



# Uuden sukupolven turboahtimen asennus työkoneen dieselmoottoriin ja sen tuennan tarkastelu

Petteri Kiiskilä

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2019

Ajoneuvotekniikka  
Työkonetekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikka  
Auto- ja työkonetekniikka

KIISKILÄ, PETTERI:

Uuden sukupolven turboahtimen asennus työkoneen dieselmoottoriin ja sen tuennan tarkastelu

Opinnäytetyö 54 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Huhtikuu 2019

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella uuden sukupolven turboahtimen mekaaninen asennus työkoneen dieselmoottoriin testikäyttöön, tuennan tarpeen selvitys ja varmistua suunnitellun tuennan riittävydestä moodianalyysillä. Työ suoritettiin AGCO Power Oy:lle. Suunnittelu ja CAD-mallinnus suoritettiin käyttämällä Creo Parametric 3.0 ohjelmistoa, ja moodianalyysi suoritettiin käyttämällä ANSYS Workbench 17.0 ohjelmistoa. Lisäksi työssä pyrittiin tarkastelemaan ja selvittämään, voiko suurnopeuskameraa hyödyntää kiinteästi asennettujen komponenttien värähtelyn tutkimiseen moottorikehityksessä. Kuvaukset suoritettiin Phantom Mira LC 310 suurnopeuskameralla, ja kuvamateriaalia analysoitiin Phantom PCC 2.5 ohjelmistolla.

Opinnäytetyössä onnistuttiin suunnittelemaan ja valmistamaan tuki, joka täyttää AGCO Powerin suunnitteluvaatimukset ominaistajuuden suhteen pakolinjan komponenteille. Tuki valmistettiin ja asennettiin moottoriin, ja sen käytössä ei toistaiseksi opinnäytetyötä kirjoitettaessa ole ilmennyt ongelmia.

Tuennan suunnittelua ja valmistustapaa rajoitti se, että siitä haluttiin tehdä yksinkertainen ja helposti valmistettavissa laboratoriotesteihin. Tuennan tarkastelun yhteydessä myös todettiin, että joustavilla kumityynyillä dynamometriin asennetusta dieselmoottorista ei pystytä kuvaamaan hyvin kiinteästi asennettujen komponenttien värähtelyjä, sillä moottorin oma heiluminen oli niin voimakasta.

Tästä julkisesta opinnäytetyöstä poistettiin salassa pidettävät liitteet ja yksityiskohdat.

---

Asiasanat: dieselmoottori, moodianalyysi, turboahdin, suurnopeuskamera

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Vehicle engineering  
Industrial vehicle engineering

Kiiskilä, Petteri:  
New Generation Turbocharger Installation for Industrial Diesel Engine and Support Examination

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 2 pages  
April 2019

---

The target of this thesis was to design the mechanical installation of a new generation turbocharger for an off-highway diesel engine for laboratory testing, to conclude the possible need for a support structure and to verify the support through modal analysis. The thesis was carried out for AGCO Power Inc. The design and CAD software used was Creo Parametric 3.0 and the modal analysis was simulated using ANSYS Workbench 17.0. This thesis also covered if high-speed cameras could be used to investigate the vibrations of rigidly mounted components in engine development. The high-speed camera used was a Phantom Mira LC 310 and the software used for video analysis was Phantom PCC 2.5.

A support was successfully designed and manufactured that fulfilled the AGCO Power design criteria for the natural frequency of exhaust aftertreatment components. The support was manufactured and installed in the engine, and so far, no problems have arisen concerning the support as this thesis is written.

The design and manufacturing methods of the support were limited by the need to make a simple support that could be easily fabricated for laboratory testing. It was also concluded that engines supported on flexible rubber mounts for dynamometer installations are not suitable for high-speed camera vibration analysis on very rigid components due to the engine's own vibration being very prevalent.

Documents and information that must not be made public were removed from this public thesis.

---

Key words: diesel engine, modal analysis, turbocharger, high-speed camera

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	TEORIA .....	7
	2.1 Ominaistaajuus ja pakkovärähtely.....	7
	2.2 Moottorin aiheuttama pakkovärähtely .....	9
	2.3 Moodianalyysin periaate ja sen hyödyntäminen suunnittelussa ...	10
3	KOMPONENTTIEN JA ASENNUKSEN ESITARKASTELU.....	12
	3.1 Moottorin esitarkastelu .....	12
	3.2 Turboahtimen tarkastelu .....	14
4	TUENNAN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI .....	16
	4.1 Tuennan suunnittelu.....	16
	4.2 Moodianalyysi pakosarja-ahdinsysteemistä ja tuennasta.....	23
	4.3 Tuennan kehittäminen simulointia hyödyntäen .....	30
5	TUENNAN ASENNUS JA TARKASTELU.....	34
	5.1 Lopullinen suunniteltu asennus ja fyysinen asennus.....	34
	5.2 Suurnopeuskameramittaus .....	36
	5.3 Moottorin värinä dynamometrissä ja sen vaikutus .....	44
6	POHDINTA .....	47
	6.1 Ahtimen tuennan ja suunnittelun arviointi.....	47
	6.2 Moodianalyysin luotettavuuden arviointi.....	48
	6.3 Suurnopeuskameran käyttö moottorin värähtelyjen mittaukseen .	50
	LÄHTEET .....	52
	LIITTEET .....	53
	Liite 1. Tuen 8D210 tekninen piirustus.....	53
	Liite 2. Tuen 8D211 piirustus. ....	54

**ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)**

$f$	taajuus
$T$	jaksonaika
$F$	voima
$k$	jousivakio
$x$	siirtymä
$f_0$	ominaistaajuus
$m$	massa
<i>CAD</i>	Computer assisted design, tietokoneavusteinen suunnittelu
<i>FEA</i>	Finite element analysis, elementtimenetelmää hyödyntävä analyysi
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics, numeerinen virtausdynamiikka
<i>FPS</i>	Frames per second, kuvaa per sekunti

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, tarkastella ja toteuttaa tuenta uuden sukupolven turboahtimelle työkoneen dieselmoottorissa laboratoriotestausta varten. Työssä selvitettiin turboahtimen valmistajan ja dieselmoottorin valmistajan vaatimuksia ahtimen ja muiden komponenttien kiinnitykseen liittyen. Opinnäytetyössä toteutettiin tuennan suunnittelu ja mallinnus Creo Parametric 3.0 ja moodianalyysi simuloimalla ANSYS Workbench 17.0 ohjelmalla. Opinnäytetyössä myös esitellään tuennan valmis asennus sekä asennuksen tarkastelu suurnopeuskameran avulla. Työ suoritetaan AGCO Power Oy:lle.

Tuennan asennus suoritettiin 4.9 litraiseen nelisynteriseen työkoneen dieselmoottoriin. Moottorin käyntinopeusalue on 800-2100 RPM. Asennettava turboahdin on kokeellinen uuden sukupolven testiahdin, jonka riittävä tuenta haluttiin varmistaa myös laboratorikäytössä.

Opinnäytetyössä käsitellään ensin yleistä teoriaa värähtelystä ja moodianalyysistä, joiden periaatteet tukevat tuennan suunnittelua. Tämän jälkeen asennettavia komponentteja sekä asennuskohteena toimivaa moottoria tarkastellaan lähemmin.

Teorian ja esitarkastelujen jälkeen edetään tuennan suunnitteluun ja mallinnukseen ja sen jälkeen vertailevaan moodianalyysiin turboahtimen ja pakosarjan ominaistajuudesta ilman tukea ja tuen kanssa. Tämän jälkeen tuentaa parannelaan moodianalyysin pohjalta, ja suunnittelutavoitteiden täyttyminen varmistetaan.

Lopuksi opinnäytetyössä esitellään valmis tuenta ja sen asennus moottorissa, sekä käydään läpi suurnopeuskameran tutkittu käyttömahdollisuus moottoriin asennettujen komponenttien värähtelyn analysoinnissa. Lopuksi myös työstä, sen tuloksista ja onnistumisesta käydään läpi pohdintaa.

## 2 TEORIA

Tässä luvussa käsitellään opinnäytetyössä käsiteltävät teoria-asiat. Pehdytään ensin värähtelyyn yleisellä tasolla, tämän jälkeen tässä asennuksessa huomioon otettaviin herätteisiin.

### 2.1 Ominaistaajuus ja pakkovärähtely

Käytännössä kaikilla systeemeillä on ominaistaajuus. Ominaistaajuus eli resonanssitaajuus on taajuus, jolla kappale pyrkii itsenäisesti värähtelemään, kun se poikkeutetaan tasapainoasemasta. Määritellään taajuuteen liittyen taajuuden  $f$  ja värähtelyn jaksonajan  $T$  välinen yhteys kaavalla 1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Kaavan 1 mukaisesti taajuus  $f$  ilmaistaan yksikössä hertsi eli Hz. Kappaleen tai systeemin ominaistaajuus riippuu monesta asiasta, kuten materiaalin ominaisuuksista, muodosta, massasta ja mahdollisesta tuennasta. Ehkä erästä yksinkertaisimmista esimerkeistä värähtelijöiden suhteen on massa jousen päässä, joka muodostaa harmonisen värähtelijän. Yleisesti jousiin liittyen voidaan todeta pätevä Hooken lain, joka määrittää jousivoiman ja tasapainotilan poikkeaman välisen yhteyden kaavan 2 mukaisesti (Knight 2014, 439).

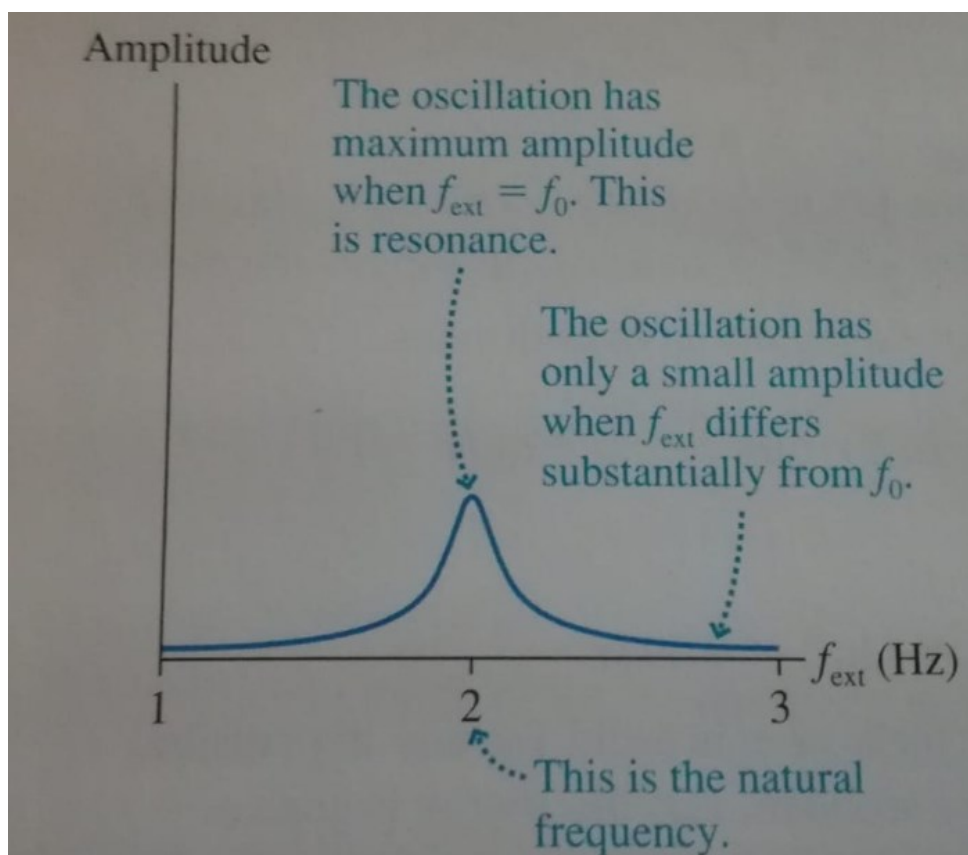
$$F = kx \quad (2)$$

Kaavassa 2  $F$  kuvaa tasapainoasemaa päin palauttavaa voimaa,  $k$  kuvaa jousen jousivakiota ja  $x$  kuvaa poikkeamaa tasapainoasemasta. Näin ollen palauttava voima on suoraan verrannollinen jousivakioon (jousen jäykkyyteen) ja poikkeamaan. Kun mallinnetaan harmonista värähtelijää Hooken lain mukaisen jousen ja jousen päässä olevan massan avulla, voidaan tällaisen ominaistaajuus määrittellä yleisesti seuraavalla harmonisen värähtelijän kaavalla 3 (Knight 2014, 448).

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

Kaavassa 3 suure  $f_0$  kuvaa systeemin (yksinkertaistetussa tapauksessa jousen ja massan) ominaistajuutta,  $k$  kuvaa jousen jousivakiota ja  $m$  kuvaa värähtelevää massaa.

Jousi-massasysteemi pyrkii siis värähtelemään itse omalla ominaistajuudellaan, kun se värähtelee itsenäisesti. Jos systeemi taas saa herätteen jostain muuta kautta, ja se pakotetaan värähtelemään tällä herätetaajuudella, on kyse pakkovärähtelystä. Se, kuinka tehokkaasti pakkovärähtelyn vaikutus siirtyy toiseen systeemiin, eli kuinka suurella amplitudilla systeemi värähtelee, riippuu siitä, kuinka lähellä resonanssitaajuus ja pakkovärähtelyn taajuus ovat toisiaan (Knight 2014, 448). Tätä ilmiötä kuvaa seuraava havainnollista kuva (kuva 1).



KUVA 1. Havainnollistava kuva resonanssitaajuuden  $f_0$  ja pakkovärähtelyn  $f_{\text{ext}}$  taajuuksien suhteesta amplitudiin (Knight 2014, 448).



Vaikka nämä yksinkertaistetut esimerkit koskevat jouta ja sen päässä olevaa massaa, voidaan tämän saman periaatteen ajatella pätevän myös vastaaviin, monimutkaisempiin systeemeihin. Esimerkiksi teräkset ja valuraudat joustavat taiputettaessa, ja niiden voidaan ajatella toimivan jousina. Mitä jäykempiä ne ovat esimerkiksi materiaalista, muodosta, tuennasta ja materiaalihyvyydestä johtuen, sitä suuremmaksi niiden jousivakion voisi kuvitella olevan, joka kaavan 2 mukaisesti kohottaa systeemin ominaistajuutta. Mitä enemmän massaa tämän ”jousen” massakeskipisteessä on, sitä matalampi systeemin ominaistajuus on kaavan 2 mukaisesti, joskin ei aivan kaavan esittämällä yksinkertaisella tavalla, kun kyseessä on monimutkainen systeemi. Tällaisen systeemin värähtelyn amplitudiin eli värähtelyn liikkeen suuruuteen vaikuttaa luonnollisesti myös kappaleen etäisyys sen tukipisteistä, sillä etäisyyden kasvaessa tukipisteestä liikkeen suuruus moninkertaistuu.

## 2.2 Moottorin aiheuttama pakkovärähtely

Koska turboahdin asennetaan dieselmoottoriin, täytyy moottorista aiheutuva pakkovärähtely huomioida. Vaikka moottorissa onkin useita pyöriä komponentteja, kuten nokka-akseli ja kampiakseli, sekä pystysuunnassa liikkuvia komponentteja kuten mäntä ja kiertokanget, merkittävin pakkovärähtelyn aiheuttaja tässä tilanteessa on moottorin palotaajuus (Immonen, 2018). Palotaajuus on siis se taajuus, jolla moottorin sylintereissä tulee työtahti polttoaine-ilmaseoksen syttymisestä ja palamisesta johtuen. Asennuskohteena tässä tilanteessa on nelisylinterinen ja nelitahtinen moottori. Koska kyseessä on nelitahtinen moottori, yksi sylinteri sytyttää aina  $720^\circ$  kampiakselin asteen välein, eli joka toinen kierros. Mutta koska sylintereitä on neljä, ja sytytysväli on jaettu tasaisesti kaikkien neljän sylinterin välein, tapahtuu koko moottoria tarkastellen työtahti aina  $180^\circ$  kampiakselin asteen välein eli puolen kampiakselin kierroksen välein. Toisin sanoen nelisylinterisen ja nelitahtisen moottorin palotaajuus on kaksi kertaa moottorin kierrosnopeus.

Asennuskohteena toimivan työkoneen dieselmoottorin käyntinopeusalue on noin 800-2100 RPM. Jos tämä muutetaan yksikköön kierrosta / sekunti, on käyntinopeus luokkaa  $n = 13-35$  Hz. Kun huomioidaan palotaajuus, eli työtahti aina kaksi

kertaa yhden kierroksen aikana, saadaan palotaajuusalueeksi 26-70 Hz. Tämä on siis se pakkovärähtelytaajuusalue, joka pitää erityisesti huomioida tuentaa suunniteltaessa, ja jonka mukaan tuennan ominaistajuus pitää suunnitella. Suunnittelutavoitteena pakosarja-turboahdinsysteemin ominaistajuudessa voidaan siis pitää riittävää palotaajuuden ylitystä, jotta millään käyntinopeusalueella ei pääse tapahtumaan resonanssia. Yleisenä suunnitteluohjeena vastaaville komponenteille on käytetty vähintään 120 Hz ominaistajuutta nelisynterisissä moottoreissa (Immonen, 2018).

### **2.3 Moodianalyysin periaate ja sen hyödyntäminen suunnittelussa**

Moodianalyysin pääperiaate on tutkia ja selvittää systeemien ja rakenteiden dynaamisia ominaisuuksia, kuten taajuutta, vaimennusta ja värähtelyn ominaismuotoja (Avitabile 2018, 6).

Moodianalyysin avulla pyritään selvittämään rakenteen resonanssitaajuudet ja värähtelyn ominaismuodot. Rakenteen omista ominaisuuksista, kuten massasta, jäykkyydestä ja muodosta, riippuu rakenteen antama vaste herätteeseen ja värähtelyn muoto. Värähtely voi olla esimerkiksi taipumista tai kiertymistä, ja eri resonanssitaajuuksilla värähtelyn muoto on usein erilaista. Moodianalyysi ei anna suoraa vastausta siihen, onko rakenne hyvä vai huono, ja minkä suuruista rakenteen siirtymä on. Moodianalyysillä pystytään kuitenkin selvittämään ominaistajuudet ja värähtelyn ominaismuodot, ja tätä tietoa pystytään hyödyntämään suunnittelussa. (Avitabile 2018, 3-4).

Käytännön moodianalyysi suoritetaan yleensä kiihtyvyyssantureilla, joita asennetaan rakenteeseen riittävästi. Kiihtyvyyssantureiden aikapohjaisesta datasta selvitetään yleensä rakenteen taajuusvastefunktio käyttäen esimerkiksi nopeaa Fourier'n muunnosta. Tämän avulla saadaan selville rakenteen ominaistajuudet, ja riittävällä anturoinnilla voitaisiin selvittää myös rakenteen värähtelyn ominaismuodot eri taajuuksilla. (Avitabile 2018, 6-8). Seuraava kuva havainnollistaa, miten tämä käytännön moodianalyysi etenisi (kuva 2).

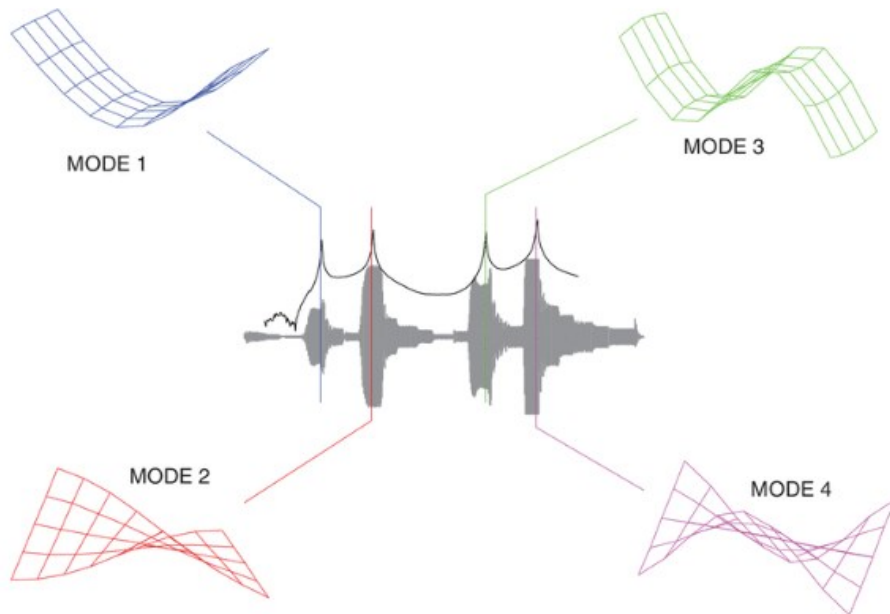


Figure 1.7 Simple plate sine dwell response.

KUVA 2. Käytännön moodianalyysiä kuvaava perusidea, jossa kiihtyvyyssanturin aikadatatista muutetaan taajuuspohjaiseksi vasteeksi, saadaan ominaistajuuudet selville, joiden ominaismuodot voivat olla hyvin erilaisia. (Avitabile 2018, 8)

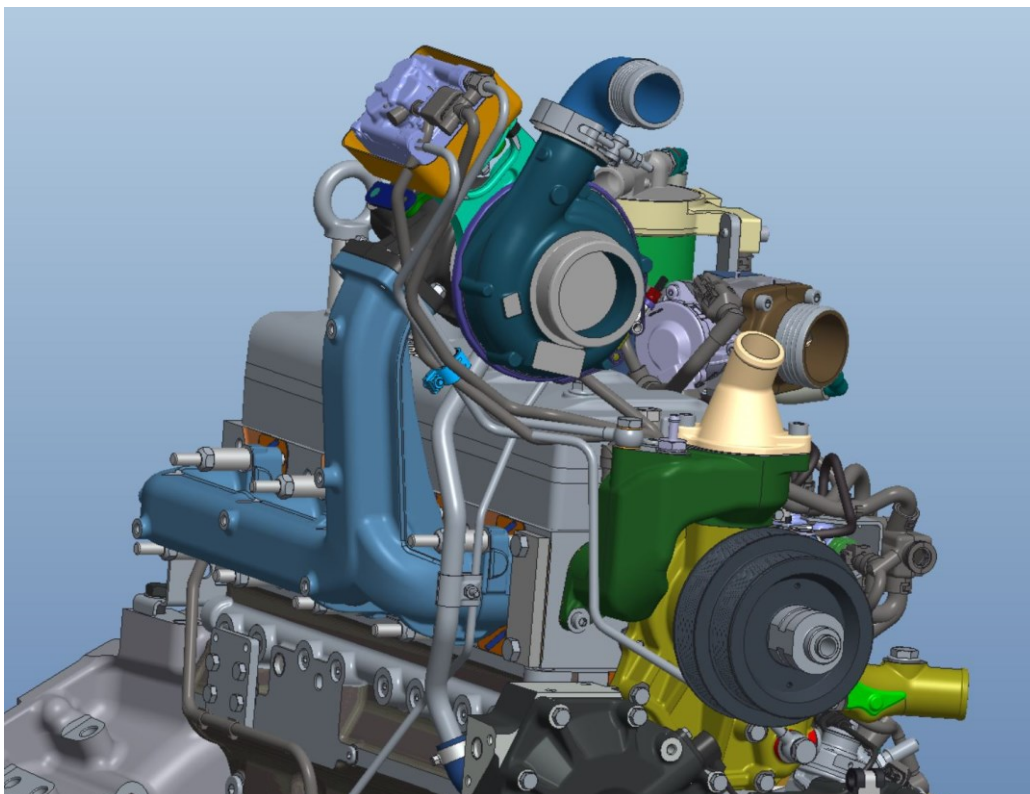
Koska käytännön moodianalyysi on jossain määrin työlästä ja vaatii oikean fyysisen rakenteen, voidaan FEA-ohjelmistoja (Finite Element Analysis), kuten ANSYS:tä, hyödyntää jo suunnitteluvaiheessa. Tällaiset ohjelmistot verkottavat rakenteet elementtimenetelmän mukaisiin yksikköihin, ja materiaaliominaisuuksien sekä esimerkiksi tuennan perusteella pystyvät antamaan simuloinnin kautta saatuja tuloksia. Tätä simulointia voidaan hyödyntää rakenteen suunnittelussa varmistamalla, että ainakaan selkeitä ongelmia ei ominaistajuuksien ja muotojen suhteen ole. Lisäksi ominaismuotojen avulla voidaan havaita, millä tavalla rakennetta tulisi tukea tai muokata, jotta saadaan paras hyöty.

### 3 KOMPONENTTIEN JA ASENNUKSEN ESITARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan asennukseen vaikuttavia komponentteja, eli pakosarjaa ja turboahdinta. Asennus on tarkoitettu suorittamaan laboratoriotestejä varten, ja sen takia tavoitteena on hyödyntää jo valmiita sarjatuotantokomponentteja, jos mahdollista.

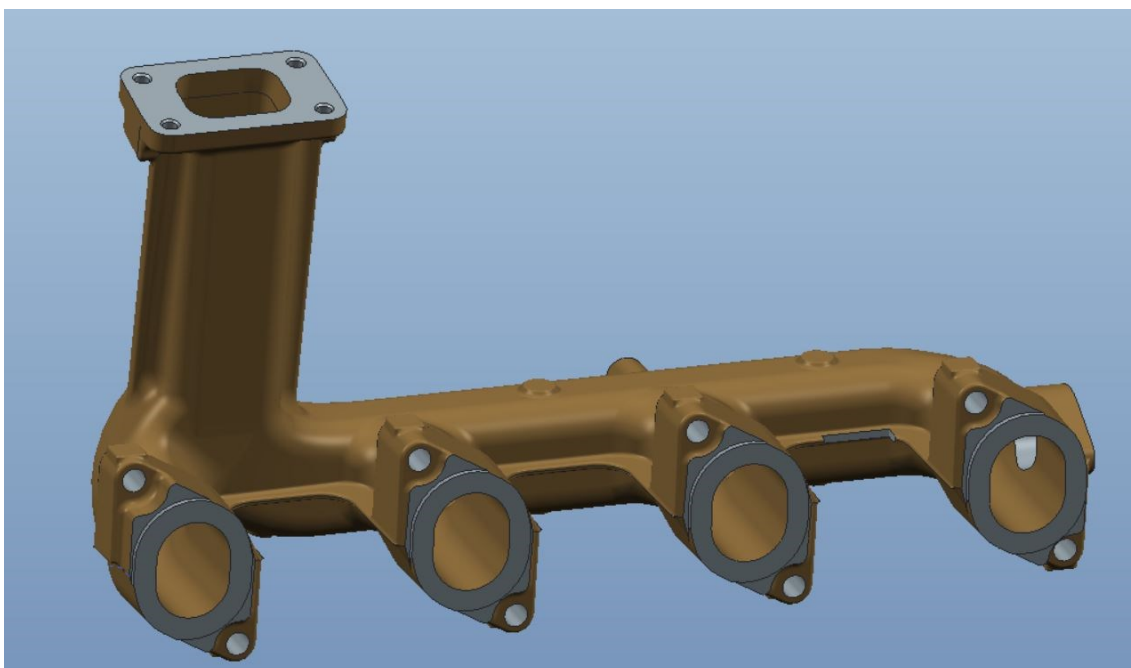
#### 3.1 Moottorin esitarkastelu

Moottori, johon turboahdin asennettiin, on AGCO Power HD49 LFTN dieselmoottori, jonka iskutilavuus on 4.9 litraa. Moottoreilla on useita käyttötarkoituksesta riippuvia viritysasteita, mutta kyseisen moottorin nimellisteho on 148 kW / 2100 RPM ja vääntö on 830 Nm / 1500 RPM. Asennustarkastelua alettiin tehdä eräseen asiakassovellukseen, joka kuvasti todennäköistä uuden turboahdinten käyttökohdetta. Seuraava kuva (kuva 3) havainnollistaa tätä tarkastelun lähtökohtaa.



KUVA 3. Tarkastelun lähtökohta. (Kiiskilä, 2018)

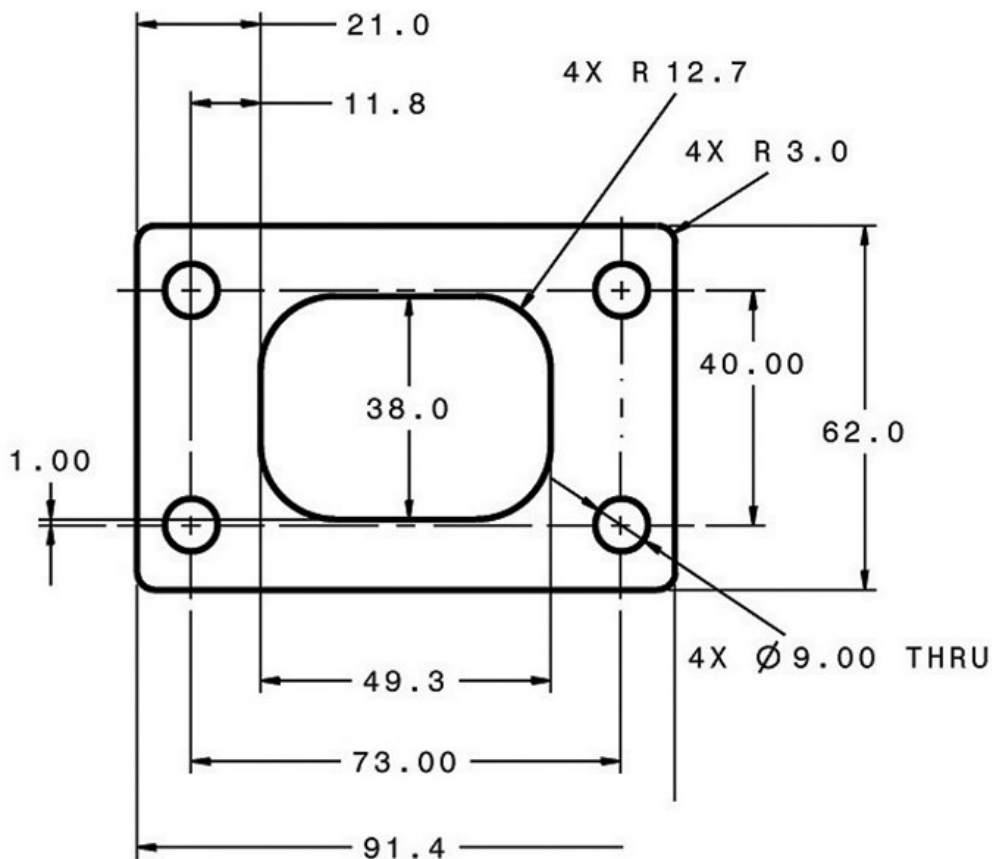
Asennettava turboahdin on valmistajan uuden sukupolven turboahdin ja ns. A-sample, joten juuri tälle ahtimelle tarkoitettua ja suunniteltua ratkaisua ei ole valmiina. Ahdinvalmistaja ja AGCO Power olivat kuitenkin keskustelleet ja spesifioineet yhdessä esimerkiksi laipat ja liitännät ahtimelle niiltä osin, joihin voidaan vaikuttaa. Lisäksi ahtimen ja pakopesän CFD- simuloinnissa simulointia (computational fluid dynamics, numeerinen virtausdynamiikka) oli tehty erään tuotannossa käytössä olevan pakosarjan kanssa, joka soveltuu hyvin myös laboratoriokokeisiin, joten toiveena oli käyttää tätä jo yhteensovitettua pakosarjaa.



KUVA 4. Pakosarja 837074734, jota hyödynnettiin simuloinnissa. (Kiiskilä, 2018)

Ahdinvalmistajan ja AGCO Powerin spesifioima pakosarja 837074734 (kuva 4) on valurautainen tasapainesarja, joka nostaa ahtimen 1. ja 2. sylinterin välistä ylöspäin 195 mm pakokanavien keskitasosta katsoen, 80 mm ulospäin sylinterikannesta ja laippa kääntää ahtimen 10° kulmassa moottoria kohti. Tarkasteltavan moottorikokoonpanon pakosarja 837084427 kohottaa ahtimen 238 mm korkeuteen pakokanavien keskitasosta katsoen, 102 mm ulospäin sylinterikannesta ja kääntää sen 40° asteen kulmassa moottoria kohti. Pakosarja on kiinnitetty sylinterikanteen yhteensä kahdeksalla 10 mm vaarnaruuvilla, kahdella joka sylinterin pakokanavan viereltä. Pakosarja 837074734 valittiin käytettäväksi tässä tilanteessa, koska se on mitoiltaan kompaktimpi, ei nosta ahdinta niin korkealle ja pitää ahtimen pystysuoremmissa kulmassa. Koska testiahdin on keskivertoa

raskaampi muun muassa erilaisen turbiinipesävalun johdosta, merkittävä asennuskulma voisi aiheuttaa suurta rasiusta ahdinta kannatteleville ruuveille. Ahtimen laippa on ns. T25 laippa, joka on laajalti käytössä useiden ahdinvalmistajien keskuudessa. Seuraava kuva havainnollistaa T25 laipan mitoitusta (kuva 5).



KUVA 5. T25 laipan mitoitus (GCG Turbos, 2016).

### 3.2 Turboahtimen tarkastelu

Turboahtimen turbiinipesän sisääntulolaippa on niin ikään edellä mainittu T25 laippa mitoituksensa puolesta. Pakopesä on tähän käyttöön suunniteltu ja uudenvuotoinen muotoilultaan, ja sen pyrkimyksenä on vähentää hukkaportin kautta tulevan pakokaasun virtauksen aiheuttamaa häiriötä turbiinin läpi kulkevan pakokaasuvirran suhteen. Pakoputken laippa turbiinipesässä on 112 mm V-pannalle tarkoitettu, sisähalkaisijan ollessa 96 mm. Ahtimessa on kompressorin imupuolella letkukiinnitys 80 mm letkulle, ja kompressorin painepuolella halkaisijaltaan 70 mm V-pannalle tarkoitettu, sylinterimäisesti tiivistyvä lähtö. Tähän oli toiveena

suunnitella 76 mm letkulle soveltuva laippa, joka olisi soveltuva laboratorioasennukseen. Seuraava kuva havainnollistaa yleiskuvassa asennettavaa turboahdinta (kuva 5).



KUVA 5. Asennettava uuden sukupolven turboahdin. (Kiiskilä, 2018)

Nyt kun asennuskohde eli moottori sekä asennettava turboahdin oli pääpiirteisään ja liitoskohdissaan käsitelty, voitiin alkaa suunnitella asennusta CAD-ohjelmistoa hyödyntäen.

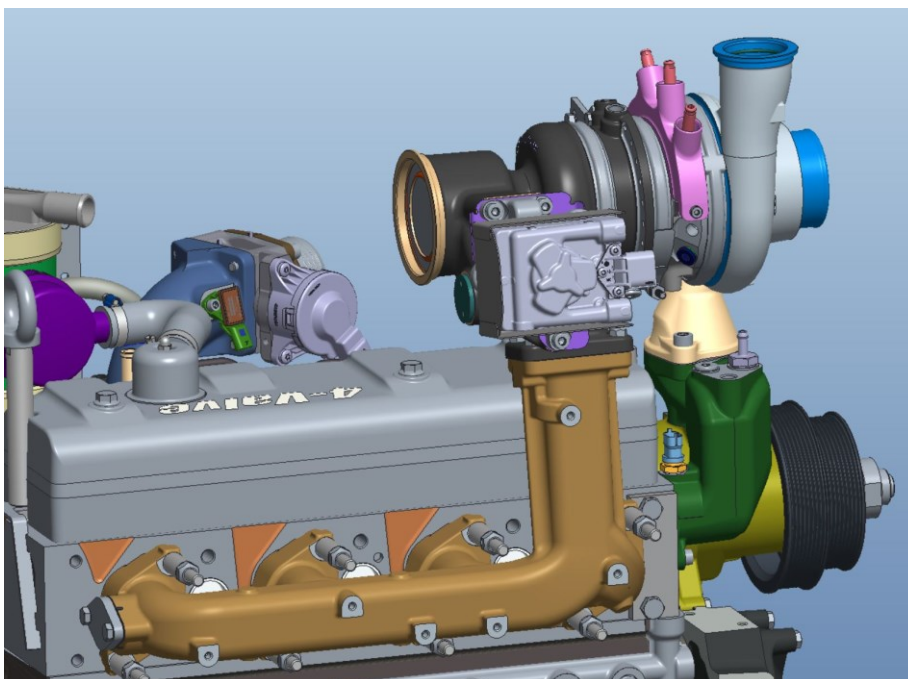
## 4 TUENNAN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI

Tässä luvussa tarkastellaan tuennan suunnittelua ja simulointia. Suunnittelun apuna ja mallinnukseen käytettiin Creo Parametric 3.0 ohjelmistoa, ja simuloinnissa käytettiin ANSYS Workbench 17.0 ohjelmistoa. Aluksi Creo Parametric 3.0 ohjelmistolla asennettiin turboahdin ja pakosarja yhteen, ja tämä kokoonpano asennettiin moottoriin. Sen jälkeen tarkasteltiin mahdollisia tuennan kiinnityspaikkoja. Tämän jälkeen luvussa käsitellään moodianalyysi, jossa referenssiksi simuloitiin asennus ilman tuentaa ja sen jälkeen tuennan kanssa. Lisäksi tehtiin analyysi tuloksista, ja paranneltiin ja jatkokehitettiin tuentaa vastaamaan suunnittelutavoitteisiin.

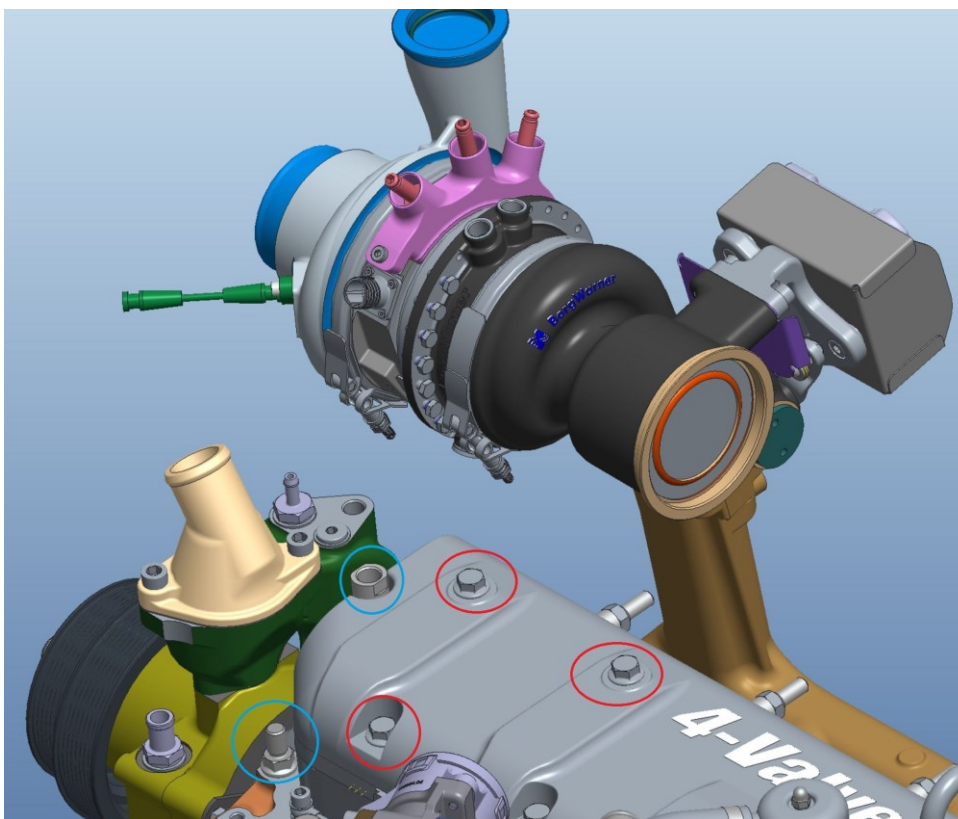
### 4.1 Tuennan suunnittelu

Ensimmäisenä tuennan suunnittelussa ahdin ja pakosarja asennettiin yhteen Creossa. Koska edellä läpi käydyn komponenttien esitarkastelun kautta selvitetiin, että ahtimen ja pakosarjan laipat sopivat suoraan yhteen, ei tässä tapauksessa ollut mitään ongelmia tai tarvetta suunnitella laippa-adaptoreita. Myöskin uusi pakosarja 837074734 oli niin ikään tarkoitettu 4-sylinterisiin moottoreihin, joten tähän pisteeseen päästiin helposti ja nopeasti. Seuraavat kuvat ovat havainnollistavia kuvia siitä, miltä esiasennus näytti, johon piti alkaa suunnitella tuentaa ja sen sijaintia (kuvat 6-7).



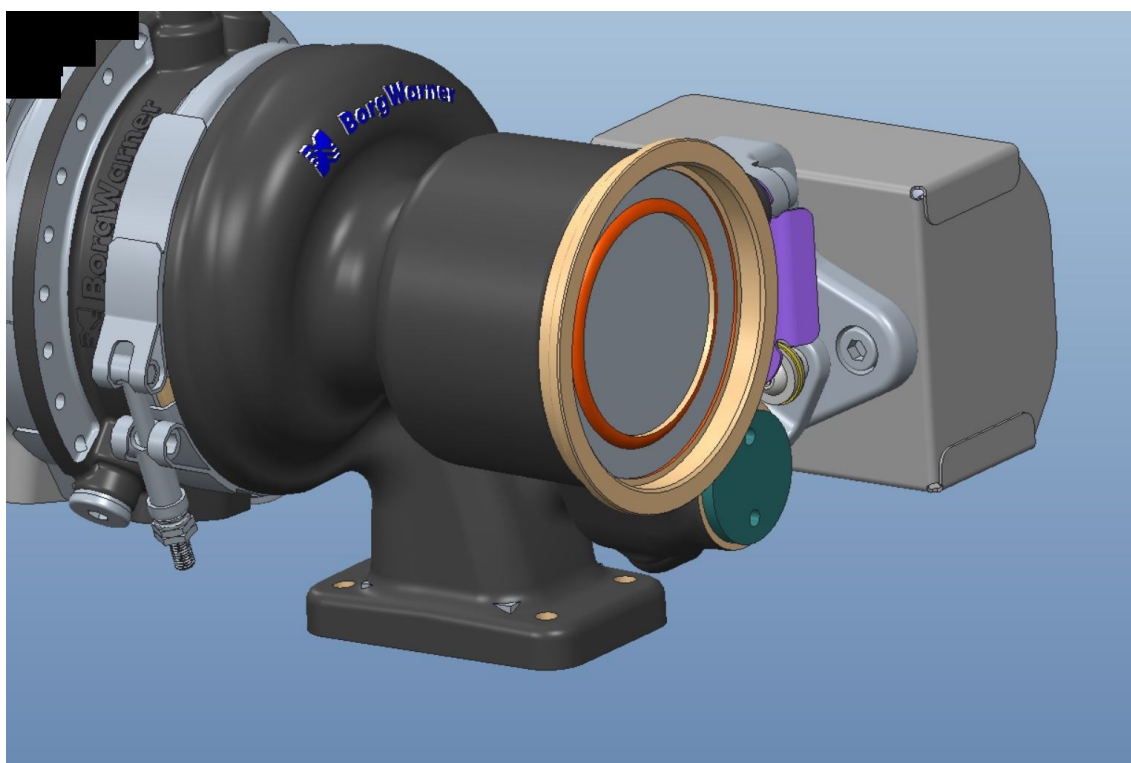


KUVA 6. Turboahntimen asennus pakosarjan 837074734 kanssa moottoriin, sivusta. (Kiiskilä, 2018)



KUVA 7. Turboahntimen asennus pakosarjan 837074734 kanssa moottoriin, takasivusta. Kuvassa ympyröity punaisella ja sinisellä tuennan mahdollisia pisteitä. (Kiiskilä, 2018)

Ahtimen mahdollisia tuentapisteitä havaittiin olevan keskiössä olevat lukuisat M6 kierrereiät. Tässä vaiheessa ahdinvalmistajan kanssa keskusteltiin siitä, mihin tarkoitukseen ahtimen keskiössä olevat useat M6 kierteet on tarkoitettu, ja voiko niitä käyttää ahtimen tuentaan. Käydyn sähköpostikeskustelun perusteella selvisi, että kierteet olivat alun perin tarkoitettu mahdollisesti käytettävän pneumaattisen hukkaportin aktuaattorin telineen asennusta varten. Tässä tapauksessa hukkaportin aktuaattori on sähköinen ja se on asennettu jo ahtimen turbiinipesän yhteyteen, joten nämä reiät ovat vapaana tuennan asennusta varten. Ahtimessa ei olekaan muita ylimääräisiä kierrereiä, ja näiden kautta saatiin ahdin hyvin tuettua useammassakin suunnassa, joten näitä kierrereiä päätettiin käyttää ahtimen tuennassa. Seuraava kuva havainnoi ahtimen keskiössä hyödynnettäviä kierrereiä (kuva 8).

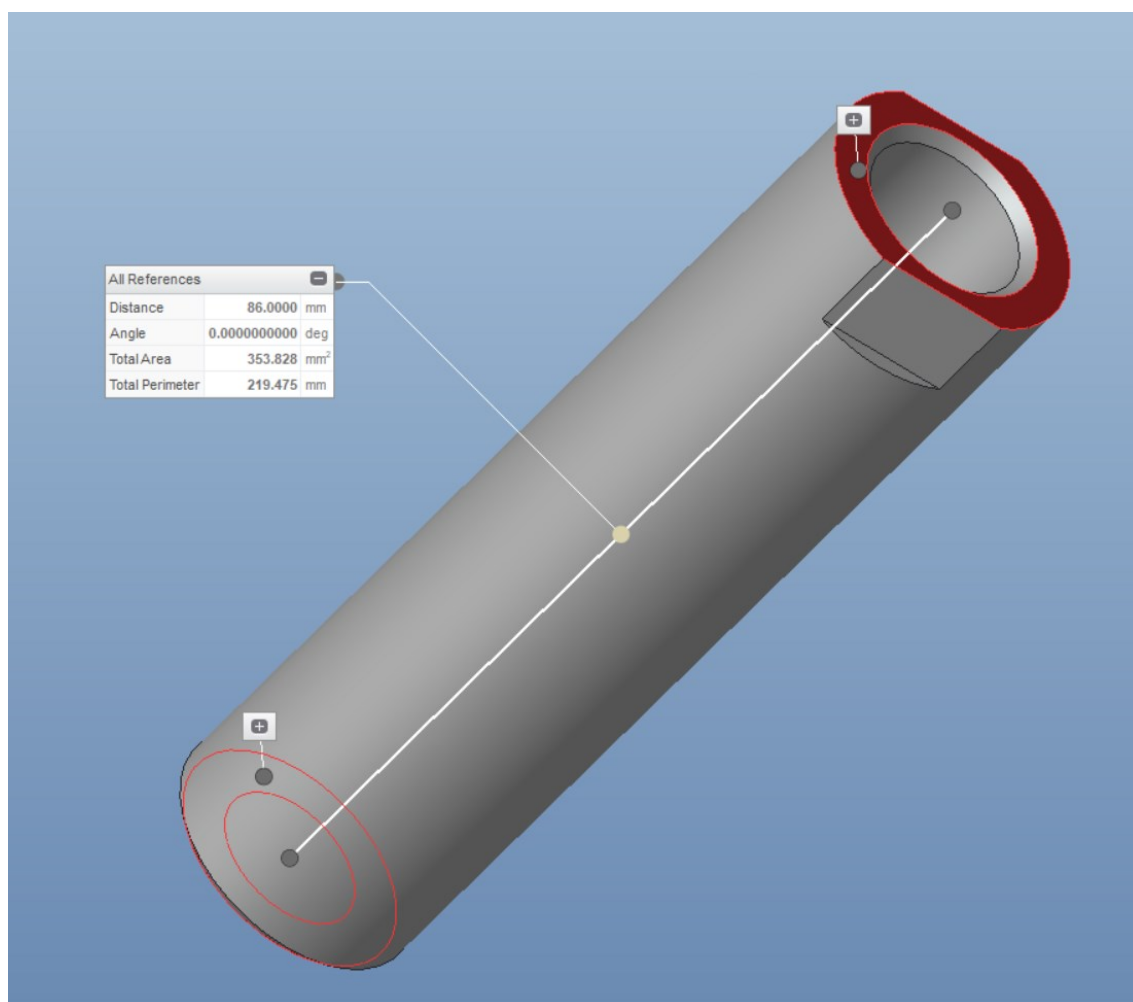


KUVA 8. Turboahtimen turbiinipesä ja keskiön kierrereiät. (Kiiskilä, 2018)

Tuentapaikkaa tarkasteltiin myös moottorin puolelta. Pakosarja tosin nosti ahtimen melko korkealle, hieman vivustonkanta korkeammallekin, ja tällä tasalla olivat lähinnä vivustonkanta kiinnittävät, o-renkailla varustetut ruuvit (ympyröity kuvassa 7 punaisella). Koska ruuveissa on o-renkaat ja selvästi ne tiivistävät

moottorin huohotusta ja öljyroiskeita, ei näitä kannattanut käyttää ahtimen mahdollisesti kuumaan tuentaan.

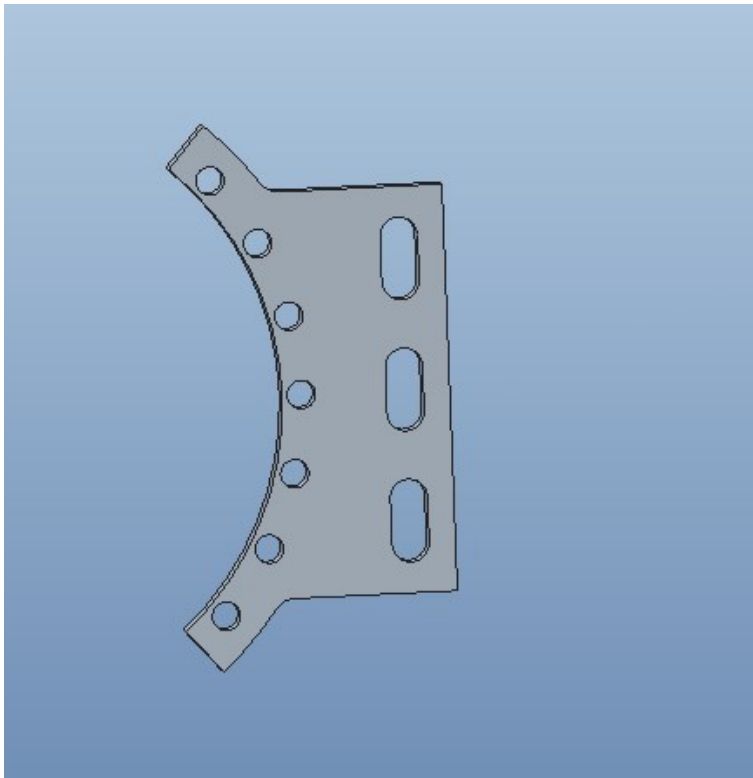
Järkevimmäksi paikaksi sylinterikannen puolella valikoituvat sylinterikannen kiinnityspultit (ympyröity kuvassa 7 sinisellä). Moottorin nostolenkit on kiinnitetty erikoisiin sylinterikannenpultteihin, joiden päässä jatkuu vaarnaruuvi. Näitä erikoisia sylinterikannenpultteja käytetään yleisesti moottorin nostolenkkien kiinnitykseen hyödyntäen 86mm jatkomutteria (kuva 9). Tällaisella jatkomutterilla voidaan tuoda M16 kierre noin vivustonkannen ylätasalle, ja käyttämällä kahden sylinterikannenpultin paikalla tällaisia erikoisia sylinterikannenpultteja, saatiin kaksi M16 kierrettä vivustonkannen ylätasalle tuenta varten.



KUVA 9. Jatkomutteri, olla sylinterikannenpultista saadaan M16 kierre vivustonkannen tasalle. (Kiiskilä, 2018)

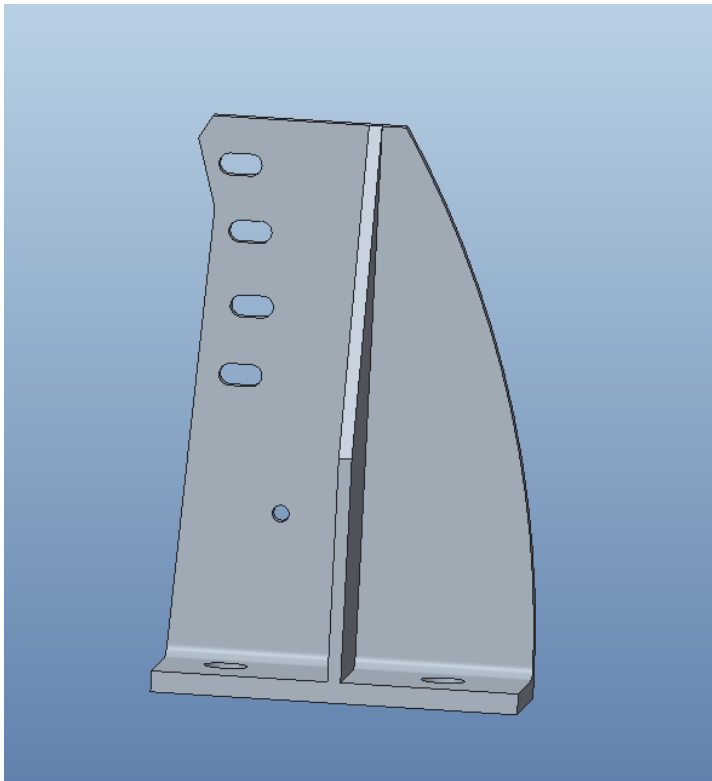
Nyt kun kiinnityspisteet oli päätetty sekä ahtimen että sylinterikannen päässä, alettiin hahmotella tuentaa. Tässä kohtaa selvitettiin, että vain yksi tällainen asennus tehdään laboratorikäyttöön, joten edullisuus, helppo valmistus ja riittävä tuenta olivat johtavia suunnitteluperusteita materiaalin, painon ja muodon optimoinnin jäädessä taustalle. Tästä johtuen tuki päätettiin valmistaa AGCO Powerin tuotekehityksen omassa verstaassa teräslevykappaleista hitsaamalla. Saatavilla oli runsaasti useaa paksuutta S235 teräslevyä, jota pystyttiin polttoleikkauttamaan piirustusten muodon mukaisesti, koneistamaan tarvittavat reiät ja hitsaamaan kokoonpano paikan päällä.

Ahtimen puolen kiinnitys oli erikoisen muotoinen, ja se ei kierrereikiensä puolesta jättänyt paljoa suunnitteluvaraa. Koska muutaman ylimääräisen reiän tekeminen ei tässä vaiheessa vienyt käytännössä sen enempää aikaa, päätettiin hyödyntää riittävästi M6 kierrereikiä ahtimella, yhteensä 7 kappaletta. Tuennassa haluttiin myös huomioida mahdollinen epätarkkuus asennuksessa ja valmistuksessa, sekä ahtimessa oleva keskiön kierron mahdollisuus. Tästä johtuen ahtimeen kiinnitettävään tukipalaan suunniteltiin korkeussuunnassa pidennetyt kiinnitysreiät 8 mm ruuville. Kappaleen levyn ainevahvuudeksi suunniteltiin 5 mm johtuen siitä, että ahtimen keskiöllä oli heikosti tilaa asentaa ruuveja, jos levy on paksumpi. Seuraava kuva havainnoi ahtimelle suunniteltua tuennan palaa 8D210 (kuva 10).



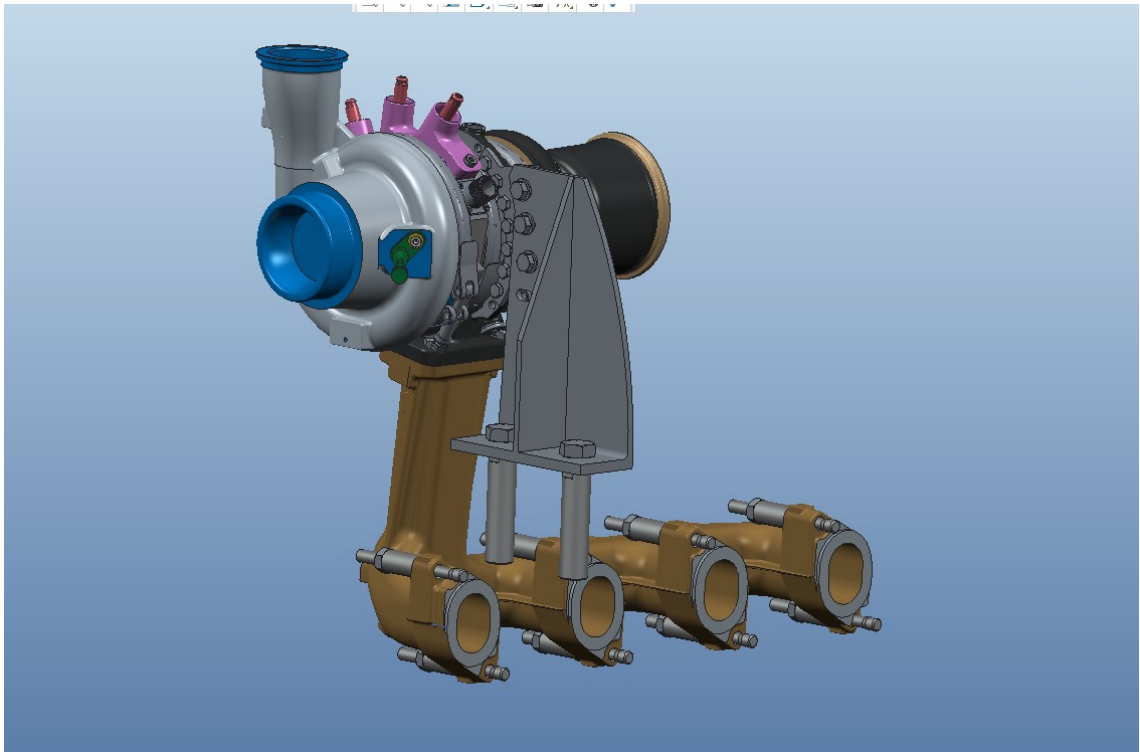
KUVA 10. Ahtimen keskiöön tuleva kiinnityskappale 8D210. (Kiiskilä, 2018)

Tuennan toinen osa suunniteltiin sylinterikannen korotettujen kierrereikien pohjalta ja siten, että se osuisi hyvin kohdalleen ahtimeen kiinnitetyn levyn kanssa. Koska ahtimen yhteydessä olleen palan kanssa huomioitiin pystysuunnan epätarkkuus valmistuksessa ja asennuksessa, haluttiin tässä sylinterikanteen tulevassa tuennassa huomioida sivusuuntainen epätarkkuus asennuksessa ja valmistuksessa. Tästä johtuen sylinterikannen tukeen suunniteltiin sivusuunnassa pidennetyt kiinnitysreiät 8 mm ruuville ja mutterille. Ainevahvuudeksi suunniteltiin alhaalla olevalle levyllä 8 mm, ja tukiseinälle- ja kolmiolle 5 mm. Seuraava kuva havainnoi sylinterikannen puolelle suunniteltua tuentaa 8D211 (kuva 11).



KUVA 11. Sylinterikannen puoleinen suunniteltu tuennan pala 8D211. (Kiiskilä, 2018)

Kiinnitys sylinterikanteen tapahtui siis sylinterikannenpulttien päälle tulevien jatkomutterien kanssa, ja sylinterikannen puoleinen kannake 8D211 kiinnittyi näihin kahdella M16 ruuvilla. Ahtimen keskiön puoleinen kannake 8D210 kiinnittyi ahtimeen seitsemällä M6 ruuvilla, ja nämä kaksi kannaketta kiinnittyivät toisiinsa kolmella M8 ruuvilla ja mutterilla. Kun tämä kokonaisuus hahmoteltiin yhdeksi tuennaksi pakosarjan, ahtimen ja sylinterikannen pultteihin kiinnittyvien jatkomutterien kanssa, tulee kokoonpano näyttämään seuraavalta (kuva 12).



KUVA 12. Suunniteltu tuenta, pakosarja ja ahdin yhdessä kokoonpanona. (Kiiskilä, 2018)

Kun ensimmäinen hahmotelma tuennasta oli saatu aikaiseksi, alettiin sitä tarkastella yhdessä pakosarjan ja ahtimen kanssa ANSYS-ohjelman moodianalyysillä.

#### 4.2 Moodianalyysi pakosarja-ahdinsysteemistä ja tuennasta

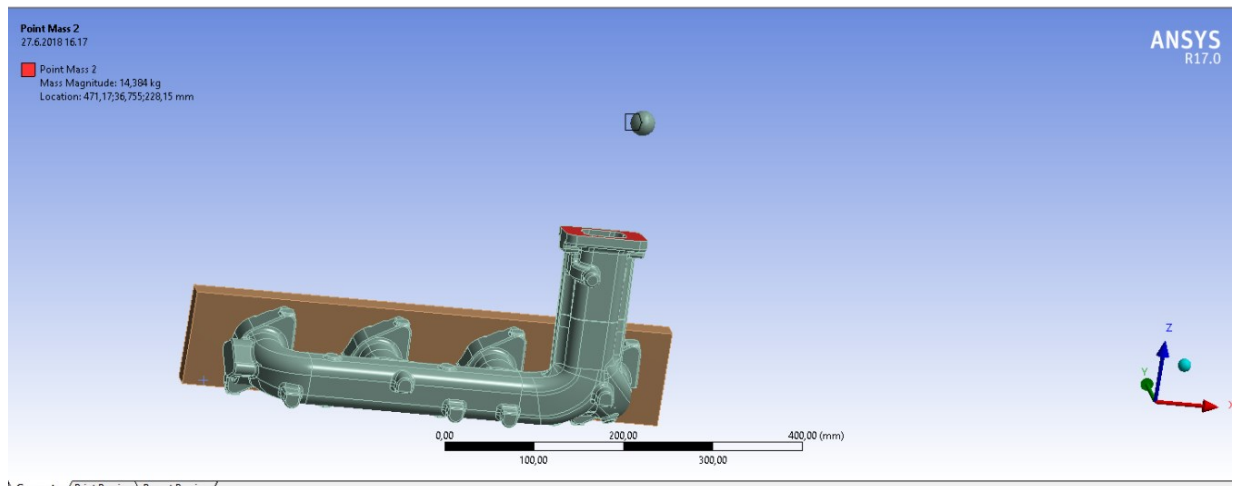
Moodianalyysiä varten tehtiin erikseen CAD-malli, jossa oli vain siivu sylinterikantta pakosarjan puolelta, pakosarja, kannenpulttien päässä olevat jatkomutterit ja suunniteltu tuki. Ahtimen 3D-mallin todettiin olevan turhan raskas tähän tarkoitukseen, eikä se olisi tuonut moodianalyysiin juurikaan lisää tarkkuutta. AGCO Powerin kehitysinsinööri Velipekka Mellinin (2018) kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta todettiin, että tässä tapauksessa voitiin riittävällä tarkkuudella mallintaa ahdinta pistemassana, jonka massakeskipisteen paikka määritellään, ja joka tuettiin kiinteästi pakosarjan laippaan ja suunniteltuun tukeen. Komponenttien ma-

tereaaliominaisuudet laitettiin vastaamaan todellisuutta, pakosarjan ja sylinterikannen ominaisuudet laitettiin vastaamaan valurautaa ANSYS-ohjelman materiaalikirjastosta, ja tuen sekä jatkomutterien materiaaliksi valittiin teräs.

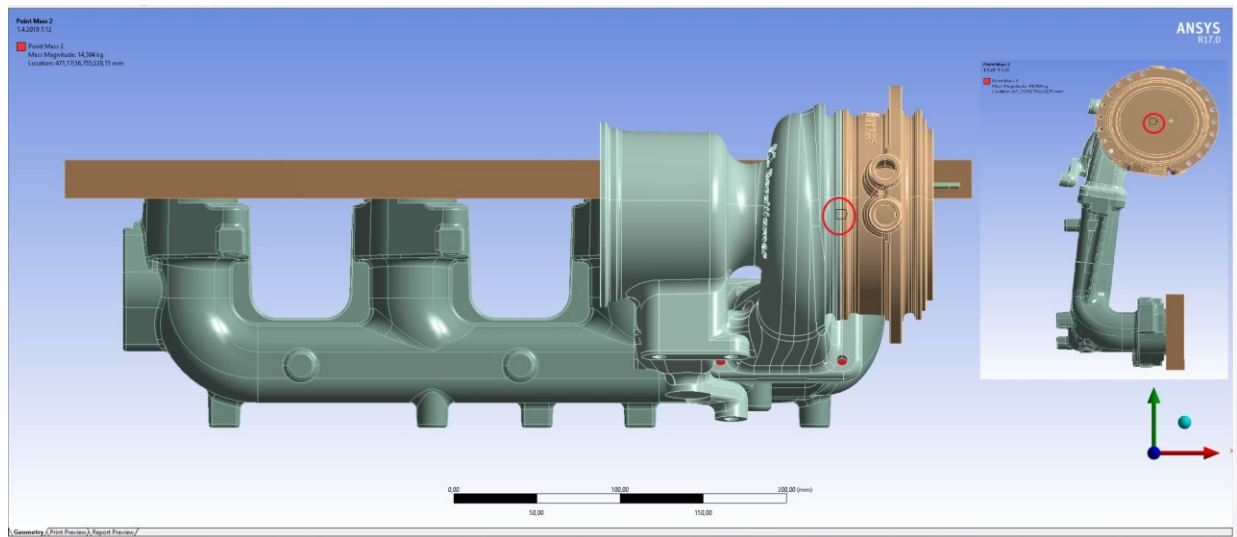
Ahtimen massa määritettiin punnitsemalla se vaa'alla, ja sen massaksi todettiin 14,384 kg. Massakeskipisteen arvioitiin tasapainottelun kautta olevan turbiinipesän ja ahtimen keskiön välisen V-pannan kohdalla, käytännössä ahtimen keskiakselilta hieman pakosarjan laippaa kohti. Tämä johtui siitä, että ahtimen kompressoripesä on alumiinia turbiinipesän ollessa huomattavasti raskaampaa valurautaa, ja turbiinipesän massan keskittyessä enemmän pakosarjaa kohti, kuin keskiakselille. Vaikka aivan tarkkaa massakeskipistettä ei pystytkään määrittämään, hieman karkea arviointikin riitti tämän moodianalyysin suorittamiseen riittävällä tarkkuudella. Tämän arvioidun massapisteen sijainti selvitettiin CAD-ohjelmassa, ja ANSYS Workbenchiin siirrettävään CAD-mallin lisättiin piste kuvaamaan tätä pistemassan paikkaa. Massakeskipiste sidottiin kiinteästi kiinni pakosarjan ahtimen laippaan, ja tuennan kanssa simuloitaessa ahtimen keskiöön tulevan tuen 6 mm ruuvireikiin.

Vertailun vuoksi tehtiin ensin analyysi ilman tuentaa, jotta saatiin selvitettyä, mikä on lähtötilanne, sekä myös tuen vaikutus. Tähän analyysiin tehtiin vain pakosarjamalli, joka oli kiinni sylinterikannen siivussa, ja jonka ahtimen laippaan kiinnitettiin ahtimesta aiheutuva pistemassa. Seuraava kuva havainnollistaa pakosarjamallia ja sen tuentaa, sekä ahtimen pistemassaa (kuva 13). Pistemassan sijainti XYZ-koordinaatistossa oli  $X = 471,17$  mm,  $Y = 36,76$  mm ja  $Z = 228,15$  mm. Pistemassan tarkempi sijainti suhteessa ahtimeen näkyy kuvassa 14. Ahtimen osittainen malli jätettiin pois itse simuloinnissa, mutta sitä käytettiin pistemassan sijainnin oikeanlaiseen sijoittamiseen.



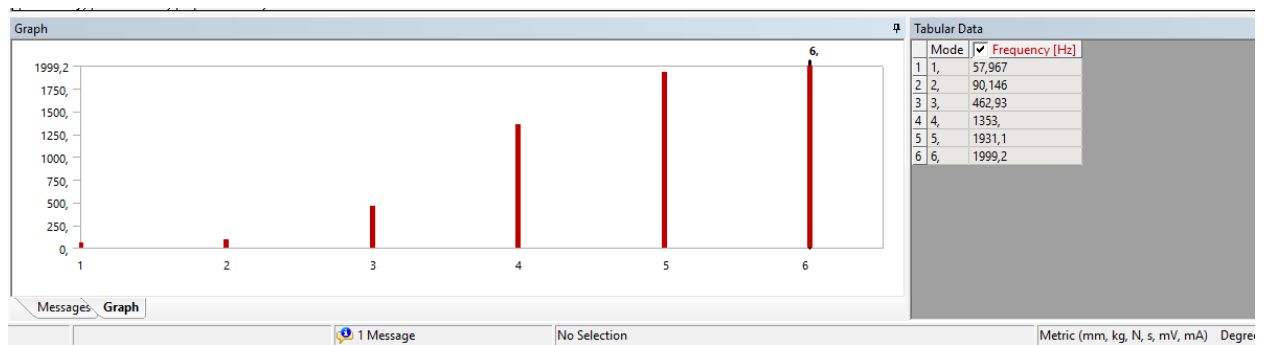


KUVA 13. Referenssanalyysi pelkällä pakosarjalla, pakosarjan yläpuolella näkyy myös pallona pistemassa, joka kuvaa ahdinta. (Kiiskilä, 2018)



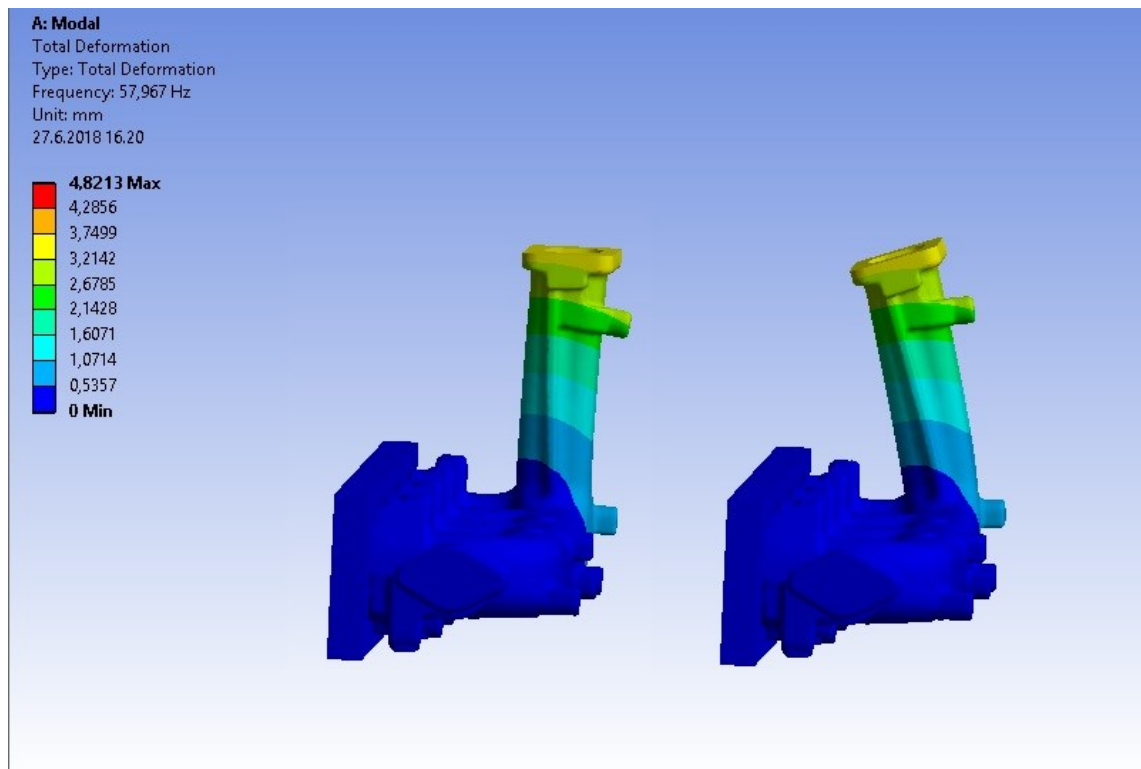
KUVA 14. Pistemassa ahtimen keskiöön nähden, ympyröity punaisella. (Kiiskilä, 2018)

Simulointi antoi tälle rakenteelle tuloksena ominaistajuuksiksi (kolme ensimmäistä) 58 Hz, 90 Hz ja 463 Hz. Seuraava kuva esittää moodianalysissä saadut ominaistajustulokset (kuva 15).



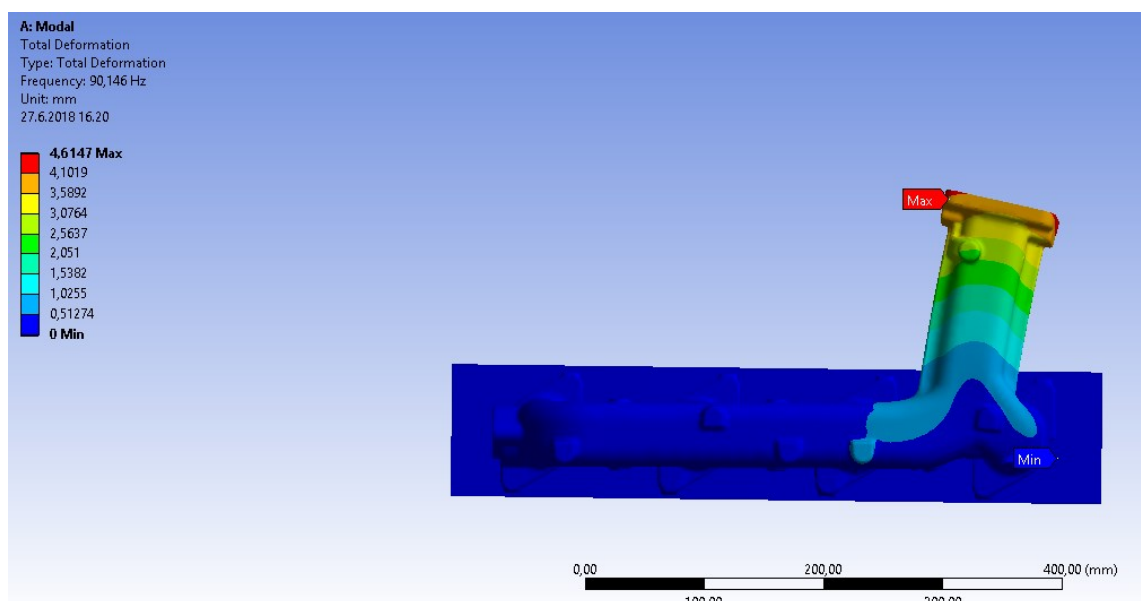
KUVA 15: Moodianalyysin tulos ominaistaajuuksille ilman tuentaa. (Kiiskilä, 2018)

Näistä kaksi ensimmäistä, eli 58 Hz ja 90 Hz ovat ongelmallisimpia. Loput ominaistaajuudet ovat tarpeeksi korkeita, jotta moottorin palotaajuus ei ole niiden kannalta ongelmallinen. Palotaajuuden maksimiarvo on noin aiemmin mainitun mukaisesti 70 Hz, ja suunnittelussa tulisi pyrkiä yli 120 Hz arvoon. Näin ollen 1. ominaistaajuus 58 Hz osuu jo selkeästi palotaajuudella saavutettavaan arvoon, ja vastaa moottorin pyörintänopeutta 1740 RPM. 90 Hz taajuus ei osu palotaajuudelle, mutta se ei täytä suunnittelun vaatimusta. Havaittiin siis, että tuennan tarve on selkeä. Seuraava kuva havainnollistaa 1. ominaistaajuutta ja sen ominaismuotoa, joka on liike moottorista katsoen poikittaissuunnassa, eli sylinterikantta kohti ja siitä poispäin (kuva 16). Kuvaa on muokattu, jotta molemmat ääripää näkyvät samaan aikaan.



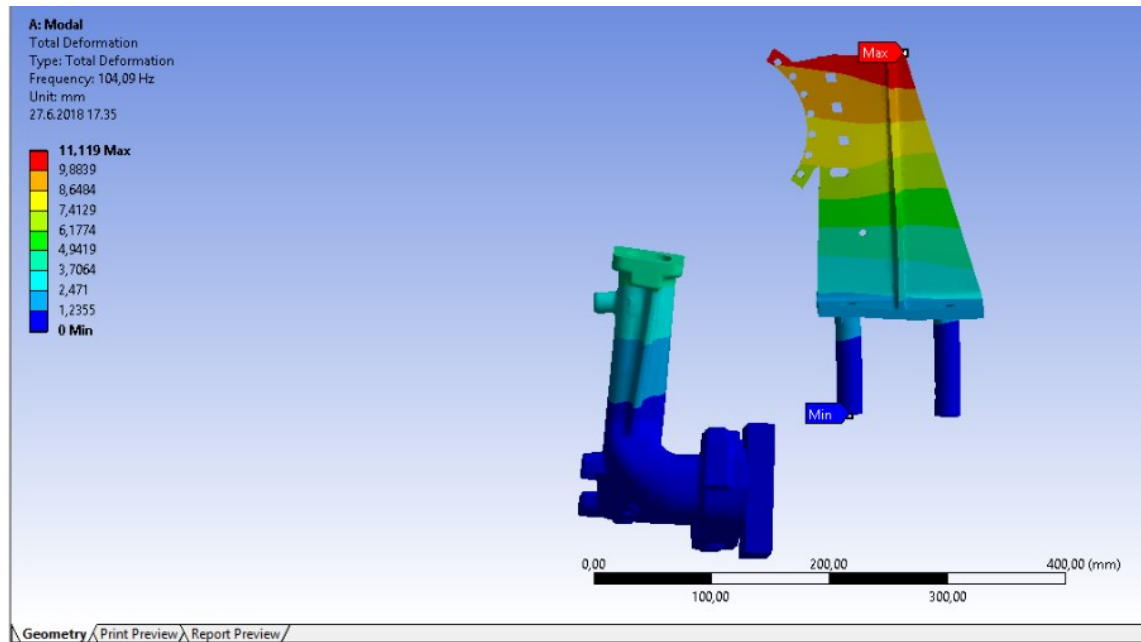
KUVA 16. Ilman tuentaa, 1. ominaistajuus 58 Hz, värähtelyn ominaismuoto. (Kiiskilä, 2018)

Moodianalyysin simuloitussa 2. ominaistajuudessa liike oli pääasiassa moottorin suhteen pitkittäistä. Seuraava kuva havainnollistaa tätä ominaismuotoa (kuva 17).



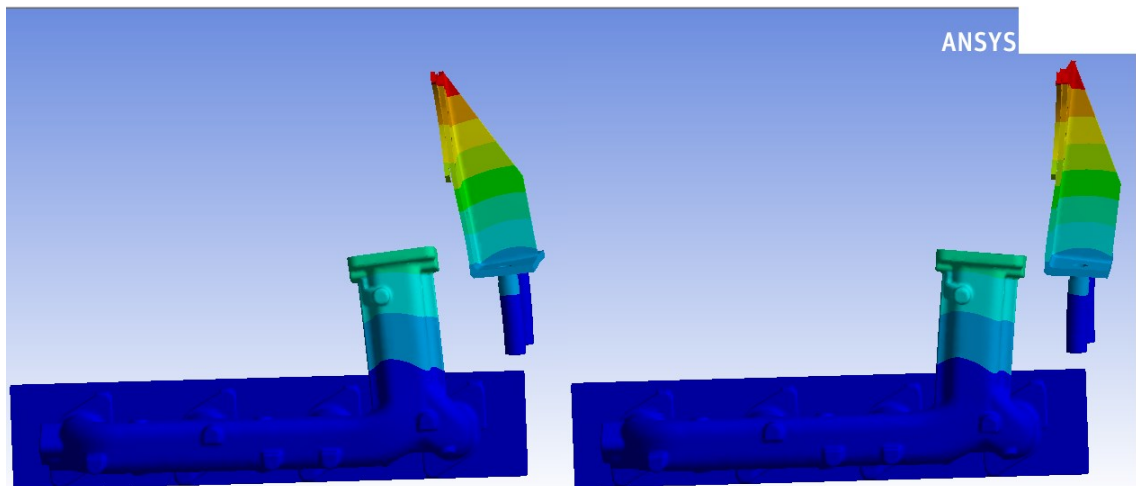
KUVA 17. Ilman tuentaa, 2. ominaistajuus 90 Hz, värähtelyn ominaismuoto. (Kiiskilä, 2018)

Tämän referenssin jälkeen simuloitiin vastaavat tulokset ahtimesta suunnitellun tuennan kanssa. Kuvassa 15 simuloitun 58 Hz ominaismuodon kautta havaittiin, että suunniteltu tuenta, jonka tuki kohdistui pääasiassa moottorista katsoen poikittaiseen liikkeeseen, auttaa juuri tämän ominaismuodon liikesuunnassa. Seuraava kuva esittää vastaavaa simulointia, johon lisättiin myös suunniteltu tuki ja jatkomutterit sylinterikannenpultteihin (kuva 18).



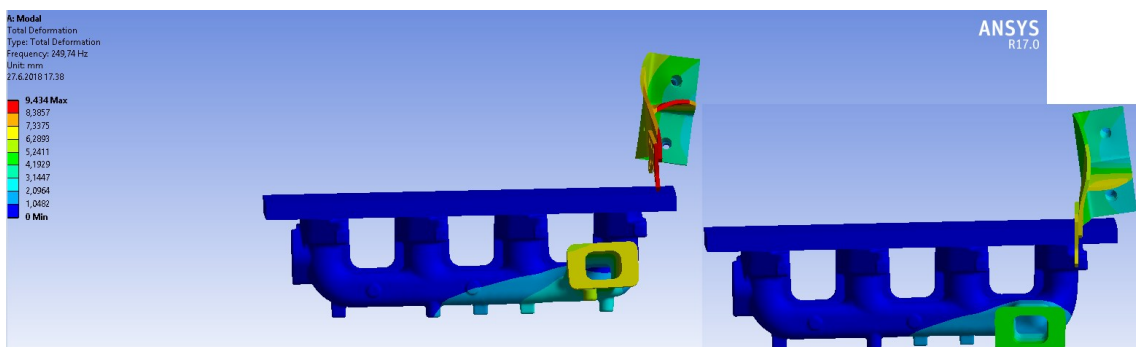
KUVA 18. Simulointi pakosarjalla, ahtimen pistemassalla ja suunnitellulla tuennalla. (Kiiskilä, 2018)

Suunnitellulla tuennalla systeemin ominaistaajuus nousi huomattavasti, ja muodotkin muuttuivat monimutkaisemmiksi. Simuloinnin mukainen 1. ominaistaajuus oli 104 Hz, 2. ominaistaajuus on 250 Hz ja kolmas on 546 Hz. Tuennan myötä toinenkin ominaistaajuus nousi jo merkittävästi suunnittelutavoitteen eli 120 Hz vähimmäisvaatimuksen yläpuolelle, mutta 1. ominaistaajuus oli yhä tämän tavoitteen alla, vaikka se olikin lähes kaksi kertaa korkeammalla taajuudella, kuin ilman tukea. Seuraava kuva havainnoi 104 Hz ominaistaajuuden ominaismuotoa (kuva 19)



KUVA 19. Suunnitellun tuen kanssa, 1. ominaistajuus 104 Hz, värähtelyn ominaismuoto. Kuvaa muokattu, jotta molemmat ääripäät näkyvät yhtä aikaa. (Kiiskilä, 2018)

Kuvasta 19 nähdään, että 1. ominaismuoto ei enää liikkunut sylinterikantta kohti, vaan moottorista katsoen pitkittäin. Tuen kylkiosassa havaittiin myös hieman taipumaa pituussuunnassa, joka havaitaan sivusta kuvattuna. Seuraavassa kuvassa (kuva 20) esitetään tuen 2. ominaistajuuden ominaismuoto, johon sisältyy myös kiertymää ja liikettä pitkittäissuunnassa. Kuvasta 20 havaitaan, että myös tuen 8D211 kaukaisin laita voi olla altis liikkumaan, jos taajuudet olisivat hyvin korkeita. Tällaisen kiertymän vähentämiseen tarvittaisiin todennäköisesti jotain kehämäistä rakennetta, mutta taajuus on myös hyvin korkea, ja siten sen ei pitäisi aiheuttaa ongelmia käytännön tilanteissa.



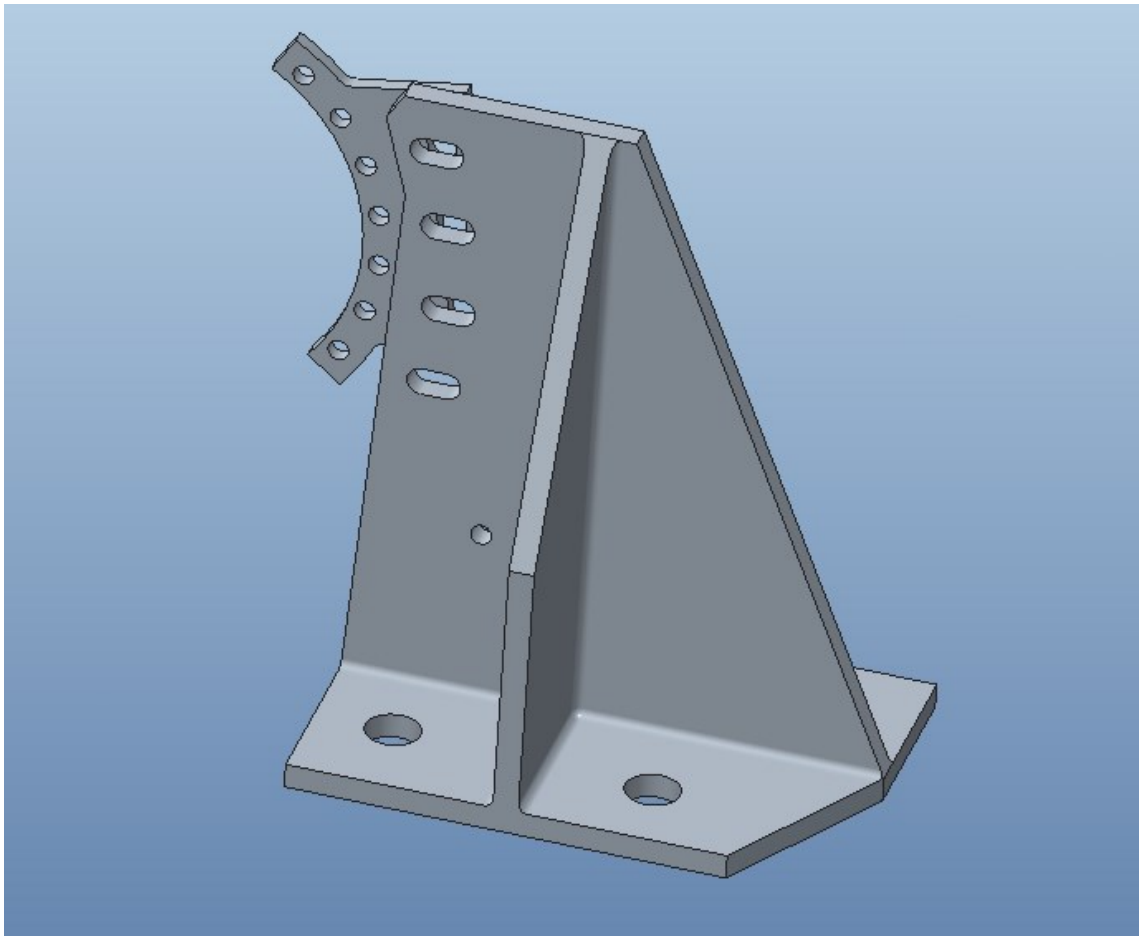
KUVA 20: Suunnitellun tuen 2. ominaistajuuden 250 Hz ominaismuoto, jossa havaitaan myös kiertymää. (Kiiskilä, 2018)

Yhteenvetona voitiin suunnitellusta tuesta tehdyn moodianalyysin perusteella tehdä kaksi johtopäätöstä. Suunniteltu tuki ei ollut vielä tarpeeksi jäykkä, jotta systeemin ominaistajuudet pysyisivät suunnittelutavoitteen 120 Hz yläpuolella, eli tuentaa pitäisi vielä parantaa. Toisena johtopäätöksenä ominaisuudesta nähtiin, että tuentaa pitäisi parantaa erityisesti moottorin pitkittäissuunnassa.

### **4.3 Tuennan kehittäminen simulointia hyödyntäen**

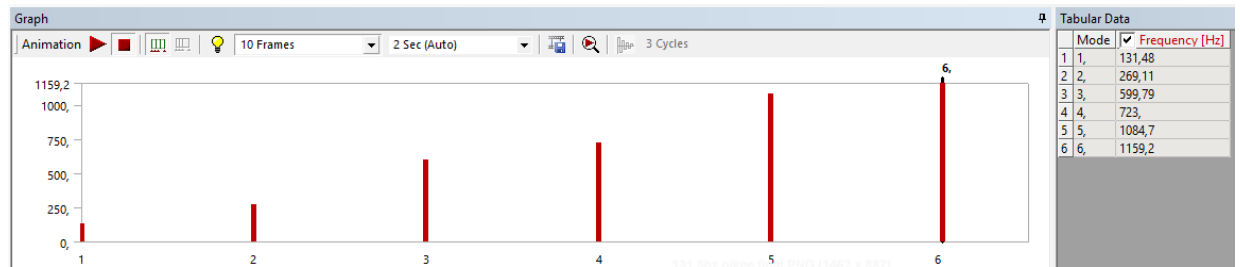
Suunnitellun tuen kanssa suoritetun moodianalyysin myötä havaittiin, että tuentaa tulisi parantaa moottorin pituussuunnassa. Pikaisena parannuksena testattiin koko tuennan ainevahvuuden kasvattamista 8 mm:iin, joka vastasi jo sylinterikannen puoleisen tuen 8D211 alalevyn ainevahvuutta. Tämän korjauksen vaikutus oli vähäinen, sillä 1. ominaistajuus nousi arvoon 107 Hz ja 2. ominaistajuus nousi arvoon 260 Hz. Vaikutus oli vain noin 3 Hz 1. ominaistajuutta korotavasti. Tarvittiin selvästikin tarkempaa muokkaamista tuennan geometrian suhteen. Tuentaa tarkastellessa se olikin huono pitkittäiseen suuntaan, sillä se on vain kahdesta paikasta kiinni sylinterikannessa, ja nämä kaksi kiinnityspaikkaa ovat lähes suorassa poikittaissuuntaisessa linjassa keskenään. Tuenta oli siis hyvä vain poikittaissuunnassa, mutta pitkittäissuunnassa se ei juurikaan antanut tukea. Tukea päätettiin siis parantaa hyödyntämällä myös kolmatta sylinterikannenpulttia lähempänä moottorin imusarjaa ja hieman kauempana sylinterikannen etupäästä.

Tämä kolmas kiinnityspiste ei ole enää lähes suorassa linjassa, ja se jämähöittää ja estää sitä kautta paremmin sylinterikanteen kiinnittyvän tuen liikettä pitkittäissuunnassa. Tukipistettä hyödynnettiin suunnitteleamalla pohjalevy uudelleen siten, että se jatkui kolmannelle kiinnityspisteelle asti kiertäen vivustonkannen korotetun osuuden. Tämän pohjalevyn pidennyksen kautta tuen 8D211 kylkipalan toiselle puolelle tuli mahdollisuus lisätä ylimääräinen kolmiotuki vähentämään mahdollista kiertymää, joten sellainen lisättiin suunniteltuun tukeen. Lisäksi ainevahvuus sylinterikannen puoleiselle tuelle päätettiin jättää arvoon 8 mm, mutta ahtimen puoleisen tuen ainevahvuus pidettiin arvossa 5 mm. Simuloinnin pohjalta paranneltua tukiratkaisua esitetään seuraavassa kuvassa (kuva 21)



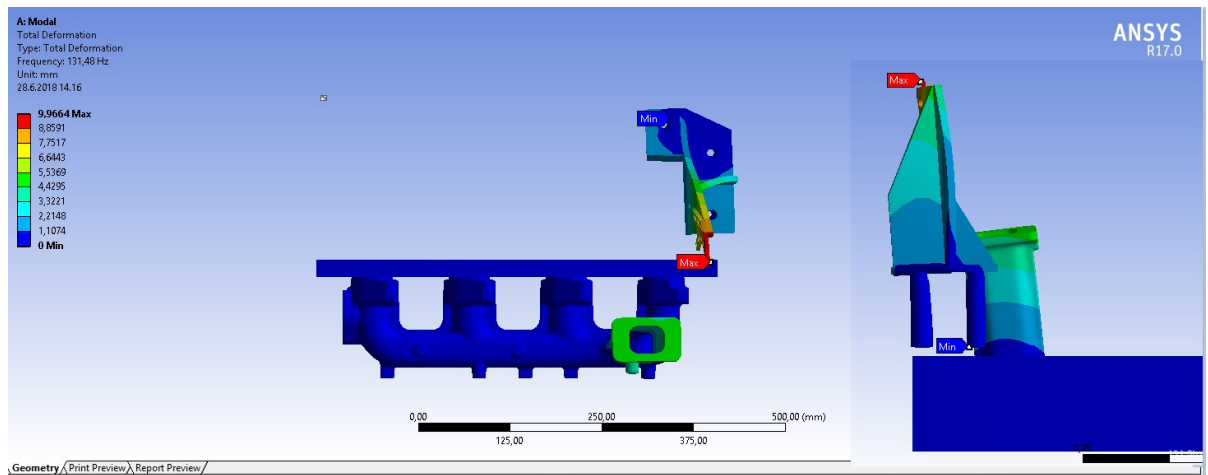
KUVA 21. Simuloinnin pohjalta paranneltu tukiratkaisu tukeen 8D211, joka on kiinni kolmesta kohtaa sylinterikannessa. (Kiiskilä, 2018)

Tällä kolmipistetuelle saatiin jälleen huomattavasti parempia tuloksia. Malli ja verkotus vastasivat edellisiä simuloiteja. Malliin kuului siis sylinterikannen siivu, pakosarja, jatkomutterit sekä paranneltu tuki, ja ahdinta mallinnettiin piste-massana, joka oli kiinteällä liitoksella pakosarjan laipassa ja keskiön tuen kiinnikereissä. Tämän paranneltun tuennan simuloinnin tuloksina saatiin 1. ominaistaajuudeksi 131,5 Hz ja 2. ominaistaajuudeksi 269 Hz. Ominaistaajuuksia parannelulla tuella havainnollistetaan seuraavassa kuvassa (kuva 22).



KUVA 22. Moodianalyysin tulos ominaistajuuksille parannellulla tuennalla. (Kiiskilä, 2018)

Näin siis parannellulla tuella 1. ominaistajuuksikin 131,5 Hz saatiin jo yli suunniteltu vaatimuksen eli 120 Hz. Tarkastellaan myös seuraavassa kuvassa ilmenevää 1. ominaistajuuden ominaismuotoa (kuva 23).



KUVA 23. Parannellun tuen 1. ominaistajuuden 131,5 Hz ominaismuoto. (Kiiskilä, 2018)

Kuvasta 22 havaitaan, että 1. ominaismuoto oli yhä pääasiassa pitkittäissuuntainen. Tuessa ei tosin tapahtunut liikettä juurikaan muualla, kuin ahtimen keskiön tukikappaleessa 8D210 ja sylinterikanteen kiinnittyvän tuen 8D211 yläkulmassa. Pohjalevy ja jatkomutterit eivät käytännössä taipuneet, ja tukikolmioissakin siirtymä oli jo pienempää, kuin alkuperäisessä tuessa. Näin ollen, jos tukea vielä haluttaisiin parantaa, täytyisi ahtimen keskiön tukikappaletta 8D210 pyrkiä jäykistämään, mutta tilanpuutteen vuoksi tämä ei ollut juuri mahdollista. Toinen hyödyllinen toimenpide olisi jäykistää sylinterikanteen kiinnittyvän tuen 8D211



kylkipalaa yläkulmastaan, ja pyrkiä estämään tämä pitkittäissuunnan liike esimerkiksi lisäämällä tukikolmioita kylkipalan laitaan ja yläkulmaan. Ennen tuen perusteellisempaa muokkaamista testattiin jo pelkkä ainevahvuuden kasvatus arvosta 5 mm arvoon 8 mm. Tämän vaikutuksen todettiin olevan hyvin vähäinen ominaistaajuuden noustessa 104 Hz:stä arvoon 107 Hz. Näin tultiin siihen tulokseen, että esimerkiksi nykyisen parannellun tuen 8D211 ainevahvuuden pieni kasvattaminen 8 mm paksuisesta 10 mm paksuiseksi tuskin antaisi merkittävää etua ominaistaajuuden kasvattamiseen. Jäykkyyttä olisi kannattavampaa hakea muodolla kuin pelkällä ainevahvuudella. Suunniteltua tukea ei kuitenkaan enää muokattu enempää, sillä suunnittelutavoite saavutettiin jo tuennan viimeisellä versiolla

Esitetään vielä vertailun helpottamiseksi referenssinä simuloitu tulos 1. ja 2. ominaistaajuudesta ilman tukea, ensin suunnitellulla tuennalla ja moodianalyysin pohjalta parannellun tuennan kanssa seuraavassa taulukossa (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Vertailua helpottava taulukko simuloituista 1. ja 2. ominaistaajuudesta tapauksista ilman tuentaa, ensimmäisen tuennan kanssa ja parannel- lun tuennan kanssa.

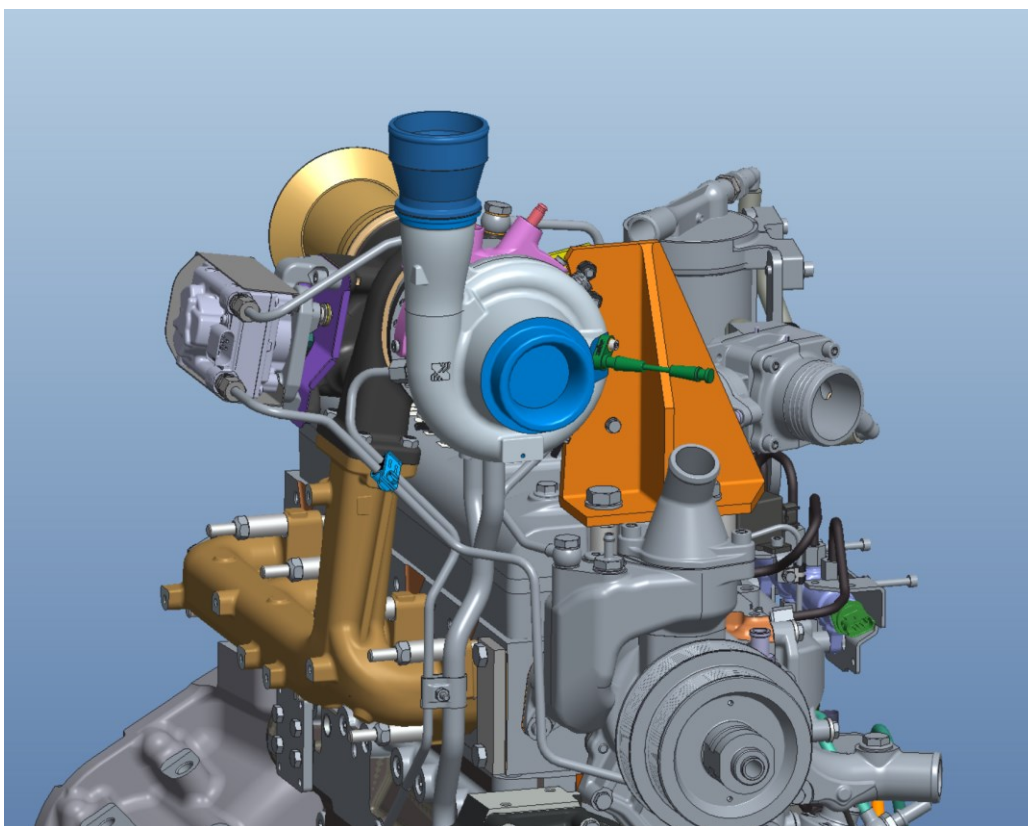
Simulointitapaus	Ilman tuentaa	Ensimmäinen tuki	Paranneltu tuki
1. ominaistaajuus	58 Hz	104 Hz	131,5 Hz
2. ominaistaajuus	90 Hz	250 Hz	269 Hz

## 5 TUENNAN ASENNUS JA TARKASTELO

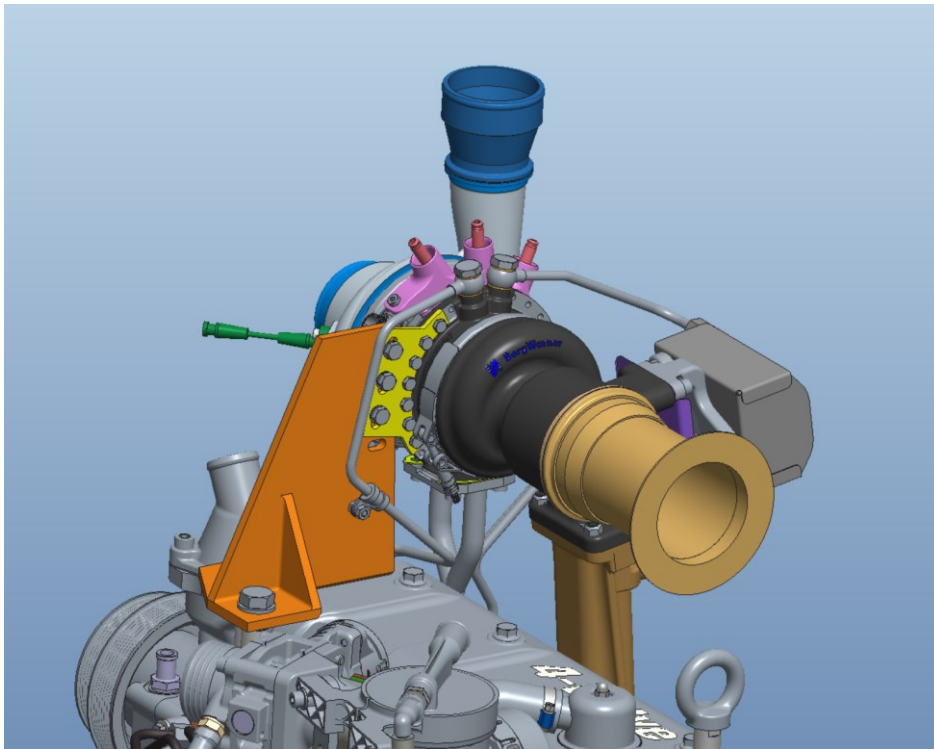
Tässä luvussa käsitellään ahtimen käytännön asennus moottoriin ja tuennan valmistus, sekä sopivuus käyttötarkoitukseen. Lisäksi tarkastellaan ahdinta ja sen tukea suurnopeuskameran avulla saadun datan avulla, jonka avulla pyrittiin tarkastelemaan ahtimen värähtelyä ja sen amplitudia moottorin käydessä.

### 5.1 Lopullinen suunniteltu asennus ja fyysinen asennus

Lopullinen suunniteltu ahtimen asennus moottoriin sisälsi myös öljy- ja vesiputkien mallintamisen ja ahtimen turbiinipesään tulevan pakoputken lähdön, sekä kompressoripesään tulevan ahtolähdön suunnittelun. Seuraavat kuvat havainnollistavat lopullista tuentaa ahtimen, lopullisen tuen sekä putkien kanssa (kuvat 24-25).



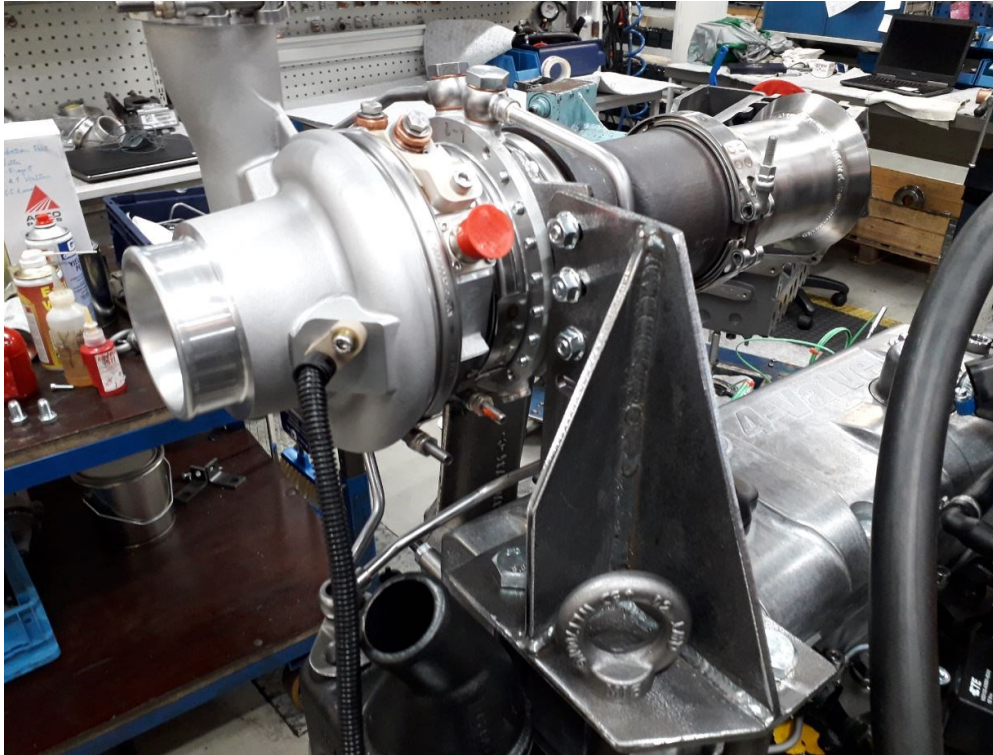
KUVA 24. Lopullinen asennus ahtimelle tuennan ja putkien kanssa. Tuen osia 8D210 ja 8D211 korostettu keltaisella ja oranssilla värillä. (Kiiskilä, 2018)



KUVA 25. Lopullinen asennus ahtimelle tuennan ja putkien kanssa, toinen sivu. Tuen osia 8D210 ja 8D211 korostettu keltaisella ja oranssilla. (Kiiskilä, 2018)

Kun tuenta oli suunniteltu loppuun ja se todettiin suunnittelutavoitteet täyttäväksi, siitä tehtiin AGCO Powerin käytännön mukaiset tekniset piirustukset, joiden avulla pystyttiin valmistamaan tukikappaleet 8D210 ja 8D211. Nämä piirustukset ovat liitteinä opinnäytetyön lopussa. Ahtimen keskiön tuen 8D210 piirustus on liite 1, ja sylinterikannen puoleisen tuen piirustus on liite 2.

Tuennan valmistus suoritettiin polttoleikkaamalla yksittäiset levykappaleet, jonka jälkeen tarvittavat reiät koneistettiin. Hitsaus suoritettiin asennuksen yhteydessä, jotta kokonaisuudesta tulee suoraan sopiva. Osat hitsattiin kevyesti nurkista paikoilleen, kun 8D211:n pohjalevy oli pultattu jatkomuttereiden päälle, ja 8D210 oli pultattu ahtimen keskiöön kiinni. Saumojen hitsaus suoritettiin erillään moottorista, kun sijainnit määritettiin edellä selostetulla tavalla. Seuraava kuva havainnollistaa tuen ja ahtimen konkreettista asennusta moottoriin (kuva 26).



KUVA 26. Ahtimen ja tuen asennus moottorissa. (Kiiskilä, 2018)

Ahdinta testattiin suunnitellun tuen ja asennuksen kanssa laboratoriossa. Tuen toiminnan varmistamiseksi suoritettiin myös mittaus suurnopeuskameralla, jonka avulla tarkasteltiin ahtimen liikettä.

## 5.2 Suurnopeuskameramittaus

Suurnopeuskamerakuvaukset suoritettiin AGCO Powerin yhteistyökumppanin testilaboratoriossa, jossa uuden sukupolven ahtimeen liittyvää tutkimusta suoritettiin. Mittausvälineenä toimi Phantom Miro LC 310 suurnopeuskamera, joka pystyy ottamaan suurimmalla 1280x800 pikselin resoluutiolla jopa 3200 kuvaa sekunnissa. Mittauksia suoritettiin tällä suurimmalla resoluutiolla, sillä moottorin palotaajuusalue 30-70 Hz oli jo merkittävästi alhaisempi, kuin kuvaustaajuus 3200 FPS (frames per second, kuvaa sekunnissa). Tarkoituksena oli kuvata ahdinta ja selvittää, pystyykö suurnopeuskameran kuvausta hyödyntämään värähelyn kuvaamiseen ja analysoimiseen moottoreiden tuotekehityksessä. Seuraava kuva havainnollistaa kamerasäätöjärjestelyä (kuva 27).

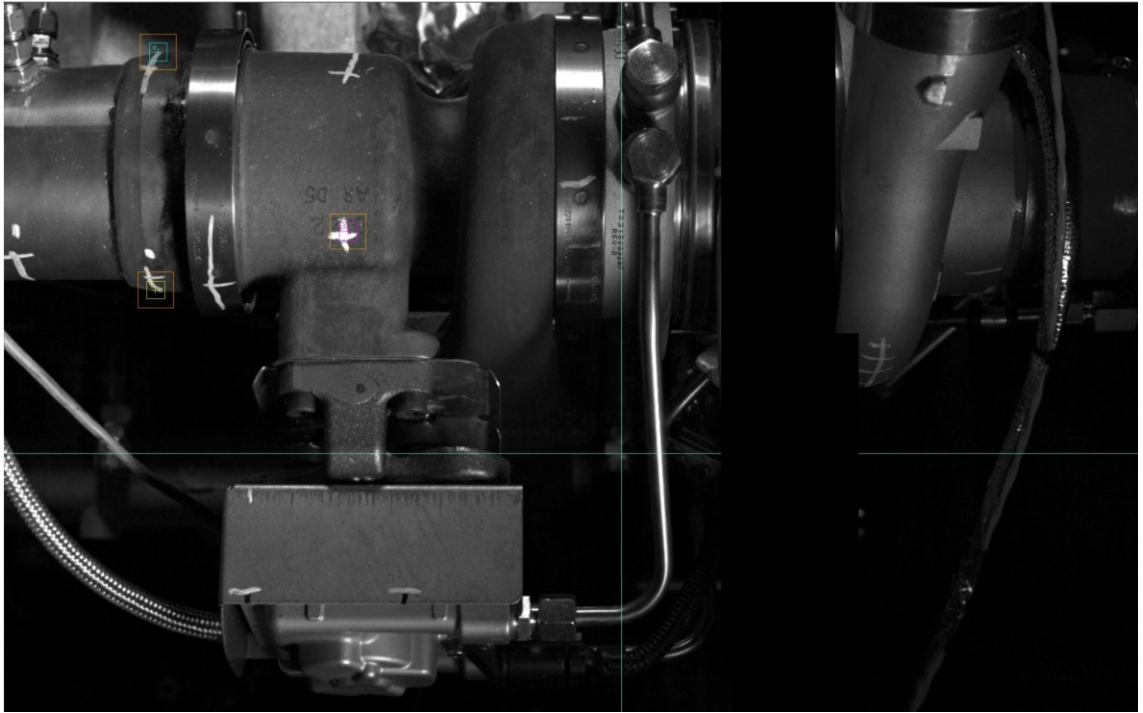


KUVA 27. Suurnopeuskamerakuvaus ahtimelle. (Kiiskilä, 2019)

Kuvaukset pyrittiin suorittamaan mahdollisimman pystysuoraan ylhäältä. Näin pystyttäisiin kuvaamaan ahtimen oletettu liike parhaiten, sillä moodianalyysien perusteella ahdin todennäköisimmin liikkuisi poikittais- ja pitkittäissuunnassa, mutta epätodennäköisesti pystysuunnassa. Kuvauksissa käytettiin kuvasta vielä puuttuvia tehokkaita LED-valoja valaistukseen, joiden avulla pystyttiin turvaamaan riittävän valaistus kameran nopeaa kuvaustaajuutta varten, sekä estämään loisteputkivalojen välkkymistä.

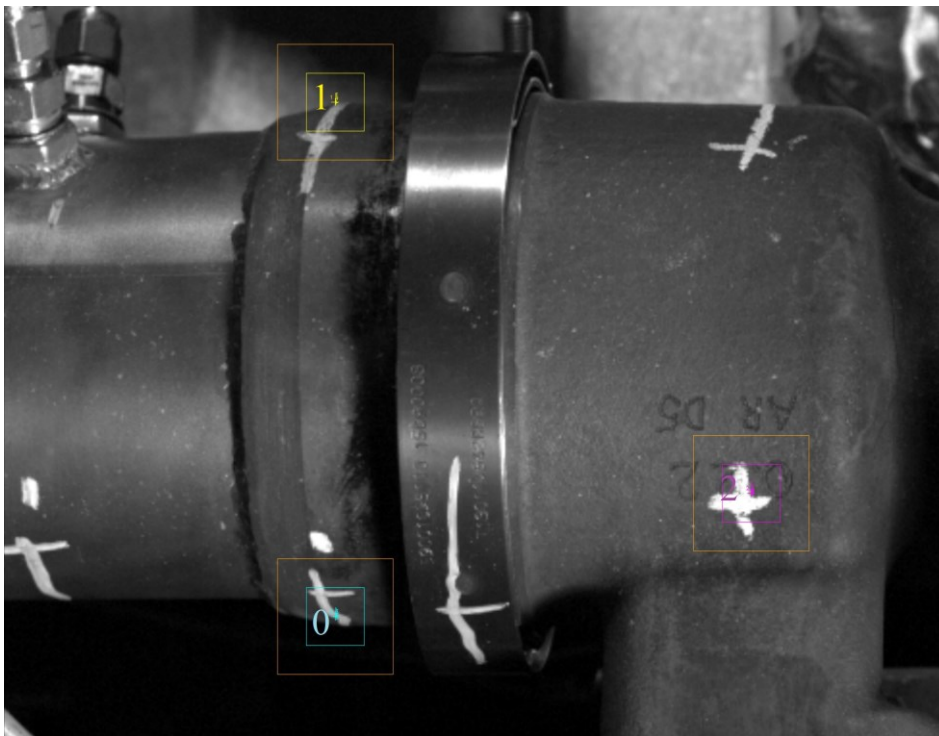
Ahdinta kuvattiin moottorin käydessä pyörintänopeuksilla 1000 RPM, 1500 RPM, 1700 RPM ja 1900 RPM täydellä kuormalla. Kuvausten jälkeen kuvamateriaalia analysoitiin Phantom PCC 2.5 ohjelmistolla, joka on kameran valmistajan tarjoama ohjelmisto kameran käyttöön ja kuvamateriaalin analysointiin. Kuva 28 esittää suurnopeuskameran kuvaa ahtimesta ylhäältäpäin.





KUVA 28. Ahdin ylhäältäpäin suurnopeuskameralla kuvattuna. (Kiiskilä, 2019)

Seuraavaksi tarkasteltiin mittauspisteitä, joita tutkittiin Phantom PCC 2.5 ohjelmassa. Ohjelmassa saatiin kerralla 3 pistettä tarkasteluun. Etäisyysmittausta varten ohjelmassa voi määrittää tietyn referenssimitan, jonka pikselien etäisyydellä ohjelma laskee 2D-etäisyydet. Referenssimitaksi otettiin ahtimen turbiinipesältä lähtevä pakolähtö, jonka ulkohalkaisija on 100 mm. Ohjelma laski, että yhden pikselin leveydeksi tuli 0,37 mm. Työssä päätettiin aloittaa ahtimen takalaidasta, ja referenssinä ahtimen turbiinipesän keskialueelta. Mittauspisteitä esitetään seuraavassa kuvassa (kuva 29). Mittauspiste 0 on vaaleansininen, mittauspiste 1 on keltainen ja mittauspiste 2 on lilaa.



KUVA 29. Ahtimen mittauspisteet Phantom PCC 2.5 ohjelmassa. (Kiiskilä, 2019)

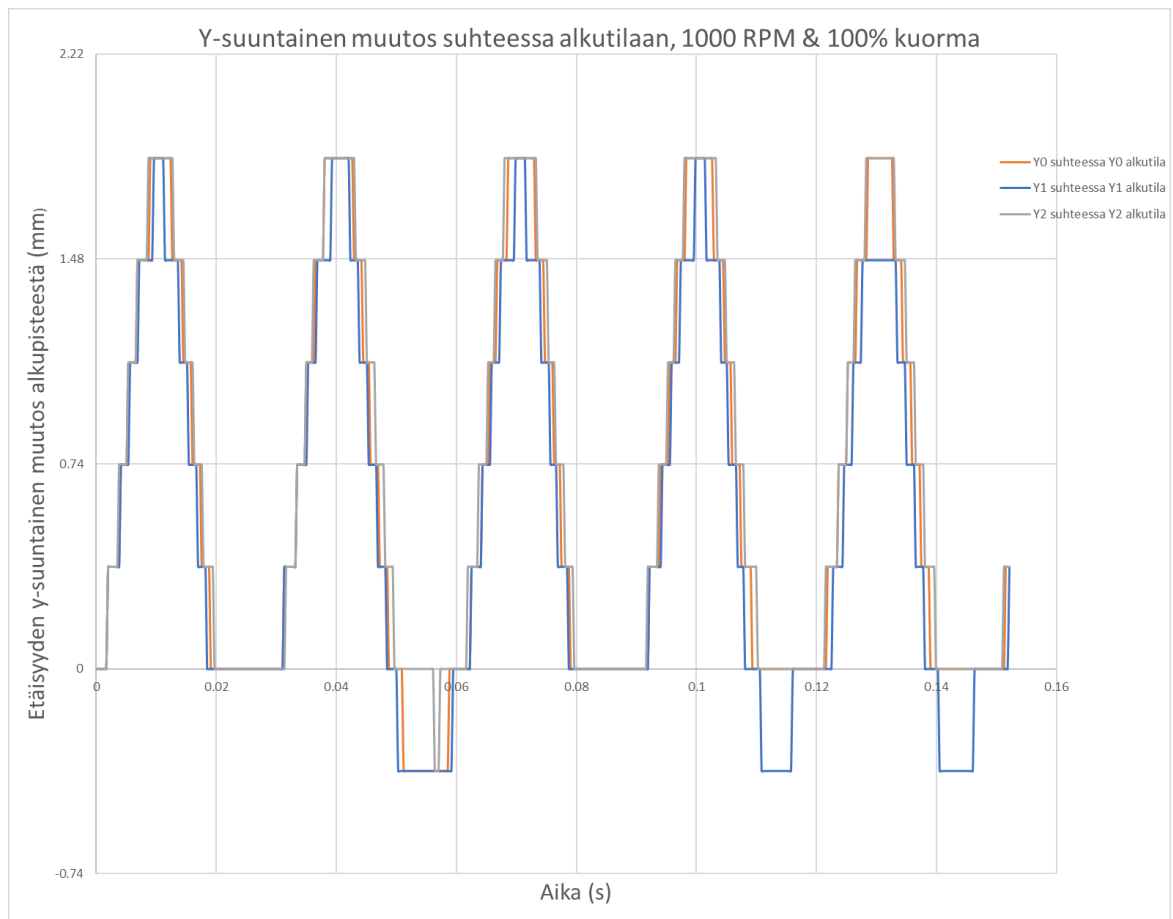
Kun pisteet oli valittu ja referenssimitta annettu, ohjelmalla seurattiin kyseisiä pisteitä automaattisesti, ja niiden etäisyysmuutokset X- ja Y-suunnassa tallennettiin. Koordinaatiston origona toimi vasen ylänurkka, ja X-akseli siis on vaakasuunnassa kuvaan nähden, ja Y-akseli on pystysuunnassa kuvaan nähden. Esimerkiksi 1000 RPM mittauksesta saatiin seuraavan taulukon 2 mukaiset mittaustulokset (taulukossa 2 esitetään vain ote mittaustuloksesta, sillä 3200 FPS taajuudella mittaustuloksesta tulee huomattava määrä).

TAULUKKO 2. Esimerkkitulo suurnopeuskameralla mitatusta liikkeestä 1000 RPM mittauksen aikana. Sarakkeissa esiintyy kuvanumero, aika aloituksesta ja pisteiden X- ja Y-suuntaiset paikkatiedot.

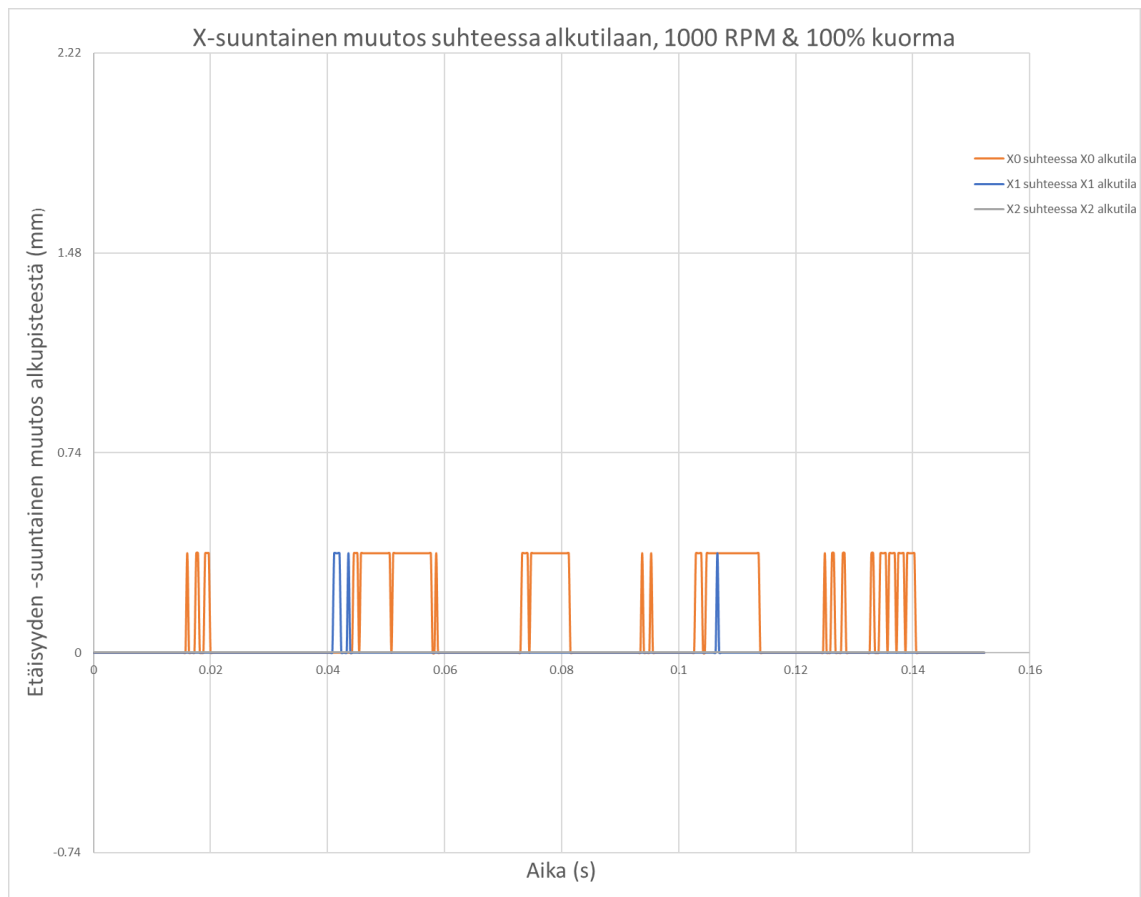
ImageNr.	TimeFromTrig.	X0	Y0	X1	Y1	X2	Y2
0	0.000135214	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
1	0.000441196	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
2	0.000747179	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
3	0.00105316	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
4	0.00135914	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
5	0.00166512	63.4647	-119.181	63.4647	-20.6629	143.165	-95.5661
6	0.00197111	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
7	0.00227709	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
8	0.00258307	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
9	0.00288905	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
10	0.00319504	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
11	0.00350102	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-95.1971
12	0.003807	63.4647	-118.812	63.4647	-20.294	143.165	-94.8281
13	0.00411298	63.4647	-118.443	63.4647	-19.925	143.165	-94.8281
14	0.00441896	63.4647	-118.443	63.4647	-19.925	143.165	-94.8281
15	0.00472495	63.4647	-118.443	63.4647	-19.925	143.165	-94.8281
16	0.00503093	63.4647	-118.443	63.4647	-19.925	143.165	-94.8281
17	0.00533691	63.4647	-118.074	63.4647	-19.925	143.165	-94.4592
18	0.00564289	63.4647	-118.074	63.4647	-19.556	143.165	-94.4592
19	0.00594888	63.4647	-118.074	63.4647	-19.556	143.165	-94.4592
20	0.00625486	63.4647	-118.074	63.4647	-19.556	143.165	-94.4592
21	0.00656084	63.4647	-118.074	63.4647	-19.556	143.165	-94.4592
22	0.00686682	63.4647	-117.705	63.4647	-19.556	143.165	-94.0902

Taulukon 2 mukaisesta datasta voitiin piirtää seuraavanlaiset kuviot Y-suunnan liikkeestä (kuvio 1) ja X-suunnan liikkeestä (kuvio 2). Kuvioissa liike on suhteutettu alkupisteeseen, jossa kuvaus aloitettiin, eli kuviot esittävät erotusta alkupisteeseen ajan funktiona. Kuvioissa vaakasuuntaiset apuviivat ovat 0,74 mm välein, eli kuvauksessa kahden pikselin välein.





KUVIO 1. Ahtimen mittauspisteiden 0-2 Y-suunnan liike suhteessa alkupisteeseen ajan funktiona 1000 RPM mittauksessa.



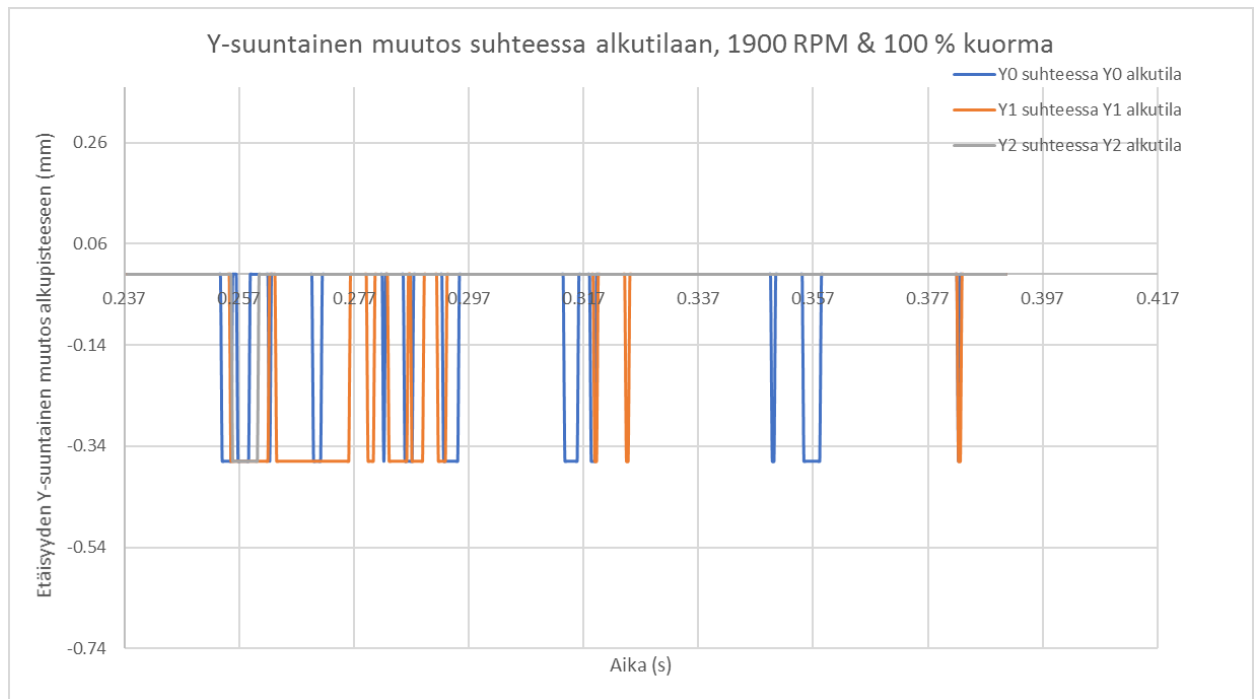
KUVIO 2. Ahtimen mittauspisteiden 0-2 X-suunnan liike ajan funktiona 1000 RPM mittauksessa.

Kuviosta 2 havaitaan, että ahtimen X-suuntainen liike oli lähes olematonta. Vaihtelu on 0,37 mm, eli yhden pikselin verran. Tämän voidaan olettaa olevan käytännössä jo mittausepävarmuutta. Kuviosta 1 havaitaan, että maksimiarvojen ero on korkeimmillaan 7 pikseliä (jokainen kynnyks on yhden pikselin hyppäys), joka vastaa siis noin 2,59 mm liikettä. Havaitaan siis, että ahtimen liike oli käytännössä täysin Y-suuntaista (moottorista katsoen poikittaista liikettä). Laskemalla kahden Y-suuntaisen värähtelyn harjojen etäisyyden toisistaan, havaittiin, että välissä on noin 97 kuvaa, kun lasketaan piikkiarvoissaan pysyvien kuvien keskimmäisten kuvien välinen erotus. Ajan erotus kahden harjan välillä eli jaksonaika  $T$  on tällöin datan mukaan noin 0,02968 s. Värähtelyn taajuus voidaan laskea kaavalla 1.

$$f_{1000} = \frac{1}{0,02968 \text{ s}} = 33,7 \text{ Hz} \quad (1)$$

Eli värähtelyn taajuus on noin  $f_{1000} = 33,7$  Hz. Nelitahtisen ja nelisynterisen moottorin pyörintänopeudella 1000 RPM palotaajuus on juurikin 33,3 Hz, sillä teoria-luvun mukaisesti palotapahtumia tulee kaksi per kampiakselin kierros. 1000 RPM pyörintänopeudella palotaajuus on 16,67 Hz, ja kerrottuna kahdella 33,3 Hz. Näin ollen voidaan siis päätellä, että värähtely aiheutuu juurikin palotaajuudesta.

Jos tarkastellaan korkeampien pyörintänopeuksien arvoja, havaitaan, että muutokset pienenevät jo niin merkittävästi, että PCC-ohjelmiston seuraamien pisteiden tarkkuus ei ole enää riittävä. Seuraava kuvio (kuvio 3) esittää Y-suuntaisen muutoksen 1900 RPM mittauksessa, jossa havaitaan, että maksimimuutos on enää vain 0,37 mm (yksi pikseli). X-suunnassa liike oli maksimissaan yhden pikselin verran, kuten aiemmissakin mittauksissa, joten sitä ei esitetä.



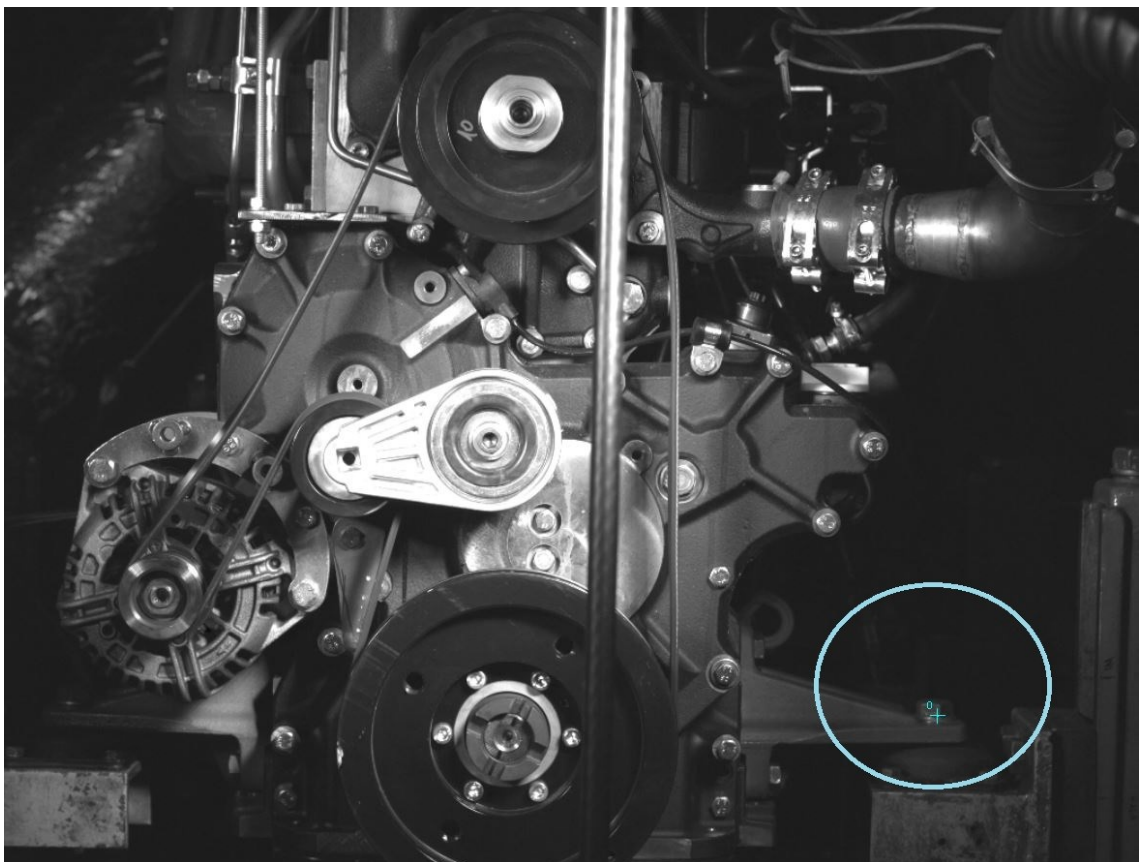
KUVIO 3. Ahtimen mittauspisteiden 0-2 Y-suunnan liike ajan funktiona 1900 RPM mittauksessa.

Edellä mainittujen tulosten perusteella voidaan siis havaita, että kameran resoluutio ja haluttu mittaustarkkuus PCC-ohjelmistolla oli suurin piirtein riittävä ainoastaan matalilla kierroksilla tehtyjen mittausten perusteella, muutoin yhden pikselin suuruinen liike on niin pieni, että mittausdatasta ei ole juuri hyötyä. Seuraa-

vassa kappaleessa käsitellään havainto liittyen moottorin tuentaan, jos tämänkaltaista ahtimen tai muun komponentin värinää pyrittäisiin mittaamaan suurnopeuskameralla.

### 5.3 Moottorin värinä dynamometrissä ja sen vaikutus

Kun ahtimen kuvaukset oli saatu suoritettua, kuvattiin myös moottorin moniurahiinaa ja moottoria jakopään puolelta. Kuvauksen jälkeen materiaalia tutkiessa havaittiin, että kumityynyjen päälle tuettu moottori heilui huomattavasti 1000 RPM mittauksen aikana. Tämän takia päätettiin tehdä referenssimittaukseksi moottorin heilumisen tarkastelu samalla Phantom PCC 2.5 ohjelmistolla. Mittaus suoritettiin moottorin tuennassa olevasta 19 mm ruuvinkannasta. Referenssiksi otettiin tämä 19 mm ruuvin kanta, jonka kantista-kanttiin mitaksi annettiin 19 mm. Yhden pikselin kooksi tuli siten 0,63 mm. Kuva 30 esittää moottorin jarrussa, ja mittauspisteen.



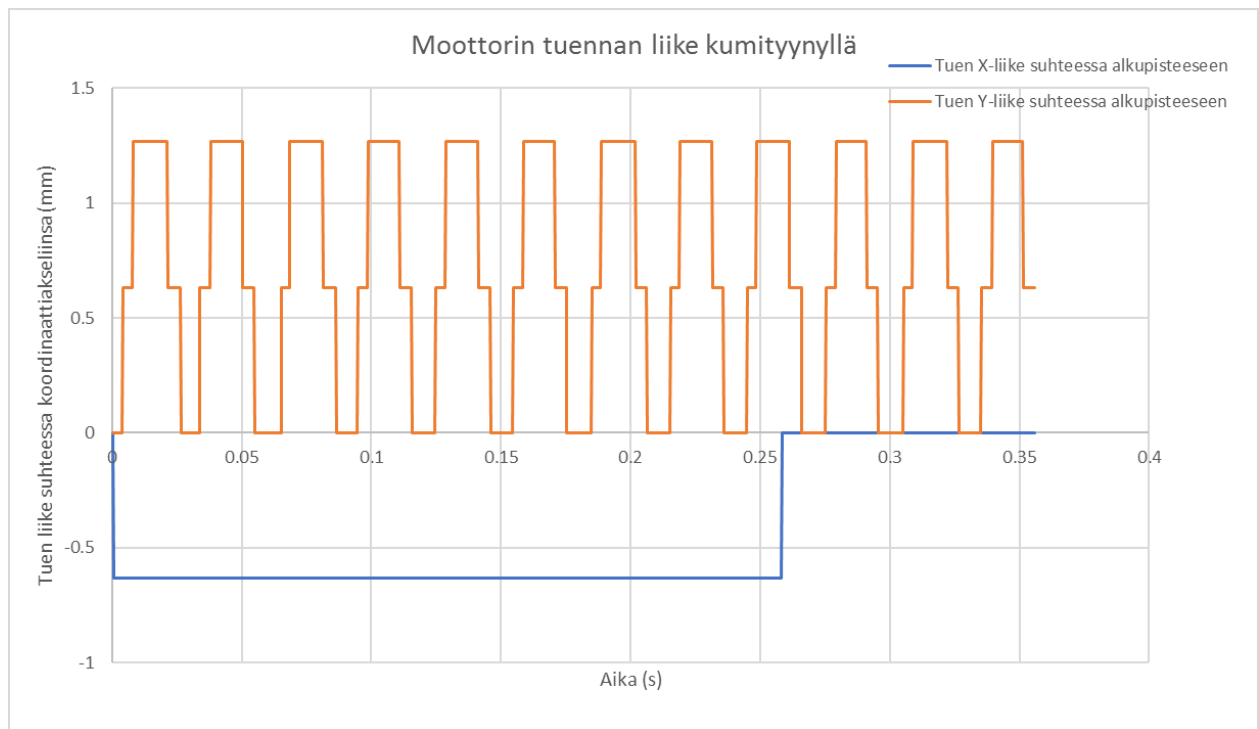
KUVA 30. Moottori dynamometrissä. Sinisellä ympyröity tuen mittauspiste. (Kiiskilä, 2019)

Kun tämän tuen liikettä seurattiin XY-koordinaatistossa, saatiin PCC-ohjelmasta seuraavanlainen taulukko (taulukko 3). Kyseessä on vain lyhyt ote koko mittauksesta, sillä todellisia mittauspisteitä oli 1138.

TAULUKKO 3. Moottorin tuennan mittaus Phantom PCC 2.5 ohjelmistolla. Ote kokonaisesta taulukosta.

ImageNr.	TimeFromTrig.	X0	Y0
0	0.000175553	646.907	-415.869
1	0.000488054	646.274	-415.869
2	0.000800554	646.274	-415.869
3	0.00111305	646.274	-415.869
4	0.00142555	646.274	-415.869
5	0.00173805	646.274	-415.869
6	0.00205055	646.274	-415.869
7	0.00236305	646.274	-415.869
8	0.00267555	646.274	-415.869
9	0.00298805	646.274	-415.869
10	0.00330055	646.274	-415.869
11	0.00361305	646.274	-415.869
12	0.00392555	646.274	-415.869
13	0.00423805	646.274	-415.236
14	0.00455055	646.274	-415.236
15	0.00486305	646.274	-415.236
16	0.00517555	646.274	-415.236
17	0.00548805	646.274	-415.236
18	0.00580055	646.274	-415.236
19	0.00611305	646.274	-415.236
20	0.00642555	646.274	-415.236
21	0.00673805	646.274	-415.236
22	0.00705055	646.274	-415.236
23	0.00736305	646.274	-415.236

Kun taulukon 3 datasta piirretään X- ja Y suuntaista liikettä kuvaava kuvaaja, saadaan seuraavan kuvion 4 mukainen esitys. Kuvaajassa oranssilla esitetään tuen Y-suuntaista liikettä alkupisteen suhteen, ja sinisellä tuen X-suuntaista liikettä alkupisteen suhteen.



KUVIO 4. Moottorin liike kumityynyn päällä ajan funktiona suhteessa alkupisteeseen.

Kuviosta 4 havaitaan, että moottorin liike ääripäästä toiseen oli 1,26 mm Y-suunnassa (kaksi pikseliä). X-suunnassa liike ei ollut tarpeeksi suurta, jotta se olisi luotettavasti tallentunut kameralle. Vaikka mittatarkkuus on näinkin huono pikseleissä, havaitaan, että se on niin toistuvaa, että sen suuruusluokkaan voidaan varmastikin luottaa. Moottori siis heilui merkittävästi jo tukipisteestään, joka on huomattavan matalalla, ja lähellä moottorin keskipistettä.

Kun huomioidaan, että turboahdin on paljon korkeammalla moottorin keskipisteestä, sylinterikannen sivulla ja kohtalaisen korkealle nostavan pakosarjan päässä, moottorin heiluminen moninkertaistuu. Voidaan siis todeta, että kaikki ahtimestakin kuvattu liike on varmastikin itse moottorin heiluntaa jarrussa, joka vain moninkertaistuu varren kasvaessa, mitä pidemmälle moottorin keskiöstä mennään. Joustavasti tuettua moottoria ei siis voida käyttää tarkempaan jäykkien komponenttien värähtelyn kuvaamiseen, ellei moottorin värähtelyä pystyttäisi jotenkin poistamaan kuvasta.

## 6 POHDINTA

Tässä luvussa suoritetaan pohdinta turboahtimen suunniteltuun tuentaan, moodianalyysiin ja suurnopeuskamerakuvauksiin liittyen.

### 6.1 Ahtimen tuennan ja suunnittelun arviointi

Yleisesti ottaen tuennan suunnittelun voidaan todeta onnistuneen. Tuenta täyttää suunnittelutavoitteet ominaistaaajuuden suhteen, asennus onnistui ja se on toiminut toistaiseksi käytännössä. Toki tällaiset värähtelyyn ja ominaistaaajuuksiin liittyvät ongelmat eivät todennäköisesti ilmene heti käytön alkaessa, vaan ongelmat saattavat ilmetä vasta käyttötuntien lisääntyessä.

Tuentaa voidaan pitää siinä mielessä hyvänä lisänä, koska useissa sovelluksissa ei ole minkäänlaista lisätukea turboahtimelle laboratoriossa tai ajoneuvossa. Näissä sovelluksissa on todennäköisesti huomioitu koko pakolinja suurempana kokonaisuutena, ja sitä kautta lisätukea saatetaan saada esimerkiksi pakoputken ja muiden rakenteiden kautta. Lisäksi varsinkin ajoneuvosovelluksissa tilanpuute voi monesti olla rajoittava tekijä. Tähän laboratoriokäyttöön haluttiin varmistaa, että ongelmia ei tule kalliin testikomponentin kanssa.

Turboahtimen tuenta on ehkä hieman karu ulkonäöltään ja asennustavaltaan, sillä yhtenä tärkeänä tavoitteena oli saada aikaiseksi halpa, riittävä ja helposti asennettava tuki. Siten melko helposti hitsattavat ja koneistettavat levykappaleet olivat oikeastaan ainoa pätevä vaihtoehto. Parempaa ja esteettisempää tuentaa voitaisiin tavoitella, jos jotain vastaavaa tuentaa haluttaisiin saattaa sarjatuotantoon. Tällöin varmastikin esimerkiksi parempi tilankäytön ja materiaalin optimointi olisi mahdollista ja huomattavasti tärkeämmässä roolissa, ja esimerkiksi valettu kappale olisi houkutteleva vaihtoehto.

Tuennan suunnittelu on kuitenkin perehdyttänyt tekijänsä hyvin suunnitteluinsinöörin mahdollisesti kohtaamiin haasteisiin, huomioitaviin näkökulmiin ja tarpeelliseen päätöksentekoon.

## 6.2 Moodianalyysin luotettavuuden arviointi

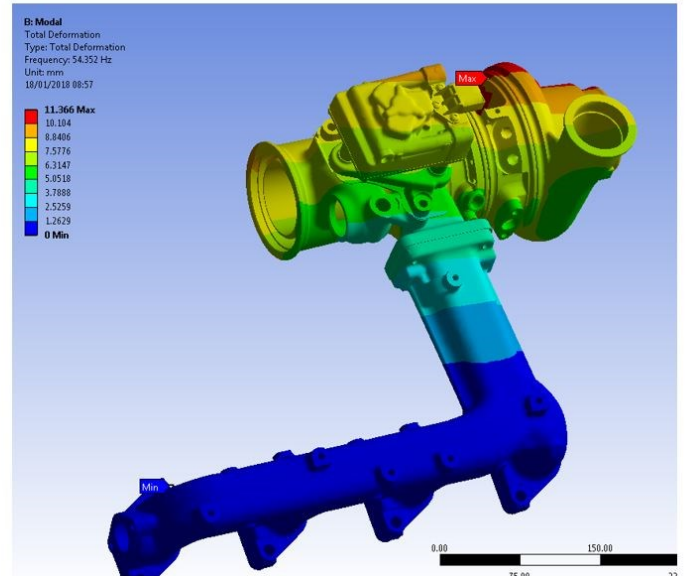
Simuloinnin yhteydessä tehdään aina jonkin tasoisia yksinkertaistuksia ja riippuen näistä simuloijan päätöksistä tuloksissa saattaa olla hieman vaihtelua. Tämän opinnäytetyön aiheen moodianalyysissä yksi yksinkertaistus oli ahtimen 3D-mallin korvaus pistemassalla useista syistä. Näitä olivat esimerkiksi se, että ahtimen 3D-malli ei ollut täydellinen, vaan ahtimen poikkileikkaus oli umpinainen solidi. Ahtimen laskennallinen massa 3D-ohjelmassa ei siten olisi ollut todellisuutta vastaava, ja ohjelman määrittämä massakeskipisteen paikka ei myöskään olisi ollut todellinen. Ahdin koostuu myös useista eri komponenteista ja materiaaleista, ja tarkan massakeskipisteen määrittäminen vaatisi jokaisen komponentin massan ja massakeskipisteen määrittämisen. Koska tätä tietoa ei ollut saatavilla, ja aiemmin mainitun mukaisesti keskustelujen pohjalta ahtimen korvaaminen pistemassamallilla kelpaa simulointiin riittäväällä tarkkuudella.

Ennen AGCO Powerille suoritettujen simulointien aloittamista ahdinvalmistaja oli myös halunnut tietää, millä tavalla ahdin aiottaisiin tukea. He halusivat myös 3D-mallin tuennasta, jotta voisivat itsekin varmistaa moodianalyysillä tuennan riittävyyden. Heille annettiin ensimmäinen tässä opinnäytetyössä käsitelty tukimalli 8D210 ja 8D211. Ahdinvalmistaja käytti simuloinnissaan oikeaa ahdinmallia. Seuraavassa kuvassa (kuva 31) esitetään ahdinvalmistajan oman moodianalyysin simuloinnissa saatua 1. ominaistajuutta, jota voidaan hyödyntää vertailuna yksinkertaistetun simuloinnin ja tarkemman mallin simuloinnin eroihin.



# 1<sup>st</sup> \_Mode =54[Hz]

With no exhaust  
and no support  
bracket



KUVA 31. Ahdinvalmistajan määrittämä tulos moodianalyysin 1. ominaistajuudelle ilman ahtimen tuentaa (Shoghi, 2018).

Ahdinvalmistajan tulokset olivat hyvin pitkälti samassa linjassa AGCO Powerille simuloitujen tulosten kanssa. Ilman tuentaa 1. ominaistajuus on 54 Hz ja 2. ominaistajuus on 83 Hz (Shoghi, 2018). AGCO Powerille simuloitujen, vertailukelpoiset tulokset olivat 58 Hz ja 90 Hz. Tuloksissa ei siis ole merkittävää eroavaisuutta keskenään, vaikka ahtimen varsinainen malli olikin korvattu pistemassalla. Ahdinvalmistajan simulointi antaa hiukan pienemmät arvot ominaistajuudelle (noin 7 %). Näin ollen tuloksia voidaan pitää riittävällä tarkkuudella suhteellisen luotettavina ja suuntaa-antavina. Huomioitavaa on myös, että ahdinvalmistajan simuloinnissa ei ollut mukana sylinterikannen siivua, jolla saattaa olla pieni merkitys tulokseen. Lisäksi simuloinnin pääasiallisena tarkoituksena on antaa vertailevaa analyysiä eri komponenttien kesken, eikä tarkkaa ja eksaktia tulosta.

Tuen kanssa tehtyihin simuloiteihin ahdinvalmistaja oli lisännyt myös muita komponentteja, jota ei ollut mukana AGCO Powerille tehdyissä tuellisissa simuloinneissa. Näin ollen ne eivät ole vertailukelpoisia keskenään, toisin kuin simuloinnit ilman tukea. Joka tapauksessa tämä simulointitulokset varmistaa oletuksen, että ahtimen korvaaminen pistemassalla ei vääristä tuloksia merkittävästi, ja simuloitua moodianalyysiä voidaan silti hyödyntää suunnittelun tukena.

### 6.3 Suurnopeuskameran käyttö moottorin värähtelyjen mittaukseen

Yhtenä sivuhaarana opinnäytetyössä tutkittiin myös mahdollisuutta käyttää suurnopeuskameraa värähtelyiden analysointiin moottoreiden kehitystyössä. Tarkoituksena oli kuvata turboahdinta ja sen värähtelyä moottoreihin nähden.

Kuvauksia tehdessä tuli selkeästi esille, että tällaiseen käyttöön suurnopeuskamera ei liene paras työkalu. Kun moottori oli asennettu kumityynyjen päälle, moottori itse täräsi niin merkittävästi, että kaikki kuvattu värinä oli koko moottorin liikettä palotaajuudesta johtuen. Siten ahtimen värinää suhteessa moottoriin ei pystytty kuvaamaan. Tuloksena voidaan todeta, että jos tällaista tarkkaa kiinteästi asennetun komponentin liikettä suhteessa moottoriin haluttaisiin kuvata, täytyisi moottorin asennuksen olla hyvin kiinteä. Tämä toki tuo omat ongelmansa esimerkiksi dynamometrin, laboratorion ja moottoriin kiinnitettävien putkien, letkujen ym. suhteen. Tämä ei siten liene käytännössä mahdollista tai helposti toteutettavissa. Opinnäytetyössä käsitellyssä tapauksessa moottorin tuenta oli keskivertoa huonompi tarkan värähtelyn kannalta, sillä moottoripetikin oli laboratorion lattiassa kiinni kumityynyillä, joka ei ole tavallisesti käytetty asennustapa. Näin ollen laboratorioon nähden moottori oli kahteen kertaan kumityynyillä tuettu, joka todennäköisesti lisää moottorin omaa liikettä suhteessa laboratorioon tavallista enemmän.

Toisena ongelmana havaittiin suurnopeuskameran resoluutio, ja PCC 2.5 ohjelmiston mittaustarkkuus. Vaikka kuva vaikutti kuvaushetkellä siltä, että ahdin hähdin tuskin mahtuu kuvaan, ei todellisuudessa ylisuuresta liikkeestäkään saatu eroa kuin korkeintaan 7 pikseliä mittauspisteessä 1000 RPM. Käytössä oli myös kaikkein suurin resoluutio, mihin kyseinen kamera pystyi, eli 1280 x 800. Siten voidaan todeta, että jos haluttaisiin tehdä tarkkoja mittauksia jostain melko pienestä värähtelystä, täytyisi kamerassa käyttää vielä tarkempaa kohdistusta johonkin kohteen nurkkaan. Todennäköisesti kuvan täytyisi olla sellainen, että kokonaiskuvaa ei juurikaan havaittaisikaan, vaan ainoastaan jokin tutkittavan kohteen yksityiskohta. Näin liikkeen muutos saattaisi olla tarpeeksi isoa, edes joi-tain kymmeniä pikseleitä, että siitä voitaisiin saada melko tarkkaa mittaustietoa. Muutamista pikseleistäkin saatetaan nähdä suuntaviivoja, kuten koko moottorin

värinää, niin kuin tässä työssäkin lopulta selvitettiin, mutta merkittäviä värähtelymittauksia varten vaadittaisiin enemmän ja tarkempaa dataa.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että suurnopeuskameraa ei ainakaan nykyisillä sovelluksilla voida pitää kovinkaan hyödyllisenä välineenä moottoriin hyvin kiinteästi kiinnitettyjen komponenttien värähtelyn yksityiskohtaiseen tarkasteluun ja mittaamiseen. Suurnopeuskameralle on tietysti monia muita hyödyllisiä käyttötarkoituksia, mutta tarkat etäisyysmittaukset pienille siirtymille suuressa kuvassa eivät ole tyydyttäviä.

Suurnopeuskameramittauksia on suoritettu onnistuneesti tutkittaessa vähemmän kiinteästi kiinnitettyjen komponenttien värähtelyn ja liikkeen tutkimiseen AGCO Power Oy:ssä. Esimerkiksi jäähdytysputkien ja letkujen, sekä peltitukien liikettä suhteessa moottoriin on kuvattu menestyksekkäästi. Tällaisissa komponenteissa värinä suhteessa moottorin värinään on todennäköisesti selkeämpää, ja liikeradat myöskin merkittävästi suurempia. Sama havaittiin myös turboahtimen kuvauksissa, sillä hukkaportin aktuaattorin peltinen lämpösuoja värisi oikealla taajuudella kuvamateriaalia katsoessa. Lisäksi moottoriin kiinnitettyjen letkujen ja anturijohtojen värähtely ja liike oli selkeästi havaittavissa.

## LÄHTEET

Knight, R. 2014. Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach with Modern Physics. Harlow: Pearson Education Limited.

Immonen, J. 2018. Mechanical design criteria: Simulation in design. AGCO Power Oy.

Avitabile, P. 2018. Modal testing: A practitioner's guide. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd.

GCG Turbos, 2016. Turbine inlet flange T25. Luettu 12.11.2018.

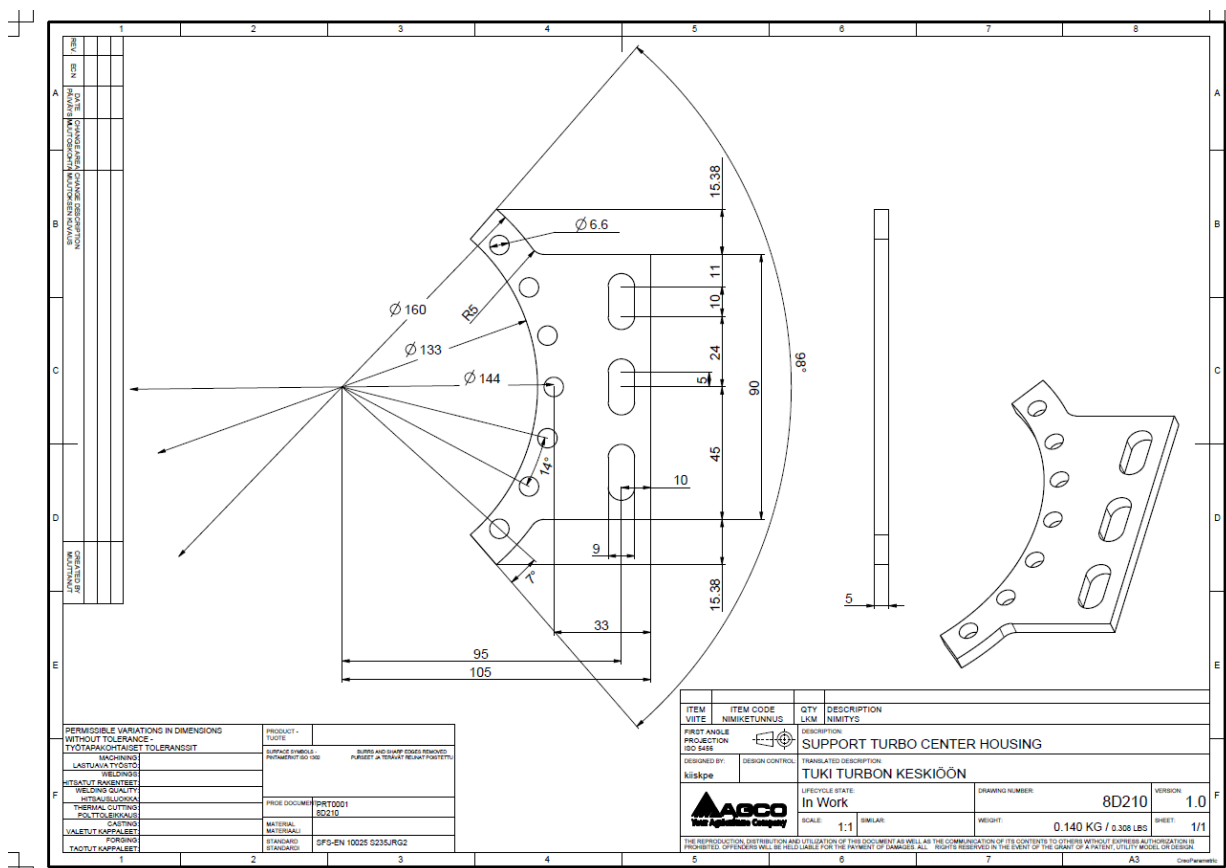
<https://gcg.com.au/petrol-performance/performance-3/turbocharger-flanges/turbine-inlet-flange-t25-t28-detail>

Mellin, V. Kehitysinsinööri. 2018. Haastattelu 15.11.2018. Haastattelija Kiiskilä, P. Nokia.

Shoghi, K. 2018. AGCO SM18-42. Modal analysis. BorgWarner Inc.

LIITTEET

Liite 1. Tuen 8D210 tekninen piirustus.



Liite 2. Tuen 8D211 piirustus.

