



Kilpa-auton etupyöräntuennan suunnittelu ja toteutus

Juho Härkönen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021

Ajoneuvotekniikka
Työkonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikka
Työkonetekniikka

HÄRKÖNEN, JUHO
Kilpa-auton etupyöräntuennan suunnittelu ja toteutus

Opinnäytetyö 39 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2021

Tämän opinnäytetyön taustana on oma tarve valmistaa kilpailukykyinen auto alati suosiotaan kasvattavaan drifting-kilpasarjaan. Drifting -kilpa-auton etupyöräntuennalta vaaditaan suurta pyörien kääntökulmaa sekä ohjauksen tarkkuutta ja loogisuutta.

Työn tavoitteena on määrittää auton etupään pyöräntuennan kinematiikka sekä suunnitella ja valmistaa auton olkavarret, etualatukivarret ja heilahduksen- vaimentimen alakiinnike oheiskomponentteineen. Suunnitelluille osille tehdään lujuusanalyysi ja niiden toiminta testataan käytännössä.

Suunnitellut osat valmistettiin asianmukaisilla laitteilla ja niiden kokoonpano suoritettiin normaaleissa korjaamo-olosuhteissa. Käytännön testien perusteella auton alusta vaikutti kilpailukykyiseltä ja sen ympärille on hyvä luoda toimiva kokonaisuus.

Drifting kilpa-auton suunnitteluun liittyvää teoriaa on esillä vielä vähän, mutta normaalin kilpa-auton suunnittelun perusteita käyttämällä pääsee pitkälle. Tulevaisuudessa auton kehittäminen tulee perustaa tiedonkeruujärjestelmistä saadulle datalle.

Asiasanat: pyöräntuenta, kinematiikka, ohjaus, drifting,

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Automotive Engineering
Industrial Vehicle Engineering

HÄRKÖNEN, JUHO
Design and Implementation of Racing Car Front Suspension

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 1 page
May 2021

Background of this thesis was writer's own need to design and manufacture a competitive race car to drifting race series. Drift car is driven at high slip angles, so front end must have a lot of steering angle. Steering also needs to be accurate and behave logically.

The purpose of this thesis is to design kinematics to front end and design and manufacture front knuckles, front a-arms, and lower mounts to shock absorbers with accessories. Strength analysis is made to designed parts and their function is tested in practical.

Designed parts are manufactured with appropriate tools and assembly is made at workshop conditions. Practical test drive confirmed that chassis seems competitive and it is a good basis to a functional race car.

There are not a lot of theory to build a car which is driven at high steering angles, but basic theory to build a normal race car assisted with the design. In the future drift car development be based on data from data-analysis systems.

Key words: suspension, kinematics, steering, drifting

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	PYÖRÄNTUENTA JA KINEMATIikka	6
	2.1 Camber, KPI-akseli ja kääntövierinsäde	6
	2.2 Caster ja casterpoikkeama	8
	2.3 Sortokulma	9
	2.4 Aorauskulma ja sen muutos joustossa	10
3	DRIFTING -AUTON VAATIMUKSET JA TAVOITTEET	11
	3.1 Drifting -kilpa-auton pyöräntuenta	11
	3.2 Tavoitearvot ja suunnittelun strategia	12
4	ETUPYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU	14
	4.1 Kinematiikan suunnittelu	14
	4.1.1 Aorauskulman muutos kääntäessä	15
	4.1.2 Aorauskulman muutos joustossa	15
	4.1.3 Camber-kulman muutos joustossa	17
	4.2 Etupyöräntuennan muotoilu	18
	4.2.1 Pyöränlaakeri ja heilahduksenvaimennin	19
	4.2.2 Olkavarsi	20
	4.2.3 Alatukivarsi	21
	4.3 Etupyöräntuennan lujuusanalyysi	22
	4.3.1 Alatukivarren lujuusanalyysi	22
	4.3.2 Olkavarsi ja heilahduksenvaimentimen alakiinnike	24
	4.4 Etupyöräntuennan kokoonpano	26
	4.4.1 Kokoonpano CAD-ohjelmistossa	27
	4.4.2 Kokoonpano käytännössä	29
5	TULOSTEN TARKASTELU	32
	5.1 Toteutuneet arvot	32
	5.2 Käytännön testaus	32
6	POHDINTA	37
	LÄHTEET	38
	LIITTEET	39
	Liite 1. Pyöränsuuntauksen todistus	39

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan ja valmistetaan drifting -kilpasarjan kilpa-auton etupyöräntuenta. Drifting-kilpailukäyttöön tarkoitettulla autolla ajetaan huomattavasti suuremmalla luistokulmalla kuin normaalilla kilpa-autolla, joten etupyöräntuennan muuttaminen näyttelee isoa roolia auton suunnittelussa.

Drifting-kilpasarjan auton rakentamiseen tarjotaan varsin vähän tietoa toimivan pyöräntuennan suunnittelun pohjaksi. Kuitenkin sama teoria alustan toiminnan kannalta pätee niin normaalin-, kuin drifting kilpa-auton suunnitteluun. Oma tietoperusta pohjautuu ajoneuvoalan koulutuksen, työkokemuksen sekä harrastusten kautta hankittuun tietoon. Lisäksi kokemuspohja on karttunut useiden aiempien autoprojektien ja Formula Student -tiimiin kuulumisen myötä.

Etupyöräntuenta suunnitellaan autoon käyttäen alkuperäistä etuapurunkoa, mutta heilahduksenvaimentimen yläkiinnityspistettä muutetaan. Autoon suunnitellaan etualatukivarret, heilahduksenvaimentimen alakiinnike sekä etuolkavarret, ja tarkastellaan niiden lujuutta. Osat valmistetaan ja niiden toiminta testataan käytännössä. Pyöräntuennan suunnittelussa käytetään apuna 3D-mallin-
nusohjelmistoa sekä pyöräntuennan kinematiikan suunnitteluohjelmistoa.

Työ pohjautui omiin tarpeisiin, ja muutostyöt tehtiin aiemmin hankittuun omaan autoon. Muutettava auto on malliltaan porrasperäinen C-sarjan Mercedes-Benz W203. Autossa on noin 400 hevosvoimainen 4-sylinterinen kaksoisahdettu moottori. Alustan muutostyöt tehtiin itsenäisesti syksyn 2020 aikana.

Aluksi työssä esitellään pyöräntuennan suunnittelun pohjalla oleva teoria. Tämän jälkeen keskitytään suunnitteluun, komponenttien lujuusanalyysiin ja lopuksi komponenttien ja geometrian toiminta tarkastetaan käytännön testein.

2 PYÖRÄNTUENTA

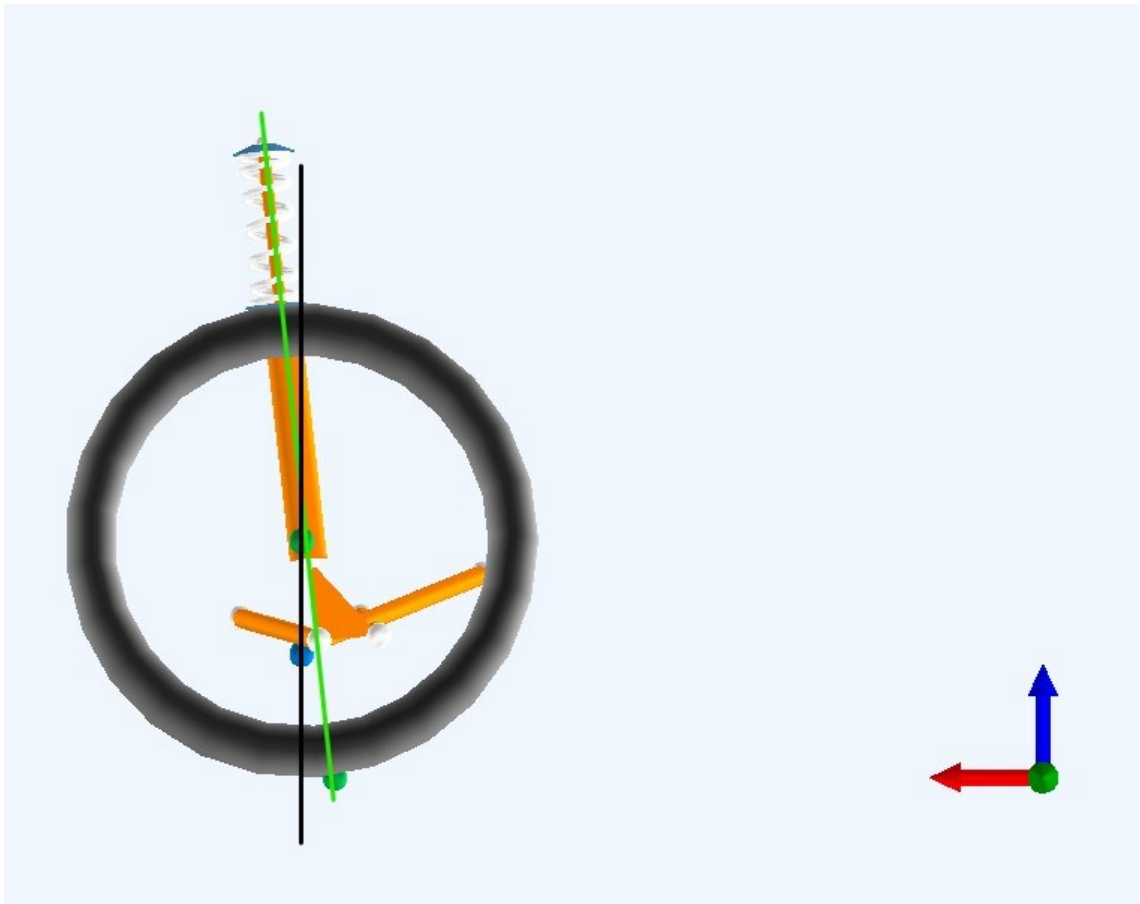
2.1 Camber, KPI-akseli ja kääntövierinsäde

Auton pyöräntuenta on kokonaisuus, joka käsittää pyörien kiinnityksen auton runkoon. Kinematiikalla tutkitaan pyörän liikkumista, kun siihen kohdistuu voimia, jotka aiheuttavat liikkeen. Auton pyöräntuennan komponenttien kiinnityspisteet toimivat geometrisina ehtoina renkaan liikkumiselle. Yksinkertaisesti sanottuna alustan suunnittelijan tulee ennustaa ajoneuvon käyttäytyminen erilaisten herätteidien tai ympäristön muutoksissa (Dixon, J. 1996, 331). Herätteiksi voidaan määrittää esimerkiksi kuljettajan tekemä ohjausliike tai kiihdyttäminen. Pyörän asennoille on annettu erilaisia termejä, joita kutsutaan pyöräntuenteiksi.

Camber-kulma on kulma, joka muodostuu autoa edestäpäin katsottuna sen pystyakselin- ja renkaan keskitason välille. Camber-kulma on positiivinen, kun renkaan yläosa on kauempana auton keskitasosta kuin sen alaosa. (Milliken & Milliken 1995, 46.)

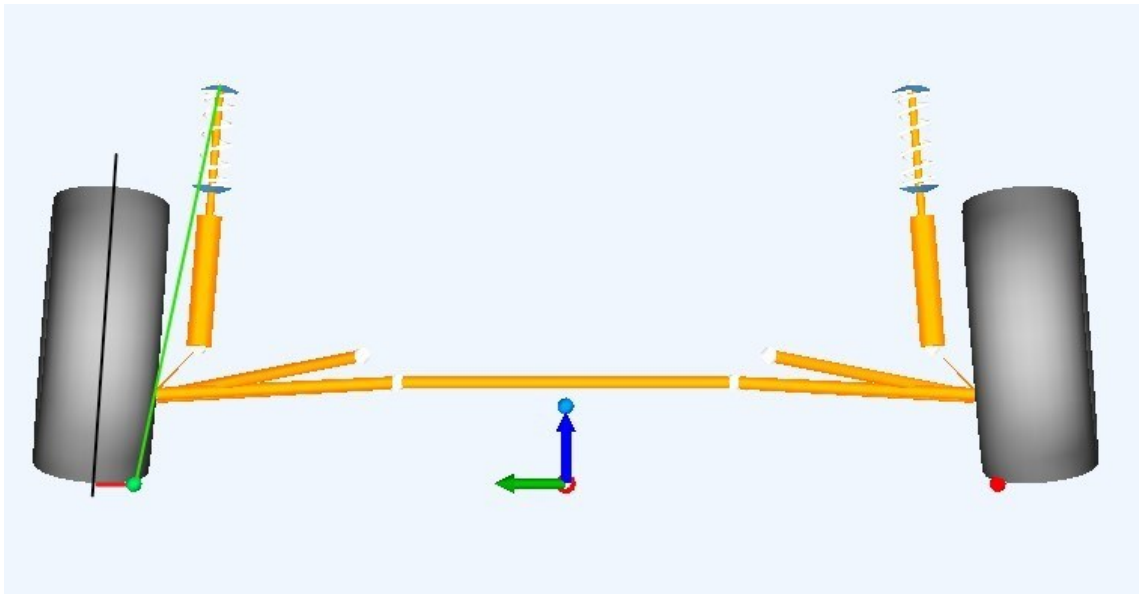
Lähtökohtaisesti camber-kulma halutaan autossa säätää aina sellaiseksi, että renkaan kosketuspinta ajopintaan olisi mahdollisimman suuri. Staattisessa tilanteessa tämä tarkoittaisi sitä, että renkaan camber-kulma olisi nolla. Kuitenkin renkaan ominaisuuksien takia suurin sivuttaisvoima saavutetaan yleensä negatiivisella camber-kulmalla (Milliken & Milliken 1995, 407).

KPI-kulma, eli kääntöakselin kallistumakulma taas muodostuu ajoneuvon ylä- ja alapalloniveliä välisen kuvitteellisen akselin- ja pystysuoran tason välille. KPI-kulmaa voi tarkastella sekä auton edestä että sivusta katsoen. Sivusta katsottu KPI-akseli esitetty kuvassa 1 vihreänä viivana.



KUVA 1. KPI-kulma sivusta katsoen

Käntövierinsäde (scrub radius) on mitta, joka syntyy edestäpäin katsottuna pystysuoran tason ja KPI-akselin etäisyydestä toisiinsa ajopinnalla. Käntövierinsäde esitetty kuvassa 2 punaisena viivana. Käntövierinsäde on positiivinen, kun KPI-akseli kohtaa ajotason lähempänä auton keskitasosta kuin renkaan pystytaso. Positiivinen käntövierinsäde aiheuttaa renkaaseen jarrutustilanteessa voiman, joka pyrkii känttämään renkaat haritukselle. (Automotive Handbook, 2018, 936.)



KUVA 2. KPI-kulma edestä

Yhdessä KPI- ja caster-kulman kanssa käntövierinsäde vaikuttaa auton nostattavaan voimaan käntäessä. Käntövierintäsäteen ollessa muu kuin nolla, auton keulan korkeus pyrkii muuttumaan, kun rattia kännetään. Tämä aiheuttaa myös ohjaukseen voiman, joka pyrkii palauttamaan sen keskiasentoon.

Käntövierinsäteen määrittäminen kilpa-autoon on yleensä kompromissi osien sijoittelun ja suorituskyvyn välillä. Käntövierinsäteen suunnitteluun vaikuttaa rengas/vannevalinta, KPI-kulma sekä ylä- ja alapallonivelien sijoittelu. Drifting -kilpa-auton pyöräntuennalta vaaditaan suuri tila pyörän käntymiselle. Vaikka auton suurin kilpailusuorituksissa käytettävä käntökulma olisi pienempi kuin 70° , täytyy käntämisessä kuitenkin olla varaa, jotta mahdollinen ajovirhe voidaan korjata auton pyörähtämättä.

2.2 Caster ja casterpoikkeama

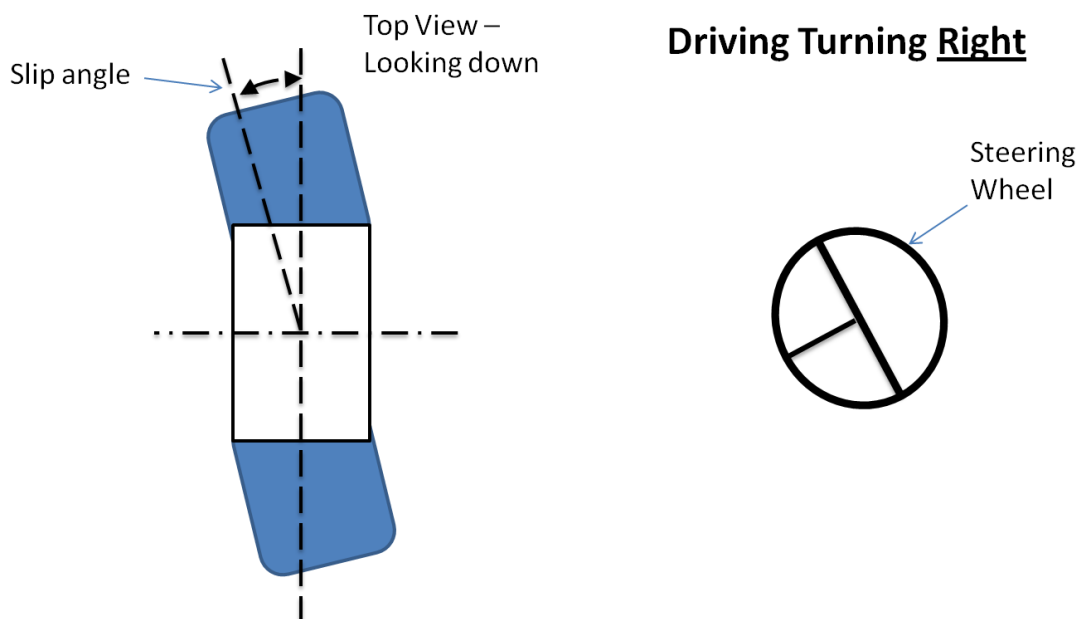
Caster-kulma on käntyvän renkaan pystysuoran akselin ja KPI-akselin välinen kulma sivustapäin katsottuna. Akseli on positiivinen, kun yläpallonivel on kulku-suuntaan nähden taaempana kuin alapallonivel. (Automotive Handbook, 2018, 934). Positiivinen caster-kulma lisää pyörän käntämiseen tarvittavaa voimaa, mutta lisää ohjauksen keskiasentoon palauttavaa voimaa ja täten suuntavaka- vuutta.

Caster-poikkeama (mechanical trail) on mitta, joka syntyy sivusta päin katsottuna renkaan keskipisteestä pystysuoraan piirretyn tason ja KPI-akselin etäisyydestä toisiinsa ajopinnalla. Mitta on positiivinen, jos KPI-akseli kohtaa ajopinnan renkaan etupuolella. Autossa caster-poikkeaman suuruus on yleensä luokkaa 15...30 mm. (Automotive Handbook, 2018, 936)

Drifting -kilpa-auton alustassa ei voi käyttää suuria caster-kulmia, sillä kääntäessä toinen rengas pyrkii muuttumaan rajusti positiiviselle camber-kulmalle. Jotta saavutetaan ohjauksen keskittävää voimaa, joudutaan casterin sijasta lisäämään casterpoikkeamaa.

2.3 Sortokulma

Sortokulma on kulma, joka muodostuu renkaan keskitason ja auton kulkusuunnan välille (kuva 3). Kun rengaskuorma pidetään vakiona ja sortokulmaa lisätään, renkaan tuottama sivuttaisvoima kasvaa aluksi lineaarisesti. Kadulla käytettävän renkaan sivuttaisvoima saavuttaa suurimman arvonsa sortokulman ollessa noin 5° , jonka jälkeen se laskee hieman (Automotive Handbook, 2018, 938.)



KUVA 3. Sortokulma (Lähde: YourDataDriven)

Sortokulman suunnitteluun vaikuttaa suuresti renkaat ja niiden ominaisuudet. Renkaista on mahdollista saada data, jota analysoimalla on mahdollista suunnitella kinematiikka suurimmalle mahdolliselle pidolle ajotilanteen mukaan. Dataa on kuitenkin haastava saada, ja sen analysointi vie paljon aikaa. Lisäksi tarvitaan ennakkotietoja auton suoritusarvoista.

2.4 Aorauskulma ja sen muutos joustossa

Aorauskulma on kulma, joka muodostuu ajoneuvoa ylhäältä katsottaessa renkaiden keskitason ja ajoneuvon keskitason välille. Aorauskulma on positiivinen, kun ajosuuntaan nähden ylhäältäpäin katsoen vanteen etuosan ja ajoneuvon keskilinjan välinen etäisyys on pienempi kuin vanteen takaosan. Negatiivista aorauskulmaa kutsutaan haritukseksi.

Kun ajoneuvon ohjauspyörää käännetään, renkaat pyrkivät kääntymään samaan suuntaan kuin ohjauspyörä. Normaalissa henkilöautossa kuitenkin oikean ja vasemman renkaan tulee kääntyä eri verran, jotta ylimääräistä sortamista ei aiheudu mutkaan ajattaessa. Autolla, jolla saavutetaan suuria sivuttaiskiihtyvyyksiä mutkissa, renkaiden sortaminen hitaasti ajattaessa ei ole ongelma.

Aorauskulmien muuttuminen joustotilanteessa tavallisessa kilpa-autossa voi olla toivottavaa, jos haetaan esimerkiksi renkaiden ylimääräistä sortamista jarrutustilanteessa, tai aorauskulman muuttumista nolnaan kiihdytyksessä kitkahäviöiden vähentämiseksi. Drifting-käytössä aorauskulman tulisi muuttua mahdollisimman vähän, jotta ajopinnan epätasaisuuksista ei aiheutuisi ylimääräisiä häiriöitä ohjauspyörään, ja pyöräkulmat pysyisivät suunniteltuina. Aorauskulman muutoksen suuruuteen vaikuttaa lisäksi pyörien kääntökulma, joten aorauskulman muutos tulee suunnitella siten, että muutos on pienin niillä pyöräkulmilla millä kilpailusuoritus tehdään.

3 DRIFTING -AUTON VAATIMUKSET JA TAVOITTEET

3.1 Drifting -kilpa-auton pyöräntuenta

Normaalista kilpa-autosta poiketen drifting-kilpa-autoa ohjataan poikkeuksellisen suurilla etupyörien kääntökulmilla. Suuret kääntökulmat aiheuttavat haasteita liikkeen vaatiman tilan sekä pyöräntenkulmien muutosten takia.

Suurilla kääntökulmilla ulkomutkan puoleinen rengas pyrkii kääntymään positiiviseen camber-kulmaan positiivisen caster-kulman ja KPI-kulman takia. Tätä efektiä pystytään rajoittamaan asettamalla eturenkaisiin negatiivinen staattinen camber-kulma, tai vähentämällä caster-kulmaa. Kuitenkin suuret kääntökulmat vaativat myös paljon voimaa renkaiden keskiasentoon palautumiseen, joten caster-kulmaa ei voi pienentää liikaa.

Aurauskulman muutos kääntämisen aikana tulee pyrkiä minimoimaan. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että molempia etupyöriä yritetään kääntää saman verran ajotilanteesta riippumatta. Pyörät asetetaan lähtökohtaisesti hieman haritukselle, jotta luistotilanteen alkaessa ulkokurvin puoleinen rengas olisi suunnattu valmiiksi mutkan suuntaan.

Kääntövierinsäde täytyy pyrkiä pitämään mahdollisimman pienenä, jotta ajoneuvon oikean ja vasemman puolen käyttäytyminen kääntötilanteessa pysyy mahdollisimman samanlaisena ja ohjaus on vakaampi. Kuitenkin suuret pyörän kääntökulmat vaativat paljon tilaa ajoneuvon olkavarteen ja alatukivarteen, joten olkapoikkeama täytyy iteroida siten että KPI-kulma jää järkeväksi.

Tyypillisen henkilöauton kallistuskeskiön korkeus on alle 120 mm maasta (Automotive Handbook, 2018, 935). Mitä lähempänä auton painopistettä kallistuskeskiö on, sitä vähemmän auto kallistuu käänöksissä. Etuakselin kinemaattinen kallistuskeskiö halutaan suunnitella normaalia korkeammaksi, sillä etupyörien kääntymiseen vaadittavan tilan takia kallistuksenvakaajaa ei asenneta. Etuakselin tulee käyttäytyä loogisesti, eikä se saa tehdä äkillisiä liikkeitä tien epätasai-

suuksien mukaan. Pariajotilanteessa voi joutua muuttamaan nopeutta toisen kilpailijan ajotavan mukaan, joten etupyöräntuennan on käyttäytyttävä rauhallisesti, vaikka painonsiirto muuttuu.

Tämän työn pyöräntuennan kinematiikkasuunnittelu tehtiin OptimumKinematics -suunnittelu-, simulointi- ja analyysiohjelmalla. 3D -suunnittelu sekä lujuusanalyysi toteutettiin Autodesk Inventor Professional CAD-ohjelmistolla.

3.2 Tavoitearvot ja suunnittelun strategia

Auton etupyöräntuentaan asetettiin alkuarvot, joita suunnittelulla lähdettiin tavoittelemaan. Tavoitearvot esitetty taulukossa 1. Renkaan kooksi valittiin levein drifting-kilpailuluokkaan Pro2 hyväksytty rengas. Vanteen halkaisija valittiin myös mahdollisimman suureksi, jotta olkavarrelle saatiin mahdollisimman suuri tila vanteen sisään.

TAULUKKO 1. Tavoitearvot

Staattinen camberkulma	-4,5°
Casterkulma	7°
Casterpoikkeama	45 mm
Auraukulma	-0,5°
KPI-kulma	12°
Maksimi ohjaukulma	70°
Vanteen halkaisija	18"
Vanteen leveys	8,5"
Renkaan koko	225/40R18
Auton paino ajokunnossa	1200 kg

Suunnittelu aloitettiin paikoittamalla auton pyöräntuennan komponenttien sekä etuapurungon kiinnityspisteet Spanesi -korimittalaitteella. Kiinnityspisteet sijoitettiin 3D-mallinnusohjelman ja OptimumKinematicsin pisteavaruuteen, jotta kinematiikkaa voitiin alkaa tutkimaan.

Etupyöräntuennan kinematiikkaa analysoitiin OptimumKinematics -ohjelmistolla, joka luo koordinaattipisteiden avulla mallin pyöräntuennan liikkumisehdoista. Ohjelmisto vaatii esitiedoiksi muun muassa staattisen pyörän sivukallistuman sekä raidevälin. Pyöräntuennan koordinaattipisteiden sijoittamisen jälkeen kinematiikka voidaan simuloida antamalla alustalle liikkumisehtoja. Liikkumisehtoja on neljä erilaista: etupyörien kääntäminen (steering), alustan sisään- ja ulosjousto (heave), auton kallistuminen sivulle (roll), ja auton nyökkääminen tai niiaaminen (pitch).

OptimumKinematicsilla ei kuitenkaan voi mallintaa pyöräntuennan osien tilava-
rausta, joten analysointi on tehtävä yhtäaikaaisesti sekä 3D-mallinnusohjelmis-
tolla, että kinematiikan suunnitteluohjelmistolla. Osien vaativan tilan määrittämi-
nen on erittäin tärkeää etenkin, kun etupyörät kääntyvät paljon ja tilaa on rajattu
määrä.

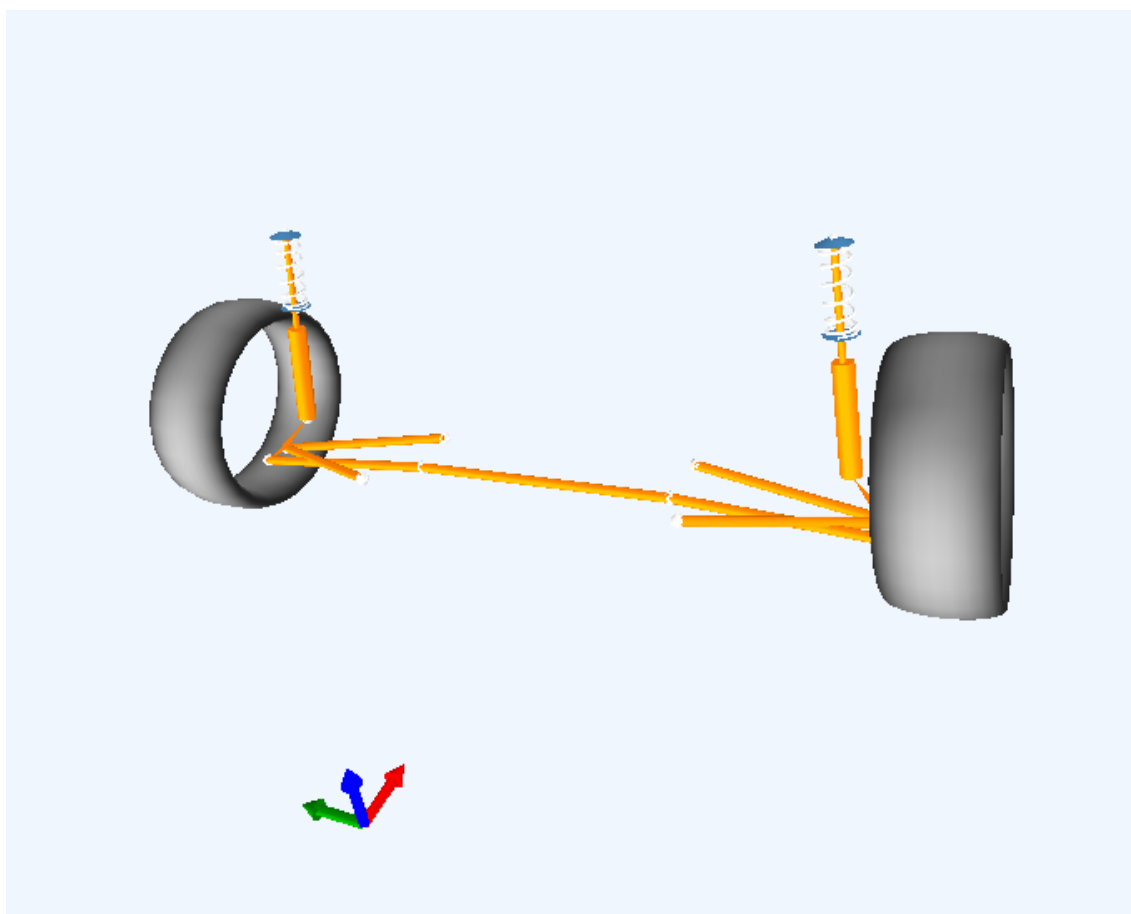
Jokainen auton etupyöräntuentaan vaikuttava komponentti mallinnettiin Auto-
desk Inventorilla, jotta pyöräntuennan kokonaisuutta voitiin käsitellä ja tehdä nii-
hin tarvittavia muutoksia. Mallista tehtiin liikkuva, jotta pyöräntuenta voitiin tar-
kastella eri käyttötilanteissa. Ohjelman mittatyökaluilla pystyttiin tarkastamaan
pyörien asentoja eri kääntökulmilla ja alustan joustoilla. Myös komponenttien liik-
kumiseen vaadittavaa tilaa on helppo tarkastella suunnittelun edetessä.

4 ETUPYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU

4.1 Kinematiikan suunnittelu

Kinematiikka suunniteltiin asetettujen tavoitearvojen perusteella. Etupyörien maksimikäntökulmaksi asetettiin 70° , ja kääntäminen haluttiin toteuttaa mahdollisimman loogisesti, ettei ohjauksessa tapahdu äkillisiä poikkeamia tai muita epämääräisiä liikkeitä.

Kinematiikan suunnittelua helpottaa OptimumKinematicsin geometriapisteiden visualisointi. Visualisointi auttaa havaitsemaan mahdolliset näppäilyvirheet kinematiikkapisteitä sijoittaessa. Visualisoitu auton etupään kinematiikka esitetty kuvassa 4.

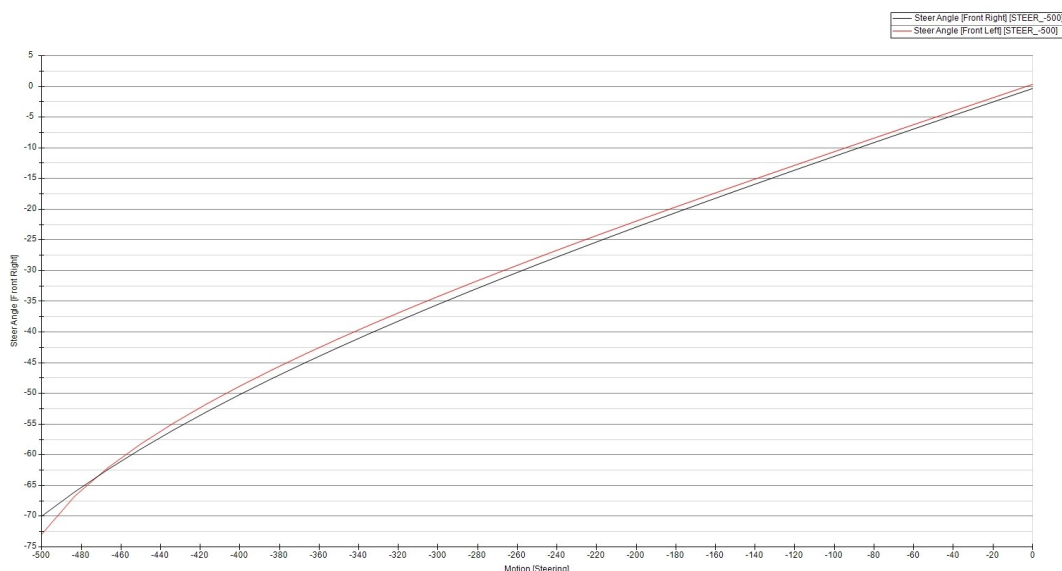


KUVA 4. Kinematiikkaehdot visualisoituna

4.1.1 Aorauskulman muutos kääntäessä

Autossa käytetään alkuperäistä hammastankoa, jonka liikkeen määrä on 50 mm/1 ratin kierros. Ohjauksen toimintaa simuloitiin OptimumKinematicsissa kääntämällä rattia lineaarisesti keskeltä oikealle päin siten, että ratti kääntyy 500° (kuva 5). Kuvassa punainen viiva kuvaa vasemman etupyörän liikettä ja musta oikean.

Etupyörien kääntökulmat pysyvät hyvin pitkään samana oikean pyörän kääntyessä hieman enemmän kuin vasemman. Kuitenkin noin 60° kääntökulman jälkeen vasemman etupyörän kääntö tehostuu ja se kääntyy enemmän kuin oikea. Tämä tapahtuu kuitenkin suuremmilla kääntökulmilla kuin missä tavallinen ajo-suorite tehdään, joten ei ole tarvetta korjata ohjauksen geometriaa.

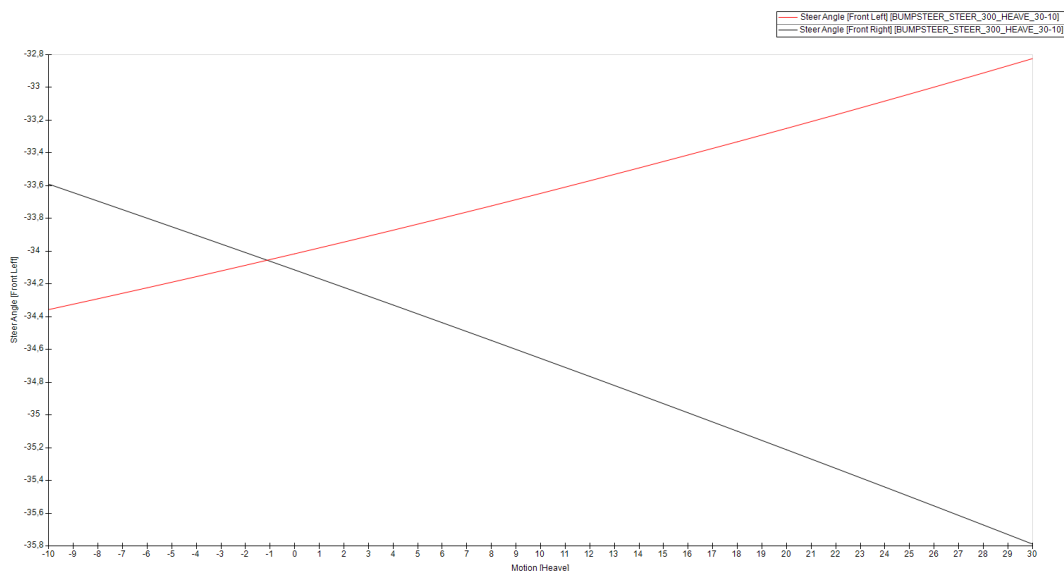


KUVA 5. Etupyörien kääntökulman simulointi

4.1.2 Aorauskulman muutos joustossa

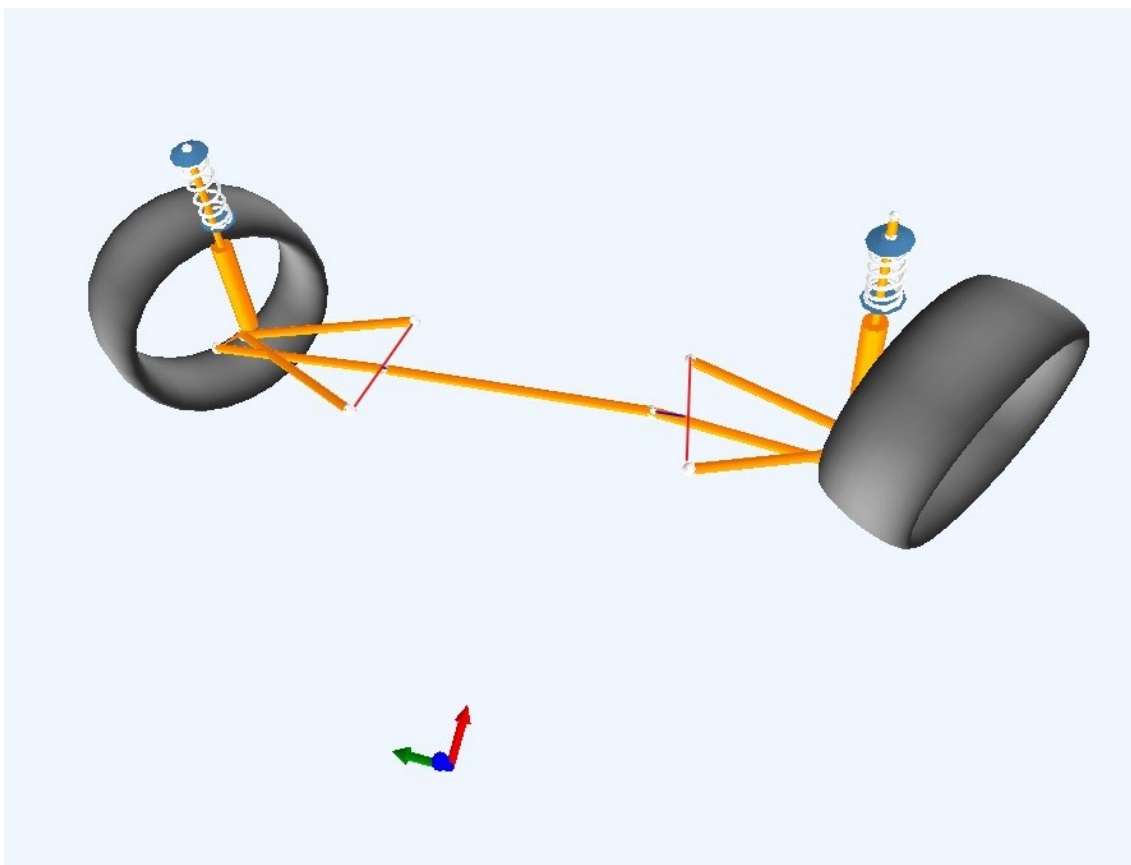
Aorauskulman muutos sisään- ja ulosjouston aikana haluttiin sovittaa mahdollisimman pieneksi etupyörien asennon ollessa noin 35°. Simuloinnissa ratin kääntökulmaksi asetettiin 300° oikealle, joka vastaa noin 35° etupyörien kääntämistä. Simuloinnissa alusta liikkuu lineaarisesti 30 mm sisäänjoustosta 10 mm ulosjoustoon saakka, eli yhteensä 40 millimetriä.

Kuvassa 6 esitetty simuloinnin tulos. 40 millimetrin jouston aikana aurauskulma muuttuu korkeintaan 3° . Kuvassa punainen viiva kuvaa vasemman etupyörän liikettä ja musta oikean.



KUVA 6. Etupyörien kääntökulman muutos alustan lineaarisessa joustossa.

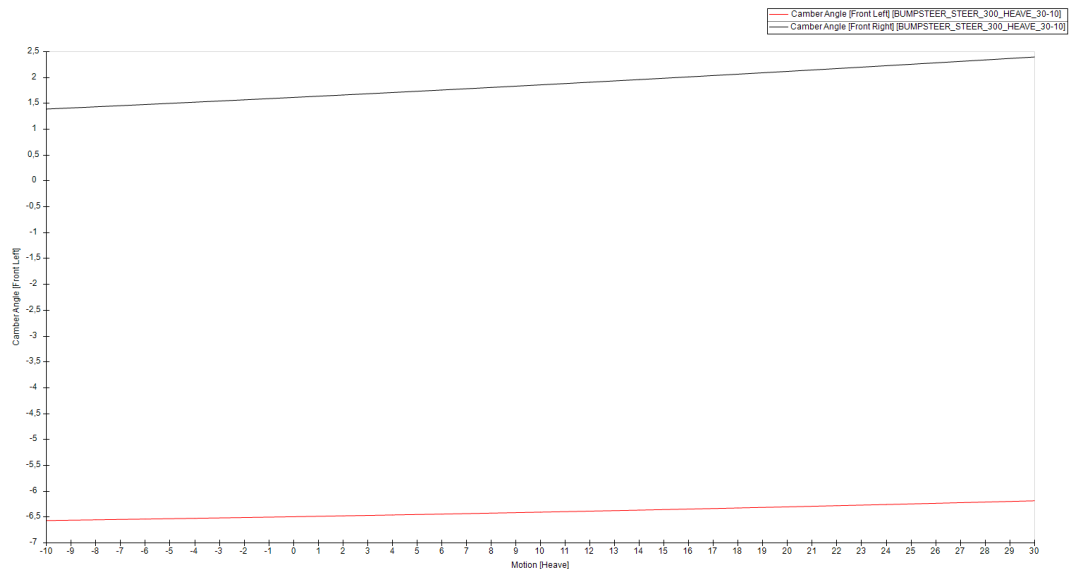
Aurauskulman muutoksen määrään vaikuttaa raidetankojen sisäpäiden sivuttaissiirtymä. Kuvassa 7 esitetty raidetankojen sisäpäiden sivuttaissiirtymä tummansinisillä viivoilla. Alapallonivelten välinen linja piirretty kuvaan punaisena viivana. Aurauskulma muuttuu normaalilla käyttöalueella huomattavasti vähemmän kuin mitä renkaan sortokulma on.



KUVA 7. Raidetankojen sisäpäiden siirtymä

4.1.3 Camber-kulman muutos joustossa

Etupyörien camber -kulmaa analysoitiin vastaavassa tilanteessa kuin aurauskulman muutosta jouston aikana. Rattia käännettiin 300° oikealle, joka vastaa noin 35° pyöräntulmaa, ja alusta liikkui lineaarisesti 30 mm sisäänjoustosta 10 mm ulosjoustoon. Camber -kulman muutos esitetty kuvassa 8. Kuvassa punainen viiva kuvaa vasemman etupyörän camber -kulmaa ja musta oikean. Vasemman etupyörän sivukallistuma muuttuu noin 0.4° , kun taas oikean muuttuu noin 1° verran.



KUVA 8. Camber -kulman muutos alustan joustossa

Kuvan 8 mukaisessa ajotilanteessa oikea eturengas on hallitseva painonsiirtymän vuoksi. Ajotilanne on voimakkaasti aliohjaava, joten kummankin etupyörän camber-kulman muutos tapahtuu oikeaan suuntaan. Oikealla camber-kulmalla haetaan maksimaalista sivuttaisvoimaa eturenkaille. Camber-kulmaa voidaan säätää renkaiden lämpiämisen mukaan, tai tiedonkeruusta saadun datan perusteella.

4.2 Etupyöräntuennan muotoilu

Etupyörien tuenta on MacPherson -tyyppinen, joten se käsittää seuraavat osat:

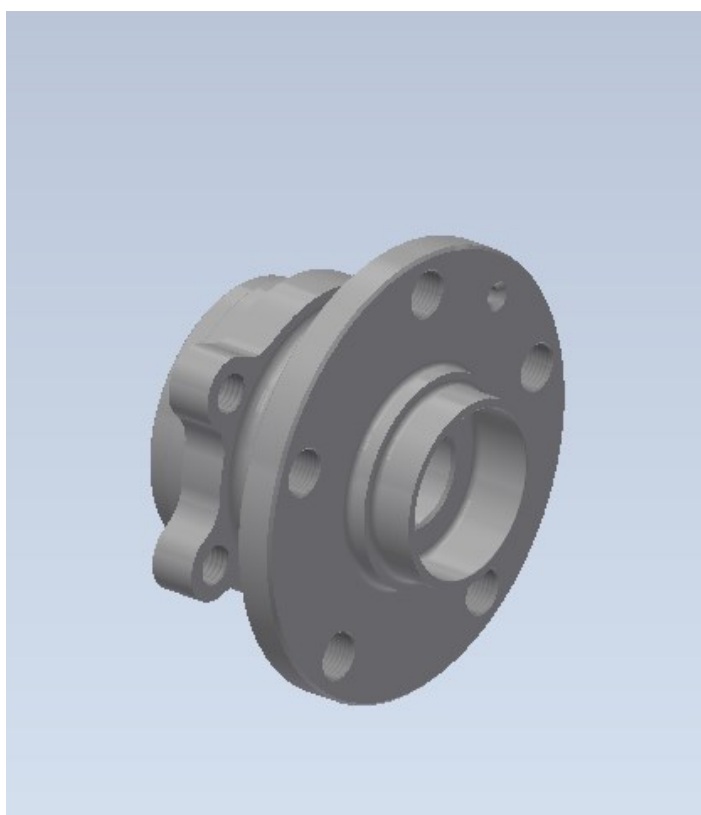
- Heilahduksenvaimennin ja sen alakiinnike
- Pyöränlaakeri
- Olkavarsi
- Alatukivarsi
- Raidetanko.

Etupurunko sekä hammastanko pidettiin muokkaamattomina, mutta muita osia muokattiin tai tehtiin uusiksi, jotta suunniteltu pyöräntuennan geometria voitiin toteuttaa.

Suunnittelussa haluttiin painottaa osien kustannustehokasta valmistusta, luotettavuutta, sekä yksinkertaisuutta. Olkavarsi valmistetaan alumiinista sen keveyden ja helpon työstettävyyden takia, ja alatukivarsi teräspuikkoprofiilista.

4.2.1 Pyöränlaakeri ja heilahduksenvaimennin

Pyöränlaakerina käytettiin Audi A3 8P -mallin laakeriyksikköä sen hyvän saatavuuden ja valmiin kokoonpanon vuoksi. Laakeriyksikkö koostuu kolmesta osasta, pyörännavasta, laakerista ja laakeripesästä. Laakeriyksikön välykset poistetaan alun perin kiristämällä vetoakseli pyörännapaan kiinni. Koska autossa ei ole vetoakseleita etuakselilla, laakeriyksikön välykset poistettiin kiristämällä pultti ja holkit vetoakselin sijaan napaan. Laakeripesä kiinnittyy olkavarteen neljällä M12-pultilla. Laakeriyksikkö mallinnettiin, jotta sitä voitiin käyttää hyväksi suunnittelussa (kuva 9).



KUVA 9. Laakeriyksikön 3D-malli

Muokattavaksi heilahduksenvaimentimeksi valikoitui BMW E36 -sarjaan alun perin suunniteltu jälkiasenteinen vaimennin, jossa on eriytetty jousen esijännityksen säätö, sekä korkeuden säätö. Erillisen korkeudensäädön myötä vaimentimessa on erillinen runko-osa, joka alkuperäisesti kiinnittyy pyörännapaan kolmella pultilla.

Suunniteltu kiinnike (kuva 10) kiinnittyy olkavarren läpi pyöränlaakeriin neljällä M12 pultilla, ja siinä on erillinen läpivientireikä etupyörän nopeustunnistimelle. Alakiinnikkeen rakenteen ansiosta on mahdollista säätää renkaan sivukallistumaa ilman, että KPI kulma muuttuu. Säätö tapahtuu olkavarren ja heilahduksenvaimentimen väliin asetettavilla korokepaloilla.



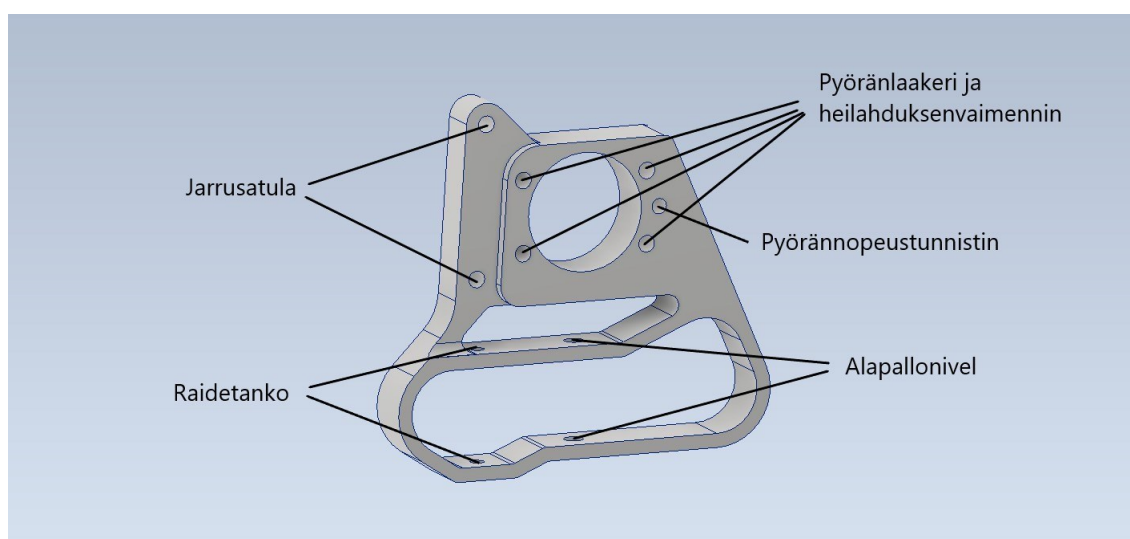
KUVA 10. Suunniteltu heilahduksenvaimentimen alakiinnike ja vaimennin

4.2.2 Olkavarsi

Olkavarsi (kuva 11) suunniteltiin siten, että se on valmistettavissa kustannustehokkaasti 40 millimetriä paksusta 6082-T6 alumiinilevystä 3-akselisella CNC jyrsimellä. Myötöraja 6082 -alumiinille on 310 MPa (Thyssenkrupp 2018). Kuvassa

kerrottu kappaleeseen pulteilla liitettävät komponentit. Lisäksi olkavarteen tehtiin kiinnitys jarrusatulalle. Olkavarren suunnittelussa otettiin huomioon myös kappaleen yksinkertainen valmistusmahdollisuus kumpaankin etupyörään.

Alapallonivelen sekä raidetangon kiinnitys haluttiin tehdä olkavarteen kaksileikkeisenä. Kaksileikkeinen kiinnitys vaatii tarkkuutta sovitusholkkien valmistukseen, mutta toisaalta kappaleesta saadaan valmistettua huomattavasti jäykempi kuin yksileikkeisenä. Kun olkavarren materiaalina on alumiini, tämä on otettava eritoten huomioon. Lisäksi holkkien korkeutta muuttamalla voidaan muuttaa pyöräntuennan geometriaa.

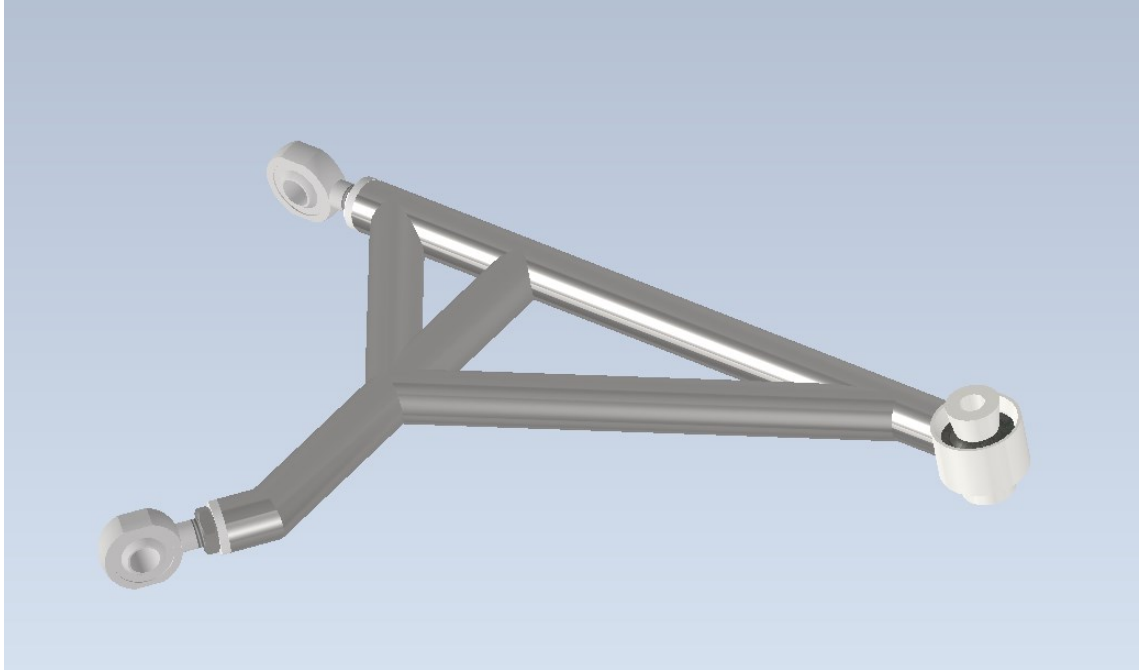


KUVA 11. Vasemman etupyörän olkavarsi

Olkavarren suunnittelussa otettiin huomioon renkaan 70° kääntökulma molempiin suuntiin, haluttu pyöränkulmien aerausmuutos kääntäessä, aerauskulman muutos pyöräntuennan jostaessa suurilla kääntökulmilla, sekä kallistuskeskiön korkeus. Olkavartta ei eritoten kevennetty, sillä keventäminen lisää valmistuskustannuksia, ja se voi vähentää komponentin jäykkyyttä.

4.2.3 Alatukivarsi

Alatukivarret päätettiin suunnitella putkivarsiksi, sillä niiden valmistaminen ei vaadi CNC -koneita, vaan ne voi valmistaa käytettävissä olevalla manuaalijyrsimellä ja -sorvilla. Kuvassa 12 esitetty vasemman etualatukivarren muotoilu.



KUVA 12. Alatukivarsi laakereilla

Alatukivarsien materiaaliksi valittiin 30x2 saumaton teräsputki, ja ne kokoonpantiin TIG -hitsaamalla. Alatukivarsien ulkopäiden laakeripesät sorvattiin 50 millimetrin teräksestä, ja niihin tehtiin oikea laakerin sovite jysimällä hitsauksen jälkeen. Sisäpään niveleksi valittiin ulkokierteiset M16 uniball -nivelet, ja niille sorvattiin hitsattavat kierreholkit tukivarsiin.

4.3 Etupyöräntuennan lujuusanalyysi

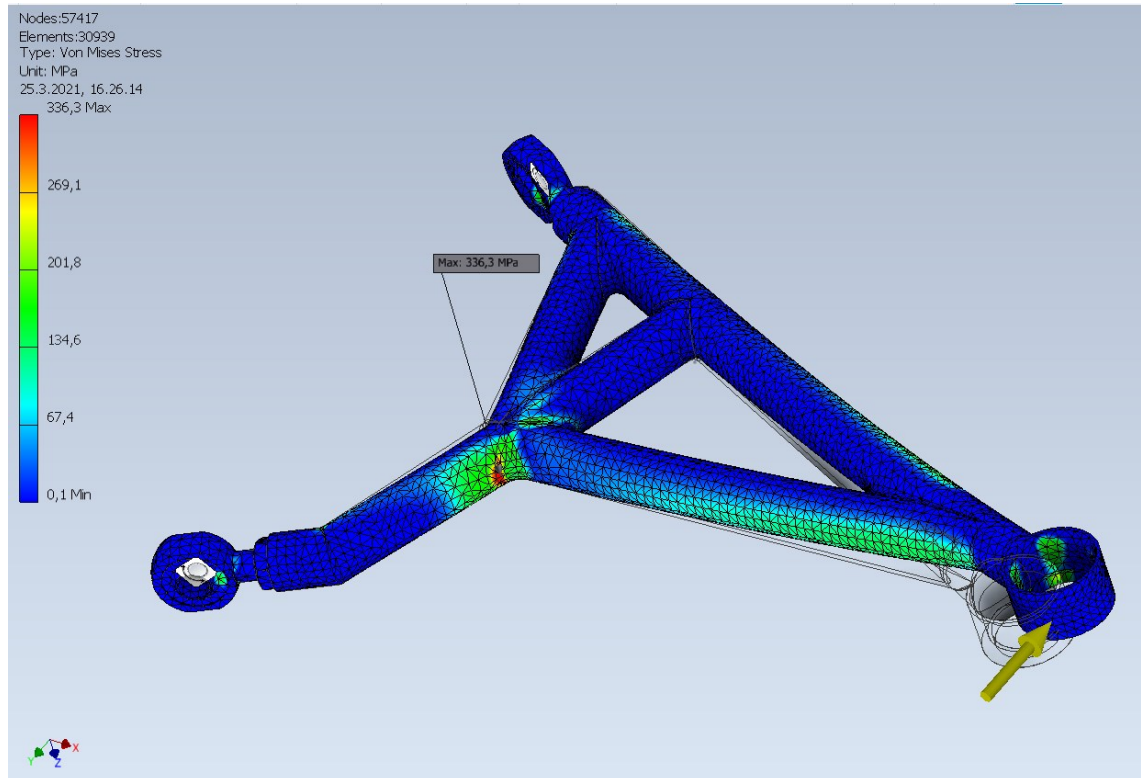
4.3.1 Alatukivarren lujuusanalyysi

Alatukivarsi haluttiin suunnitella auton etupyöräntuennan heikoimmaksi osaksi, jotta vältetään olkavarren, heilahduksenvaimentimen tai auton rungon vaurioitumiselta kiinniajotilanteessa. Myös alatukivarren nivellaakereiden tulee kestää enemmän kuin alatukivarsi, jotta laakereiden käyttöikä olisi kilpa-ajossa tarpeeksi pitkä. Sisäpään niveliksi valikoitui uroskierteiset M16 uniball -nivelet, joiden dynaaminen voimansieto on 21,4 kN, ja ulkopäähän 20 mm sisäpään uniball nivel, jonka dynaaminen voimansieto on 30kN (SKF 2021).

Alatukivarrelle suoritettiin FEM -analyysi (kuva 13), jonka perusteella voitiin todeta sen kesto. Alatukivarren tulee kestää normaalista ajotilanteesta aiheutuvat voimat. Auton kokonaispainoksi arvioitiin 1200 kg, josta jarrutusilanteessa voi siirtyä etuakselille noin 70 %, kun käytetään moottoriurheiluun tarkoitettua pehmeän kumiseoksen rengasta. Renkaan kitkakerroin voi olla jopa 1,8 (Automotive Handbook, 2018, 946). Tämä massa jaetaan vielä puolittain molempien etupyörien kesken, jolloin yhtä etupyörää kuormitetaan 420 kg. Tähän lisätään varmuuskerroin 1,3, saadaan simuloitavaksi voimaksi

$$F = \frac{1200 \text{ kg} \cdot 0,7}{2} \cdot 1,3 \cdot 9,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 5362,17\text{N} \quad (1)$$

Analyysissä alatukivarren sisäpään niveliin asetettiin kiinteä sidonta, joka estää nivelien liikkeen simulaatiossa. Ulompaan niveleen asetettiin staattinen voima, jonka suuruudeksi määritettiin kaavalla 1 laskettu voima.



KUVA 13. Alatukivarren FEM -analyysi

Analyysistä voidaan todeta, että tukivarren heikoimmat kohdat sijaitsevat putkien liitoskohdassa. S355 teräsputken myötörajan ollessa 355 MPa ja maksimijännityksen ollessa 336,3 MPa tukivarsi kestää vaaditun kuormitustilanteen.

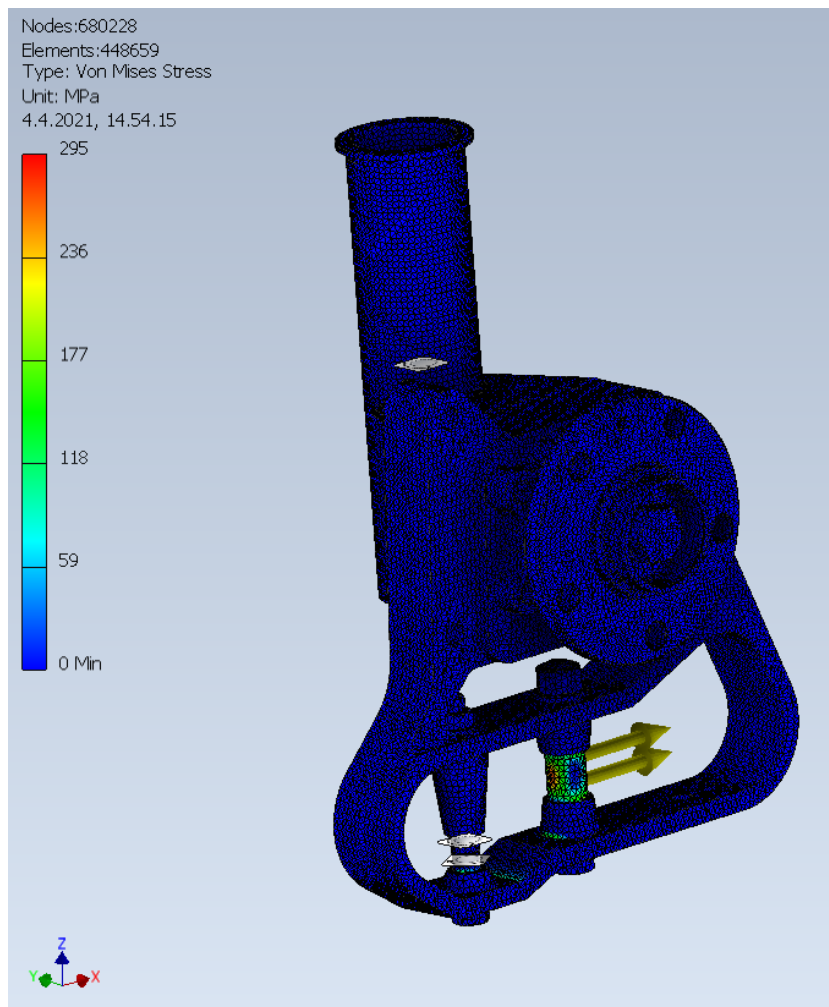
4.3.2 Olkavarsi ja heilahduksenvaimentimen alakiinnike

Etuolkavarrelle ja heilahduksenvaimentimen alakiinnikkeelle luotiin kokoonpano CAD-sovelluksessa, jotta saatiin analysoitua niiden rakenteen lujuutta. Kokoonpanolle luotiin kaksi eri kuormitustilannetta, joiden arvioitiin rasittavan rakennetta eniten. Kummankin simulaation voimaksi arvioitiin auton massa kerrottuna 1.5 varmuuskertoimella (kaava 2).

$$F_{max} = 1200 \text{ kg} \cdot 9,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1.5 = 17676 \text{ N} \quad (2)$$

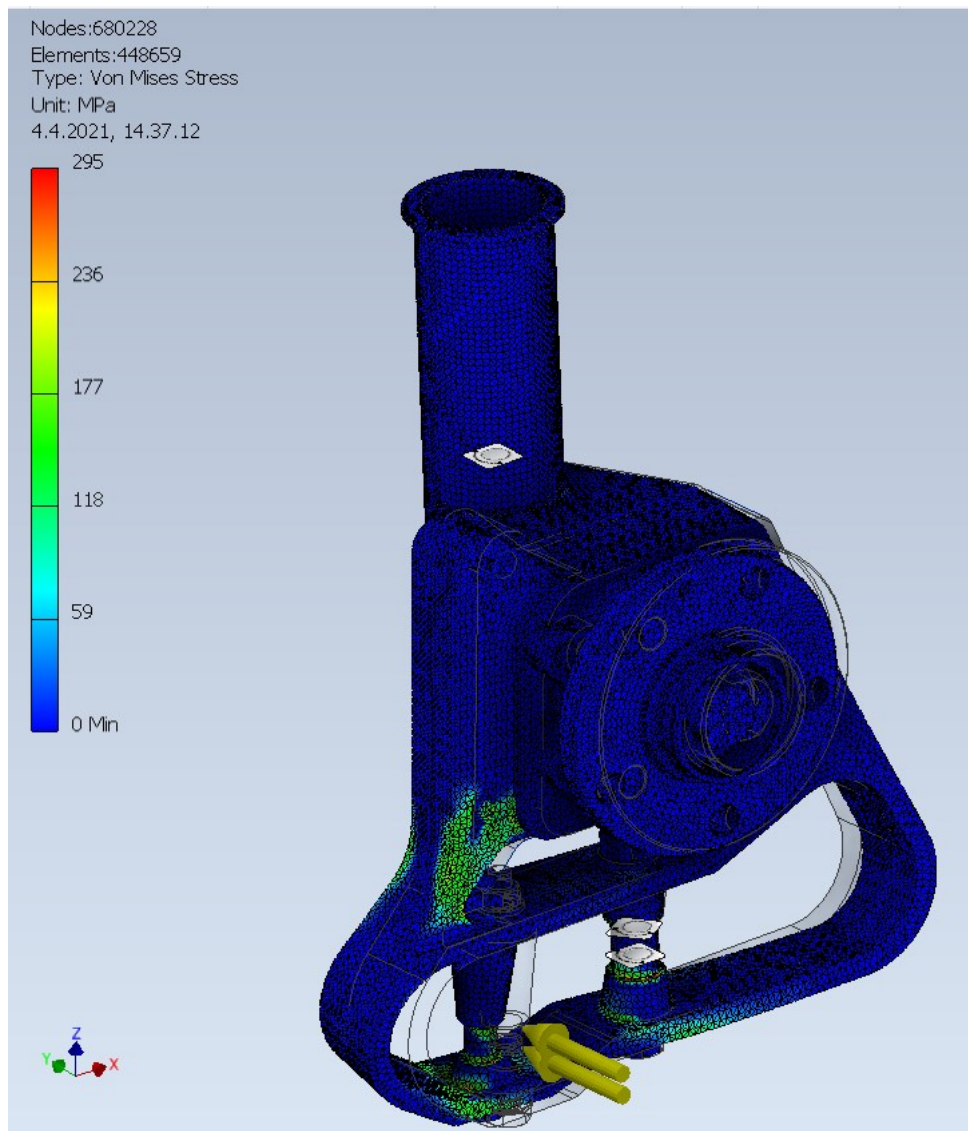
Ensimmäinen kuormitustilanne mukailee vastaavaa tilannetta kuin alatukivarren analyysissä. Kyseessä on jarrutustilanne, jossa jarrutuksesta aiheutuva voima kohdistuu alapalloniveleen. Voiman tyypiksi valittiin "Bearing Load", jolla voima kohdistuu osan pinnan puoleen, jota vasten simulaation kuvitteellinen nivellaakeri painautuu, eikä koko holkin pinta-alalle. Voiman suunnaksi valittiin positiivinen X-akseli. Kokoonpanon reunaehdoiksi analyysiin määritettiin heilahduksenvaimentimen alakiinnikkeen kierreosaan sekä raidetangon ulkopään kiinnityspulttiin "Pin Constraint", joka mahdollistaa osien rotaation, mutta ei siirtymää X, Y, ja Z suunnassa. Näillä reunaehdoilla simuloidaan nivellaakereita.

Jarrutustilanteen simulaation tulokset esitetty kuvassa 14. Tuloksista voidaan huomata, että rakenne kestää tämän kuormitustilanteen hyvin, ja ainoastaan nivellaakerin holkkiin kohdistuu mainittavia voimia.



KUVA 14. Jarrutustilanteen simulaatio.

Toisessa kuormitustilanteessa (kuva 15) simuloidaan auton ajautuminen esteeseen rengas ääriasentoon käännettynä. Kuormitustilanteessa voiman paikka muutetaan alapallonivelestä raidetangon ulkokiinnityspisteeseen, ja raidetangon liikkumisen reunaehto alapalloniveleen. Voiman suunnaksi valitaan positiivinen Y-akseli.



KUVA 15. Törmäystilanteen simulaatio

Tuloksista voidaan huomata, että olkavarsi kestää kuormitustilanteen hyvin. Maksimijännityspiste kohdistuu nivellaakerin holkin reunaan, joka on mallinnettu teräväksi. Todellisuudessa reunassa on kuitenkin sorvaustyökalusta aiheutuva säde, ja maksimikuormitus on pienempi kuin simulaatiossa. Kuormitusta syntyy myös jarrusatulan olakkeen ohennukseen. Kehitysideana voisi pitää jarrusatulan kiinnityspisteen muokkaamista olkavarren takapuolelle, jolloin ohennus ei vaikuttaisi rakenteen lujuuteen yhtä paljoa.

4.4 Etupyöräntuennan kokoonpano

4.4.1 Kokoonpano CAD-ohjelmistossa

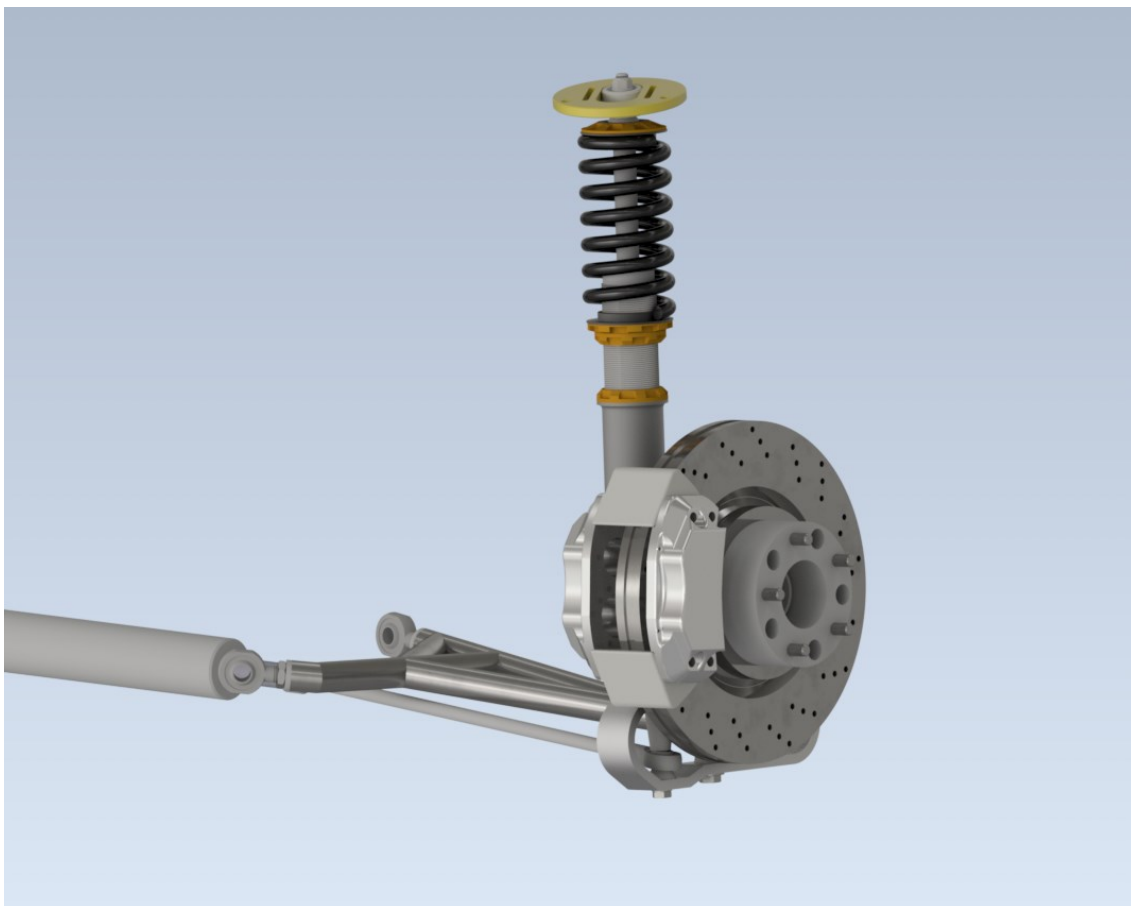
Kuvassa 16 esitetty etupyöräntuennan kokoonpano, jossa näkyy alatukivarsi, raidetanko, olkavarsi, laakeriyksikkö, heilahduksenvaimennin, sekä näiden nivellaa-kerit, niiden holkit ja kiinnitystarvikkeet. Kokoonpanossa eturenkaiden aurauskulmaksi on asetettu $-0,5^\circ$, ja camber -kulmaksi $-4,5^\circ$



KUVA 16. Etupään kokoonpano

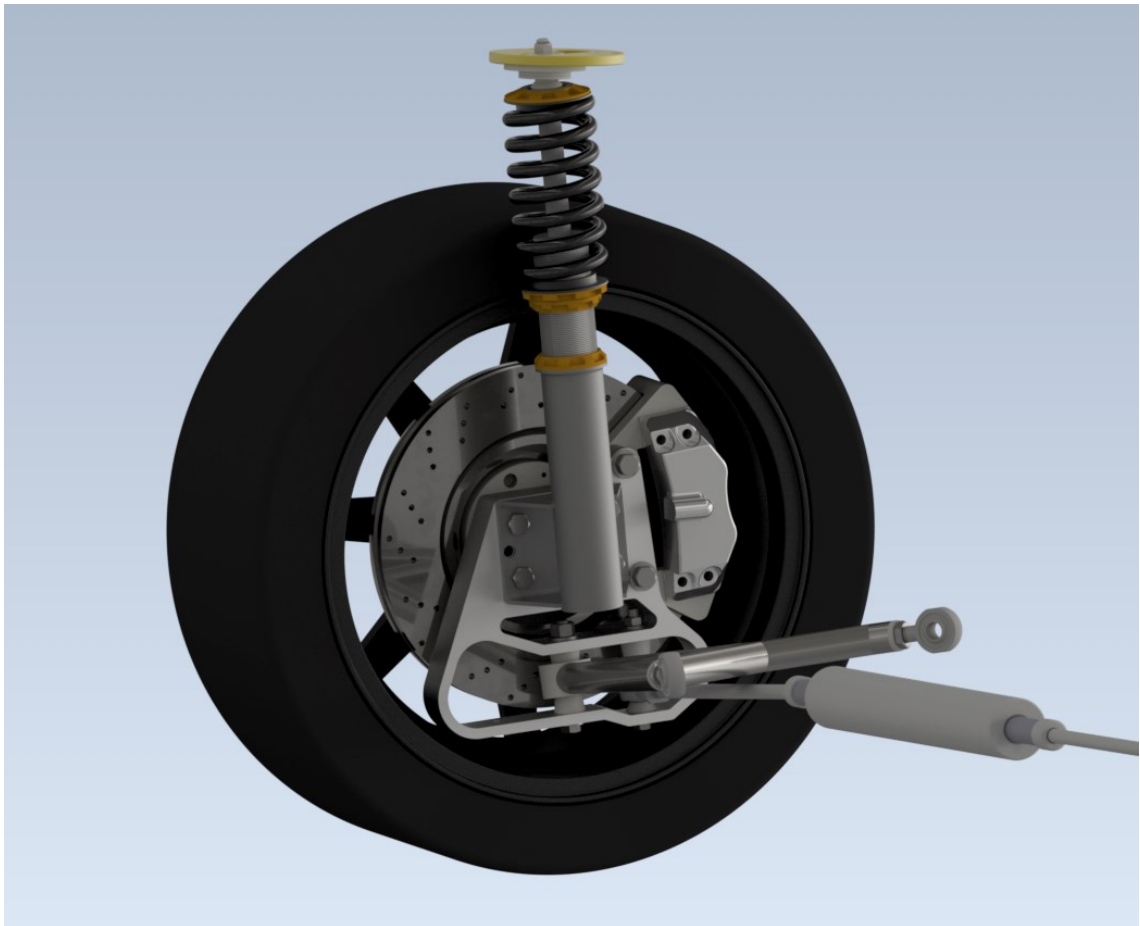
Jarrulevyksi valittiin Mercedes-Benz C32 AMG:n 330 millimetrinen jäähdytetty levy, ja jarrusatulaksi W211 4-mäntäinen alumiinisatula (kuva 17). Jotta rakenteen haluttu olkapoikkeama saavutetaan ilman renkaan kontaktia heilahduksenvaimentimeen, asennettiin etuakselille 51 millimetriä paksu levikepala. Matalan laakeriyksikön ja olkavarren ansiosta levikepalan käyttäminen ei aiheuta haittaa etupyöräntuennan geometriaan ja se on otettu huomioon suunnittelussa. Levikepala aiheuttaa momenttivarren laakerille, joten laakeri kuluu nopeammin kuin se

on tarkoitettu. Kilpailusuoritteiden ollessa lyhyitä, voidaan laakerin kunto tarkastaa usein ja reagoida nopeasti, jos siinä esiintyy vikaa.



KUVA 17. Etupään kokoonpano jarruilla

Suuren kääntökulman ja olkavarren rakenteen takia tilaa vanteen ja olkavarren välissä jouduttiin optimoimaan. Vanteen ja olkavarren (kuva 18) väliin jää tilaa vähimmillään 14 millimetriä. Mahdollisimman pienen olkapoikkeaman takia renkaan ja jousen väli koitettiin tehdä myös mahdollisimman pieneksi. Renkaan ja heilahduksenvaimentimen väliin jää tilaa 7 millimetriä.



KUVA 18. Etupään kokoonpano takaa

4.4.2 Kokoonpano käytännössä

Etupyöräntuennan kokoonpano (kuva 19) ei vaadi erikoistyökaluja, vaan laakeriyksikkö kiinnittyy olkavarteen pulteilla. Samoilla pulteilla kiinnittyy myös heilahduksenvaimentimen alakiinnike. Nivellaakereiden sovitusholkit valmistettiin manuaalisorvilla. Sovitusholkkien valmistustoleranssina pidettiin $-0,05$ mm, jotta molemmat holkit puristuvat olkavarteen oikein, eikä kumpikaan jää väljäksi. Etuolkavarren alaosan ohut muotoilu auttaa sovitusholkkeja ja niveliä kiristymään oikein.



KUVA 19. Oikea etuolkavarsi kokoonpantuna

Kokoonpanon jälkeen varmistettiin vielä käytännössä, että pyörät liikkuvat hyvin vielä ääriasennoissa (kuva 20). Samalla varmistuttiin, että osat eivät ota toisiinsa kiinni missään tilanteessa.



KUVA 20. Maksimikäntökulma

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Toteutuneet arvot

Suunnittelun toteutuneet arvot tarkastettiin OptimumKinematicsin ”Output Data” -työkalun, sekä mittausten avulla (liite 1). Toteutuneet etupyöräntuennan arvot esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Suunnittelun toteutuneet arvot

	TAVOITE	TOTEUTUMA
Staattinen camberkulma	-4,5°	-4,7°
Casterkulma	7°	6,5°
Casterpoikkeama	45 mm	40,5 mm
Auraukulma	-0,5°	-0,5°
KPI-kulma	12°	12,3°
Maksimi ohjaukulma	70°	70°
Raideväli	-	1810 mm
Kinemaattisen kallistuskeskiön korkeus	yli 120 mm	151 mm
Olkapoikkeama	-	63,4 mm

Säädettävien alatukivarren sisäpään niveliin sekä etuheilahduksenvaimentimen yläpään ansiosta pyöräntulmien säätö onnistui helposti. Säätövaraa jäi vielä caster- ja camber ja aurauksen säätöön molempiin suuntiin, jos säädölle havaitaan tarvetta.

5.2 Käytännön testaus

Työn valmistumisajankohdan vuoksi käytännön testit jouduttiin suorittamaan talvella. Alkuperäisistä lähtökohdista poiketen testit tehtiin jääradalla käyttäen 215/40R18 rengasta ja 7,5” leveää vannetta (kuva 21).



KUVA 21. Auton testauskunto

Auton etu- ja takarenkaat varustettiin teroitetuilla pulteilla (kuva 22). Testeillä haettiin informaatiota auton käyttäytymisestä suurilla käänkökulmilla sekä transiitilanteissa. Lisäksi testattiin komponenttien kestoa kilpailusuorituksen mukaisilla ajosuoritteilla.



KUVA 22. Etupyöräntuenta

Talviset ajo-olosuhteet aiheuttivat normaalista tilanteesta poikkeavat testaus puitteet. Jäärata kului ja urat olivat useita senttimetrejä syviä (kuva 23). Siitä huolimatta pyöräntuenta kesti hyvin, eikä vaurioitumisia havaittu.



KUVA 23. Luistotilanne oikealle kaartuvassa mutkassa

Ohjaus toimi tasapainoisesti molempiin kääntösuuntiin (kuva 24) eikä ohjauksen keskiasentoon palautumisessa havaittu ongelmia. Auton takapään jousitusgeometria on vakio. Takaheilahduksenvaimentimet on muutettu ja ne säädettiin yksilöllisiksi tähän autoon ja käyttötarkoitukseen soveltuviksi.



KUVA 24. Luistotilanne vasemmalle kaartuvassa mutkassa

Auton suoritusarvoja koitettiin tarkastella datankeräyslaitteilla, mutta talvisten testiolosuhteiden takia laitteiden toiminta ja valmistelu osoittautui suunniteltua vaikeammaksi, eikä kohtuullisella työllä analysoitavia tuloksia saatu.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli suunnitella drifting kilpa-auton etupyöräntuenta sekä toteuttaa se jo olemassa olevaan kilpa-autoon. Auton kuljettamista suurella luistokulmalla on tutkittu vielä huomattavan vähän, joten kinematiikan suunnittelu oli haasteellista. Työssä suunnitellun kinematiikan ehdoilla mallinnettiin pyöräntuennan komponentit ja ne valmistettiin sekä asennettiin autoon. Asennuksen jälkeen auto nelipyöräsuunnattiin ja jousitus säädettiin. Autoa testattiin jääradalla, ja auton käyttäytymisen perusteella oli luotu kilpailukykyinen etupyöräntuenta.

Komponenttien suunnittelun avainasemassa oli kustannustehokkuus sekä varma toiminta. Osien yksinkertaisen muotoilun ansiosta ne eivät vaatineet monia eri työvaiheita tai tarkkoja toleransseja, joten niiden hinta jäi alhaiseksi. Testien perusteella saavutettiin myös toimintavarmuus.

Opinnäytetyön haasteeksi osoittautui aiheen rajaaminen ja tiedonkeruusta saatavan datan puute. Auton testaaminen olisi täytynyt suorittaa kesällä, mutta aikataulujen puitteissa se osoittautui mahdottomaksi.

Autoon kytkettävillä pyörän asento- ja kiihtyvyyssantureilla saadaan luotua malli, jolle suunnittelu on helpompi perustaa. Tulevaisuudessa auton alustan säätö ja kehitystyö tullaan perustamaan tiedonkeruusta saadulle datalle. Auton käyttäytymistä asfalttiradalla tullaan testaamaan kesällä 2021.

LÄHTEET

Automotive Handbook. 2019. 10. painos. Robert Bosch GmbH. Karlsruhe: Bosch.

Dixon, J. 1996. Tires, suspension and handling. 2.painos. Warrendale: Society of Automotive Engineers.

Milliken & Milliken, 1995. Race Car Vehicle Dynamics. USA: SAE International

Segers, J. 2008. Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition. Warrendale: SAE International.

SKF SAKB 16F. Luettu 25.3.2021. <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/rod-ends/productid-SAKB%2016%20F>

SKF GE 20 ES. Luettu 25.3.2021. <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/radial/productid-GE%2020%20ES>

Thyssenkrupp. Aluminium 6082. 2018. <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/aluminium-6082.html>

YourDataDriven. Tyre Slip Angle. Luettu 28.4.2021. <https://www.yourdatadriven.com/tyre-slip-angle-explained/>

LIITTEET

Liite 1. Pyöräsuuntauksen todistus

