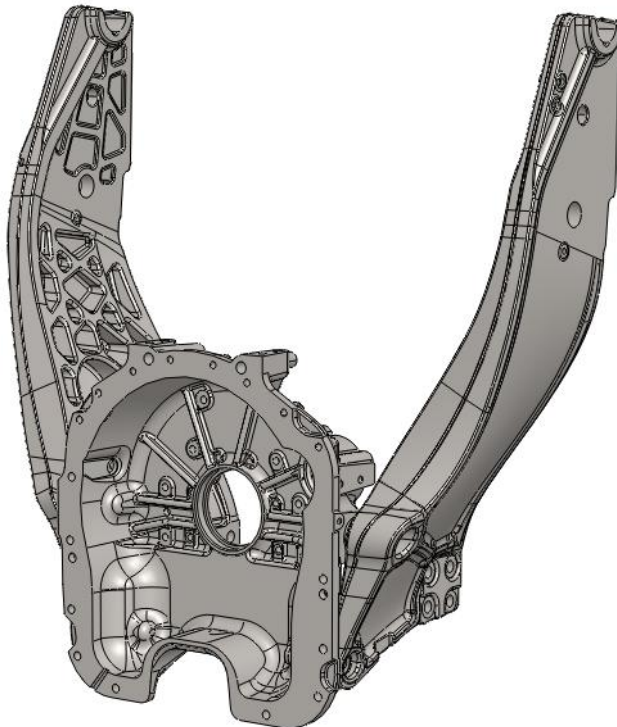
**Kuva 6.** Vapausasteiden määrittely osarakennetekniikassa (Mikkola, Kerkkänen, 2004, s. 16).

### 3 TUTKITTAVA RAKENNE

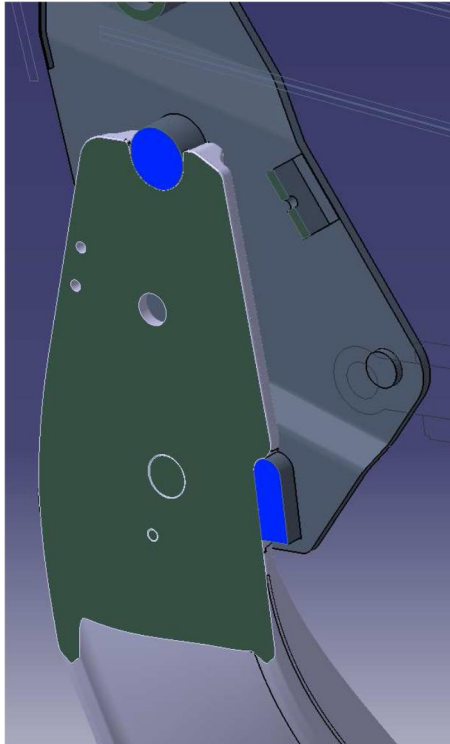
Kandidaatin työssä tutkittavan rakenteen analysoinnissa käytettyjä kaupallisia ohjelmistoja ovat mm. SpaceClaim, SolidWorks, ANSYS ja ADAMS. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi kuinka ohjelmistoja on käytetty vauhtipyöräkotelon ja runkosovitteiden tutkimisessa työn aikana eri työvaiheissa.

#### 3.1 Tutkittavan rakenteen esittely

Tässä työssä tutkittavan rakenteen kokoonpano on kuvan 7 mukainen. Kokoonpano koostuu keskellä olevasta vauhtipyöräkotelosta ja siihen kiinnitetyistä kahdesta runkosovitteesta. Todellisuudessa runkosovitteisiin kiinnitettäisiin etukuormain, mutta yksinkertaistuksen vuoksi vain etukuormaimen aiheuttama voima otetaan huomioon, jolloin etukuormaimesta jää jäljelle voimakomponentti. Etukuormaimen aiheuttama kuormitus välittyy runkosovitteisiin kuvan 8 mukaisesti kahta reittiä. Kuormitusta yksinkertaistettiin vaikuttamaan ainoastaan runkosovitteiden kärkiin. Kaikkien kappaleiden origo sijaitsee samassa pisteessä eli kokonaisen traktorimallin taka-akselin keskipisteessä.



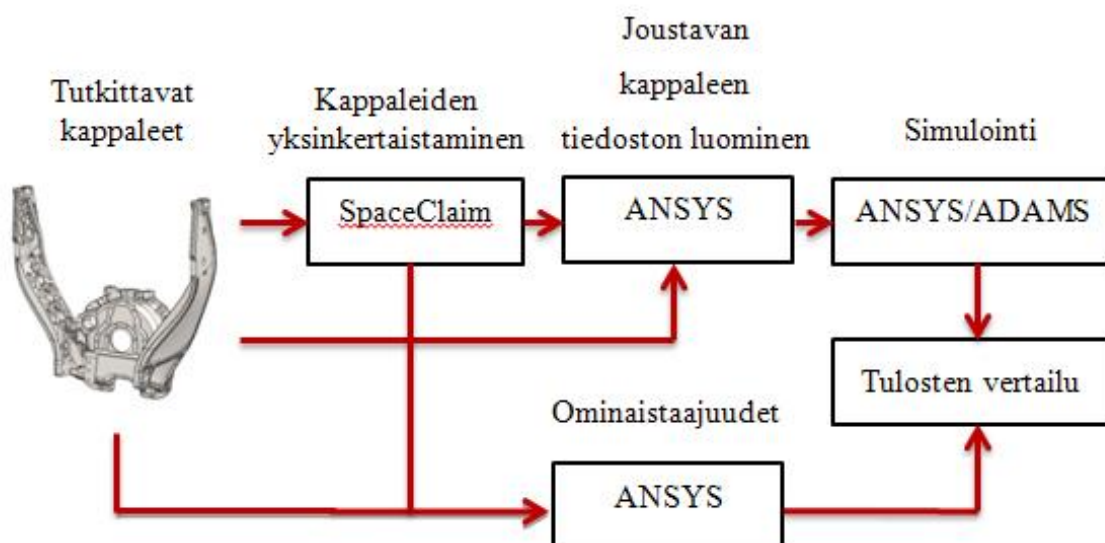
**Kuva 7.** Tutkittavan rakenteen kokoonpano ennen yksinkertaistamista.



**Kuva 8.** Voiman välittyminen etukuormaimesta runkosovitteelle.

### 3.2 Käytettävät ohjelmistot ja työvaiheet

Kandidaatintyö etenemistä on kuvattu kuvan 9 kaavion mukaisesti.



**Kuva 9.** Kaavio työn etenemisestä.

Ensin alkuperäisistä kappaleista tehdään kaksi yksinkertaistamisen tasoa. Yksinkertaistaminen toteutettiin SpaceClaim –ohjelmistolla. SpaceClaim on käänteinen suunnitteluohjelma, jolla voidaan poistaa jo kappaleessa olevia profiilimuotoa, kuten reunojen pyöristyksiä tai reikiä. Tämän jälkeen työn eteneminen jakautuu kahteen haaraan, joustavien kappaleiden luomiseen ja ominaistuuksien määrittämiseen. Joustavien kappaleiden luomisessa käytetään yksinkertaistettuja ja alkuperäisiä geometrioita. Kappaleet tuotiin yksi kerrallaan ANSYS –ohjelmistoon, jossa niille ajettiin joustavan kappaleen tiedoston luomisen makro, josta saatiin tulokseksi MNF tiedosto. Valmiista joustavista kappaleista rakennettiin ADAMS –ohjelmistossa uusi kokoonpano ja kokoonpanoa simuloitiin.

Moodianalyysia varten käytettiin yksinkertaistettuja ja alkuperäisiä geometrioita. Geometrioista haluttiin selvittää kymmenen ensimmäistä vapaan kappaleen ominaistajuuden arvoa. Jokainen geometria tuotiin erikseen ANSYS –ohjelmistoon, jossa niille suoritettiin moodianalyysi. Moodianalyysistä otettiin ylös 16 ensimmäistä ominaistajuuden arvoa, joista ensimmäiset kuusi jätettiin huomioimatta niiden ollessa jäykän kappaleen muotoja. Tulokset kirjattiin ylös ja tuloksia vertailtiin yksinkertaistustasojen kesken. Työssä käytettiin ANSYS Workbench -ohjelmiston versiota 14.5.0 ja ADAMS View -ohjelmiston versiota 2013.

Vauhtipyöräkotelon ja runkosovitteiden geometriat saatiin Valtra Oy Ab:lta IGES muodossa. IGES eli Initial Graphic Exchange Specification CAD –ohjelmistoille tarkoitettu tiedostomuoto, jonka avulla malleja voidaan siirtää ohjelmasta toiseen. IGES-tiedostossa mallin data on jaettu itsenäisiin kokonaisuuksiin. Kokonaisuudet voidaan jakaa geometrisiin ja ei-geometrisiin kokonaisuuksiin. Geometriset kokonaisuudet määrittelevät mallin fyysisen muodon sekä samankaltaisten kokonaisuuksien suhteet, jotka sisältävät pisteet, kaaret, pinnat, kiinteät kappaleet. Ei-geometriset kokonaisuudet pitävät sisällään mallin näkymän, piirustuksen, dimensiot, tekstin, merkintätavan sekä mittaviivat. (Bhandarkar, Downie, Hardwick & Nagi, 1999, s. 3.)

Geometrioissa ilmeni tiedostomuodon muuttamisen ja tiedonsiirrosta johtuneita ongelmia, kun ne ensimmäisen kerran avattiin SolidWorks 2012 -ohjelmistossa. Geometriat eivät

olleet kiinteitä, vaan niistä oli muodostunut alkuperäisen mukaisia kuorimalleja, joista puuttui yksittäisiä geometriapintoja tai reunaviivoja, jolloin geometriassa oli reikiä ja rakoja. Geometrioiden puutokset korjattiin SolidWorksin Import Diagnostics toiminnon avulla takaisin kiinteiksi kappaleiksi ja tallennettiin SLDPRT-tiedostoiksi, SolidWorksin omaksi osatiedostoksi, jonka jälkeen geometrioita yksinkertaistettiin SpaceClaim –ohjelmistossa. Yksinkertaistamisen jälkeen geometriat tallennettiin STEP tiedostomuotoon. STEP eli Standard for the Exchange of Product Model Data on IGES-tiedoston jälkeen kehitetty kehittyneempi tiedostotyyppi CAD mallien siirtomuoto (Bhandarkar, Downie, Hardwick & Nagi, 1999, s. 4.).

Geometrioiden yksinkertaistamisen ja tiedostomuodon muuttamisen jälkeen geometriat jouduttiin korjaamaan toistamiseen SolidWorksin Import Diagnostics toiminnon avulla yksinkertaistuksesta syntyneiden geometriapuutoksien korjaamiseksi. Kun geometriat oli korjattu takaisin kiinteiksi kappaleiksi, voitiin edetä joustavan kappaleen luomiseen ja ominaistuuksien määrittämiseen.

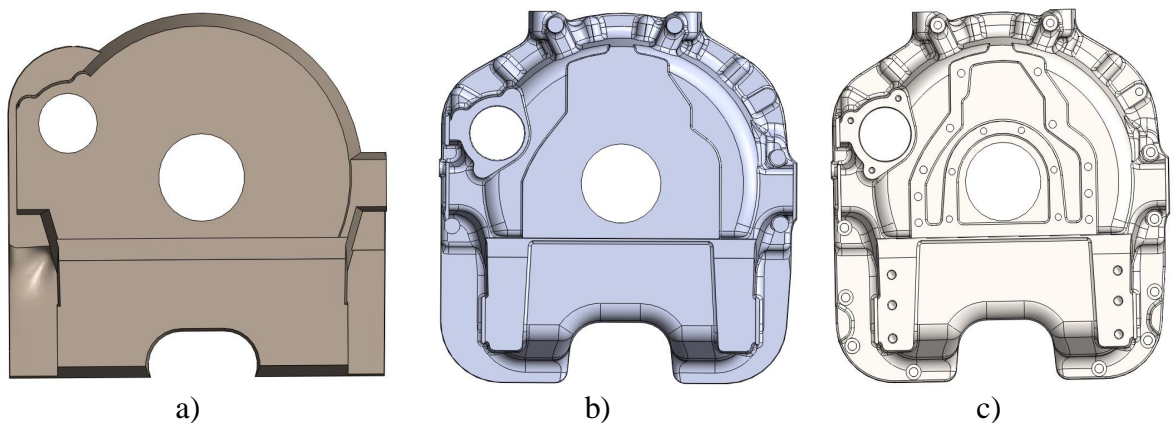
### 3.3 Geometrian yksinkertaistaminen

Geometrian yksinkertaistaminen toteutettiin SpaceClaim –ohjelmistolla. Alkuperäisistä geometrioista päätettiin tehdä kaksi yksinkertaistamisen tasoa, joiden kokoonpanojen simuloinnin ja yksittäisten kappaleiden ominaistuuksien eroja vertailtaisiin keskenään. Alkuperäiset geometriat olivat valukappaleita ja ne sisälsivät todella paljon pieniä yksityiskohtia, kuten reikiä, pyöristyksiä ja syvennyksiä.

Yksinkertaisimmista geometrioista oli tarkoituksena tehdä mahdollisimman paljon yksinkertaistetut. Tämä tarkoitti sitä, että alkuperäisestä geometriasta poistettiin kaikki pienet yksityiskohdat ja pyöristykset, jotta tuloksesi saadaan alkuperäistä geometriaa mukaileva, palikkamainen geometria. Toisen yksinkertaistustason yksinkertaistaminen tarkoitus oli olla hienovarainen yksinkertaistus alkuperäisestä geometriasta, jolloin alkuperäiset muodot säilyivät selkeämmin ja joitakin yksityiskohtia jäi vielä malliin jäljelle.

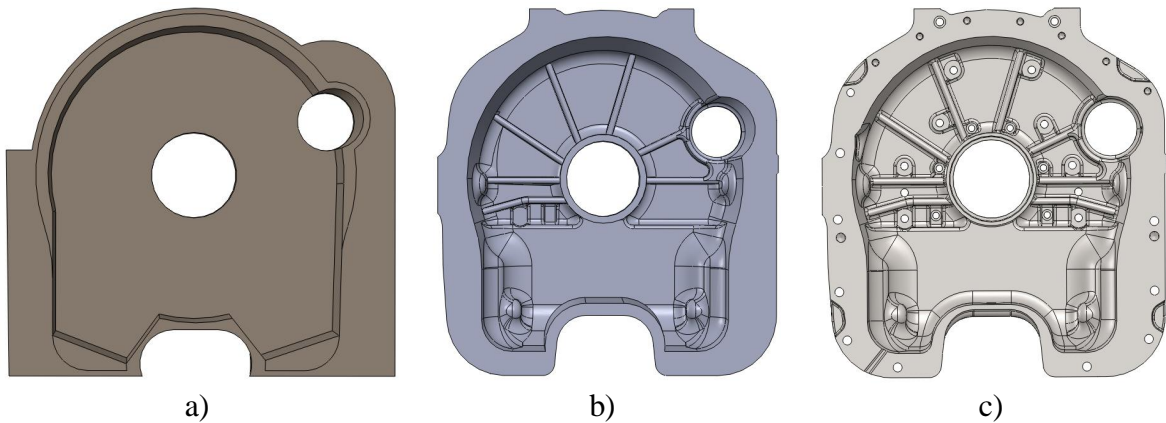
Vauhtipyöräkotelon yksinkertaistaminen aloitettiin yksinkertaisten geometrioiden täyttämällä. Kaikki vauhtipyöräkotelon reikien ja pulttien reiät täytettiin yläpalkin ”Fill”

komennon avulla. Vauhtipyöräkotelon akselien ulostuloreiät säästettiin mallissa niiden ollessa oleellisia yksityiskohtia. Sen jälkeen siirryttiin yksinkertaistamaan ja tasoittamaan vauhtipyöräkotelon pinnalla olevia muotoja, kohoumia, painaumuksia ja pyöristyksiä. Yksinkertaisinta mallia varten geometriasta poistettiin kaikki pyöristykset, jolloin tulokseksi saatiin palikkamainen alkuperäisen geometrian muotoja mukaileva kappale. Yksinkertaisimmasta mallista jäi alkuperäiseen verrattuna kotelon kehän osia kokonaan pois. Toiseen yksinkertaistustasoon tehtiin hienovarainen yksinkertaistaminen, jossa keskityttiin reikien ja nopeasti poistettavien yksityiskohtien yksinkertaistamiseen. Vauhtipyöräkotelon yksinkertaistuksessa pidettiin runkosovitteiden kiinnityspinnan tason asema muuttumattomana yksinkertaistamisen ajan. Kuvassa 10 on esiteltyä vauhtipyöräkotelon etupuolen yksinkertaistamistasot alkuperäisen geometrian kanssa.



**Kuva 10.** Vauhtipyöräkotelon yksinkertaistaminen edestä, alkuperäinen oikealla.

Vauhtipyöräkotelon sisäpuolella lisäksi sisäpuolella paljon yksityiskohtaista geometriaa. Yksinkertaisinta geometriaa kaikki sisäpuoliset geometriat poistettiin, siten että sisäpuolelle jää vain tasainen pinta. Toista yksinkertaistamistasoa varten poistettiin reiät ja reikien kohdilla olleet profiilin paksummat yksityiskohdat, jolloin tasaisten pintojen määrä kasvoi. Kuvassa 11 on esiteltyä vauhtipyöräkotelon sisäpuolen yksinkertaistamistasot alkuperäisen geometrian kanssa.



**Kuva 11.** Vauhtipyöräkotelon yksinkertaistaminen sisältä, alkuperäinen oikealla.

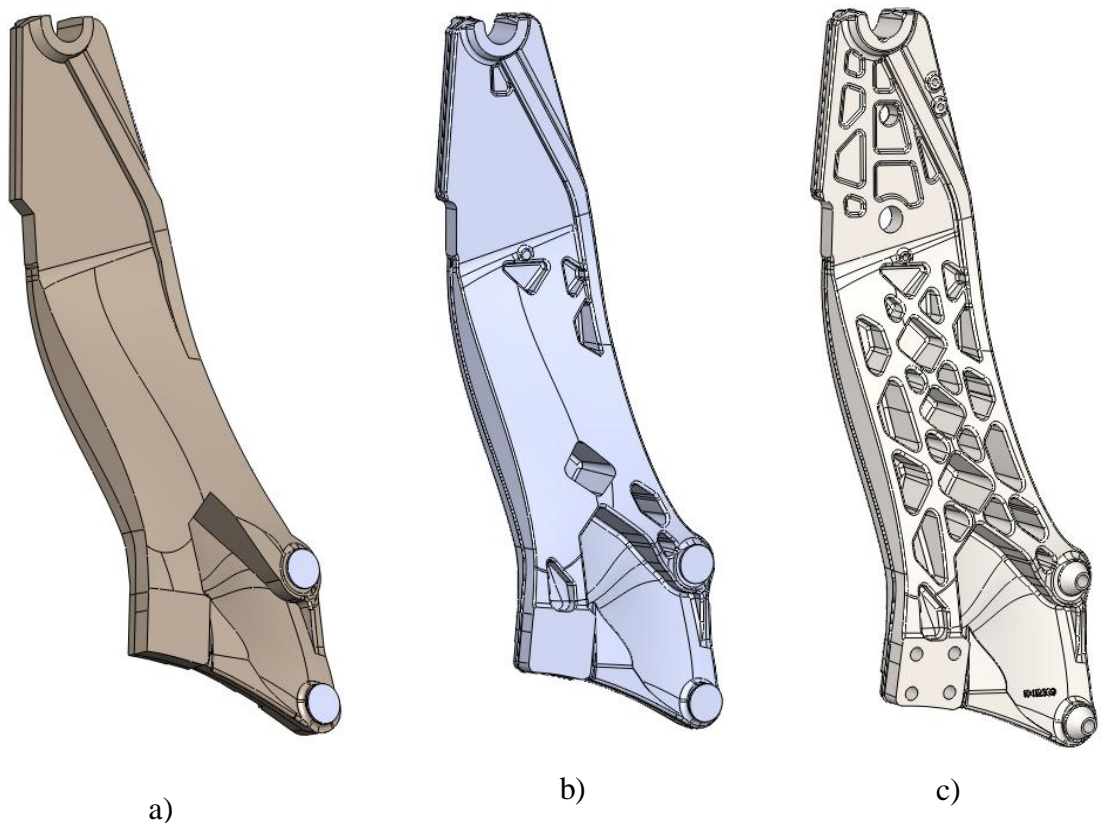
Oikean runkosovitteen yksinkertaistaminen aloitettiin helppojen yksityiskohtien, kuten reikien ja sarjanumeroiden poistamisella. Reikien täyttöä varten valittiin reiän sisäpinnan geometriat ja painettiin SpaceClaimin yläpalkin valikosta ”Fill” komentoa, jolloin ohjelma automaattisesti täytti sisäpinnan geometrian ja geometriaan jäi yhtenäinen pinta. Sarjanumeroiden poistamista varten valittiin kaikki sarjanumeroiden geometriat samanaikaisesti ja painettiin ”Fill”, jolloin ohjelma poisti geometriat niitä yhdistävään pintaan asti. Nämä yksinkertaistukset suoritettiin molemmille yksinkertaistustasoille runkosovitteissa.

Jäykentävien syvennysten geometrioiden poistamiseksi valittiin kaikki geometriaan liittyvät muodot, pyöristykset yms. ja ”Fill” komennolla täytettiin vastaamaan pinnan muotoja. Kaikille koloille tämä ei suoraan onnistunut, jolloin jouduttiin yksi silmukka tai geometrian osa kerrallaan täyttää kunnes koko geometria saatiin täytettyä. Tämä ei aina sujunut suoraviivaisesti, jolloin yksinkertaistaminen tapahtui kokeilemalla eri yksityiskohtien yksinkertaistamista eri järjestyksessä kunnes haluttuun tulokseen päästiin. Yksinkertaisimmilla geometrioilla tätä suoritettiin niin kauan, kunnes kaikki syvennykset saatiin tasoitetuksi. Toisen yksinkertaistustason geometrioille nämä yksinkertaistukset suoritettiin hienovaraisesti ja muutama jätettiin lopulliseen malliin jäljelle.

Lopuksi keskityttiin pienten yksityiskohtien, kuten reunojen pyöristyksien, yksinkertaistamiseen. Alkuperäisen geometrian reunaviivoista jokainen oli pyöristetty ja pyöristykset kiersivät koko geometrian läpi. Näiden poistaminen ei onnistunut suoraan pelkästään silmukoiden yksinkertaistamisilla tai kokeilemalla. Näiden geometrioiden



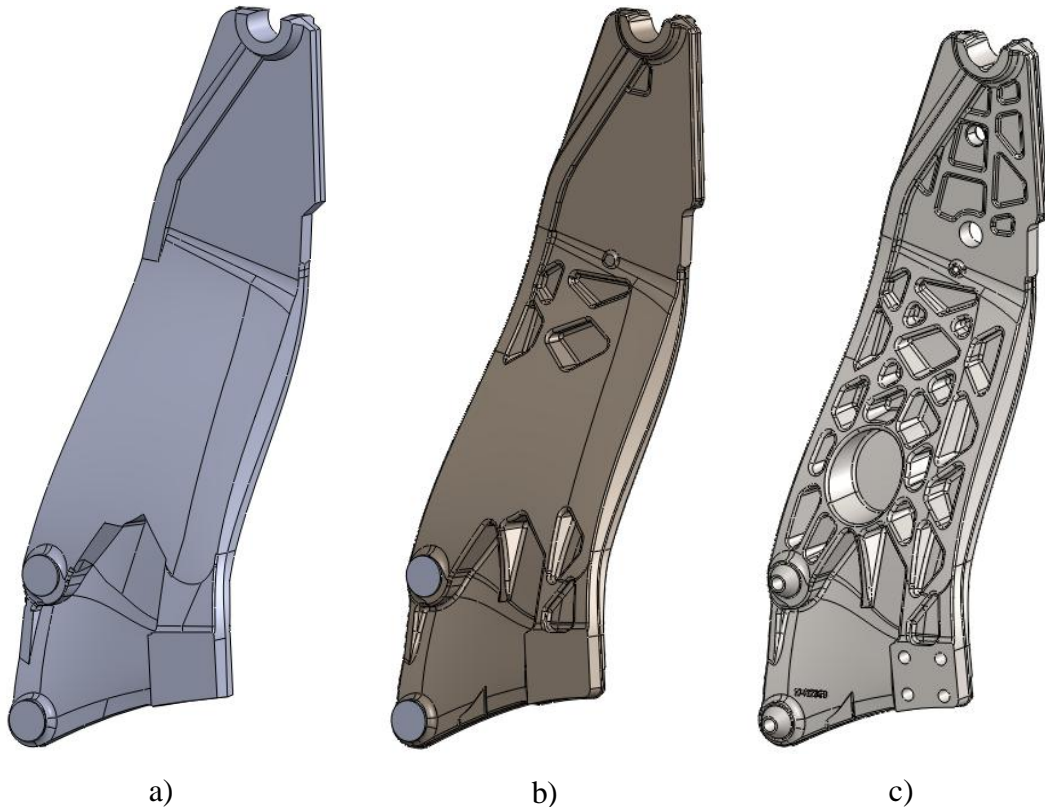
yksinkertaistamiseksi täytyi joissakin tilanteissa geometrioiden sisälle lisätä pallonmuotoiset geometriat ongelmakohdan välille ja sitten poistaa ongelmallinen geometria ja muodostetut pallot. Tämä toistettiin kaikille kiertäville geometrioille, kunnes kaikki pyöristykset olivat poistettu. Kuvassa 12 on esiteltyä oikeain runkosovitteen yksinkertaistustasot alkuperäisen geometrian kanssa.



**Kuva 12.** Oikean runkosovitteen yksinkertaistaminen, alkuperäinen oikealla.

Vasemman runkosovitteen yksinkertaistaminen toteutettiin samalla periaatteella kuin oikeankin runkosovitteen. Yksinkertaistus aloitettiin reikien ja sarjanumeroiden poistamisella, jäykentävien syvennysten täyttämällä ja yksityiskohtien geometrioiden poistamisella. Yksinkertaistukset yksinkertaistustasojen välillä olivat myös samanlaiset kuin oikealla runkosovitteella. Kuvassa 13 on esiteltyä vasemman runkosovitteen yksinkertaistustasot alkuperäisen geometrian kanssa.





**Kuva 13.** Vasemman runkosovitteen yksinkertaistaminen, alkuperäinen oikealla.

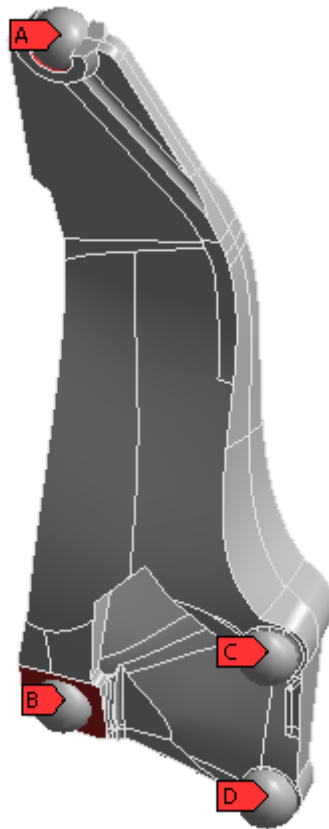
Yksinkertaistamisen jälkeen yksinkertaistetut geometriat tallennettiin STEP tiedostomuotoon ja tuotiin SolidWorksiin korjattavaksi Import Diagnostics toiminnon avulla. SpaceClaim sisälsi rakojen korjaamiseen tarkoitettuja toimintoja, muttei saanut niitä kaikkia korjattua. Geometrioiden korjaamisen jälkeen yksinkertaistettujen runkosovitteiden geometrioihin mallinnettiin 4 mm paksut levyt runkosovitteiden ja vauhtipyöräkotelon välisille kiinnityspinnoille, jotta geometriat saataisiin kontaktiin keskenään kokoonpanoa rakennettaessa.

### 3.4 Joustavan kappaleen luominen

Joustavan kappaleen luomista varten täytyi ANSYS –ohjelmistossa suorittaa ANSYS-ADAMS liitäntä, jonka tuloksena saatiin joustavan kappaleen tiedosto MNF-tiedosto (modal neutral file) (ANSYS 14.5 Help). Joustavan kappaleen luomisessa geometria tuotiin ensin ANSYS Workbench:n Static Structural työympäristöön, jossa geometrialle luotiin verkotus, luotiin interferenssipisteet ja ajettiin ADAMS-makro joustavan kappaleen tiedoston luomiseksi.

Interferenssipisteet eli IP-pisteet ovat pisteet, joissa on liitoksen tai voiman kiinnittymiskohta ADAMS -ohjelmistossa. Voiman mallinnuksessa tulee voiman vaikutusalueen olla mieluummin pinta-alaa kohden kuin pelkästään yhdelle solmulle. Interferenssipisteiden lukumäärä määrää tuettujen moodien määrän kappaleessa. Tuettut moodit ovat kappaleen staattisia korjausmuotoja, kun yhdelle interferenssipisteeseen vapausasteelle on annettu yksikön mittainen poikkeama muiden vapausasteiden pysyessä jäykkinä. Tuettujen moodien lukumäärä on yhtä suuri kuin kaikkien interferenssipisteiden vapausasteiden summa. Täten 3D-malleissa, jokaisella interferenssipisteellä on kuusi vapausastetta ja täten kuusi tuettua moodia. (ANSYS Help 14.5)

Joustavan kappaleen tiedosto luotiin ANSYS Workbench ympäristössä Static Structural työympäristössä. Työympäristöä varten valittiin haluttu geometria, jonka jälkeen avattiin työikkuna. Ensiksi määriteltiin pinta-alat, joihin interferenssipisteet sijoitetaan. Pinta-alojen määrittäminen toteutettiin ”Named Selections” työkalun avulla, jolloin valittiin halutut pinta-alat geometriasta yksittäisiksi työpisteiksi. Kuvassa 14 on esiteltynä oikeaan runkosovitteeseen tehdyt interferenssipisteiden valinnat kirjaimin A, B, C ja D. Simulaatiomallissa pisteessä A tulee olemaan kuormittava voima ja muut pisteet toimivat reunaehtopisteinä. Interferenssipisteet tehtiin vasempaan runkosovitteeseen samalla tavalla kuin oikeaankin. Vauhtipyöräkoteloon tehtiin vain yksi interferenssipiste kotelon ja rungon väliselle kiinnityspinta-alalle. Luoduille nimetyille pinta-aloille tehtiin oma itsenäinen lokaali koordinaatisto. Tämän jälkeen määriteltiin interferenssipisteet valittuihin pinta-aloihin niihin tehtyjen omien koordinaatistojensa avulla ja asetettiin jokainen interferenssipiste omaksi origokseen. Lopuksi luotiin jokaiselle luodulle interferenssipisteelle 0,1 kg suuruinen pistemassa.



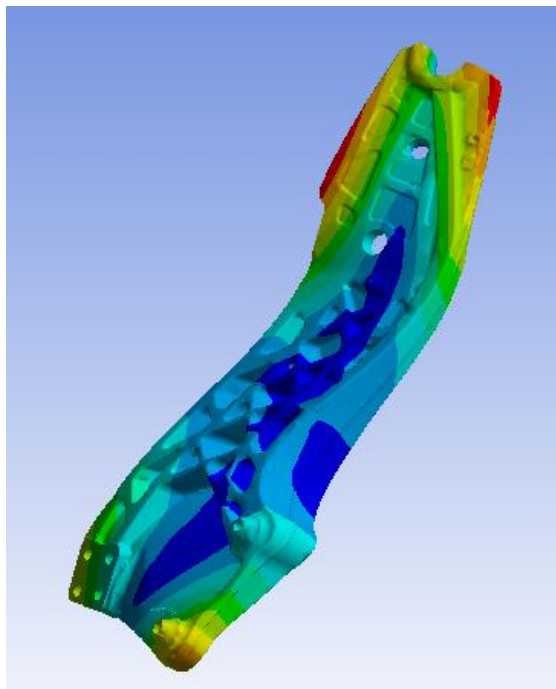
**Kuva 14.** Oikean runkosovitteen interferenssipisteiden sijainnit.

Joustavan kappaleen tiedoston luomista varten, täytyy ratkaisun aikana ajaa Commands APDL:n sisällä komentosarja, joka luo joustavan kappaleen tiedoston. Komentosarjassa valittiin ensiksi interferenssipisteet ja poistettiin muu ylimääräinen data käytöstä. Seuraavaksi valittiin tiedostolle yksikköjärjestelmä ”/UNITS,SI” rivikomennolla, jolloin muodostuva tiedosto käyttää SI-järjestelmän yksiköitä. Joustavan kappaleen tiedosto ADAMS käsittelyä varten saadaan luotua ”ADAMS, NMODES, KSTRESS, KSHELL” komennon avulla ANSYS:lla. Komennossa ADAMS on makro, jonka avulla joustavan kappaleen tiedosto luodaan, NMODES määrittelee haluttujen ominaismuotojen määrän, KSTRESS määrittelee sisältääkö tiedosto jännityksen ja/tai venymän arvoja ja KSHELL kuorielementtien sijoittumisen (ADAMS Help 14.5). Kandidaatintyössä ei otettu jännityksien tai venymien tietoja mukaan eikä kuorielementtejä käytetty, jolloin KSTRESS ja KSHELL muuttuvat saivat arvon nolla. Haluttujen ominaismuotojen määrälle käytettiin nyrkkisääntöä kuusi kertaa IP-pisteiden lukumäärä, koska interferenssipinteisiin mallinnettiin MASS21 elementit, joilla on 6 vapausastetta. Kandidaatintyössä käytetään Pekka Mölkkäsen tekemää komentosarjaa MNF-tiedoston luomiselle.

Interferenssipisteiden määrittelyn ja Commands APDL komentosarjan jälkeen voidaan ”Solve” komennolla käynnistää joustavan kappaleen tiedoston luominen. Ohjelma suorittaa ratkaisun ja antaa aina muutaman virheilmoituksen ratkaisun päätteeksi. Virheilmoituksista huolimatta, jos laskentakapasiteettia ei ylitetty tai geometriaa varten luotu elementtiverkko on riittävä, tulokseksi saadaan MNF –tiedosto, joka sisältää kappaleen massan, inertian, ominaistuuksien ja –muotojen tiedot. (Zhang, Zhong, Gao & He, 2010, s. 1.)

### 3.5 Ominaistuuksien määrittäminen

Kappaleiden ominaistuuksien määrittämistä varten käytettiin ANSYS Workbench:n ”Modal” moodianalyysityöympäristöä. Moodianalyysia varten halutun tiedoston valitsemisen jälkeen avattiin työikkuna. Työikkunassa kappaleelle luotiin verkotus ja valittiin haluttujen ominaisarvojen lukumäärä. Haluttujen ominaisarvojen lukumääräksi valittiin 16 kappaletta, koska kuusi ensimmäistä ominaisarvoa kuvaavat jäykän kappaleen liikettä, joiden teoreettiset ominaisarvojen suuruudet ovat nolla. Tämän jälkeen ratkaistiin ”Solve” painikkeella haluttu määrä ominaisarvoja ja kirjattiin tulokset ylös. Kuvassa 15 on esiteltyä esimerkki oikean soviteen vapaan kappaleen värähtelymuodosta.



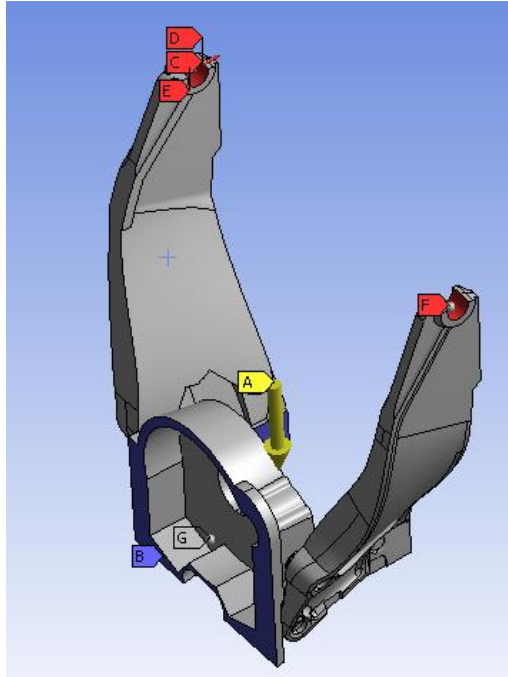
**Kuva 15.** Alkuperäisen oikean soviteen toinen vapaan kappaleen värähtelymuoto.

### 3.6 Simulointi

Yksinkertaisimman kokoonpanon simulointi suoritettiin sekä ADAMS että ANSYS simulointiohjelmistoilla. Simuloinnissa tutkittiin runkosovitteiden päiden deformaatioita viiden sekunnin mittaisen simulaation aikana. Simulointi suoritettiin joustavista kappaleista rakennetulla kokoonpanolla. Simuloinnin tulokset runkosovitteiden päiden deformaatioista selvitettiin molemmilla simulointiohjelmistoilla, jonka jälkeen tuloksia verrattiin keskenään.

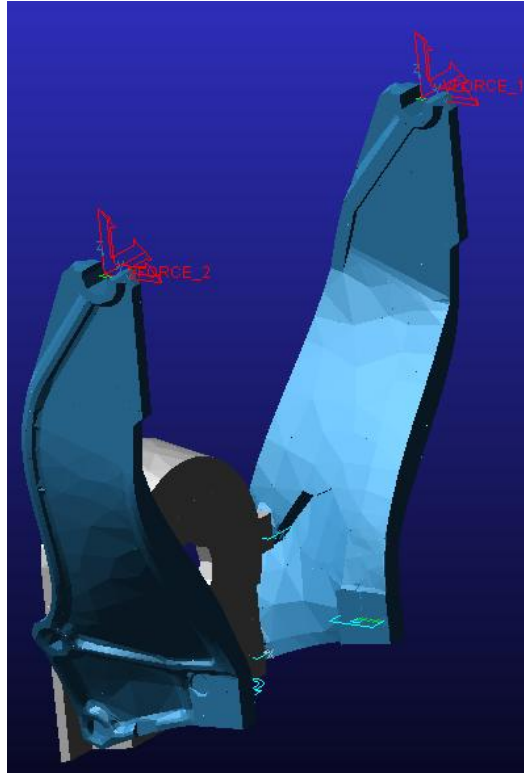
ANSYS simulointia varten yksinkertaisimmista geometrioista täytyi rakentaa kokoonpano, joka itsessään on vain yksi geometria. Tätä varten yksinkertaisimmista geometrioista rakennettiin SolidWorksissa kokoonpano ja tallennettiin kokoonpano SLDPRT tiedostoksi yhdeksi geometriaksi. Tämän jälkeen tallennettu SLDPRT tiedosto avattiin, yhdistettiin ”Combine” toiminolla kaikki kiinteät geometriat ja tallennettiin STEP tiedostoksi.

Valmiin kokoonpanon tiedoston muodostamisen jälkeen avattiin ANSYS Workbench:n Static Structural ja tuotiin luotu geometria tutkittavaksi ja avattiin työikkuna. Ensimmäiseksi kokoonpanolle luotiin verkotus. Verkotusta varten käytettiin tetraedrielementtejä, joiden koko on minimissään 25 mm. Näin saatiin kokoonpanolle 38 282 elementtiä ja 63 644 solmua. Seuraavaksi asetettiin kokoonpanolle reunaehdot. Jäykät reunaehdot asetettiin vauhtipyöräkotelon ja rungon väliselle kiinnityspinnalle sekä runkosovitteiden alapääkiinnityksille. Voimat asetettiin runkosovitteiden päiden pinta-aloihin. Molempiin aloihin asetettiin kaksi voimakomponenttia, voiman X- ja Y-komponentit. Voiman X-komponentti oli muotoa  $-50000 * \sin\left(\frac{180*time}{\pi}\right)$  ja Y-komponentti  $-50000 * \cos\left(\frac{180*time}{\pi}\right)$ . Voimien asettelun jälkeen kokoonpanoon asetettiin vaikuttamaan vielä maan vetovoiman vaikutus. Kokoonpanoa simuloitiin viiden sekunnin ajan ja tuloksista tutkittiin runkosovitteiden päiden siirtymien suurinta vaihtelua. Kuvassa 16 on esitettyinä voimien ja reunaehtojesen asettelu kokoonpanolle.



**Kuva 16.** ANSYS –ohjelmistossa suoritetun simuloinnin alkutilanne.

ADAMS –ohjelmistossa simulointia varten yksinkertaisimpien kappaleiden kokoonpano rakennettiin joustavia tiedostoja käyttäen. Joustavat kappaleet tuotiin ADAMS View –ohjelmistoon ADAMS/Flex –työkalun avulla yksitellen. Kaikilla kappaleilla oli sama globaali koordinaatisto, jolloin ne asettuivat oikeille paikoilleen suoraan ohjelmaan tuomisen jälkeen. Geometrioiden tuonnin jälkeen geometrioihin alettiin asettaa reunaehtoja. Reunaehdot asetettiin geometrioihin luotuihin IP-pisteisiin. Vauhtipyöräkotelossa oli yksi IP-piste vauhtipyöräkotelon ja rungon liitospintojen kiinnityksen kuvaamiseksi. Tähän pisteeseen asetettiin jäykkä liitos. Runkosovitteissa oli molemmissa neljä IP-pistettä, joista kolmeen asetettiin jäykkä liitos ja neljänteen rakenteeseen vaikuttava voima. Jäykät liitokset asetettiin vauhtipyöräkotelon ja runkosovitteiden välisille liitoksille sekä runkosovitteiden vapaaseen liitoslevyyn. Rakenteeseen vaikuttava voima asetettiin runkosovitteiden päihin muodostettuihin IP-pisteisiin. Kuvassa 17 on havainnollistettuna ADAMS –ohjelmistossa rakennettu kokoonpano systeemistä ja osa reunaehdoista.



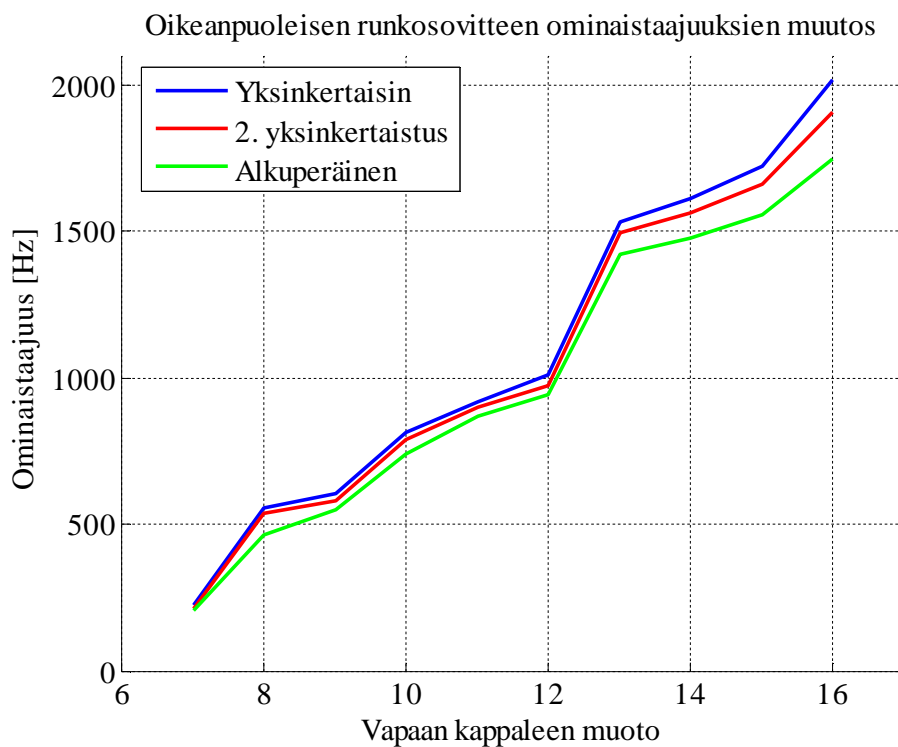
**Kuva 17.** ADAMS –ohjelmistossa suoritetun simuloinnin alkutilanne.

Runkosovitteiden päihin asetettiin parametrinen voima vaikuttamaan ympyrän muotoisella radalla. Molempien runkosovitteiden päihin asetettiin kolmikomponenttinen vektorivoima. Voiman komponentit olivat  $F_x = 50000 * \sin(time)$  ,  $F_y = 50000 * \cos(time)$  ja  $F_z = 0$  . Voimien tarkoituksena oli kuvata runkosovitteiden päihin kiinnitettävän etukuormaimen aiheuttamaa rasitusta, sen liikkuessä käytön aikana. Voimien asettelun jälkeen kokoonpanoa simuloitiin viiden sekunnin ajan, jonka jälkeen tarkasteltiin runkosovitteiden IP-pisteiden kokonaissiirtymien muutosta simuloinnin aikana.

#### 4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

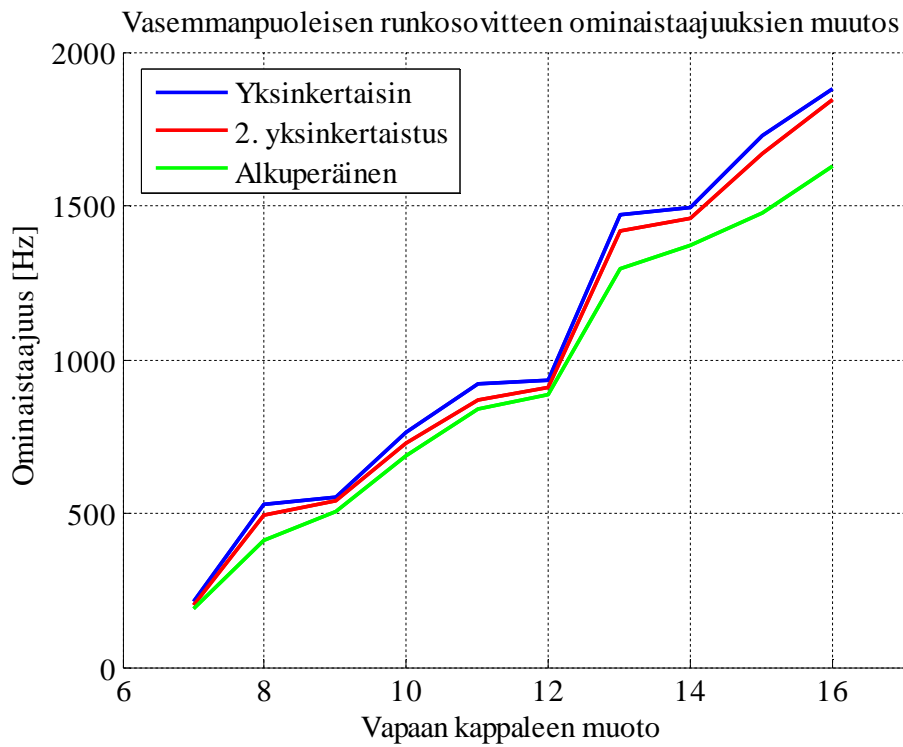
Kappaleiden yksinkertaistamisen vaikutusta niiden ominaistajuuksien suuruuksiin ja mitä tuloksia yksinkertaisimpien kokoonpanojen simuloinneista saatiin, käydään läpi tässä kappaleessa. Ensiksi käydään läpi kappaleiden ominaistajuuksien määrittämisestä saadut tulokset ja lopuksi yksinkertaisimpien kokoonpanojen simulointi.

Tutkittavista kappaleista selvitettiin kuinka niiden kymmenen alinta vapaan kappaleen ominaistajuuden arvoa muuttuisivat yksinkertaistustasojen kesken. Kappaleiden ominaistajuuksien suuruudet määritettiin ANSYS –ohjelmistossa ja saadut tulokset kirjattiin ylös. Ensimmäiset kuusi ominaistajuutta jätettiin huomioimatta niiden ollessa jäykän kappaleen ominaismuotoja. Tuloksissa keskityttiin vapaan kappaleen muotoihin 7-16. Kuvissa 18, 19 ja 20 on esiteltynä runkosovitteiden ja vauhtipyöräkotelon ominaistajuuksien muutokset yksinkertaistustasojen välillä. Kuvissa sininen käyrä edustaa yksinkertaisinta kappaletta, punainen toista yksinkertaistustasoa ja vihreä alkuperäistä kappaletta.

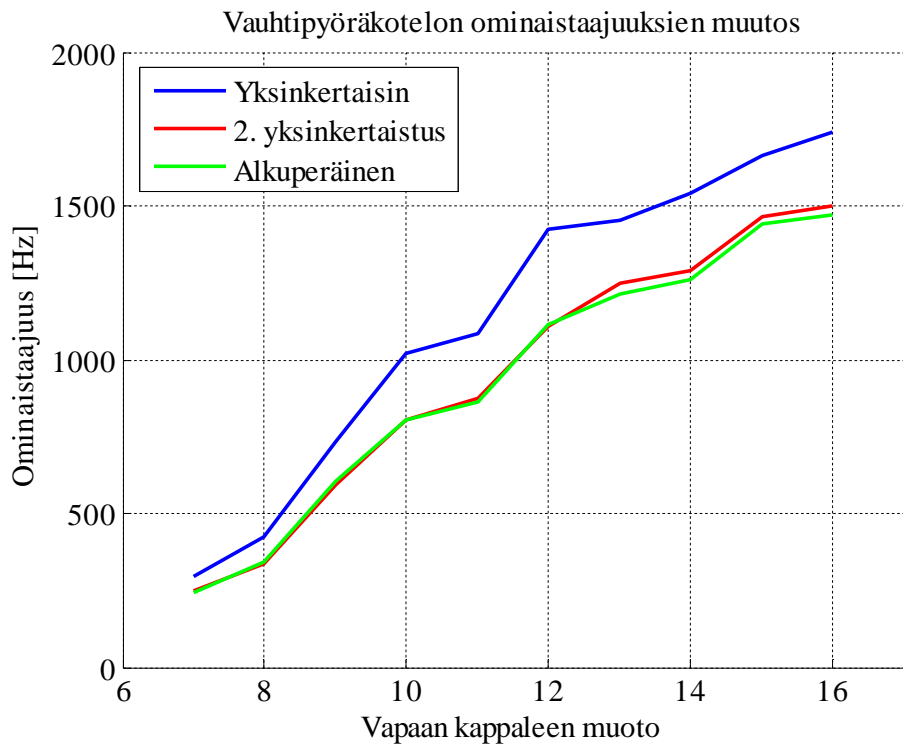


**Kuva 18.** Oikeanpuoleisen runkosovitteen ominaistajuuksien muutos.





**Kuva 19.** Vasemmanpuoleisen runkosovitteen ominaistajuuksien muutos.



**Kuva 20.** Vauhtipyöräkotelon ominaistajuuksien muutos.

Kuvista 18-20 havaitaan ominaistuuksien suuruuden kasvavan kappaleiden yksinkertaistuksessa. Ominaisuuksuudet ovat suuruusluokassa keskenään suunnilleen samoja ja vaihtelevat keskenään identtisesti. Ero alkuperäisen kappaleen ja yksinkertaistetun kappaleen ominaistuuksien välillä kasvaa korkeampiin ominaistuuksiin edettäessä. Moodianalyysiin kulunut aika ei käyttäytynyt lineaarisesti, kun analyysijä suoritettiin. Yksinkertaisimmilla kappaleilla moodianalyysin ajaminen sujui nopeasti. Toisen yksinkertaistuksen moodianalyysin suorittamiseen kulunut aika oli suurempi kuin alkuperäisen kappaleen suorittamiseen kulunut aika jokaisella kappaleella. Taulukossa 1 on esiteltynä moodianalyysihin kuluneet ajat.

*Taulukko 1. Moodianalyysin suorittamiseen kulunut aika ANSYS -ohjelmistossa.*

	Moodianalyysin kesto ANSYS –ohjelmistossa [s]		
	Oikeanpuoleinen sovite	Vasemmanpuoleinen sovite	Vauhtipyöräkotelo
Yksinkertaisin	30	19	12
2. yksinkertaistus	278	375	68
Alkuperäinen	241	236	58

Mitä yksinkertaisempi kappale on, sitä vähemmän elementtejä sen verkotukseen yleensä tarvitaan. Geometrioiden verkotuksessa kuitenkin havaittiin, että geometriat, joille tehtiin hienovarainen yksinkertaistus, tarvitsivat enemmän elementtejä verkotuksessa kuin alkuperäiset geometriat. Kaikkein yksinkertaisimmilla geometrioilla luonnollisesti oli vähiten elementtejä verkotuksessa. Taulukossa 2 on esiteltynä geometrioiden elementtien määrä verkotuksen jälkeen.

*Taulukko 2. Geometrioiden elementtien määrä.*

	Geometrioiden elementtien määrä		
	Oikeanpuoleinen sovite	Vasemmanpuoleinen sovite	Vauhtipyöräkotelo
Yksinkertaisin	11002	6983	2922
2. yksinkertaistus	27876	28438	27735
Alkuperäinen	28583	27699	21711

Vertailemalla taulukoiden 1 ja 2 tuloksia keskenään saadaan määriteltynä kuinka monta elementtiä sekunnissa ratkaisija kykeni ratkaisemaan. Mitä suurempi luku on, sitä tehokkaammin ratkaisuun päästiin. Yksinkertaisimpien geometrioiden suhdeluku oli oletetusti suuri elementtien pienen määrän ja nopean ratkaisuaajan takia. Runkosovitteilla kuitenkin toisen yksinkertaistustason ratkaisu oli raskaampi kuin alkuperäisen geometrian. Vauhtipyöräkotelolla toisaalta kaikkein tehokkain ratkaisu oli toisella yksinkertaistustasolla ja raskain yksinkertaisimmalla. Yksinkertaisimman vauhtipyöräkotelon geometria oli niin äärimmilleen yksinkertaistettu, ettei sille muiden geometrioiden kanssa vertailukelpoista elementtimäärää syntynyt. Taulukossa 3 on esiteltyä mallien elementtien lukumäärä ratkaisuaajan suhteen.

*Taulukko 3. Elementtien lukumäärä ratkaisuaajan suhteen.*

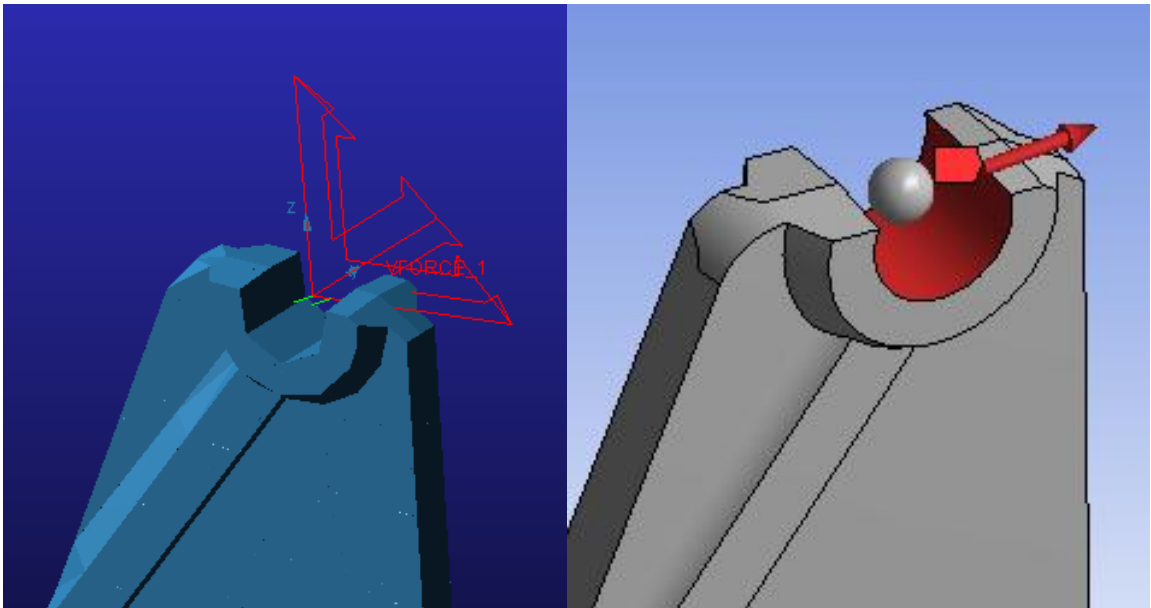
	Geometrioiden elementtien lukumäärä ratkaisuun kuluneen ajan suhteen		
	Oikeanpuoleinen sovite	Vasemmanpuoleinen sovite	Vauhtipyöräkotelo
Yksinkertainen	366,7333	367,5263	243,5
2. yksinkertaistus	100,2734	75,83467	407,8676
Alkuperäinen	118,6017	117,3683	374,3276

Yksinkertaistamisen vaikutusta laskentatuloksiin tarkasteltiin simuloimalla yksinkertaisinta kokoonpanoa ADAMS ja ANSYS simulointiohjelmistoissa. Simulointia varten runkosovitteiden päihin asetettiin molemmissa ohjelmistoissa vaikuttamaan parametrinen ympyrävoima, jonka tarkoituksena oli kuvata etukuormaimesta aiheutuvaa kuormitusta sen liikkeessä. Kokoonpanoja kuormitettiin viiden sekunnin ajan ja simuloinnista saadut siirtymien tulokset on listattuna taulukossa 4.

*Taulukko 4. Maksimisiirtymien vertailu simulointiohjelmistojen välillä.*

	Runkosovitteiden maksimisiirtymät [mm]	
	Vasen	Oikea
ANSYS	8,6	7,9
ADAMS	8	7,6

Tuloksista havaitaan siirtymien olevan maltillisia ja suuruusluokaltaan lähes samoja. Tulosten pieniin eroavaisuuksiin vaikuttaa mittauspiste, joista siirtymiä on mitattu. ADAMS –ohjelmistossa siirtymiä on mitattu runkosovitteiden päihin luoduista IP-pisteistä, jotka eivät ole kiinni kappaleessa vaan kelluvat etukuormaimen kiinnityspinta-alan keskellä. ANSYS –ohjelmistossa mittausta on suoritettu suoraan runkosovitteiden päiden kiinnityspinta-alasta. Mittauspisteiden eroavaisuutta on kuvattu kuvassa 21.



**Kuva 21.** Simulointimalleihin asetettu voima kiinnityspisteissä.

Moodianalysissä määritettyjen ominaistajuuksien perusteella geometrian hienovaraisella yksinkertaistamisella voi olla haittavaikutuksia geometrian simuloinnissa. Runkosovitteiden toisen yksinkertaistustason geometrioiden elementtimäärä oli suunnilleen yhtä paljon kuin alkuperäisten geometrioidenkin, mutta ratkaisuun kulunut aika oli molemmilla suurempi kuin alkuperäisillä. Tähän voi vaikuttaa geometrioiden yksinkertaistuksen aikana syntyneiden geometriavirheiden, tiedostomuotomuutosten ja geometriavirheiden korjaamisen aiheuttamat muutokset geometriatiedoston sisällössä.

## 5 YHTEENVETO

Geometrioiden ominaistuuksien määrittämisessä havaittiin yksinkertaistamisen kasvattavan geometrian yksittäisen ominaistajuuden suuruutta alkuperäiseen geometriaan verrattaessa. Yksinkertaistetun geometrian yksittäisen vapaan kappaleen ominaistajuuden suuruus oli sitä suurempi kuin alkuperäisen geometrian vapaan kappaleen ominaistajuus mitä korkeampiin ominaistajuuksiin edettiin. Ominaisuuudet olivat kuitenkin samaa kokoluokkaa kaikilla geometrioiden moodeilla. Ominaisuuksien muutoksista huolimatta ei voida tehdä yleispätevää johtopäätöstä siitä, kuinka kappale tulisi yksinkertaistaa ja mikä on yksinkertaistamisen vaikutus kappaleen ominaisuuksiin.

Kokoonpanojen simulointia suoritettiin ADAMS ja ANSYS simulointiohjelmistoilla. Simulointia varten geometrioista tehtiin joustavat kappaleet, joista uudet kokoonpanot rakennettiin. Rajoitetun laskentakapasiteetin vuoksi joustavan kappaleen tiedostot saatiin vain yksinkertaisimmista geometrioista tehtyä. Simuloinnit suoritettiin yksinkertaisimmalla kokoonpanolla ADAMS ja ANSYS –ohjelmistoissa ja tuloksia verrattiin keskenään. Tulosten perusteella ei näiden kahden ohjelman välillä ole merkittävää eroa. Viiden sekunnin simuloinnin tulosten perusteella runkosovitteiden päiden kiinnityspisteiden deformaatiot ovat maltillisia ja samaa suuruusluokkaa molemmilla ohjelmilla.

Työssä oli tarkoituksena tutkia tutkittavan rakenteen lisäksi MNF-tiedoston luomisessa käytettävän komentosarjan vaikutusta mallin kokoon ja tarkkuuteen. Joustavia kappaleita tehtäessä havaittiin joustavan kappaleen luomiseen tarvittavan komentosarjan toimivan juuri niin kuin sen pitääkin. Komentosarja valitsee geometriaan luodut IP-pisteet ja luo niihin solmupisteet joustavan kappaleen tiedostoon. Joustava kappaleen luo ADAMS-makro, johonka määritellään geometriassa käytettävän yksikköjärjestelmän ja halutun ominaistajuuksien määrän. Joustavan kappaleen tiedoston tarkkuuteen ja kokoon vaikuttaa geometrialle luodun verkotuksen suuruus. Yksinkertaisille kappaleille verkotuksen tarve on pieni, jolloin kappaleen verkottaminen ja joustavan kappaleen luominen on nopeaa. Suuremmille ja monimutkaisemmille kappaleille vaaditaan tarkempaa ja tiheämpää verkotusta yksityiskohtien kuvaamiseksi, jolloin verkotuksen koko kasvaa reilusti suuremmaksi. Suuremman verkotuksen tekeminen ja siitä joustavan kappaleen tekeminen on raskaampaa, jolloin laskentatehoa ja –aikaa tarvitaan enemmän. Tällöin joustavien kappaleiden tiedostokoot kasvavat myös suuriksi.

Kandidaatintyön tavoitteena oli löytää tehokas tapa joustavien kappaleiden kuvaamiselle ADAMS simulointiohjelmistossa. Käytettyjen menetelmien perusteella tehokkain tapa joustavien kappaleiden kuvaamiselle on käyttäjän kokemus käytettävistä ohjelmistoista ja niiden välisistä työvaiheista. Joustavan kappaleen luomista varten tarvittavien työvaiheiden oppimisen jälkeen on luomisprosessi helppo soveltaa mille tahansa uudelle kappaleelle. Geometrian yksinkertaistaminen nopeuttaa simulointiaikoja, mutta riittävän tarkan yksinkertaistuksen saavuttamiseen voi kulua helposti enemmän aikaa kuin sitä menisi alkuperäisen kappaleen simulointiin.

Jatkotutkimuksia varten tulisi joustavat kappaleet luoda muille yksinkertaistustasoille ja vertailla kokoonpanon simuloinnin tuloksia yksinkertaistustasojen välillä. Lisäksi joustavan kappaleen luomisessa voisi ADAMS-makron lisäksi määrittellä ehtoja, joilla voitaisiin kirjoittaa jännitysten ja venymien tietoja joustavan kappaleen tiedostolle. Tästä voitaisiin jatkaa runkosovitteiden väsymiskestävyyden määrittämiseen simuloinnin avulla.

## LÄHDELUETTELO

ANSYS, Inc., ANSYS® Mechanical™, Mechanical Applications, ANSYS 14.5 Help.

Avitabile Peter, 2007, Experimental Modal Analysis, A Simple Non-Mathematical Presentation, University of Massachusetts Lowell [Viitattu 15.5.2014]

Saatavissa:

[http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Experimentele\\_modale\\_analyse/introduction\\_modal\\_analysis.pdf](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Experimentele_modale_analyse/introduction_modal_analysis.pdf)

Bhandarkar, M. P., Downie, B., Hardwick, M., Nagi, R. 1999. Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data. Computers in Industry. 2000. volume 41, issue 3. s. 211-277.

Bickford, W. B., 1990. A first course in the finite element method. Homewood, Illinois: Richard D. Irving, Inc. 649 s.

Cook, R. D., 1994. Finite Element Modelling for Stress Analysis. New York: John Wiley & Sons, Inc. 320 s.

Hakala, M. K., 1980. Lujuusopin elementtimenetelmä. Espoo: Otapaino. 490 s.

Inman D. 2001. Vibration Engineering. Prentice Hall. 621 s

Mikkola, A., Kerkkänen, K. 2004. Kelluvan koordinaatiston menetelmä monikappaledynamiikassa. LTY, tutkimusraportti, 38 s. ISBN 951-764-885-5

Rantalainen, T. 2012. Simulation of Structural Stress History Based on Dynamic Analysis [verkkodokumentti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 126 s. [viitattu 6.5. 2014]. Väitöskirja.

Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-326-0>

Rouvinen A. 2003. Mekanismien dynamiikan simuloinnissa sovellettavia numeerisia- ja mallinnusmenetelmiä. Tutkimusraportti 44. ISBN 951-764-797-2

Shabana, A. 1997. Flexible Multibody Dynamics: Review of Past and Recent Developments. Multibody System Dynamics. vol. 1. pp. 189-222.

Shabana, A. 1998. Dynamics of Multibody Systems. Second Edition. Cambridge University Press, 372 s. ISBN 0-521-59446-4.

Tietoa yrityksestä. [Valtra Oy Ab:n www-sivuilla]. [Viitattu 6.4.2014].  
Saatavissa: <http://www.valtra.fi/company/128.asp>

Zhang, J., Zhong, J., Gao, R., He L. 2010. The Application of Co-Simulation Technology of ANSYS and MSC.ADAMS in Structural Engineering. Hebei University of Engineering. 4 s.



## LIITTEET

### Liite I

#### MNF-tiedoston luontia varten käytetty ADAMS-makro.

```

! Commands inserted into this file will be executed just prior to the Ansys SOLVE
command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N,
s, V, A)

! ANSYS to Adams link utility on WB for MNF file generation (c) Medeso Oy 2010 /
Pekka Mölkänen
! =====
! NOTE: INTERFACE POINTS DETERMIDED WITH MASS POINTS ON REMOTE POINTS
! =====
! SI -units used for WB: SI Metric (m, kg, N,s)
! Input number of modes, minimum IP x DOF's
! As results, in the analysis folder .MNF file generated, use it for Adams to take
account flexibility of the part
!
! Note: Select Interface Points using Named Selection tool and name it to "IP_Points".
This ANSYS component name
! is used later on.
/COM Number of modes?
N_MODE = 24      ! moodien lkm, vahintaan IP pisteiden lkm x 6

! all WB load data removed
LSCLEAR,ALL

! Interface Points selection via Remote Points
esel,,enam,,mass21
nsle
esel,all

! Units: SI Metric (m, kg, N,s)
/UNIT,SI
ADAMS,N_MODE,0,0

! Swindle WB Solve command

/nopr
*abbr,solve,stat

! Note: Even WB run ends with "General Error" message, check from Solution Information
if
! there is any "ERROR" level messages, here is a sample:
! NUMBER OF WARNING MESSAGES ENCOUNTERED= 6
! NUMBER OF ERROR MESSAGES ENCOUNTERED= 0

! If not, .MNF file created in ..\[model_name]_files\dp0\SYS-x\MECH folder

/go
/COM
=====
===
/COM
=====
===
*MSG, INFO,
  ADAMS MACRO GENERATED .MNF FILE IN "..\[model_name]_files\dp0\SYS-x\MECH" FOLDER
/COM
=====
===
/COM
=====
===
/nopr

```