

Jori Alho

Alustanmuutoksen vaikutus korin värähtelyyn

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

24.11.2019

Tekijä Otsikko	Jori Alho Alustamuutoksen vaikutus ajoneuvon värähtelyyn
Sivumäärä Aika	21 sivua 24.11.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Ammatillinen pääaine	Tuotetekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pasi Oikarinen Toimitusjohtaja Perttu Muuronen, Suomen Vaunuosa Oy
<p>Opinnäytetyössä tarkastellaan Fiat Ducaton takajousituksen muutoksen vaikutusta verrattuna alkuperäiseen jousitukseen. Työ toteutettiin Suomen Vaunuosan toimeksiannosta.</p> <p>Tutkimuksen kohteena olevaan autoon vaihdettiin apujousi toiseksi, mutta pääjousta ei vaihdettu. Alustan muutosta arvioitiin subjektiivisesti sekä kiihtyvyyssantureiden avulla ajamalla sama ajoreitti muutetulla ja alkuperäisellä jousituksella. Tutkimuksen tuloksena havaittiin muutoksen ajokäyttäytymisessä olevan melko pieni.</p> <p>Tutkimuksen perusteella ja Fiat Ducaton alustarakenteen suunnittelulähtökohtien perusteella, mittaustuloksiin voitaisiin saada isompi ero, jos matkailuauto kuormataan 500 kilogramman tavarakuormalla.</p>	
Avainsanat	auto, jousitus, värähtely, iskunvaimentaja

Author Title	Jori Alho Effect of Chassis Change on Vehicle Vibration
Number of Pages Date	21 pages 24 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Lecturer Perttu Muuronen, Managing Director of Suomen Vaunosa Oy
<p>This thesis compares the effect of the rear suspension change in Fiat Ducato compared to the original suspension. The thesis was assigned by Suomen Vaunuosasto.</p> <p>In order to find out what kind of effect the suspension change has on the vehicle behavior, a secondary spring was replaced in the vehicle, but the main spring was not replaced. The effect of this change was investigated and evaluated subjectively by means of accelerators by driving the vehicle on the same route with the modified and with the original suspension. The change in in driving behavior was found to be rather small.</p> <p>Based on the investigation and on the basis of the design of Fiat Ducato's chassis structure it seems that the difference in the measurement results would be bigger, if the vehicle was loaded with a load of 500 kilograms.</p> <p>.</p>	
Keywords	car, suspension, vibration, shock absorber

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tavoite ja työn rajaus	1
2	Värähtelyn teoria	2
2.1	Värähtely	2
2.2	Renkaat	3
2.3	Korin liike	5
2.4	Jousitus	6
3	Tarkemmat tutkimustiedot	9
3.1	Tutkimuksen kohde	9
3.2	Tutkimuksen toteutus	10
3.3	Tutkimuksen arviointi	12
4	Tulokset	13
4.1	Tulosten subjektiivinen analysointi	13
4.2	Tulosten tarkempi analysointi	13
5	Johtopäätökset	20
5.1	Tutkimustulosten johtopäätökset	20

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen Vaunuosa oy tilasi tutkimuksen Fiat Ducaton alustasta, koska oli viime vuosina saanut usein kuulla valituksia alustan pompottamisesta. Aiheesta ei löytynyt tutkittua tietoa eikä myöskään Fiatin maahantuonti ollut kiinnostunut aiheesta, sillä ongelma koski vanhaa mallia ja pelkästään matkailuautoja, jotka eivät olleet Fiatin valmistamia. Uudemmassa mallissa asia olikin jo korjattu niiden autojen osalta, joista tiedetään tulevan matkailuautoja, joten asia oli automerkin puolesta käsitelty. Teillä liikkuu kuitenkin vielä useita matkailuautoja, jotka on valmistettu ennen uutta parempaa alustaa ja myös sellaisia, joiden ei heti tiedetä päätyvän matkailuautoiksi.

Fiatin alustan muuttaminen on helpointa toteuttaa vaihtamalla apujousi, jona alkuperäisessä alustassa on uretaanijousi eli pohjaamiskumi. Tämän tilalle vaihdetaan joko ilmajousi tai kierrejousi. Muutostyön suorittamiseen menee noin viisi tuntia, eikä työ ole kovin monimutkainen. Samalla autoon voidaan vaihtaa iskunvaimentimet. Tällä toimenpiteellä saadaan alustaan pehmeyttä.

1.2 Tavoite ja työn rajaus

Tutkimukseni keskittyy matkailuautoihin, joiden jousitusta ei ole suunniteltu juuri matkailuautokäyttöön. Työn tavoitteena on saada selville, onko muutoksesta apua vai täytyisikö myös pääjousi vaihtaa, jotta alusta paranisi. Tutkimus keskittyy pääosin matkustusmukavuuteen. Mukavuutta mitataan kiihtyvyyssantureiden avulla ja arvioidaan subjektiivisesti. Tutkimuksessani keskitytään vain yhteen alustan muokausvaihtoehtoon, joka on uretaanijousen muuttaminen kierrejousen ja pienemmän uretaanijousen yhdistelmäksi. Tutkimuksessani ei vertailla eri kuormausvaihtoehtoja eikä tienpintoja. Tutkimus tapahtuu asfalttipäällysteisillä tie osuuksilla. Opinnäytetyö keskittyy vain yhteen Fiat Ducaton alustarakaisuun.

2 Värähtelyn teoria

2.1 Värähtely

Auton värähtelyn aiheuttajia ovat pyörimisestä tuleva melu, moottorin ääni ja ilmavirran aiheuttama värähtely. (Bernasch ym. 2016: esipuhe). Ilmavirran synnyttämä värähtely voidaan taajuuden perusteella kohdistaa tiedettyihin aiheuttajiin. Matalalla taajuudella korin ulkopinta värähtelee kokonaisuudessaan, korkealla taajuudella värähtelevät pienten muotoepäilyjen aiheuttamat pyörteet esimerkiksi tiivisteiden kohdalla. Näiden välissä olevan värähtelyn aiheuttajana ovat isommat muotoepäilyt kuten spoilerit ja kulmat. (Bernasch ym. 2016: 2.)

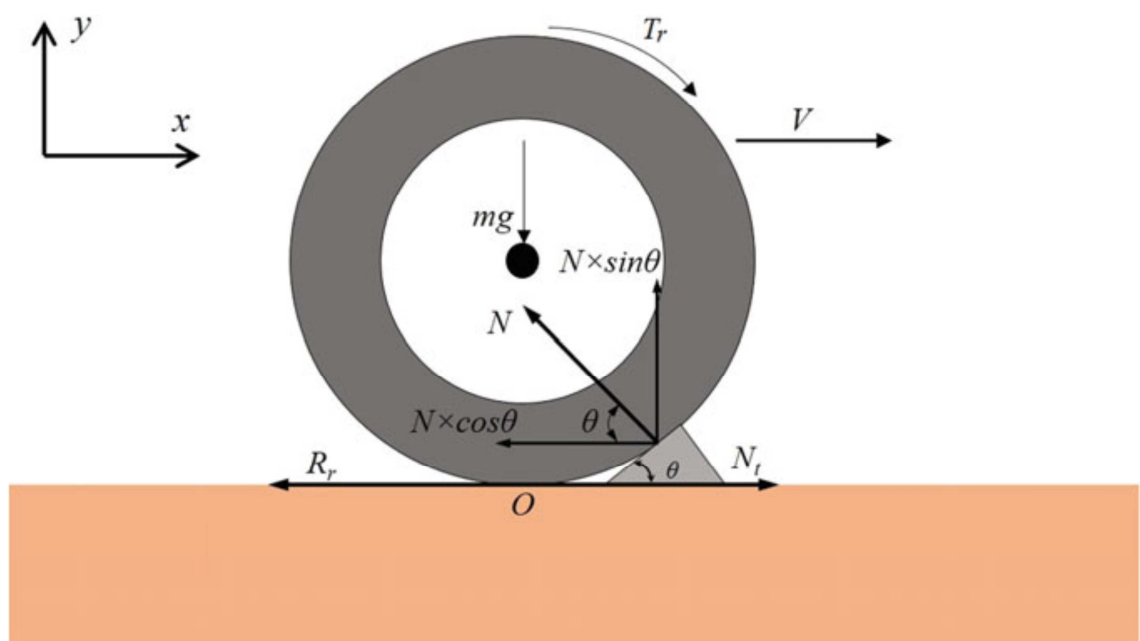
Ajoneuvon värähtelyyn keskittyvästä tarkastelusta käytetään nimitystä NVH, noise, vibration and harshness, eli melu, värähtely ja kovuus. Ajoneuvon värähtelyanalyysiä varten on kehitetty monirunkojärjestelmä, jossa renkaat muodostavat jousittamattomat massat ja auton muu kori muun jousitetun massan (Taghavifar & Mardani 2017: 2). Värähtelyksi kutsutaan fyysisen suuren muutosta, joka toistuu ajallisesti enemmän tai vähemmän säännöllisesti ja jonka suunta vaihtuu samalla säännöllisyydellä. (Haapaniemi 2003: 31.)

Auton tiestön epätasaisuudesta johtuvaa heilahtelua pyritään hillitsemään ja ehkäisemään jousituksen ja vaimennuksen avulla (Haapaniemi 2003: 676). Terramekaniikka on tieteenala, joka tutkii ympäristöön vaikutusta renkaan ja maaperän välillä. Terramekaniikkaa käytetään lähtökohtaisesti maastoajoneuvojen suunnittelussa, mutta sen osia fyysisiä ilmiöitä hyödynnetään, myös suunniteltaessa katuajoneuvoja. Auton jousitus huolehtii riittävästä pidosta (Taghavifar ym. 2017: 3). Kaikilla tela- ja pyöräajoneuvoilla on luontaiset etunsa ja haittansa, ja ne on optimoitu tiettytyypiselle maastolle ajoneuvon osajärjestelmien kuten jousituksen, ohjauksen, voimansiirron, massan ja tehon osalta. Kokonaisuudesta muodostuu ajomukavuus, suorituskyky ja ajoneuvon vakaus. Jousituksen osalta tulee myös huolehtia riittävän pidon saamisesta. Esimerkiksi matalasta maapaineesta johtuen traktoreissa käytetään tuplapyöriä ja joustavaa pitkää jousitusta, koska matalan maapaineen saavuttamiseksi kosketus pinta-alan tulee olla mahdollisimman suuri. Pitkä ja ns. löysä jousitus taas auttavat traktorin pyöriä seuraamaan muuttuvia maaston muotoja paremmin (Taghavifar ym. 2017: 1). Kuten traktoriesimerkki osoittaa, on suunnittelussa usein lähdetty jostain tiedetystä maaston tyypistä olettaen, että

kyseinen maasto on ajoneuvon kannalta haastavin ja myös yleisesti käytössä. Ajoneuvojen koostuessa useasta eri komponentista ja näiden toimiessa harmonisesti yhteen päädytään ihanteelliseen ajodynamiikkaan kyseisellä alustalla. Tässä kokonaisuudessa käyttövoimalla ja jousituksella on ratkaiseva rooli. (Taghavifar ym. 2017: esipuhe.)

2.2 Renkaat

Renkaat toimivat osana ajoneuvon jousitusjärjestelmää (Taghavifar ym. 2017:18). Renkaiden ilmanpaine, lämpötila ja käytetty kumiseos vaikuttavat siihen, miten renkaat joustavat. Renkailla on myös tärkeä rooli ajoneuvon tukemisessa, ohjattavuudesta ja käsiteltävyydestä. Renkaiden kautta siirtyvät myös voimat kuten kiihdytyksissä ja jarrutuksissa tarvittava pito. (Taghavifar ym. 2017: 3.) Massan ja epätasaisuuden muuttuessa ajo-ominaisuudet muuttuvat radikaalisti. Pyörien kinetiikasta puhuttaessa merkittävä kiinnostuksen kohde on iskuvoima eli impulssi.



Kuva 1. Voima yhtälöt pyörän kannalta (Taghavifar ym. 2017: 21)

Impulssin voimalla ja lineaarisella vauhdilla on suuri merkitys törmäävien kappaleiden käyttäytymiselle. Impulssilla tarkoitetaan kahden kappaleen törmäystä, jossa syntyy suuri liike energia lyhyessä ajassa. Lineaarille liikkeelle voidaan kirjoittaa seuraavan kaltainen yhtälö.

$$\sum F = mv = \frac{d}{dt}(mv)$$

Tämä voidaan jakaa komponentteihin ja mv voidaan korvata kirjaimella G

$$\sum F_x = G_x \quad \sum F_y = G_y \quad \sum F_z = G_z$$

ajan suhteen funktio voidaan esittää muodossa

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum F dt = G_2 - G_1 = \Delta G$$

ja se voidaan kirjoittaa muotoon

$$m(v_1)_x + \int_{t_2}^{t_1} \sum F_x dt = m(v_2)_x$$

$$m(v_1)_y + \int_{t_2}^{t_1} \sum F_y dt = m(v_2)_y$$

Voimat z suunnassa jätetään huomioimatta, koska tarkastellaan pyörään kohtisuorassa tulevaa herätettä. Yhtälö kuvaa vektoreita

$$\vec{v} = \dot{x}i + \dot{y}j \quad (\text{Taghavifar ym. 2017: 19})$$

Epätasaisuuden muoto vaikuttaa impulssivoimaan seuraavasti:

Pyöreä muoto: $y = \sin \frac{2\pi}{l} \quad 0 < x < 2\pi$

Kolmio:
$$y = \begin{cases} < \frac{1}{2} \\ -ax & x > \frac{1}{2} \end{cases}$$

monimutkaisemmissa muodoissa joudutaan geometria jakamaan pienempiin osiin kuten

$$\text{puolisuunnikas } (x;a,b,c,d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

Newtonin ja Eulerian menetelmään perustuva ohjausyhtälö voidaan esittää rengasesteen törmäysongelmaan seuraavasti:

$$\sum F_x = m_t a_x$$

$$\sum F_y = m_t a_y$$

$$\sum M = I\alpha = \ddot{\theta}$$

Yhtälö m_t = renkaan massa, M = Momentti, I = massanhitausmomentti ja α = kulmakiiktyvyys voidaan esittää muodossa

$$N_t - N \cos \theta - R_r = m a_x$$

$$N \sin \theta - mg = m a_y$$

$$N \cos \theta \times l \sin \theta + N \cos \theta \times l \cos \theta - T = \bar{I} + m_t r^2$$

jossa N = reaktion voima, N_t = nettovoima, R_r = vierintävastus, l = renkaan kosketuspinnana pituus impulssin aiheuttajaan T vääntömomentti. Tästä voidaan yhtälö horisontaalinen ja vertikaalinen impulssivoima kirjoittaa muotoon

$$F_l = N \cos \theta = N_t - m a_x - R_r$$

$$F_v = N \sin \theta = m(a_y + g)$$

On kuitenkin huomioitava, että mallin tulisi seurata muotoa x- ja y-akselin mukaisesti, Saadut voimat muuttuvat ajan suhteen. (Taghavifar ym. 2017: 19–21.)

Renkaiden osalta taka-akseli ei tarjoa muita huomioivavia seikkoja, sillä kiinteässä taka-akselissa renkaiden kulma ei muutu jouston suhteen ja vertailukohta sijaitsee suoralla tieosuudella, jossa ajetaan vakionopeutta.

2.3 Korin liike

Ajoneuvon suorituskyky on termi, joka pitää sisällään ajoneuvon liikkumiseen liittyvät käsitteet. Se tarkoittaa hetkellisiä ajoittaisia suureita, kuten kiihdytys, jarrutus ja kaarreajo-ominaisuudet samanaikaisesti huomioiden vakaan tilan suorituskriteerit, kuten voimansiirtohäviöt, pito ja ajoneuvon airodynamiikka. (Taghavifar ym. 2017: 55.) Tutkittaessa koko ajoneuvon voimayhtälöä otetaan käyttöön seuraava yhtälö.

$$\sum F_x = m \bar{a}$$

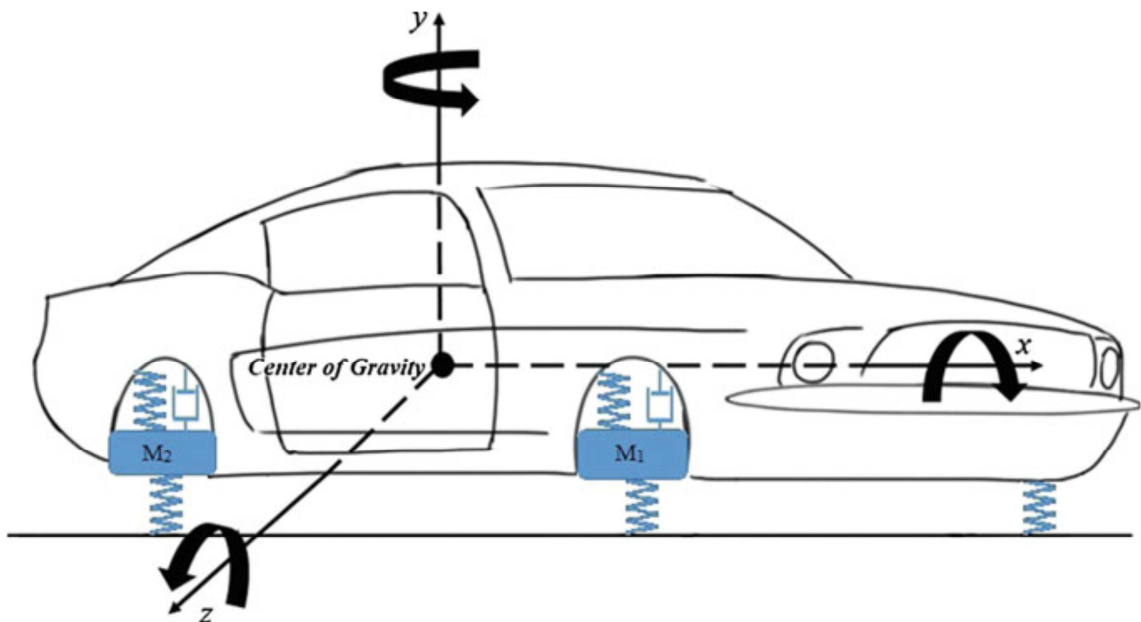
joka voidaan esittää muodossa

$$F_f + F_r - R_r - R_f - F_a - F_d = m_G a$$

Yhtälössä F_f on etupyörien vetävä voima, F_r takapyörien vetävä voima, R_r takapyörien vierinvastus, R_f etupyörien vierinvastus, F_d voiman siirron häviöt, F_a ilman vastus, m_G massa keskipisteeseen ajateltu kokonaismassa ja a kiihtyvyys. (Taghavifar ym. 2017: 56.) Airodynamiikalla on iso osa korin värähtelyssä. Ilmanvastus voidaan laskea kaavalla

$$F_a = \frac{\rho}{2} C_a A_f S_w^2$$

jossa ρ on ilmassan tiheys, C_a on aerodynaaminen vastus, johon ajoneuvon muoto vaikuttaa, A_f on ajoneuvon otsa-ala, ja S_w on tuulen nopeus suhteessa ajoneuvon liikkuvaan koriin. Ajomukavuutta käsiteltäessä tulee huomioida ajoneuvon värähtelyasteen tila, joka liittyy läheisesti eri parametreihin kuten ominaistajuus ajoneuvojärjestelmälle, tien profiili ja järjestelmän ominaisuudet. Massaan voidaan ongelmatyypistä riippuen kohdistaa voima, jolloin syntyy pakotettu värähtely tai antaa sen värähtää vapaasti. Jokaisella massalla on jokin ominaistajuus. Voimat ja momentit johtavat kehon liikkeeseen Newtonin toisen lain mukaan. (Taghavifar ym. 2017: 61–86.)



Kuva 2. Ajoneuvon jousitus ja värähtelyn vaimennus (Taghavifar ym. 2017: 60)

2.4 Jousitus

Auton jousituksen päätehtäviä ovat parantaa ajoneuvon hallittavuutta, lisätä ajomukavuutta, suojella pyörän tuennan osia ja säästää tiestöä. Auton jousituksessa käytetään taivutusjousia kuten yksinkertainen suora lehtijousi, yksilehtinen jousi, kerrostettu lehtijousi, kierretavutusjousi ja kierukkajousi tai vääntöjousia kuten vääntösauva ja kierrejousi. (Haapaniemi 2003: 326–328.) Taivutusjousten jousto perustuu metallin taivuttamiseen pitkittäissuunnassa ja vääntöjousten metallin

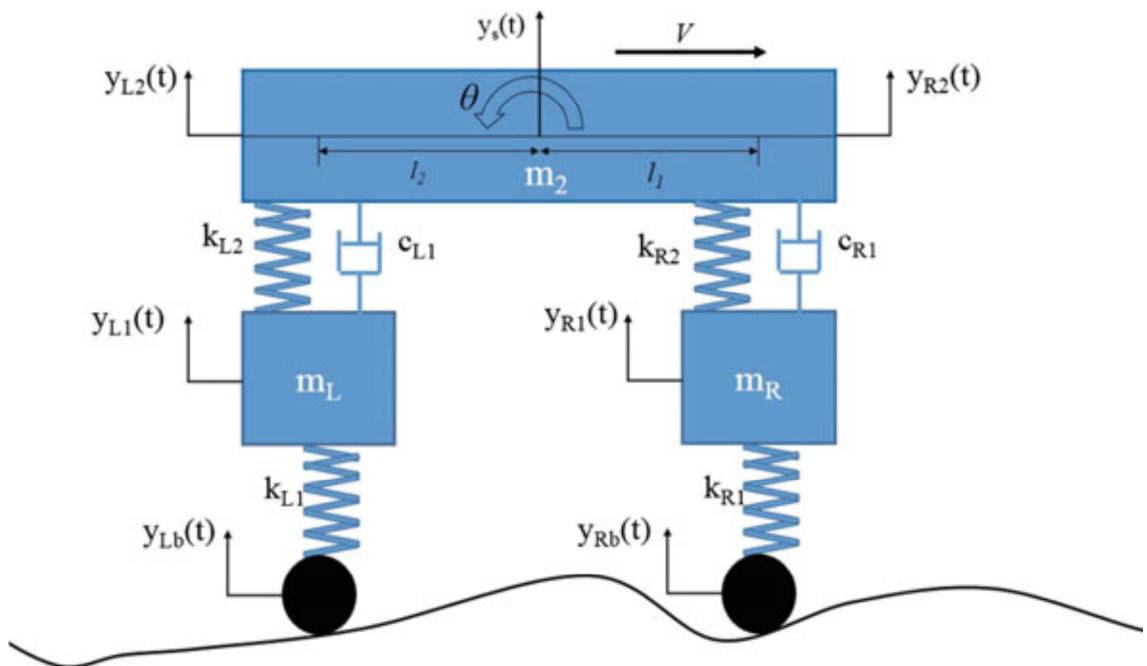
vääntöjäyhyys momenttiin poikittaissuunnassa. Newtonin toisen liikelain perusteella voidaan kehittää liikeyhtälöt järjestelmälle, jolla on neljä vapausastetta. Siksi järjestelmässä tulee olla seuraavat neljä yhtälöä:

$$m_2 \ddot{y}_s + c_{R1}(\dot{y}_{R2} - \dot{y}_{R1}) + c_{L1}(\dot{y}_{L2} - \dot{y}_{L1}) + k_{R2}(y_{R2} - y_{R1}) + k_{L2}(y_{L2} - y_{L1}) = 0$$

$$I\ddot{\theta} + l_1(c_{R1}(\dot{y}_{R2} - \dot{y}_{R1}) + k_{R2}(y_{R2} - y_{R1})) - l_2(c_{L1}(\dot{y}_{L2} - \dot{y}_{L1}) + k_{L2}(y_{L2} - y_{L1})) = 0$$

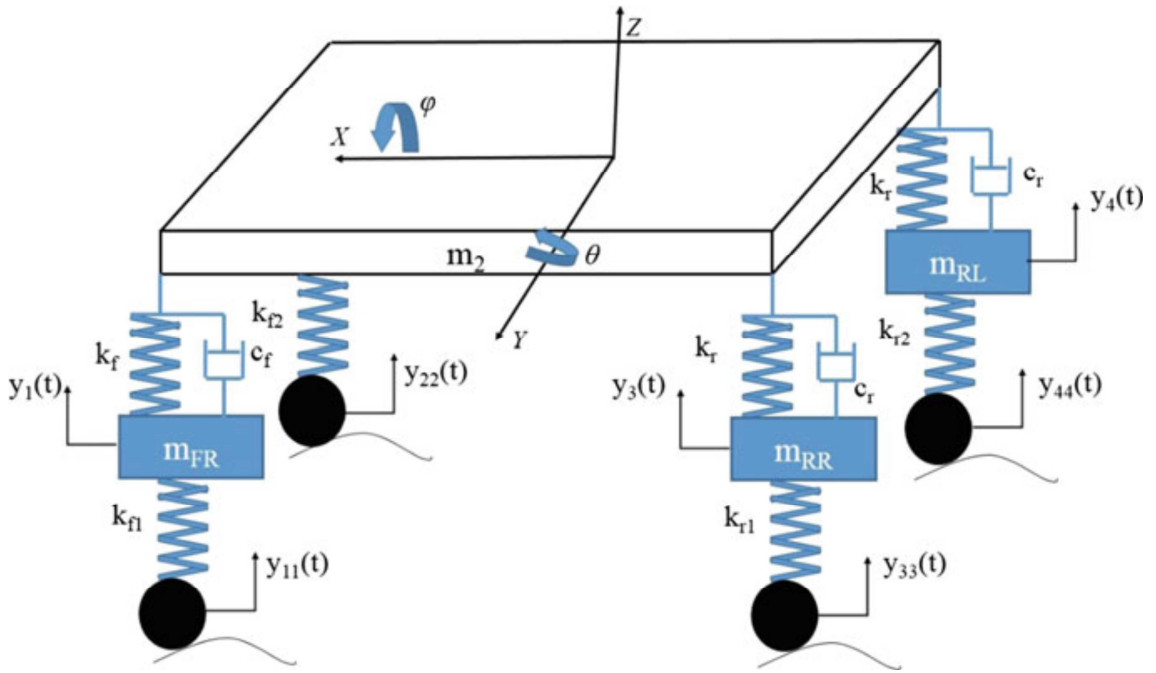
$$m_R \ddot{y}_{R1} - c_{R1}(\dot{y}_{R2} - \dot{y}_{R1}) - k_{R2}(y_{R2} - y_{R1}) + k_{R1}(y_{R1} - y_{Rb}) = 0$$

$$m_L \ddot{y}_{L1} - c_{L1}(\dot{y}_{L2} - \dot{y}_{L1}) - k_{L2}(y_{L2} - y_{L1}) + k_{L1}(y_{L1} - y_{Lb}) = 0$$



Kuva 3. Yksinkertaistettu malli auton jousituksesta, jonka laskukaava löytyy yläpuolelta (Taghavifar ym. 2017: 88)

Yksinkertaistetussa mallissa on yhdistetty etu- ja taka-akseli siten, että vapausasteita on vain neljä ja ne ovat x- ja y-akseleiden suuntaisia. Siirryttäessä nelipyöräiseen autoon vapausasteiden määrä kasvaa seitsemään



Kuva 4. Auton jousitus kuvattuna siten, että kaikki vapausasteet ovat mukana (Taghavifar ym. 2017: 91)

Tästä saadaan matemaattinen kaava

$$\begin{aligned}
 m_2 \ddot{y} + k_f(y - y_1 + l_1 \phi - s_1 \theta) + k_f(y - y_2 - l_2 \phi - s_1 \theta) + k_r(y - y_3 - l_1 \phi + s_2 \theta) \\
 + k_r(y - y_4 + l_2 \phi + s_2 \theta) + c_f(\dot{y} - \dot{y}_1 + l_1 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) \\
 + c_f(\dot{y} - \dot{y}_2 - l_2 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) + c_r(\dot{y} - \dot{y}_3 - l_1 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) \\
 + c_r(\dot{y} - \dot{y}_4 + l_2 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_x \ddot{\phi} + k_f l_1(y - y_1 + l_1 \phi - s_1 \theta) - k_f l_2(y - y_2 - l_2 \phi - s_1 \theta) - k_r l_1(y - y_3 - l_1 \phi + s_2 \theta) \\
 + k_r l_2(y - y_4 + l_2 \phi + s_2 \theta) + c_f l_1(\dot{y} - \dot{y}_1 + l_1 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) \\
 - c_f l_2(\dot{y} - \dot{y}_2 - l_2 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) - c_r l_1(\dot{y} - \dot{y}_3 - l_1 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) \\
 + c_r l_2(\dot{y} - \dot{y}_4 + l_2 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_y \ddot{\theta} - k_y s_1(y - y_1 + l_1 \phi - s_1 \theta) - k_y s_1(y - y_2 - l_2 \phi - s_1 \theta) + k_r s_2(y - y_3 - l_1 \phi + s_2 \theta) \\
 + k_r s_2(y - y_4 + l_2 \phi + s_2 \theta) - c_f s_1(\dot{y} - \dot{y}_1 + l_1 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) \\
 - c_f s_1(\dot{y} - \dot{y}_2 - l_2 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) + c_r s_2(\dot{y} - \dot{y}_3 - l_1 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) \\
 + c_r s_2(\dot{y} - \dot{y}_4 + l_2 \dot{\phi} + s_2 \dot{\theta}) = 0
 \end{aligned}$$

$$m_{FR} \ddot{y}_1 - k_f(y - y_1 + l_1 \phi - s_1 \theta) - c_f(\dot{y} - \dot{y}_1 + l_1 \dot{\phi} - s_1 \dot{\theta}) + k_{f1}(y_1 - y_{11}) = 0$$

$$m_{FL}\ddot{y}_2 - k_f(y - y_2 - l_2\varphi - s_1\theta) - c_f(\dot{y} - \dot{y}_2 - l_2\dot{\varphi} - s_1\dot{\theta}) + k_{f2}(y_2 - y_{22}) = 0$$

$$m_{RR}\ddot{y}_3 - k_r(y - y_3 - l_1\varphi + s_2\theta) - c_r(\dot{y} - \dot{y}_3 - l_1\dot{\varphi} + s_2\dot{\theta}) + k_{r1}(y_3 - y_{33}) = 0$$

$$m_{RL}\ddot{y}_4 - k_r(y - y_4 + l_2\varphi + s_2\theta) - c_r(\dot{y} - \dot{y}_4 + l_2\dot{\varphi} + s_2\dot{\theta}) + k_{r2}(y_4 - y_{44}) = 0$$

Energia ja liikeyhtälöt tulee muuttaa kyseisellä tavalla, jotta voidaan näyttää kiinteällä akselilla voimat ja momentit (Taghavifar ym. 2017: 93). Suuri osa ajoneuvon moottorissa tuotetusta energiasta häviää värähtelyyn. Värähtelyä syntyy moottorissa ja voimansiirrossa lisäksi kori värähtelee tien epätasaisuudesta ja aerodynamiikasta johtuen. Jousituksen iskunvaimentimet hillitsevät värähtelyä. Niissä tyypillisimmin liike-energia muuttuu lämmöksi viskoosin nesteen tai kuiva kitkan takia. Tämän värähtelyenergian talteen ottamiseksi onkin kehitelty erilaisia liike-energiaa talteen ottavia jousitusjärjestelmiä. (Taghavifar ym. 2017: 109.)

Fiat Ducatossa taka-akselin jousituksena toimii kerrostettu lehtijousi, jonka jousikuvaaja on melko lineaarinen johtuen metallin vääntö momentista. Lehden eri kerrokset toki hieman lisäävät progressiota. Kierr jousissa taas progressiota voidaan lisätä kahdella tavalla muuttamalla kierteiden tiheyttä tai materiaalin paksuutta.

3 Tarkemmat tutkimustiedot

3.1 Tutkimuksen kohde

Tutkittavana on matkailuauto (Fiat Ducato 2015), jonka jousitus muodostuu lehtijousen ja uretaanijousen yhdistelmästä. Taka-akseli on toteutettu kiinteällä akselilla. Vetotapa on etuveto, ja edessä jousituksena on McPherson. Ajoneuvon moottori sijaitsee edessä. Opinnäytetyössäni uretaanijousen tilalle vaihdetaan kierrejousi ja lyhempi pohjaamiskumi. Lisäksi vaihdetaan iskunvaimennin. Lehtijousi on pääjousi, jota ei vaihdeta. Lehtijousi on hieman alimitoitettu matkailuauton suurelle taka-akselin kuormalle, sillä tavaratila sijaitsee taka-akselin takapuolella. Auton alustassa on erittäin pieni joustovara ennen muutoksen tekemistä. Muutoksen jälkeen pohjaamiskumiin on huomattavasti pidempi matka.

3.2 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutettiin kahdella eri autolla, mutta ne olivat täysin identtiset. Toinen auto oli alkuperäisillä takajousituksen osilla varustettu ja toiseen autoon oli vaihdettu kierrejousi, lyhyempi pohjaamiskumi ja iskunvaimennin. Ajoneuvoissa ei ollut tavarakuormaa mittaushetkellä. Mittauksessa käytettiin kiihtyvyyssantureita. Antureita oli kolme, joista yksi sijoitettiin auton taka-akseliin. Antureista kaksi sijoitettiin koriin siten, että toinen sijaitsi taka-akselissa kiinni olevan anturin yläpuolella ja toinen hieman etuakselin takapuolella etuosassa. Kaikki anturit olivat autojen keskilinjalla (kuva 5). Taka-akselin antureille löytyi heti sopivat kiinnityskohdat, ja ne oli helppo kiinnittää. Etuakseliston kohdalta taas ei sopivaa kohtaa löytynyt, sillä moottoriin anturia ei voinut kiinnittää.



Kuva 5. Antureiden sijainti auton takana

Sopiva kohta löytyi akkukotelon yläreunasta hieman etuakselin takaa (kuva 6). Etummaisesta anturin tietoihin pitää suhtautua kriittisesti, sillä anturi oli kiinnitettynä

muovikoteloon ja muovi vaimentaa värähtelyä. Akun ollessa kotelon sisällä saattaa taas aiheutua värähtelyä.



Kuva 6. Anturin sijainti auton edessä

Autoilla ajettiin sama ajoreitti samalla nopeudella. Ajoreitin varrella tehtiin muutamia jarrutuksia ja kiihdytyksiä. Ajoreitillä sijaitsee korotettu suojatie, jossa on melko pitkä väli (20 metriä) korokkeen alun ja lopun välillä. Ajaminen tapahtui yleisellä tiellä, joten muulla liikenteellä saattoi olla pieni vaikutus mittaustuloksiin. Ajoreitillä oli jonkin verran väliaikaisia liikennejärjestelyitä ja talvesta johtuvia tien epätasaisuuksia. Ajonopeutena toimi tiellä suurin sallittu nopeus eli 40 km/h.

Korotetun suojatien nousukulma on noin 11° , joten tästä voidaan laskea herätteen suuruus, kun tiedetään taka-akselin jousittamaton massa. Siis $y = x \cdot 11^\circ$, mistä saadaan $y = m \cdot v \cdot ((11/360) \cdot 2\pi)$ ja y :n suuntaiseksi voimaksi 213 kgm/s joka voidaan kirjoittaa impulssivoimaksi 213 kgm/s² sekunnissa. Rampin pituus on 0,57 metriä ja ajonopeus 40 km/h, joka on 11 metriä sekunnissa. Kosketuksen kestoksi muodostuu 19 sekuntia, joten impulssin suuruus on 4047 kgm/s². Tällä voimalla ramppi työntää ajoneuvoa ylöspäin.



Kuva 7. Ajoreitin korotettu suojatie, josta tarkemmin tarkastelussa olevat mittaustulokset ovat

3.3 Tutkimuksen arviointi

Mittausajankohta vaikutti hieman jälkimmäiseen tulokseen, sillä jälkimmäisen mittauksen aikana liikenne oli jo melko runsasta. Ajoreitillä oli myös yhdet liikennevalot, jotka sijaitsivat risteyksessä juuri ennen korotettua suojatietä. Liikennevalot osoittautuivat helpottavaksi tekijäksi, sillä valoihin joutui lähes poikkeuksetta pysähtymään. Liikennevaloissa oli ajoreitin ainoa täydellinen pysähdys, jolloin värähtely väheni tai loppui. Tämän tekijän ansiosta korotettu suojatie oli helppo löytää jokaisesta suoritetusta mittauksesta.

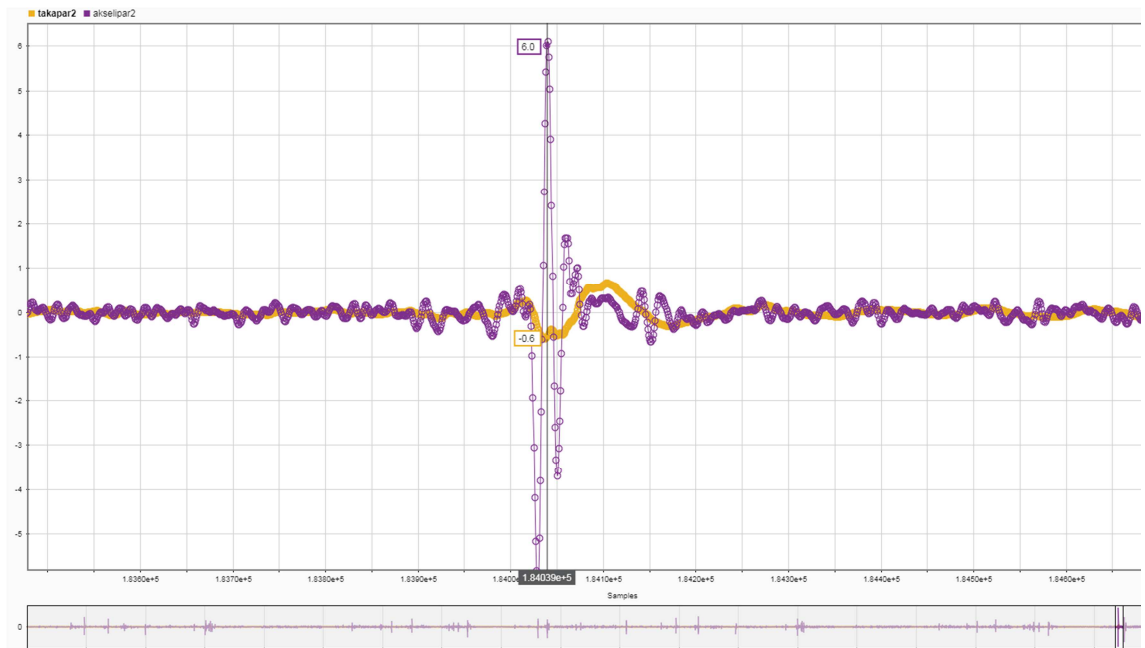
4 Tulokset

4.1 Tulosten subjektiivinen analysointi

Mittaustulokset tallennettiin Matlab-muotoon. Dataa oli sopivasti, sillä isomman otannan läpikäyminen olisi ollut työlästä ja pienemmästä otannasta ei olisi tullut luotettavia havaintoja. Erot kahden alustaratkaisun välillä olivat melko pieniä, koska pääjousi pysyi samana. Ajo-ominaisuuksiltaan alkuperäinen alusta tuntui hieman pehmeämmältä, mutta osittain myös epävakaammalta kuin muokattu alusta. Muokattu alusta oli kovempi, mutta myös selvästi jämäkempi ja johdonmukaisemmin käyttäytyvä kuin alkuperäinen alusta. Alkuperäinen alusta ei tuntunut pohjaavan, mutta tuntui nyökkäävän ja niaavan enemmän kuin muokattu alusta. Molempien alustojen ajettavuus ja ajomukavuus olivat hyvät.

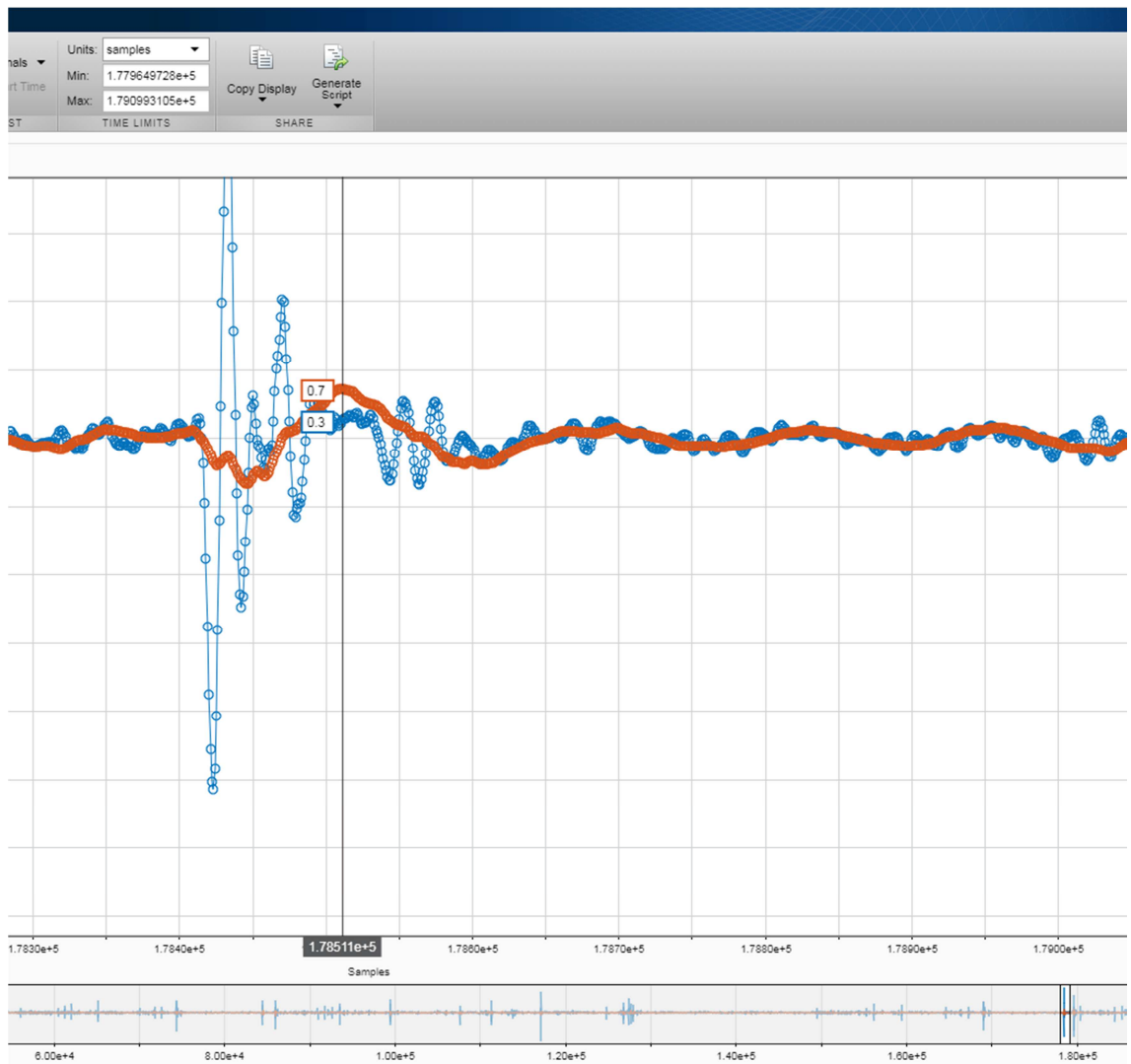
4.2 Tulosten tarkempi analysointi

Kuvasta 8 näkyy, kuinka taka-akseli lähtee korotettuun suojatiehen ajon seurauksena liikkumaan ylöspäin. Kori seuraa hieman myöhemmin ylöspäin-liikettä. Sitten renkaat saavuttavat korotetun suojatien yläpään ja liike ylöspäin hidastuu voimakkaasti akselistossa, mutta kori jatkaa yhä liikettä ylöspäin. Renkaat joustavat ja saavat aikaan uuden akseliston kiihtymisen ylöspäin, mikä näkyy seuraavana kuvaajan alareunaan menevänä piikkinä. Akselisto kiihtyy vielä kerran alaspäin. Tässä kohdassa kori on lähtemässä myös alaspäin.



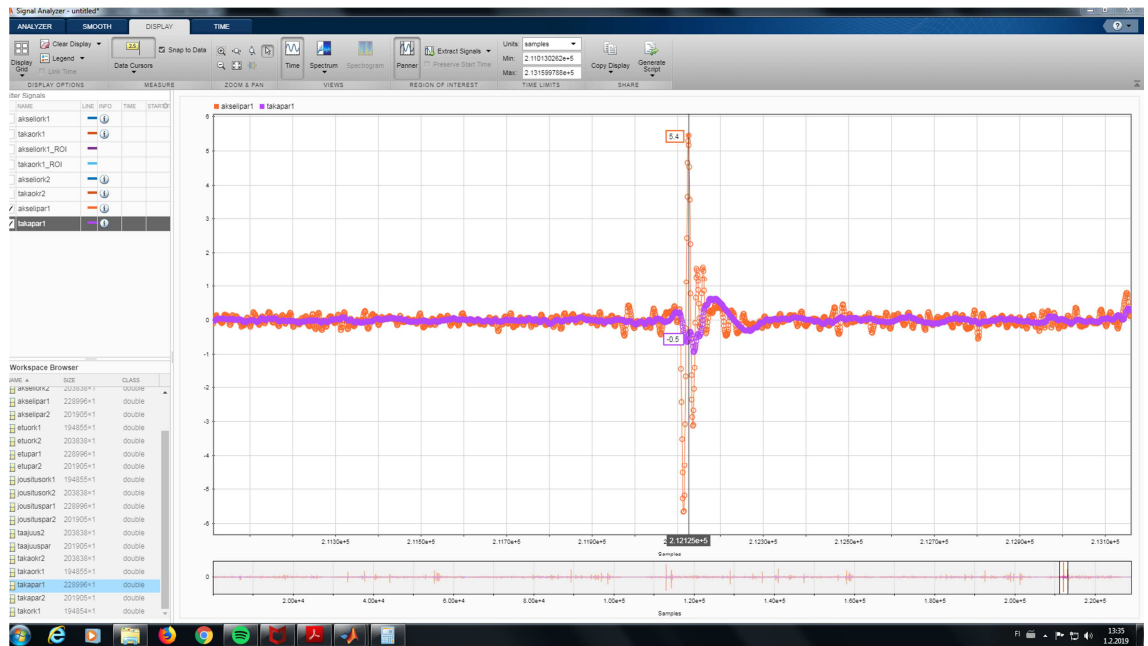
Kuva 8. Muunneltu alusta ajettaessa korotetulle suojatielle. Oranssi viiva on matkustamon pohjassa oleva anturi ja violetti viiva taka-akselissa oleva anturi.

Alkuperäisen alustan kuvaajassa (kuva 9) korin saamat kiihtyvyyden arvot ovat hieman suurempia, mikä tarkoittaa, että alkuperäisellä alustalla kori liikkuu nopeammin. Tämä kertoo alustan pienoisesta jäykkyydestä. Vaimennuksen osalta kuvaajissa ei näy suuria eroja, sillä kummassakin alustassa jousen tekemä korin heiluriliike loppuu 2–3 värähdyksen aikana. Alkuperäisessä alustassa korin anturissa ei näy selkeää heilahdusta eturenkaiden saavutettua korotetun suojatien yläpään, mutta muokatussa alustassa näkyy pieni piikki ennen töyssyn aloittamaa taka-akselin liikettä. Muokatun alustankäyttäytyminen kertoo jousituksen pinta pehmeystä, joka koetaan usein miellyttävänä heilahteluna.



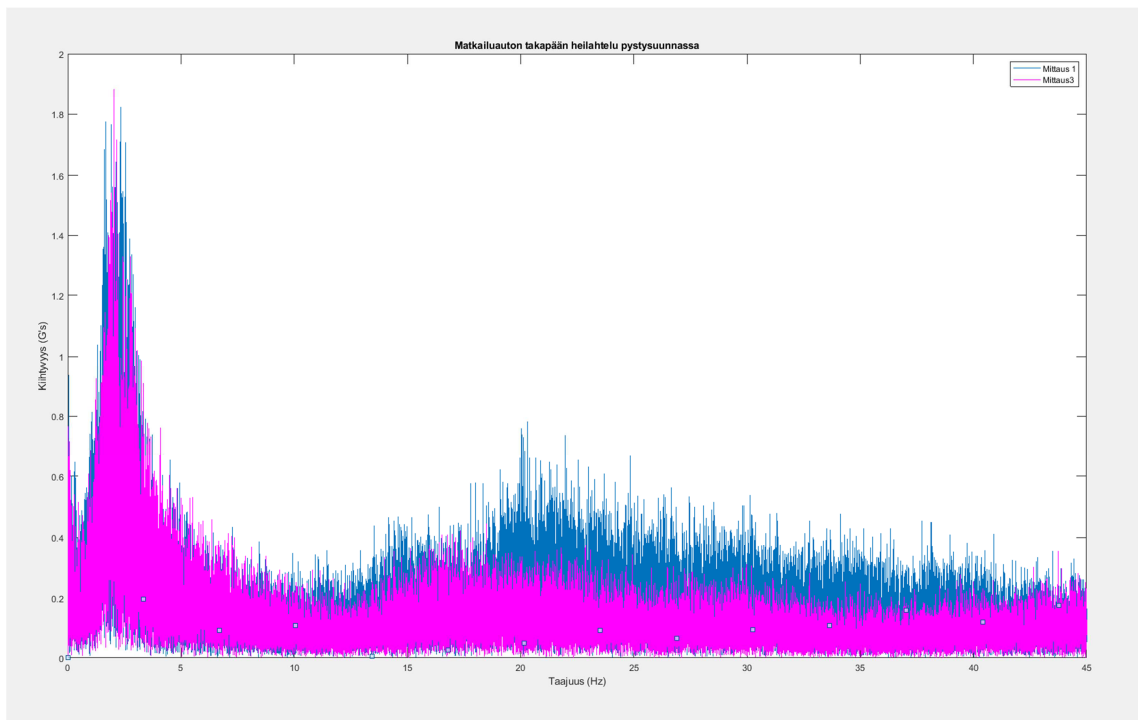
Kuva 9. Alkuperäinen alusta ajettaessa hidastetöyssyssä. Sininen viiva on taka-akselissa oleva anturi ja oranssi viiva on matkustamon pohjassa oleva anturi.

Toisessa otannassa-näky selvemmin tuo ennen töyssyä tapahtuva korin heilahdus, jolloin eturenkaat ovat töyssyn päällä ja korin etupuoli nousee voimakkaasti ylöspäin, mistä aiheutuu takapäätä alaspäin työntävä voima. (Kuva 10.)



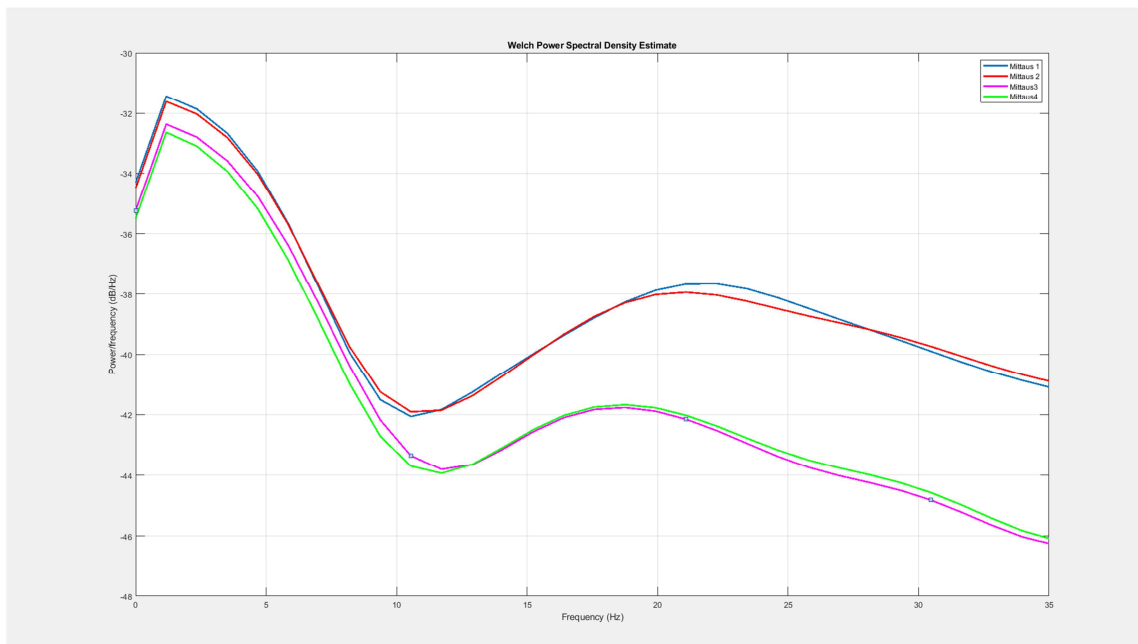
Kuva 10 Muokattu alusta ajettaessa hidaste töyssyssä. Violetti viiva on matkustamon pohjaan kiinnitetty anturi, ja oranssi viiva kuvaa taka-akseliin kiinnitettyä anturia.

Kuvan 11 kuvaaja on tarkoituksella rajattu 45 hertsiin, koska niillä taajuuksilla tapahtuva värähtely tuntuu ihmiskehossa. Sininen kuvaaja on alkuperäisen alustan värähtely, ja edessä vaaleanpunaisella värillä näkyvä käyrä on otettu muokatusta alustasta.



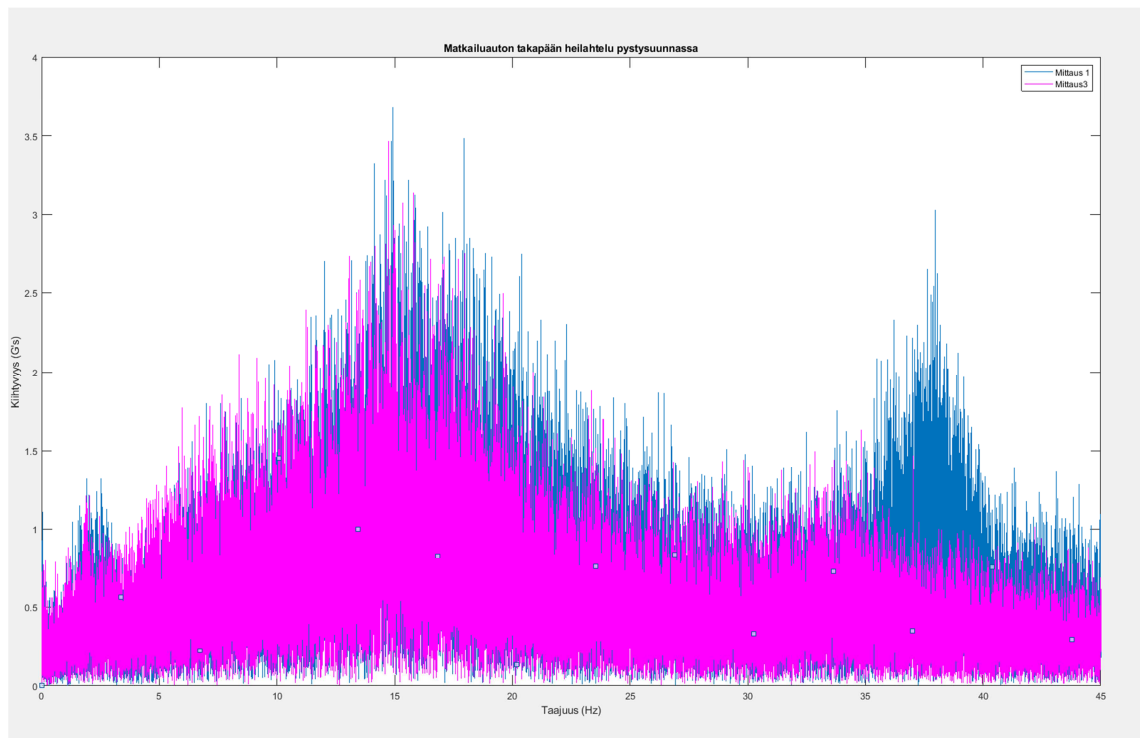
Kuva 11. Korin takana sijaitsevasta anturista lasketut kiihtyvyydet taajuuden suhteen

Kuvan 12 kuvaajassa näkyy mittaukset 1, 2, 3 ja 4 joista 1 ja 2 ovat alkuperäisellä alustalla tehtyjä 3 ja 4 parannetulla. Mittaus 1 on sinisellä, mittaus 2 punaisella, mittaus 3 vaaleanpunaisella ja mittaus 4 vaaleanvihreällä. Kuvaajasta näkee, että mittaustulokset mittauksessa 1 ja 2 ovat hyvin samankaltaiset ja myös mittausten 3 ja 4 välinen ero on melko pieni. Molemmat myös muistuttavat toisiaan, mikä kertoo massojen olevan samoja.



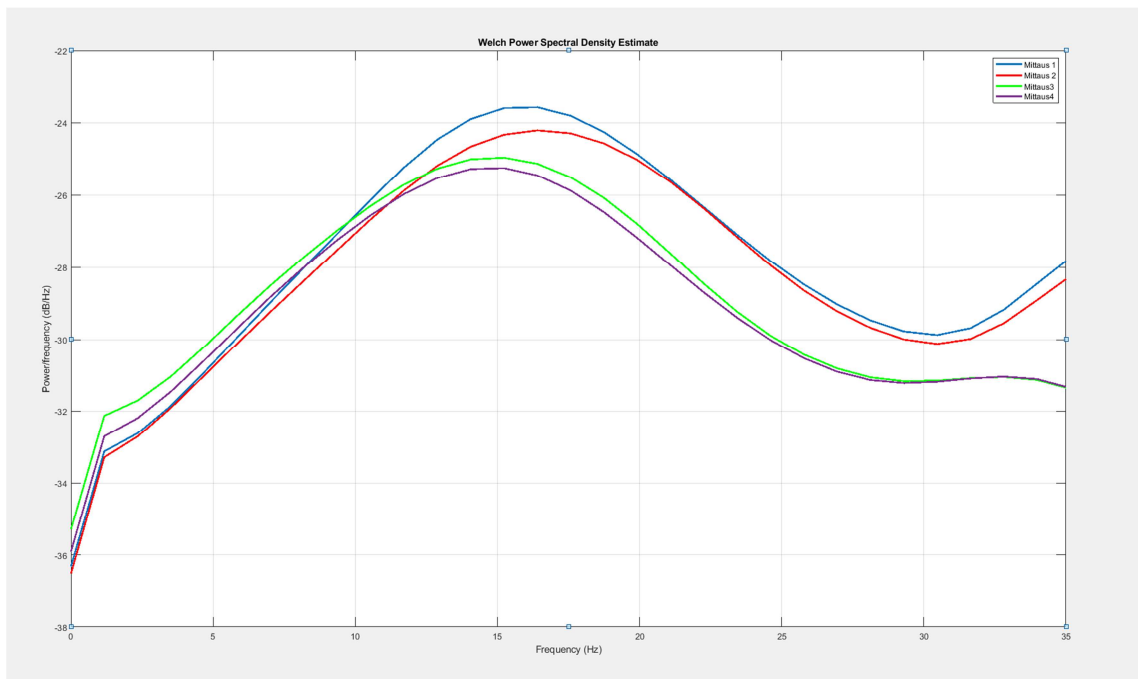
Kuva 12. Teho taajuuden suhteen korissa takan sijaitsevasta anturista

Kuvan 13 kuvaaja on akselilta mitatun värähtelyn määrä, joka on lähes yhtä voimakasta ja kertoo ajonopeuden olleen hyvin lähellä toisiaan. Kuvaajassa sinisellä on alkuperäinen alusta ja vaaleanpunaisella paranneltu. Kuvaajassa näkyvä 35–40 hertsin taajuudella oleva piikki on tutkimuksen kannalta epäoleellinen, sillä värähtely saattaa johtua renkaista, joiden ilmanpaineita ei tarkastettu, minkä lisäksi myös tasapainotus saattaa vaikuttaa arvon nousuun.



Kuva 13. Kiihtyvyyden arvot taajuuden suhteen akselistossa sijaitsevasta anturista laskettuna

Kuvan 14 kuvaajassa on esitetty mittaukset 1, 2, 3 ja 4, joiden värit ovat samat kuin korista mitatuissa arvoissa. Kuvaajista on nähtävissä hyvin lähellä toisiaan olevia arvoja. Alussa kaikki arvot ovat hyvin lähellä toisiaan, mikä viestii mittauksen vertailukelpoisuudesta, sillä akselistolta mitatun värähtelyn pitäisi olla hyvin samankaltaista molemmissa mittauksissa.



Kuva 14. Teho taajuuden suhteen laskettuna taka-akselissa sijaitsevasta anturista

5 Johtopäätökset

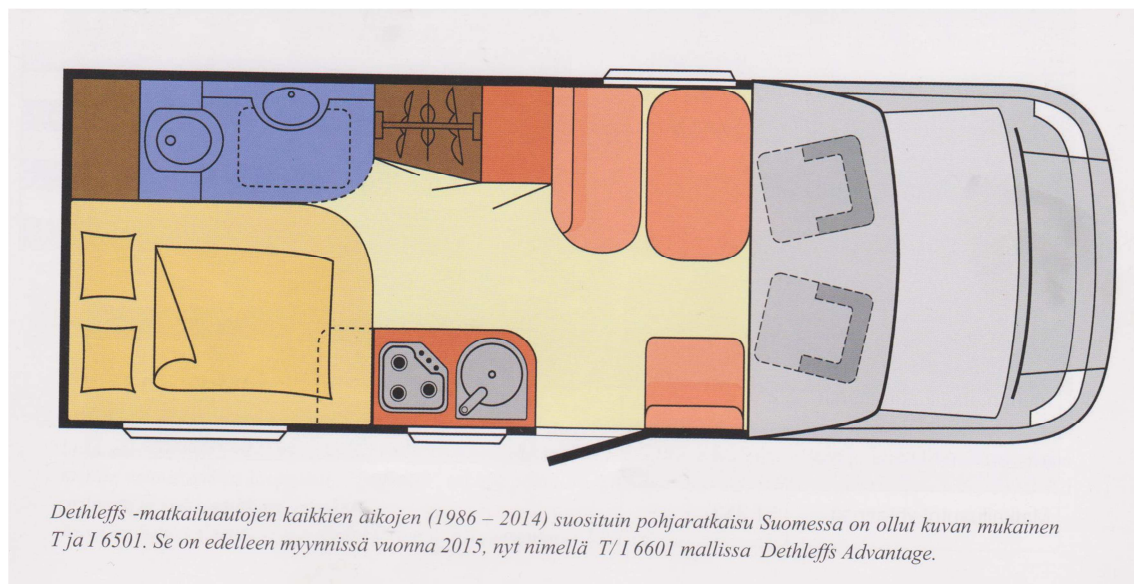
5.1 Tutkimustulosten johtopäätökset

Fiat Ducaton muokatulla alustalla on huomattavasti parempi ajokäyttäytyminen kuin alkuperäisellä alustalla, vaikka tutkimuksen mittaustulokset eivät osoittaneet kovin suurta eroa. Ajoneuvon käyttäytymisen ero on kuitenkin havaittavissa myös mittaustuloksissa. Subjekttiivinen ajokokemus muokatulla alustalla oli parempi kuin alkuperäisellä alustalla. Pieni ero mittaustuloksissa voi johtua myös siitä, ettei pääjoususta vaihdettu. Tulosten tarkemmasta analysoinnista näkee, että parannellussa alustassa jousitus on jäykempi, sillä kuvaajassa 14 näkyvä värähtely on alussa voimakkaampaa kuin alkuperäisellä alustalla. Tämä kertoo korin värähtelyn vaikuttavan akseliin asti. Maksimiteho parannetulla alustalla jää kuitenkin pienemmäksi kuin parannetulla, mikä kertoo alustasta peräisin olevan värähtelyn pienenemisestä. Kuvasta 12 näkee, että koko korin värähtely on teholtaan paljon vähäisempää eli jousitus toimii.

Mikäli ajoneuvot olisi kuormattu maksimitavarakuormalla, ajomukavuusero olisi todennäköisesti ollut huomattavampi. Perusteluna esitän seuraavan väitteen. Fiat

Ducaton alustaa suunniteltaessa on ajateltu massakeskipisteen sijaitsevan lähellä auton etuosaa.

Tehtäessä alustasta matkailuauto siirtyy massakeskipiste huomattavan taakse. Autoa suunnitellessa on varmasti myös pyritty pitämään autolla ajaminen miellyttävänä ilman kuormasta. Matkailuautoksi muutetussa Fiat Ducatossa ollaan lähellä maksimikuormaa.



Kuva 15. Matkailuauton sisusta, jossa näkyy painopisteen takapainoisuus (Siukosaari 2015, 149)

Matkailuautossa on mahdollisuus saavuttaa maksimikuorma vain sijoittamalla tavarakuorma (maksimi 500 kilogrammaa) taka-akselin takapuolelle, jolloin alkuperäinen alusta ei ole lähelläkään suunnittelunsa lähtökohtaa. Pakettiautossa, johon alusta on suunniteltu, kuormaus tapahtuu usein kuormatilan etuosaan ja tällöin takapään jousituksen rasitus on huomattavasti pienempi kuin matkailuautossa. Tutkimuksen tulosta olisi saattanut muuttaa ajoneuvon täyteen tavarakuormaan kuormaaminen, se olisi siirtänyt massakeskipistettä lähemmäs taka-akselia, johon tutkimuksen mittaukset sijoittuivat. Tutkittavien ajoneuvojen etupään jousituksen arviointiin olisi tarvittu kaksi kiihtyvyyssanturia lisää, mutta samalla myös kaarreajo käyttäytymisestä olisi saatu tarkempaa arviota, koska etu jousitus olisi pitänyt mitata molemmilta pyöriltä sillä auton etupäässä on erillisjousitus ja kallistuksen vakaaja.

Alustan käyttäytymisen parantamisessa on myös toinen vaihtoehto. Pohjaamiskumien tilalle voidaan vaihtaa ilmajouset, jolloin alustaa on myös mahdollista säätää ja optimoida

kuormauksen sekä tiestön epätasaisuuden mukaan. Jatkotutkimuksena voisi tutkia ajo-ominaisuuksia, kun ajoneuvo on täydessä tavara- ja henkilökuormassa sekä yhtenä vaihtoehtona olisi ilmajousitus.

Lähteet

Bernasch, J., Fuchs, A., Steffan, H. & Watzenig, D. 2016. Automotive NVH Technology. Lontoo: Springer.

Haapaniemi, H. 2003. Autoteknillinen taskukirja. 6. painos. Jyväskylä: Autoalan koulutuskeskus.

Heißing, B. & Ersoy, M. 2011. Chassis handbook. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Siukosaari, A. 2015. Matkailuautot 50 vuotta Suomessa. Tallinna: Alfamer.

Taghavifar, H. & Mardani, A. 2017. Off-road Vehicle Dynamics; Analysis, Modelling and Optimization. Springer.