

Hanna Posio

TAVARAPYÖRÄN ETUJOUSITUKSEN SUUNNITTELU

TAVARAPYÖRÄN ETUJOUSITUKSEN SUUNNITTELU

Hanna Posio
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikka, auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Hanna Posio
Opinnäytetyön nimi suomeksi: Tavarapyörän etujousituksen suunnittelu
Opinnäytetyön nimi englanniksi: Front suspension design for cargo bike
Työn ohjaaja: Janne Ilomäki
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021
Sivumäärä: 23 + 4 liitettä

Opinnäytetyössä suunniteltiin jousitus Muksubussi Oy:n tavarapyörän etupyöriin. Työn tavoitteena oli valita ja suunnitella jousitusmenetelmä, jousikomponentit ja jousituksen piirustukset. Valintoja ja suunnittelua rajasivat työn tilaajan toiveet ja vaatimukset jousitusmatkasta, koosta, huoltovapaudesta ja kustannuksista.

Työ aloitettiin jousitusmenetelmän valinnasta, jossa vertailtiin neljää eri jousitusmenetelmää työn tilaajan toiveiden ja vaatimusten pohjalta. Vertailun perusteella luotiin vertailutaulukko ja valittiin jousitusmenetelmäksi erillisjousitettu rengas, koska rakenteen hyödyt vastaavat työn tilaajan toiveita ja rakenteella saavutetaan haluttuja ominaisuuksia tavarapyörän monille käyttösovelluksille. Tämän jälkeen tehtiin jousikomponenteille valitsemistaulukko jousivakion, vaimennusvakion ja jousen pituudesta, jotka määritettiin tavarapyörän maksimimassan mukaan. Lopuksi tutkittiin bump steer -ilmiötä yksinkertaisella mallilla ja uudestaan kokonaan suunnitellusta kokoonpanon 3D-mallista. Bump steer -ilmiön tulokset huononivat, kun mittaus toistettiin kokoonpanon 3D-mallista, sillä jousen kiinnitys alatukivarteen osoittautui haastavaksi epäsymmetrisellä alatukivarrella. Myös kaarrekäyttämistä tutkittiin valmiista kokoonpanosta mittaamalla kääntösäteet jousen pituuksilla 271 mm ja 245 mm. Rungon ja alatukivarren jousen kiinnitys osien lujuutta arvioitiin FEA-analyysillä.

Opinnäytetyössä tuotettiin piirustukset kaikista jousituksen osista ja taulukko tilattavista osista. Alkuperäisestä rungosta pystyttiin hyödyntämään raidetangon pidennystä lukuun ottamatta kaikki alkuperäiset ohjauksen osat, kuten alkuperäiset renkaat, olka-akselit sekä pyörännavat. Työn tuloksena tuotettu jousituskokoonpano on paras mahdollinen kompromissi bump steer -ilmiön ja kaarrekäyttämisen näkökulmasta hyödyntämällä alkuperäistä runkoa ja osia laajamittaisesti.

Asiasanat: jousitus, kuormapyörät, 3D-mallinnus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Mechanical engineering, automobile and Industrial vehicle engineering

Author: Hanna Posio
Title of thesis: Front suspension design for cargo bike
Supervisor: Janne Ilomäki
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2021
Pages: 23 + 4 appendices

The aim of the thesis was to design front suspension for Muksubussi Ltd's cargo bikes. The main objective was to choose and design suspension method, suspension components and make drawings of suspension. Design was defined by customers wishes and demands for suspensions working stroke, space, maintenance freedom and costs.

The thesis began with choosing of suspension method. Choosing was made with comparing of four different method in computation table by wishes and demands of suspension. Independent suspension for wheels was chosen because design meets customers wishes and allows wide range of uses for the cargo bike. Once the method was chosen, table of suspension components requirements was implemented by defining spring rate, damping coefficient and length of a shock absorber. Requirements were defined by maximum mass of the cargo bike. Lastly inspection of bump steer effect was made with simplified model and again from ready 3D assembly. Results degraded as inspection was repeated from 3D assembly since shock absorber attachment to unsymmetrical lower suspension arm prove to be difficult. As well cornering ability was inspected from 3D assembly by measuring turning radius as spring length is 271 mm and repeated as spring length is 245 mm. Frame and lower suspension arm strength were inspected with FEA-analysis.

The thesis produced drawings of every part for suspension and table of components that needs to be ordered. From original frame tires, steering knuckle and wheel hub could be used as well as steering components apart from tie rod. The result of the work is best possible compromise between bump steer effect and cornering abilities with the use of original frame and components on a large scale.

Keywords: suspension, cargo bikes, three-dimensional imaging

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 JOUSITUSMENETELMÄN VALINTA	7
2.1 Vertailtavat jousitusmenetelmät	7
2.1.1 Erillisjousitettu rengas	7
2.1.2 Ilmajousitus kuormatilalle tai renkaille	8
2.1.3 Kumijousitus kuormatilalle	9
2.1.4 Lehtijousitus kuormatilalle	9
2.1.5 Yhteenveto vertailusta	10
2.2 Valittu jousitusmenetelmä	11
3 KOMPONENTTIEN VALINTA	12
3.1 Jousivakio	12
3.2 Heilahtelun vaimentaja	13
3.3 Valitut komponentit	14
4 JOUSITUSKOKOONPANON SUUNNITTELU	15
4.1 Bump Steer	15
4.2 Kääntösäteet	18
4.3 Jousituskokoonpanon osat	18
4.4 Lujuuslaskenta	19
5 YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23
LIITTEET	
Liite 1 Jousituskokoonpano	
Liite 2 Kääntösäteen laskut	
Liite 3 Kokoonpanon räjäytyskuva	
Liite 4 Jousituskokoonpanon piirustukset	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan jousitus komponentteineen tavarapyörän etupyöriin. Työn tilaajana toimii Muksubussi Oy. Jousitus suunnitellaan tilaajan prototyypivaiheessa olevaan pyörään. Jousituksesta tulee pyörään saatava lisävaruste.

Muksubussi Oy on vuonna 2017 perustettu yritys, joka vuokraa tavarapyöriä päiväkohteille sekä vanhus- ja vammaispalveluiden tuottajille. Tulevaisuudessa yrityksen on tarkoitus kehittää tuotteitaan, palvelujaan ja laajentaa yritystoimintaa niin Suomessa kuin ulkomaillekin. (Hyppää muksubussin kyytiin.)

Opinnäytetyössä tutkitaan ja suunnitellaan sopiva jousitusratkaisu, valitaan komponentit ja suunnitellaan jousituksen kiinnitys tavarapyörän runkoon. Jousitusratkaisu valitaan rajaavien tekijöiden mukaan, joita ovat esimerkiksi pieni tila ja huoltovapaus. Työssä laaditaan piirustukset jousituksen toteutukseen.

2 JOUSITUSMENETELMÄN VALINTA

Suunniteltavan jousituksen tarkoituksena on lisätä ajomukavuutta mahdollisimman yksinkertaisella ja huoltovapaalla rakenteella. Tavarapyörän rakenteen takia myös pieni tila rajaa jousitusmenetelmiä, minkä vuoksi myös vaihtoehtoisia rakenteita ja materiaaleja tutkitaan. Lähtötietoina käytetään työn tilaajan toiveita jousituksen ominaisuuksista ja 3D-mallia tavarapyörän prototyypistä. Jousitusmenetelmän valinnan selkeyttämiseksi koottiin lista vaadituista ja toivotuista ominaisuuksista (kuva 1).

Vaatimuslista	
V/T	Toiminto
V	Jousitettava massa: 125kg/rengas
T	Pieni/yksinkertainen rakenne
V	Joustovara: 2-5cm
T	Huoltovapaa
T	Pienet kustannukset
V= vaatimus	
T= toive	

KUVA 1. Vaatimuslista

2.1 Vertailtavat jousitusmenetelmät

Työtä varten valittiin muutamia jousitusmenetelmiä vertailtavaksi, jotta voitaisiin määrittää tavarapyörälle sopivin vaihtoehto. Valinta tehtiin työn tilaajan ja ohjaavan opettajan kanssa vertailun pohjalta katselmointipalaverissa.

2.1.1 Erillisjousitettu rengas

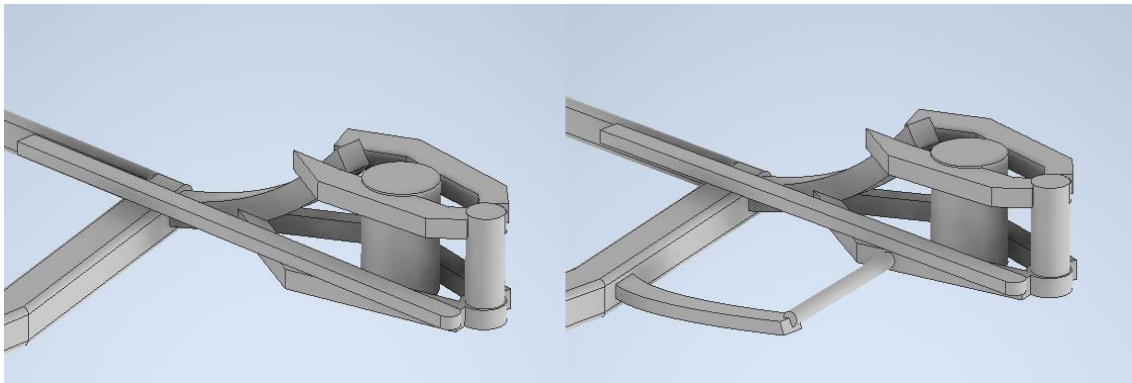
Erillisjousitettu rengas tarkoittaa tässä vertailussa kierrejousitusta tai vääntäjousitusta. Kierrejousi on metallilanka kierrettynä kompaktimpaan muotoon (Niskanen 2019, 189). Kierrejousen palautuminen aiheutuu kokoonpainumisesta syntyvästä väännöstä, koska jousi vastustaa pituuden muutosta. Vääntäjousi on jousiteräksestä tehty tanko, johon kohdistuu vääntöä. Vääntösauvan toinen pää on kiinteä ja toinen pää pystyy kääntymään. Vääntäjousi vastustaa renkaaseen kohdistuvista voimista aiheutuvaa vääntöä. (Bosch 2018, 1009.)

Erillisjousituksella saavutettaisiin suuri joustovara ja rakenne olisi huoltovapaa. Kierrejousen komponentit itsessään olisivat halpoja verrattuna esimerkiksi ilmajousitukseen.

Kierre- tai vääntäjousien rakenne tarvitsee myös iskunvaimentimen, jotta jousi palautuisi nopeasti normaaliin tilaansa. (Bosch 2018, 1007.)

Erillisjousituksen rakenne on muita vertailtavia suurempi ja vaatisi muutoksia runkoon, sillä jäykän rungon tilalle suunniteltaisiin tukivarsia, jousi ja iskunvaimennin. Tavarapyörän pyöräkotelon pieni tila tekisi tästä vaikeaa tai vaihtoehtoisesti pyöräkoteloa pitäisi suurentaa. Tukivarsien takia myös renkaan käyttäytymistä tulisi tutkia uudelleen, koska uudet tukivarret muuttaisivat ajettavuutta.

Tukiratkaisuna jousitukselle voitaisiin käyttää suunnikastuentaa, josta raakamalli on nähtävissä kuvassa 2. Vääntäjousituksessa tukivarsien väliin tulisi pelkästään iskunvaimennin, kun taas kierrejousitukselle tulisi myös jousi.



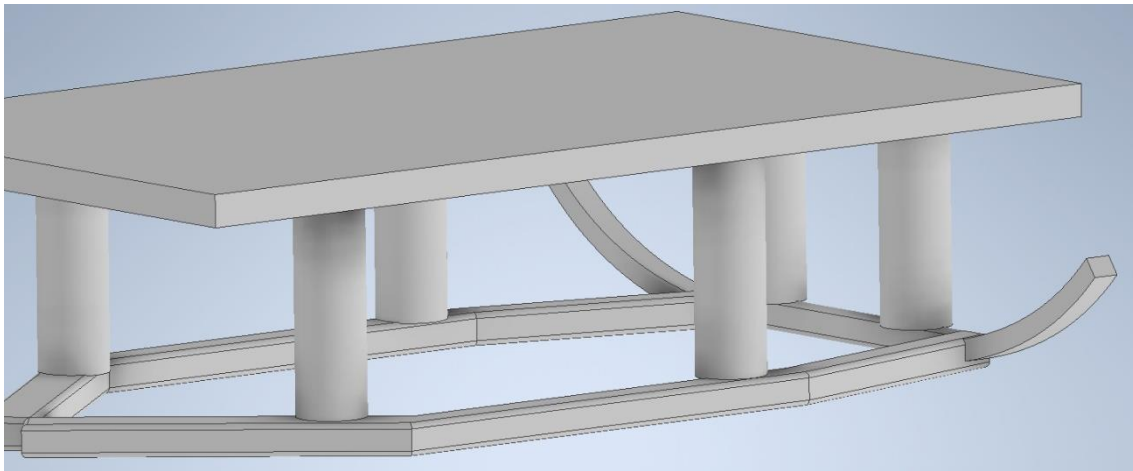
KUVA 2. Raakamalli erillistuennasta, vasemmalla kierrejousitus ja oikealla vääntäjousitus

2.1.2 Ilmajousitus kuormatilalle tai renkaille

Ilmajousituksessa jousena toimii ilma, jonka määrää muuttamalla voidaan vaikuttaa myös jousen korkeuteen (Bosch 2018, 1010). Ilmajousituksella voidaan lisätä mukavuustekijöitä painosta riippumatta, sillä jousituksen taajuus on lähes painosta riippumaton. (Bosch 2018, 1008.)

Ilmajousitus voitaisiin toteuttaa niin, että korkeuden säätö on kuorman mukaan muutettavissa. Ilmajousitus on kuitenkin kallis ja vaatii toimiakseen iskunvaimentimen, paineilmasäiliön ja kompressorin, joka veisi akkua pyörästä tai vaihtoehtoisesti vaatisi oman akkunsaa. Ilmajousitukset sijoitettaisiin rungon ja kuormatilan väliin. Kompressorin sijoitettaisiin runkoon sähkömoottorin eteen ja ilmasäiliö runkoon. Ilmajousitus nostaisi kuormatilaa

jonkin verran ja lisääisi pyörän tyhjääpainoa. Raakamalli kuormatilan ilmajousituksesta on nähtävissä kuvassa 3.



KUVA 3. Ilmajousituksen raakamalli

Ilmajousitus renkaille vaatisi muutoksia runkoon, sillä ilmajousituskin vaatisi tukivarsia ja iskunvaimentimen toimiakseen. Tukiratkaisuna käytettäisiin suunnikastuentaa. Tässäkin vaihtoehdossa kompressorin ja ilmasäiliön sijoitus pysyisi samana.

2.1.3 Kumijousitus kuormatilalle

Kumijousituksessa kumi toimii jousena. Kumissa on sisäistä vaimennusta, minkä vuoksi se ei palaudu heti takaisin muotoonsa (Niskanen 2019, 195). Kumijousitus on halpa ja tarjoaa paljon mahdollisuuksia muotoilun suhteen mutta kumi ikääntyy, joten jousia pitäisi vaihtaa (Bosch 2018, 1008).

Kumijousituksella voitaisiin saavuttaa erittäin yksinkertaisesti lisää joustavuutta kuormatilalle mutta kuormatila jouduttaisiin nostamaan. Joustomatka ei todennäköisesti olisi niin suuri kuin muilla vertailtavilla menetelmillä mutta rakenne olisi halvin mahdollinen ja rakenteeltaan yksinkertainen.

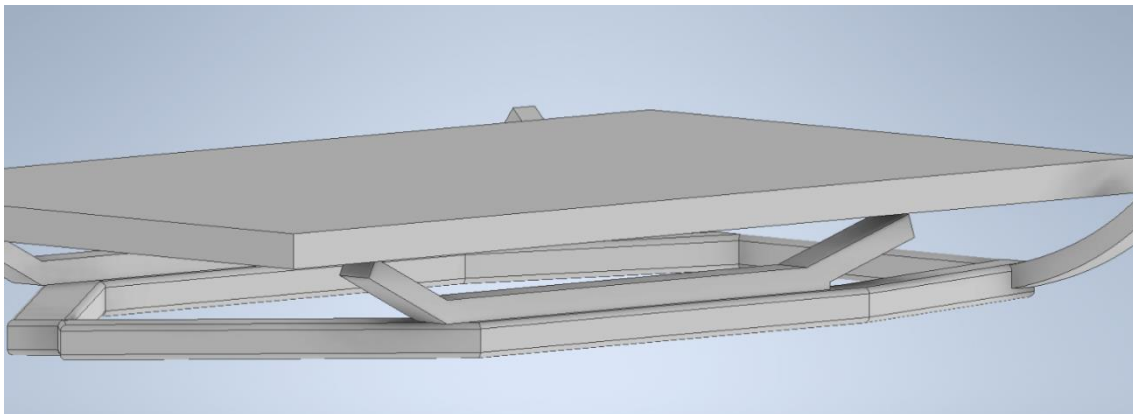
2.1.4 Lehtijousitus kuormatilalle

Lehtijousi koostuu yleisimmin yhdistetyistä jousenlehdistä, joista suurin osa on keskellä. Näin taataan rasituksen jakautuminen koko jousen pituudelle mutta tällöin jousen joustokuvaaja on lineaarinen. Tämä ei ole optimaalista ajomukavuuden kannalta, sillä jousen

tulisi olla progressiivinen eli jousen jäykkyys lisääntyy jouston lisääntyessä. (Rantala – Sirola 2011, 195.)

Lehtijousesta voidaan tehdä progressiivisesti joustava apujousilla tai jousen tehollista pituutta kuormituksen kasvaessa lyhentävillä jousilla. Lehtijousen tulee kestää jatkuvaa taipumista muotoaan muuttamatta tai murtumatta. Lehtijousen materiaalin tulee myös kestää väsymistä, joka on suurimmillaan pintakerroksessa. (Rantala – Sirola 2011, 196.)

Lehtijousitus olisi halpa verrattuna esimerkiksi ilmajousitukseen mutta lehtijousituksesta voi tulla ääntä, kun lehtijousi liikkuu, koska lehtijousen kitkan vaimennus voi olla olematon mutta tätä voidaan parantaa erimallisella lehtijousella. Lehtijousitus vaatii säännöllistä huoltoa (Bosch 2018, 1007). Kuormatilan jousituksena lehtijousi nostaisi kuormatilaa ja kuormatilan kiinnitys tulisi suunnitella uudelleen, jotta se kestäisi lehtijousituksen. Kuvassa 4 on raakamalli lehtijousituksesta kuormatilalle.



KUVA 4. Lehtijousituksen raakamalli

2.1.5 Yhteenveto vertailusta

Yhteenvetona koottiin vertailutaulukko (taulukko 1), johon on pisteytetty vaatimuslistan mukaisia kohtia vertailun tietojen pohjalta. Vertailussa ei huomioida vaatimuslistan vaatimuksia, koska jokainen jousitusmenetelmä pystyy täyttämään ne. Vertailun mukaan kumijousitus olisi optimaalisin vaihtoehto jousitusmenetelmäksi.

TAULUKKO 1. Vertailutaulukko

Vertailu				
Toiminto	Erillisjousitus	ilmajousitus	kumijousitus	lehtijousitus
Pieni/yksinkertainen rakenne	1	2	5	3
Joustovara	5	5	1	3
Huoltovapaa	5	4	4	3
Pienet kustannukset	3	1	5	4
=	14	12	15	13
1=huono				
2=tyydyttävä				
3=hyvä				
4=erittäin hyvä				
5=erinomainen				

2.2 Valittu jousitusmenetelmä

Katselmointipalaverissa valittiin vertailun pohjalta suositeltu erillisjousitus kierrejousella, koska rakenteen hyödyt vastaavat työn tilaajan toiveita jousituksesta. Renkaan erillisjousituksella saavutetaan haluttuja ominaisuuksia tavarapyörän monille käyttösovelluksille. Tavarapyörän kuormana voitaisiin ihmisten lisäksi käyttää tavaroita, jolloin pelkkä kuormatilan jousitus ei toisi haluttua ajomukavuutta ja näin ollen renkaiden jousitus on tärkeämpää.

3 KOMPONENTTIEN VALINTA

Jousikomponenttien valinnassa hyödynnetään työn tilaajan lähtötietoja tavarapyörän painosta, jonka pohjalta vertaillaan markkinoiden tarjoamia vaihtoehtoja. Tavarapyörän kokonaisuudessa kuormattuna on noin 350 kg, ja yhdelle renkaalle painoa arvioidaan tulevan noin 125 kg. Jousikomponenttien kartoituksen oletuksena pidetään lähtökohtaisesti markkinoilla jo olevia ratkaisuja, koska jousien valmistaminen itse nostaisi kustannuksia eikä olisi tarkoituksen mukaista, koska jousituksesta tulee vain lisävaruste pyörään, jolloin komponenttien tarve pysyy maltillisena.

3.1 Jousivakio

Jousivakio on jousen jäykkyyttä kuvaava suure. Jäykkyyttä voidaan kuvata seuraavasti: 100 N:n voimasta jousi painuu 1 cm:n, joten 2 cm:n painumiseen tarvitaan 200 N:n voima. Voiman sijaan kuvaamaan voidaan käyttää myös massaa. Jousivakiosta käytetään kirjainta k . Kaavassa 1 on nähtävissä jousivakion määritelmä. (Puhn 1981, 135–137.)

$$k = \frac{F}{\Delta y} \quad \text{KAAVA 1}$$

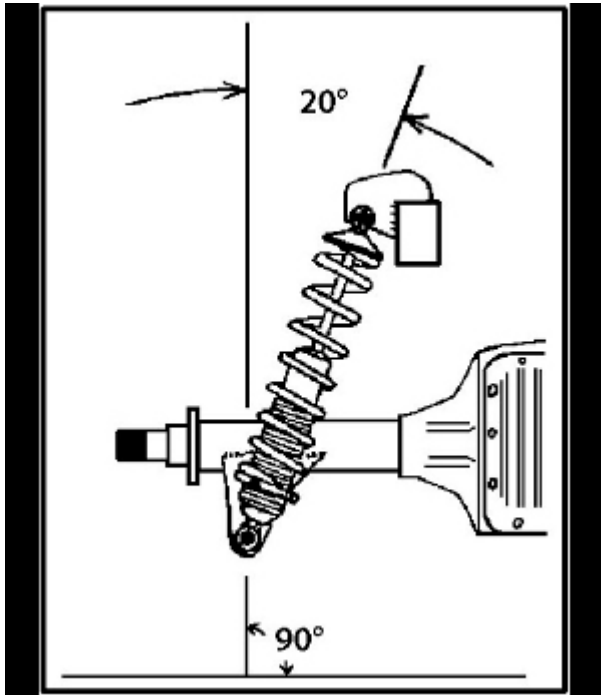
F = voima (N/kg)

Δy = painuma (mm)

Kaavalla 1 voidaan määrittää haluttava jousivakio tavarapyörälle jakamalla yhdelle renkaalle tuleva paino halutulla joustomatkalla. Yhdelle etupyörälle arvioitiin kohdistuvaksi massaksi 125 kg ja joustoksi pelkällä omalla painolla haluttaisiin 20 mm, jolloin jousivakioksi saadaan

$$k = \frac{125 \text{ kg}}{20 \text{ mm}} = 6,25 \text{ kg/mm} = 6250 \text{ N/m}.$$

Kuitenkin jousivakio pätee vain, jos jousi asennetaan täysin pystysuunnassa voimaan nähden. Jousen asentaminen vinoon vähentää korin kallistumista kaarteessa ja moni jousivalmistaja siksi suosittelee sitä. Jousivakiota tarkasteltaessa tulee siis ottaa huomioon jousen asennuskulma (kuva 5). Jousen jäykkyys eli jousivakio laskee sitä mukaan, mitä suurempi asennuskulma on. (How To Install and Adjust Coilovers. 2018.)



KUVA 5. Jousen asennuskulma (*How To Install and Adjust Coilovers. 2018*)

Tukivarsien lopullinen suunnittelu voi vaikuttaa jousivakioon, mutta suunnittelun tässä vaiheessa sitä ei tutkita. Koska renkaalle tuleva arvioitu massa on laskettu täydelle kuormalle, tyhjällä kuormalla tavarapyörä ei vaatisi niin suurta jousivakiota. Jotta jousi pysyy toiminta-alueellaan niin tasaisella maalla kuin teiden epätasaisuuksissakin, suunnittelussa on otettava myös huomioon, että jousi pääsee painumaan jo tyhjällä kuormalla. Jousen tulee taipua myös tyhjänä, jotta se voi vähentää tiestä johtuvia värähtelyjä. Tyhjällä kuormalla yhdelle pyörälle kohdistuisi vain noin 50 kg massa mutta silloinkin jousi painuisi melkein 1 cm:n tasaisella maalla ilman ulkoisia voimia.

3.2 Heilahtelun vaimentaja

Ilman heilahtelun vaimentajaa eli iskunvaimenninta pyörän jousi jäisi liikkumaan hallitsemattomasti teiden epätasaisuuksien takia. Iskunvaimennin saa renkaat pysymään tien pinnassa paremmin kaarteissa, koska muuten jousi pomppisi ylös alas saaden renkaan nousemaan. (Puhn 1981, 145.)

Jos jousitus yrittää liikkua toistuvasti, iskunvaimentaja vastustaa tätä liikettä vahvasti. Iskunvaimennin muuttaa liike-energian lämmöksi ja vähentää ei-haluttua jousen liikettä. Iskunvaimentimen sisällä oleva nesteen liike hidastuu, kun neste kulkee pienen venttiilin

läpi iskunvaimentimen liikkeestä, mikä luo lämpöä ja hidastaa jousen liikettä. (Puhn 1981, 145).

Iskunvaimentimen jäykkyys tulisi määrittää jousen jäykkyyden mukaan, koska jousien jäykkyys määritetään yleensä ajoneuvon painon mukaan. Raskaammat ajoneuvot vaativat yleensä jäykempiä jousia, jos jousi kiinnitetään alustaan samalla tavalla (Puhn 1981, 145). Iskunvaimennuksen määrää voidaan laskea karkeasti kaavalla 2. Vaimennusvakiona käytetään esimerkiksi autoille 40 prosenttia, joten sitä sovelletaan tähänkin. Vaimentimeen kohdistuva pyöränkuorma tarkoittaa painoa, joka kohdistuu yhdelle renkaalle (Niskanen 2019, 202).

$$c = 4\pi \cdot m \cdot \zeta \cdot f_0 = 3\,926\,990,816 = 3\,930\,000 \frac{\text{kg} \cdot \text{N}}{\text{m}} \quad \text{KAAVA 2}$$

c = vaimennuksen määrä (kg*N/m)

ζ = vaimennusvakio (%)

m = vaimentimeen kohdistuva pyöräkuorma (kg)

k = yksimassamallissa jousen jäykkyys [N/m]

Iskunvaimentimien valmistajat harvoin ilmoittavat teknisiä tietoja tuotteistaan, mikä tekee erikoiskohteiden iskunvaimentimien valinnasta vaikeaa. Näin ollen iskunvaimentimia joudutaan yleensä valitsemaan erikoiskohteisiin testaamalla tai vaihtoehtoisesti valitaan säädettävä iskunvaimennin (Puhn 1981, 145). Täten voidaan suositella valittavaksi iskunvaimennin jousen jousivakion mukaan, mutta säädettävä iskunvaimennin voi helpottaa jousikomponenttien lopullista säätöä.

3.3 Valitut komponentit

Edellisten tarkastelujen perusteella voidaan suositella hankittavaksi jousikomponentit kuvan 6 tietojen perusteella. Jousi voisi olla esimerkiksi moottoripyörän jousi. Jousen jousivakio ei tarvitse olla täsmälleen sama kuin kuvassa 6, jos jousi silti pääsee painumaan maksimi ja minimi kuormalla.

kierrejousen jousivakio:	6,25kg/mm	6250N/m
Iskunvaimentimen vaimennusvakio:	3 930 000 kg*N/m	
Jousikomponenttien kokonaispituus:	280mm	

KUVA 6. Jousikomponenttien tiedot

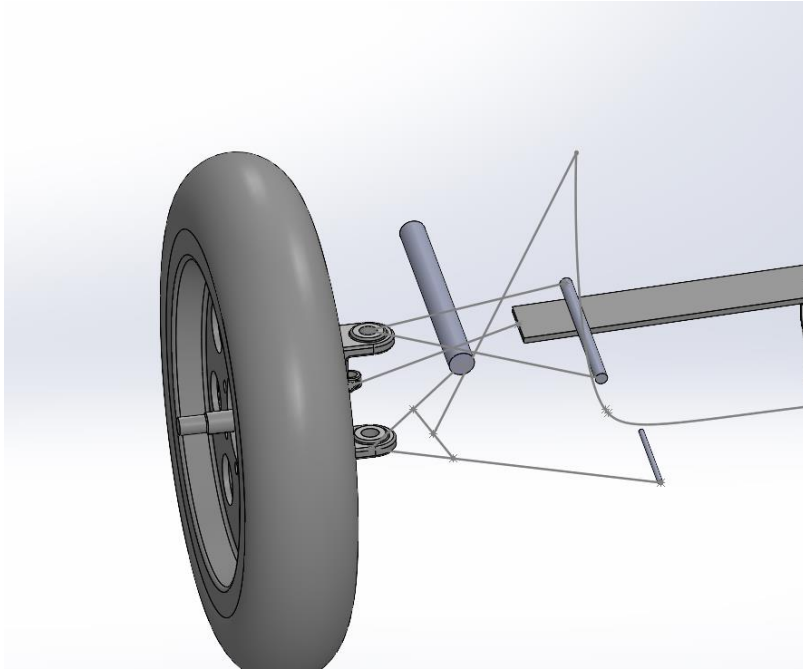
4 JOUSITUSKOKOONPANON SUUNNITTELU

Lähtötietoina jousituksen suunnittelulle käytettiin työn tilaajalta saatuja piirustuksia. Jousituksen tulisi käyttäytyä mahdollisimman mukavasti jokaisessa tilanteessa. Näin ollen suunnittelussa kiinnitetään erityistä huomiota bump steer -ilmiöön ja sen minimointiin. Suunnittelussa hyödynnetään alkuperäistä runkoa ja osia mahdollisimman pitkälle kustannusten minimoimiseksi. Työn tilaaja esitti rungon etuputken suunnittelulle lisävaatimuksia, joiden mukaan keskelle tulisi jäädä 35 cm tilaa ja rungon korkeus ei saisi olla rengasta korkeampi.

4.1 Bump Steer

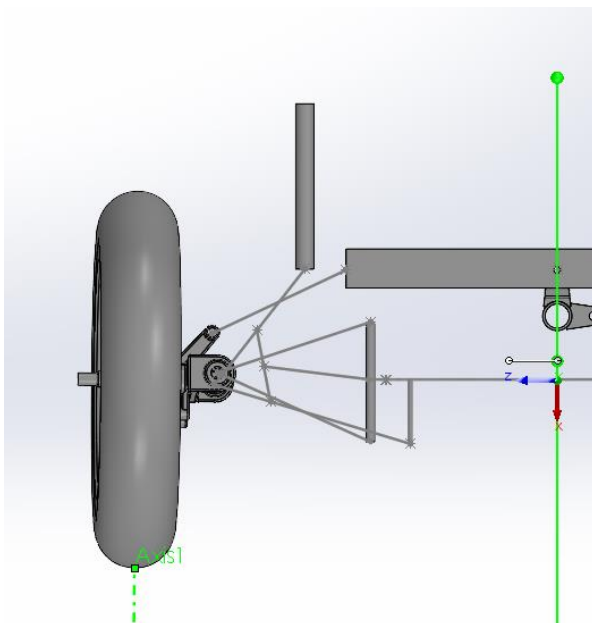
Bump steer -ilmiö tarkoittaa aurauksen muutosta renkaan liikkuessa pystysuunnassa. Ideaali tilanteessa auraus ei muutu ollenkaan renkaan liikkeestä. Etupyörissä bump steer aiheuttaa käännöksissä arvaamattomuutta ja epävakautta jarrutuksissa. Bump steer voi johtaa erittäin huonoon ohjattavuuteen, sillä jokainen töyssy tai jarrutus muuttaisi auruusta. Useat jousituksen mitat vaikuttavat bump steer -ilmiöön, joten paras tapa tutkia ilmiötä on kokeilun kautta. (Puhn 1981, 88–91.)

Bump steer -ilmiötä varten suunnitellaan 3D-mallinnusohjelmalla raakamalli, jota muuttamalla voidaan määrittää parhaat mahdolliset tukivarsien kiinnityspisteet. Raakamallissa tukivarsien, jousen ja rungon muutosten tilalla käytettiin yksinkertaisia viivoja, jotta pisteiden määrittäminen olisi nopeampaa. Myös alkuperäistä runkoa käytettiin apuna tukipisteiden määrittämisessä, jotta tukivarsien kiinnityspisteiden sijoitus runkoon olisi helpompaa. Yksinkertaisessa mallissa työn tilaajan lisävaatimukset toteutuivat. Yksinkertainen 3D-malli on nähtävissä kuvassa 7.



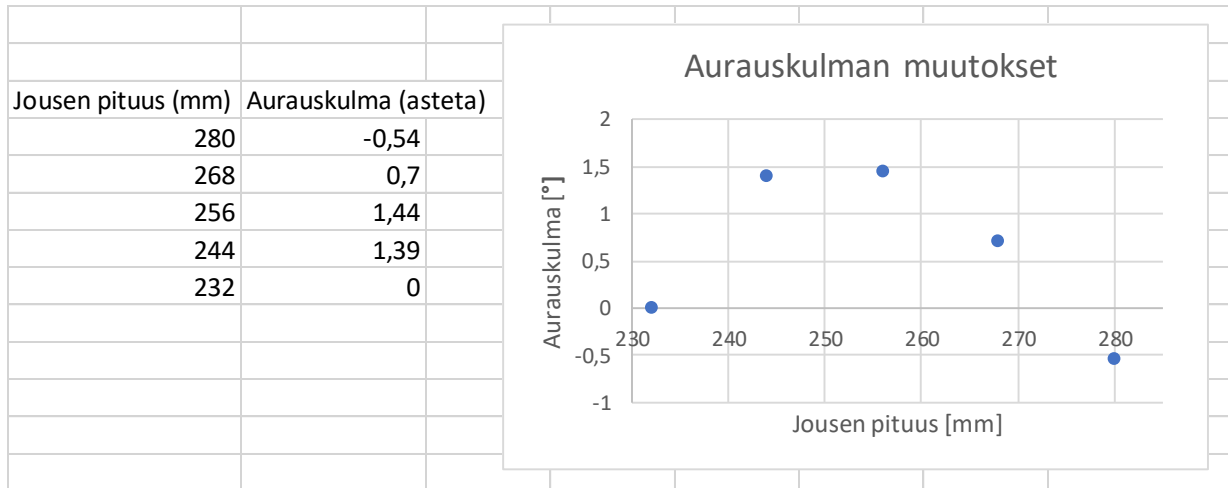
KUVA 7. Bump steer -tutkimuksen raakamalli

Bump steer -ilmiötä tutkittiin muuttamalla jousen raakamallin pituutta oikean jousen pituuden mukaan. Ohjaus oli lukittu keskelle, jotta sen kääntyminen ei vaikuttaisi mittaukseen. Aurauskulma mitattiin vain toiselta puolella verraten renkaaseen tehtyä apuakselia kokoonpanon keskilinjaan. Aurauskulman mittaaminen on nähtävissä kuvassa 8.



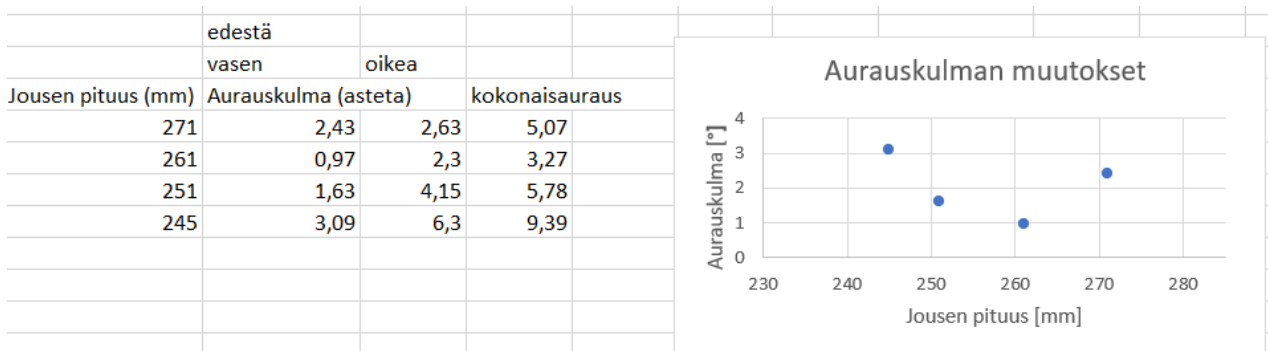
KUVA 8. Aurauskulman mittaus

Raakamallilla saatiin kuvan 9 mukaisia tuloksia aurauksen muutoksesta. Ilmiötä ei saatu täydellisesti poistettua, sillä pyörän runko vaikeuttaa tukivarsien sijoittelua mutta tuloksien voidaan arvioida olevan sallittavalla tasolla.



KUVA 9. Auraukulman muutokset yksinkertaisesta mallista

Bump steer mitattiin uudestaan valmiista kokoonpanosta, jossa jousen pituutta voitiin muuttaa. Kokoonpano on nähtävissä liitteessä 1 ja tulokset kuvasta 10. Tulokset ovat hieman huonompia kuin yksinkertaisesta mallista mitatut, mikä johtuu muutoksista yksinkertaisen mallin ja oikean kokoonpanon tukivarsien rakenteessa. Jousen kiinnitys alatu-kivarteen osoittautui haastavaksi epäsymmetrisellä alatukivarrella, joten tukivarsia muu-tettiin ja raidetangot pidennettiin lähelle alkuperäistä mitta. Rungon etuputkien väliin jäi 36 cm, joka sopii työn tilaajan lisävaatimukseen mutta runko jäi korkeammaksi kuin rengas. Kaikki huomioiden tulokset ovat paras kompromissi, joka voidaan toteuttaa hyödyntä-mällä alkuperäisiä osia ja runkoa laajamittaisesti.



KUVA 10. Auraukulman muutokset kokoonpanosta

4.2 Kääntösäteet

Kokoonpanosta mitattiin pyörien kääntökulma pyörien ollessa täysin kääntyneenä oikealle ja vasemmalle. Mittaus toistettiin jousen pituudella 271 mm ja 245 mm. Mittauksilla arvioitiin pyörän kääntymistä ja jousituksen vaikutusta pyörän kääntymiseen. Mittauksista laskettiin kääntösäteet kaavalla 3 (Niskanen 2019, 54). Tulokset ovat nähtävissä liitteestä 2.

$$R = \frac{L_1}{\tan\delta_u} - \frac{b_1}{2} = \frac{L_1}{\tan\delta_s} + \frac{b_1}{2}$$

KAAVA 3

L_1 = akseliväli (mm)

δ_u = ulkokaarteen renkaan kääntökulma (°)

δ_s = sisäkaarteen renkaan kääntökulma (°)

b_1 = olka-akseleiden väli (mm)

4.3 Jousituskokoonpanon osat

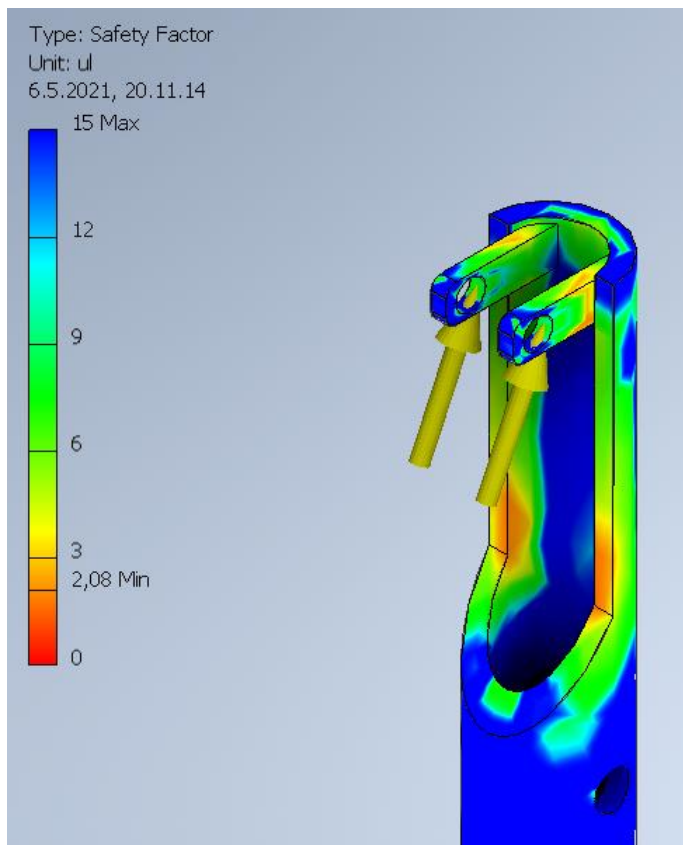
Tukivarsien suunnittelussa hyödynnettiin alkuperäistä rakennetta mahdollisimman pitkälle. Rungosta vain etuputki muutettiin, raidetankoa pidennettiin 5 mm mutta tukivarret ja jousen kiinnityksen suunnittelun lähtökohtana pidettiin bump steer -tutkimuksessa käytettyjen tukivarsien kiinnityspisteitä. Tavoitteena pidettiin myös mahdollisimman yksinkertaista rakennetta kestävyiden ja kustannusten takia. Kokoonpanosta tehtiin räjäytyskuva helpottamaan kokoonpanon hahmotusta. Kokoonpanon räjäytyskuva on nähtävissä liitteestä 3 ja osien piirustukset liitteestä 4. Tilattavat osat, kuten nivelet, ja osien hinnat löytyvät taulukosta 2.

TAULUKKO 2. Tilattavat osat

Tuote	Määrä (kpl)	Mahdollinen toimittaja	hinta (€)	kpl/hinta	Määrä*kpl hinta
ANSI B18.2.2 - 1/2 - 13, HJN1	2	IKH	4,5	10	0,9
DIN 472 - 30 x 1,2	4	IKH	4,4	10	1,76
DIN 472 - 34 x 1,5	2	IKH	4,9	10	0,98
ISO 4014 - M10 x 70	2	IKH	39,9	100	0,798
ISO 4014 - M10 x 80	2	IKH	44,9	100	0,898
ISO 4017 - M12 x 45	2	IKH	38,9	100	0,778
ISO 4017 - M14 x 55	4	IKH	33,2	100	1,328
ISO 4035 - M10	6	IKH	2,6	7	2,228571429
ISO 4035 - M12	2	IKH	2,7	5	1,08
ISO 4035 - M14	4	Ruuvikeskus	372	100	14,88
Pusla/ ENERGY SUSPENSION PUR 9.9482	4	RallyCorsa SHOP	36	1	144
Spherical Plain Bearing GXSW14.29MS	4	Suomen Laakerikeskus	73,6	1	294,4
Spherical Plain Bearing GXOW14.34MS	2	RallyCorsa SHOP	33	1	66
ISO 4014 M12x55	2	IKH	44,5	100	0,89
Ylätukipultti 0,5" x 9"	2	Lapin pultti	20,7	1	41,4
				Yhteensä:	572,32 €

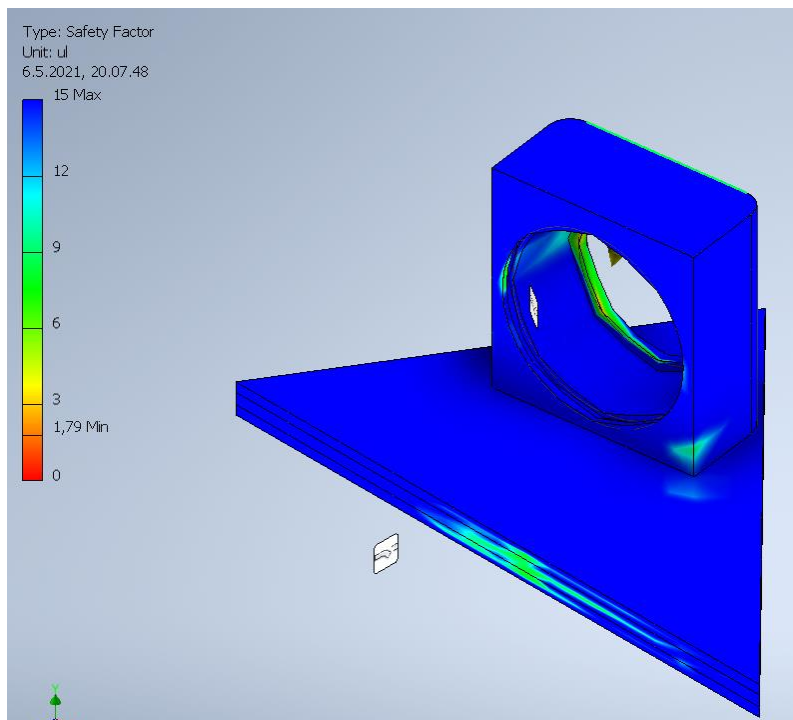
4.4 Lujuuslaskenta

Rakenteiden lujuuden riittävyttä arvioitiin FEA-analyysillä, joka toteutettiin Autocad Inventor -ohjelmalla. Analyysi tehtiin rungolle ja alatukivarren levyille, sillä niihin arvioitiin kohdistuvan suurimmat rasitukset. Rungon ja levyn materiaaliksi oli valittu rakenneteräs S355. Kuvassa 11 on nähtävissä rungon analyysi. Rungon alareuna säädettiin liikkumattomaksi, koska se hitsataan muuhun runkoon kiinni. Voima on mitoitettu jousen maksimipainon kestävyys mukaan ja säädetty jousen suunnan mukaiseksi. Kuvasta 11 voidaan nähdä, että rungon varmuuskerroin on 2,08, mikä on hyväksyttävä arvo.



KUVA 11. Rungon FEA-analyysi

Kuvassa 12 alatukivarren levyn analyysi, jossa on samat voimat samassa suunnassa kuin rungollekin. Levyn liikkuminen oli säädetty muuttumattomaksi reunoista, joista se hitsataan alatukivarsiin. Varmuuskertoimeksi levyille saatiin 1,79, mikä on hyväksyttävä arvo.



KUVA 12. Alatukivarsi levyn FEA-analyysi

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin ja suunniteltiin sopiva jousitusratkaisu, jousituksen kiinnitys ja valittiin komponentit. Jousitusratkaisun valinta toteutettiin rajaavien tekijöiden, kuten pienen tilan, mukaan. Työstä tuotettiin piirustukset jousituksen toteuttamiseksi.

Työssä valittiin erillisjousitus käytettäväksi jousitusmenetelmäksi ja jousikomponenteille tehtiin vaatimustaulukko, jonka mukaan oikea jousi voidaan hankkia. Jousitusta tutkittiin niin yksinkertaisella kuin oikeallakin 3D-mallilla ja jousituksesta tuotettiin piirustukset.

Työssä saavutettiin kaikki oleelliset tavoitteet mutta tilaajan lisätoiveeseen rungon etuputken korkeudesta ei päästy. Rungosta uudelleen suunniteltiin vain etuputki, jota nostettiin alkuperäisestä korkeammalle jousen kiinnityksen mahdollistamiseksi. Alkuperäisistä osista voitiin hyödyntää raidetangon pidennystä lukuun ottamatta kaikki alkuperäiset ohjauksen osat, kuten alkuperäiset renkaat, olka-akselit sekä pyörännavat. Etuputken korkeus, joustomatka sekä rungon keskelle jäävä vapaa tila ovat mahdollisimman lähellä tilaajan vaatimuksia ilman, että bump steer ja kaartoharitusarvot oleellisesti huononevat. Siltikin jousitusratkaisu on paras mahdollinen kompromissi ajokäyttäytymisen kannalta, mihin päästiin alkuperäisiä komponentteja hyödyntämällä ja ilman laajamittaisempia muutoksia runkorakenteisiin sekä ohjauskomponentteihin.

Opinnäytetyölle jatkona voitaisiin siirtyä jousituksen toteutukseen ja testaukseen. Testaamisessa erityistä huomiota kannattaisi kiinnittää bump steer -ilmiöön ja kaarekäyttäytymiseen sekä ajomukavuuteen.

LÄHTEET

Bosch, Robert 2018. Automotive Handbook 10th Edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Hyppää Muksubussin kyytiin. Muksubussi Oy. Saatavissa: <https://muksubussi.fi/yritys/>. Hakupäivä 5.1.2021.

Niskanen, Perttu 2019. TK00BP50 autotekniikan perusopinnot 1 10 op. Opintojakson luentomateriaali. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

Puhn, Fred 1981. How To Make Your Car Handle. New York: Berkley Publishing Group.

Rantala, Jouko – Sirola, Jarkko. 2011. Autotekniikka 3, Alusta- ja hallintalaitteet. Helsinki: Otava.

How To Install and Adjust Coilovers. 2018. Speedway Tech Team. Speedway Motors, Inc. Saatavissa: <https://www.speedwaymotors.com/the-toolbox/how-to-install-and-adjust-coilovers/30078>). Hakupäivä 10.2.2021.

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

KOKOONPANON RÄJÄYTYSKUVA

LIITE 3

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä

Salassa pidettävä