

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2023

Penjami Koskinen

Putkirunkoisen auton etuolka- akselin suunnittelu ja valmistus



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Maaliskuu 2023 | 49 sivua

Penjami Koskinen

Putkirunkoisen auton etuolka-akselin suunnittelu ja valmistus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa omavalmistaiseen putkirunkoiseen autoon etupyöräntuennan olka-akselit. Olka-akselin mallinnustyö tehdään SolidWorks CAD-ohjelmalla ja jousitusgeometrian nivelpisteiden määrittäminen, sekä simulointi tehdään SusProg3D-alustageometriaohjelmalla. Simuloinnin tuloksia ja niiden vaikutuksia auton käyttäytymiseen tullaan myös pohtimaan. Lisäksi työssä esitellään pyöräntuennan geometrian perusteita, suunniteltu olka-akseli ja olka-akselin valmistustapa.

Valmistuksessa käytetään lastuavia työstömenetelmiä, hitsausta, tietokoneohjattua särmäyspuristinta ja numeerisesti ohjattua plasmaleikkauskonetta. Omavalmistaisen auton pyöräntuenta tullaan toteuttamaan päällekkäisillä kolmiotukivarsilla ja työntövarsi-jousituksella.

Lopputuloksena on valmistettu olka-akseli. Ohjausvaihteen muutostyöt olivat kesken tätä opinnäytetyötä tehdessä. Suunnitelma ohjauksen toteuttamisesta kuitenkin tehtiin ja se esitellään tässä opinnäytetyössä. Lopullinen palaute onnistumisesta kuitenkin saadaan vasta sitten, kun autoa on päästy radalla testaamaan.

Asiasanat:

suunnittelu, simulointi, valmistus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

March 2023 | 49 pages

Penjami Koskinen

Tube frame vehicle front suspension steering knuckle designing and manufacturing

The purpose of this thesis is to design and manufacture a front suspension steering knuckle for a self-made tube frame vehicle. Designing of steering knuckle will be done with modelling software SolidWorks. Suspension geometry pivot points are defined with SusProg3D suspension design and analysis tool. We will go through the results of suspension geometry analysis and simulation. Product of modelling and manufacturing of steering knuckle will be presented also. Basics of suspension geometry will be presented at the beginning of this thesis.

The suspension of self-made vehicle will be fabricated with double wishbone suspension and with pushrod. The manufacture is carried out using chipping machining methods, welding, numerically-controlled bending press and numerically-controlled plasma cutting machine.

The result will be a manufactured steering knuckle. At the time when this thesis was written, steering rack got modified and all the data of steering was not available. A plan of steering system was made, and it will be presented in this thesis. Feedback of suspension and steering performance is obtained only after the vehicle has been tested on track.

Keywords:

design, manufacture, simulation

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Pyöräntuenta	8
2.1 Perusteet	8
2.1.1 Auraus ja haritus	8
2.1.2 Camber	9
2.1.3 Caster ja geometrinen jättämä	11
2.1.4 KPI ja kääntövierinsäde	12
2.2 Alustageometria	13
2.2.1 Painopiste	13
2.2.2 Kallistuskeskiö	15
2.2.3 Antigeometriat	16
2.2.4 Pro-ominaisuudet	18
2.3 Ohjausgeometria	19
2.3.1 Ackermann-ohjaus	19
2.3.2 Ominaisohjaus	21
3 Suunnittelu	23
3.1 Suunnittelussa huomioitavat tekijät	23
3.2 Geometrian mittaustyö	25
3.3 Nivelpisteiden määrittäminen	26
3.4 Suunnittelun geometrian tulokset	28
3.4.1 Camber käyttäytyminen	28
3.4.2 Caster käyttäytyminen	30
3.4.3 Kallistuskeskiön käyttäytyminen	32
3.4.4 Raideleveyden käyttäytyminen	35
3.4.5 Ohjauksen käyttäytyminen	37
3.4.6 Anti-dive-ominaisuus jarruttaessa	40
3.5 Olka-akselin 3D-mallinnus	41
3.6 Olka-akselin prototyypin 3D-tulostus	43

4 Valmistus	45
4.1 Sorvaus	45
4.2 Särmäys ja hitsaus	46
5 Pohdinta	47
6 Lopuksi	48
Lähteet	49

Kuvat

Kuva 1. Auraus ja haritus (Karhima 2008, 94).	8
Kuva 2. Positiivinen camber-kulma (Karhima 2008, 95).	10
Kuva 3. Caster ja geometrinen jättämä (Milliken & Milliken 1995, 710).	11
Kuva 4. KPI ja kääntövierinsäde (Milliken & Milliken 1995, 710).	12
Kuva 5. Painopisteen korkeusjakauma auton pituussuunnassa (Smith 1978, 29).	14
Kuva 6. Kallistuskeskiön ja painopisteen korkeus (Adams 1992, 14).	15
Kuva 7. Anti-squat 30 % (Smith 1978, 35).	18
Kuva 8. Ackermann-, paralleeli- ja reverse-Ackermann-ohjaus (Milliken & Milliken 1995, 714).	20
Kuva 9. Toteutunut Ackermann-ohjaus (Milliken & Milliken 1995, 714).	20
Kuva 10. Ominaisohjauksen eliminointi (JOES Racing Products 2021).	22
Kuva 11. Alatukivarsi teräskuulanivelillä.	24
Kuva 12. Geometrian mittaus.	25
Kuva 13. Tukivarsien geometria SusProg3D-ohjelmassa.	27
Kuva 14. Tukivarsien asento.	41
Kuva 15. Alatukivarren teräskuulanivelen kiinnitys olka-akseliin.	41
Kuva 16. Ylätukivarren kiinnike ja säätölevy-tekniikka.	42
Kuva 17. Olka-akselin kokoonpano.	43
Kuva 18. 3D-tulostettu olka-akseli.	43
Kuva 19. Laakeripesän sorvausta.	45

Kuviot

Kuvio 1. Camber-kulma joustoliikkeessä.	29
Kuvio 2. Camber-kulman muutos korin kallistuessa.	30
Kuvio 3. Caster-kulma joustoliikkeessä.	31
Kuvio 4. Caster-kulma korin kallistuessa.	32
Kuvio 5. Kallistuskeskiön korkeusasema maanpinnasta joustoliikkeen aikana.	33
Kuvio 6. Kallistuskeskiön korkeusasema korin kallistuessa.	34
Kuvio 7. Kallistuskeskiön sivuttaissiirtymä keskilinjalta korin kallistuessa.	35
Kuvio 8. Pyörän sivuttaissiirtymä joustoliikkeessä.	36
Kuvio 9. Pyörän sivuttaissiirtymä korin kallistuessa.	37
Kuvio 10. Ominaisohjaus joustoliikkeessä.	38
Kuvio 11. Ominaisohjaus korin kallistuessa.	39
Kuvio 12. Kaartoharitus ohjausliikkeessä.	40

Taulukot

Taulukko 1. Anti-ominaisuuden vaikutus ajotilanteen mukaan.	17
Taulukko 2. Parametreja etu-akselin pyöräntuennasta.	28

1 Johdanto

Tämän työn kohteena on omavalmisteinen putkirunkoinen auto. Auton valmistus aloitettiin marraskuussa 2021. Auto on takavetoinen ja voima moottorilta taka-akselille välittyä ketjuvedolla. Opinnäytetyötä aloittaessa autoon on jo valmistettu taka-akselisto ja takajousitus. Tässä opinnäytetyössä keskitytään etuakselistoon ja sen olka-akselin rakenteisiin, sekä pyöräntuennan geometrian suunnitteluun. Autoa ei ole tarkoitus luokitella tai rakentaa mihinkään kilpa-autoluokkaan kuuluvaksi, joten vapaudet rakentamiseen on huomattavasti laajemmat, kuin tiettyyn kilpa-autoluokkaan kuuluvalla autolla. Tarkoituksena on ajaa satunnaisesti suljetuilla moottoriradoilla.

Tarkoituksena on valmistaa etujousitus päällekkäisillä kolmiotukivarsilla ja työntövarsijousituksella. Tällaisen rakenteen jousitusta käytetään hyvin yleisesti formula-tyyppisissä autoissa. Tämä rakenne vaikuttaa myös siihen, millainen olka-akseli tulisi suunnitella.

Etuakseliston nivelpisteiden koordinaatit tullaan syöttämään SusProg3D-ohjelmaan, jossa voidaan simuloida pyöräntuennan käytöstä joustoliikkeen aikana. Nivelpisteiden koordinaatteja muuttamalla saadaan suunniteltua pyöräntuennan geometria toimivaksi ja tuotua esiin toivottuja ominaisuuksia tai vastaavasti eliminoitua epätoivottuja ominaisuuksia.

Kun nivelpisteet on määritelty halutunlaisiksi, voidaan olka-akseli mallintaa CAD-ohjelmalla. Mallintamisessa on kuitenkin huomioitava olka-akselin valmistustapa. Valmistuksessa tullaan käyttämään tietokoneohjattua plasmaleikkuria, tietokoneohjattua särmäyspuristinta, joitakin lastuavan työstön menetelmiä ja hitsausta.

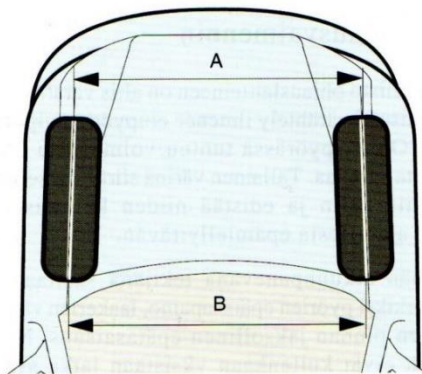
2 Pyöräntuenta

2.1 Perusteet

Pyöräntuennan geometrialla on suuri merkitys auton ajo-ominaisuuksiin ja ajettavuuteen. Ajettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat auton vakaus, renkaan tuottama pito ja auton ohjattavuus. Geometriaa muuttamalla pystytään ajettavuutta muokkaamaan kulloiseenkin ajotapaan sopivaksi. Geometria muodostuu pyöräntuennan komponenttien nivelpisteistä, nivelpisteiden välisistä etäisyyksistä ja niiden välille syntyvistä suorista ja kulmista. Ratkaisevia tekijöitä auton käyttäytymiselle joustoliikkeen aikana ovat edellä mainitut etäisyydet ja kulmat.

2.1.1 Auraus ja haritus

Yläprojektiosta katsottuna aurauksella (*Toe In*) tarkoitetaan sellaista pyöräntulmaa, jossa saman akselin pyörien keskilinjat edessä ovat lähempänä toisiaan kuin takana. Jos taas pyörien keskilinjat takana ovat lähempänä toisiaan kuin edessä, kutsutaan tällaista pyöräntulmaa haritukseksi (*Toe Out*). Haritusta voidaan myös kutsua negatiiviseksi auraukseksi. Kuvassa 1 on esitetty auraus ja haritus.



Kuva 1. Auraus ja haritus (Karhima 2008, 94).

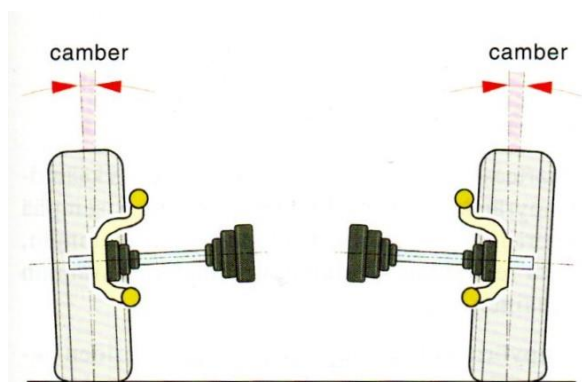
Kuvassa 1 voidaan todeta olevan hieman aurausta, sillä mitta A on pienempi kuin B. Jos mitta B olisi pienempi kuin mitta A, olisi kyseessä haritus.

Aurauksen tehtävänä on pyrkiä kumoamaan vierintävastuksesta, vetovoimasta ja camber-kulmasta johtuvia voimia, jotka pyrkivät kääntämään pyörää epätoivottuun suuntaan. Voidaan tarkastella esimerkiksi positiivisella kääntösäteellä ja positiivisella camber-kulmalla olevaa etupyörää liikkeessä, jolloin ajonopeuden kasvaessa renkaan vierintävastus aiheuttaa renkaaseen momentin, joka pyrkii kääntämään pyörää harittavampaan suuntaan. Tästä syystä tulisi pyörät säätää tiettyyn aurauskulmaan, jotta syntyvät sivuvoimat tai niiden momentit kumoutuvat. Vastaavasti negatiivinen kääntösäde ja negatiivinen camber-kulma pyrkivät kääntämään pyörää auraavaan suuntaan, jolloin pyöriin tulisi säätää hieman haritusta. (Mauno 1991, 21 - 22.)

Auraus voidaan ilmoittaa pituusmittana millimetreinä tai kulma-asteina. Aurauksen mittaamisen voi suorittaa renkaasta tai vanteesta, mutta tällöin tulisi huomioida vanne- ja rengaskoko. Suositeltavaa olisi käyttää kulma-asteita, jolloin vanteen tai renkaan koko ei ole merkitsevä. Auraus voidaan mitata etu- ja taka-akselilla. Luotettavan mittaustuloksen saa esimerkiksi erilaisilla pyöränsuuntaukseen tarkoitettulla laitteistolla. Lähes poikkeuksetta ohjaavan akselin aurausta pystytään säätämään. Mahdollinen säätäminen etuakselilla tapahtuu yleisesti raidetangon pituutta muuttamalla ja taka-akselilla epäkeskopultteja säätämällä. Taka-akselilla aurausta ei kaikissa pyöräntuentatyypeissä pystytä säätämään.

2.1.2 Camber

Pyörän sivukallistuma eli camber-kulma tarkoittaa pyörän keskilinjan kallistumaa maanpinnan kohtisuoraan nähden. Etu- tai takaprojektista katsottuna pyörän yläreunan ollessa lähempänä auton keskilinjaa kuin alareunan, on kyseessä negatiivinen camber-kulma. Pyörän alareunan ollessa lähempänä keskilinjaa kuin yläreunan, on kyseessä positiivinen camber-kulma. Kuvassa 2 camber-kulma on positiivinen molemmilla pyörillä.



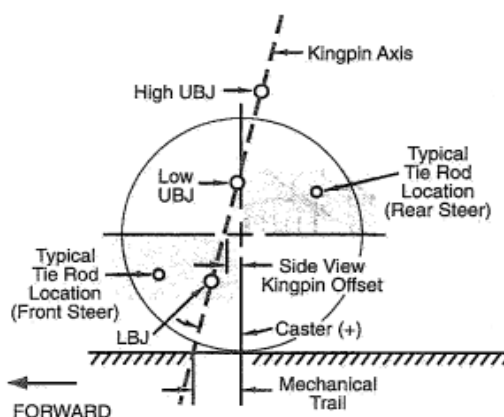
Kuva 2. Positiivinen camber-kulma (Karhima 2008, 95).

Camber ilmoitetaan kulma-asteina. Auton staattisessa tilassa kulman ollessa rajusti negatiivinen tai positiivinen, on maahan osuva renkaan kontaktipinta-ala tällöin pieni. Suoraan ajaessa rengas kuluu toispuoleisesti, eikä pysty tuottamaan maksimaalista jarrutus- ja kiihdytyspitoa. Tieliikenteeseen soveltuvissa henkilöautoissa camber on usein lähellä nollaa, kun taas useasti ratakilpa-autoissa staattinen camber on negatiivinen ja suuri. Tämä on siitä syystä, että kilpa-autoissa kaarreaajotilanteessa tavoitellaan maksimaalista pitoa, kun taas tieliikenteessä tavoitellaan maksimaalista jarrutuspitoa ja renkaan tasaista kulumista. (Mauno 1991, 7 - 8.)

Camber-kulma muuttuu myös joustoliikkeen aikana. Pyöräntuennan geometrian oikeanlaisella suunnittelulla camber-kulman muutos joustoliikkeen aikana (*Camber Gain*) on kontrolloitavissa. Kaarreajon aikana ulkokaarten puoleisiin pyöriin kohdistuu suuremmat sivusuuntaiset voimat autoon vaikuttavan keskipakovoiman aiheuttamana. Korin kallistuksen vuoksi pyörät pyrkivät kallistumaan pystysuoraan asentoon. Kilpa-auton pyöräntuennan geometria tulisi suunnitella niin, että kaarreajossa ulkokaarten puoleisen pyörän camber olisi hieman negatiivinen, jolloin renkaasta saadaan paras mahdollinen sivuttaisvoima. Optimaalinen kulman suuruus kuitenkin riippuu käytössä olevasta renkaasta ja sen ominaisuuksista.

2.1.3 Caster ja geometrinen jättämä

Caster-kulma tarkoittaa kääntöakselin kallistumaa maanpinnan kohtisuoraan nähden auton sivuprojektiosta katsottuna. Kääntöakselin kulma on negatiivinen, jos se on kallistuneena eteenpäin. Positiivinen kulma on silloin, kun kääntöakseli on kallistuneena taaksepäin (Kuva 3). Lähes poikkeuksetta caster on positiivinen ja se ilmoitetaan kulma-asteina.



Kuva 3. Caster ja geometrinen jättämä (Milliken & Milliken 1995, 710).

Kuvassa 3 on erillistuentainen kaksoisheilurituenta, jossa katkoviiva kuvaa kääntöakselin takakallistumaa. Erillistuentaissa jousituksessa, jossa on kaksi päällekkäistä tukivartta, verrataan olka-akselin ylemmän ja alemman nivelen kautta kulkevaa yhdyssuoraa maanpinnan kohtisuoraan. Tätä suoraa voidaan kutsua olkatappilinjaksi (*Kingpin Axis*). Se on kääntöakseli, jonka ympäri pyörä kääntyy, kun ohjauspyörää käännetään. (Mauno 1991, 14.)

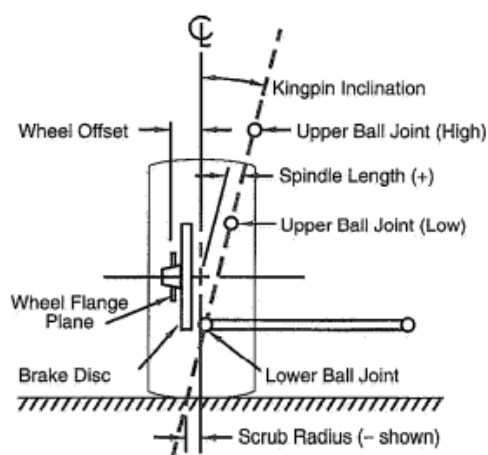
Suoraan ajettaessa positiivinen caster-kulma tekee ohjauksesta vakaan ja kaarreajossa pyrkii palauttamaan ohjauksen keskiasentoon. Lisääntynyt positiivinen caster tuottaa myös joitakin haittailmiöitä, kuten lisääntyneen ohjauksen voimantarpeen, ohjauspyörään tuntuja iskuja ja kaltevan tien aiheuttaman kääntymispyrkimyksen. (Mauno 1991, 16.)

Geometrinen jättämä (*Caster Trail tai Mechanical Trail*) on olkatappilijan ja pyörän keskilinan välinen etäisyys maanpinnassa. Jättämä on positiivinen, jos

olkatappilinjan kosketuspiste maanpinnassa on pyörän keskilinjan etupuolella. Caster-kulma vaikuttaa suoranaisesti jättämän suuruuteen ja jättämän vaikutukset ohjaukseen ovat hyvin samankaltaiset kuin caster-kulmalla. Mikäli haluaa jättämän pysyvän pienenä, mutta kasvattaa caster-kulmaa, on käytettävä niin sanottua taakse vedettyä olkatappilinjaa. Tämä tarkoittaa sitä, että olkatappilinja kulkee pyörän keskipisteen takapuolella. (Mauno 1991, 14 - 16.)

2.1.4 KPI ja kääntövierinsäde

KPI (*Kingpin Inclination*) tarkoittaa kääntöakselin sivukallistumaa etu- tai takaprojektiosta. Negatiivista tai positiivista kääntöakselin sivukallistumaa ei erotella, sillä kääntöakseli on aina sisäänpäin kallistunut. Kääntöakselin sivukallistumaa verrataan maanpinnan kohtisuoraan. (Mauno 1991, 18 - 19.)



Kuva 4. KPI ja kääntövierinsäde (Milliken & Milliken 1995, 710).

Kääntövierinsädeellä (*Scrub Radius*) tarkoitetaan kääntöakselin ja pyörän keskilinjan etäisyyttä toisistaan maanpinnan tasossa. Pyörän keskilinjan jäädessä kohti auton keskilinjaa, on kääntövierinsäde negatiivinen (Kuva 4). Kun pyörän keskilinja jää kääntöakselin leikkauspisteen ulommalle puolelle, on kyseessä positiivinen kääntövierinsäde. (Mauno 1991, 18.)

Jos piirrettäisiin kääntövierinsäteen suuruinen ympyrä, olisi tämä sellainen ympyrä, jonka kaarta pitkin pyörä vierisi ohjausliikkeen aikana. Pidempi kääntösäde tarvitsee suuremman voiman ohjaukseen ja ohjauspyörään tuntuvat iskut ovat voimakkaampia.

2.2 Alustageometria

Auton korin käyttäytyminen kaarreaajossa, jarruttaessa ja kiihdyttäessä vaikuttaa kokonaisvaltaisesti suorituskykyyn. Jousien varaan asennettu auton kori pyrkii kaarreaajossa kallistumaan, jarruttaessa nyökkäämään ja kiihdyttäessä niiaamaan. Edellä mainittuja ominaisuuksia pystytään kontrolloimaan oikeanlaisella suunnittelulla.

2.2.1 Painopiste

Jokaisella kappaleella on oma painopisteensä (*Center of Gravity*). Mikäli kappale tuettaisiin omasta painopisteestään, se olisi täydellisessä tasapainossa. Kappaleeseen, eli tässä yhteydessä autoon, vaikuttavien voimien voidaan ajatella kulkevan painopisteen kautta. (Smith 1978, 29.)

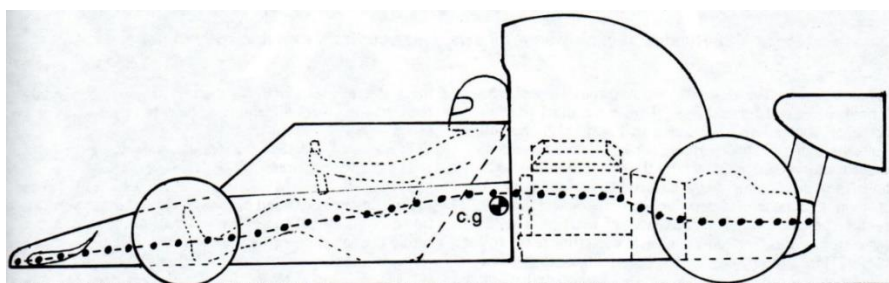
Tieliikenneajoneuvoissa painopisteen haluttaisiin olevan myös mahdollisimman alhaalla, mutta esimerkiksi maavaran tarve on yksi keskeisistä vaatimuksista, joka estää painopisteen sijoittumisen mahdollisimman alas.

Autoon vaikuttavat pitkittäis- ja sivuttaisvoimat vaikuttavat renkaan kontaktipinnassa, kun taas autoon kohdistuvat kiihtyvyydet vaikuttavat auton painopisteessä. Tästä johtuu, että auto kallistelee, niiailee ja nyökkäilee, ja nämä liikkeet koetaan ajomukavuuden kannalta huonona asiana. Ajo-ominaisuuksien kannalta huonoa on se, että pyöränkuormat vaihtelevat painon siirtyessä puolelta toiselle. Painon siirtyessä pyörältä toiselle, ei raskaammin kuormitettu pyörä pysty tuottamaan samanlaista sivuvoimaa, mitä kevyemmin kuormitettu pyörä pystyisi tuottamaan. Vähäisemmän painonsiirtymän vuoksi kilpa-autoissa painopisteen halutaan mahdollisimman alhaalla.

Painopisteen sijainti vaikuttaa suuresti eri ajotilanteissa esiintyvään korin kallisteluun, niiaamiseen ja nyökkäämiseen. Painopiste saadaan sijoitettua alemmaksi monin eri keinoin. Raskaiden komponenttien kuten moottorin, vaihteiston, akun, kuljettajan ja polttoainesäiliön sijoittaminen lähemmäs maanpintaa tuovat painopistettä alaspäin. Myös itse auton madaltaminen tuo painopistettä alaspäin, mutta madaltamisessa on huomioitava auton käyttötarkoitus. Madaltaminen ei saa johtaa kuitenkaan siihen, että auton pohja koskettaa maata.

Auton rakenteelliset ratkaisut vaikuttavat siihen, mihin kohtaan pituussuunnassa painopiste sijoittuu. Liian taakse sijoittunut painopiste saattaa aiheuttaa aliohjautumista, koska etupyörillä oleva pyöränkuorma pienenee ja sivuvoimaa ei synny, jolloin auto pyrkii kaarteessa menemään suoraan, vaikka ohjauspyörää käännetään. Liian eteen sijoittunut painopiste taas saattaa aiheuttaa yliohjautumista, jolloin kaarteessa auton takarenkaat alkavat luistamaan.

Auton pitkittäissuuntaisen painopisteen voi kuvitella jaettavan useaan eri sektioon, jossa massojen jakautumista voidaan tarkastella. Jos pitkittäissuuntaista massaa voitaisiin mitata pienin välimatkoin, kohoaisi pitkittäissuuntainen akseli raskaampien komponenttien kohdalla korkeammalle. Kuvassa 5 on esitetty kuvitteellinen pitkittäissuuntainen akseli, sekä auton painopisteen sijainti. Kuva 5 esittää formula-tyyppisen auton massojen jakaumaa auton pituuden suhteen. Paikallisen painopisteen nähdään sijoittuvan huomattavasti korkeammalle esimerkiksi kuljettajan ja moottorin kohdalla.

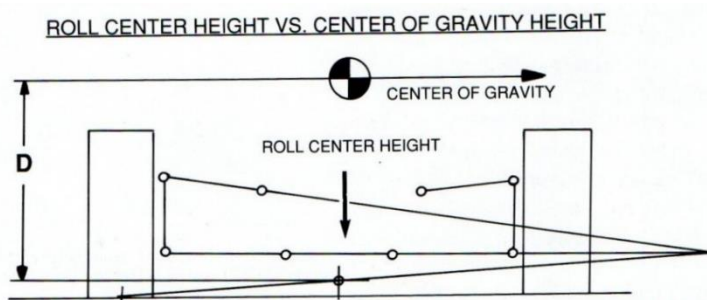


Kuva 5. Painopisteen korkeusjakauma auton pituussuunnassa (Smith 1978, 29).

2.2.2 Kallistuskeskiö

Kallistuskeskiö (*Roll Center*) on geometrian määräämä piste, johon renkaan tuottaman sivuvoiman voi ajatella vaikuttavan. Pisteiden sijainnilla on vaikutusta korin kallisteluun kaarreajon aikana. Kallistuskeskiö ei ole staattinen paikallaan pysyvä piste, vaan se siirtyy joustoliikkeen ja korin kallistuksen aikana. Etu- ja taka-akselilla on molemmilla oma kallistuskeskiönsä. Kun luodaan kuvitteellinen linja kallistuskeskiöiden väliin, voidaan tätä linjaa kutsua kallistusakseliksi. Kaarreajossa auton kori pyrkii pyörimään kallistusakselin ympäri. (Mauno 1991, 32 - 33.)

Kallistuskeskiön paikka määräytyy auton tukivarsien asennosta. Kaksoisheilurituennassa ylä- ja alatukivarsien nivelpisteistä voidaan piirtää kuvitteelliset jatkeet, kuten kuvassa 6 on piirretty. Piste, jossa tukivarsien nivelpisteiden kuvitteelliset jatkeet kohtaavat, on hetkellinen nopeusnapa (*Instant Center*). Kun hetkellisestä nopeusnavasta piirretään linja pyörän kosketuspinnan keskikohtaan, voidaan kallistuskeskiö määrittää tälle linjalle auton keskilinjalle. (Mauno 1991, 34 - 35.)



Kuva 6. Kallistuskeskiön ja painopisteen korkeus (Adams 1992, 14).

Kuvassa 6 merkitty mitta D on etäisyys kallistuskeskiöstä painopisteeseen. Tämä mitta vaikuttaa korin kallistumiseen kaarreajon aikana ja toimii vipuvarren tavoin. Mitä suurempi mitta on, sitä enemmän kori pyrkii kallistumaan kaarreajossa. (Adams 1992, 14.)

Auton ajettavuuden ominaisuuksia tarkastellessa jo suunnitteluvaiheessa, voi suunnittelija vaikuttaa auton käytökseen kallistuskeskiöitä määrittäessä. Jos kallistuskeskiö etuakselilla on matalammalla kuin taka-akselilla, pyrkii auto yliohtautumaan. Vastaavasti taka-akselilla matalampi kallistuskeskiö pyrkii tekemään autosta aliohtautuvamman. Näiden edellä mainittujen tilanteiden olettamuksena on, että painopiste sijaitsee suunnilleen auton puolivälissä pituussuuntaisella akselilla. (Mauno 1991,33 - 34.)

Sellaisen geometrian suunnittelu, jossa kallistuskeskiön korkeus olisi lähellä painopisteen korkeutta, vähentäisi korin kallistelua, mutta tämä saattaa aiheuttaa joitakin haittailmiöitä. Liian korkea kallistuskeskiö aiheuttaa kaarreaajossa koria nostavan voiman, jota kutsutaan *jacking*-ilmiöksi. Toinen haittailmiö korkeasta kallistuskeskiöstä on joustoliikkeen aikana pyörään kohdistuva sivuttaisliike. Tämä johtuu hetkellisen nopeusnavan liian korkeasta asemasta maantasoon nähden. Tällaisessa tuentageometriassa joustoliikkeen aikana akselin raideleveys muuttuu, ja samalla renkaaseen syntyy sortokulma. Tämä sivuttaisliike hukkaa osan renkaan tuottamasta sivuvoimasta. (Milliken & Milliken 1995, 613 - 616.)

2.2.3 Antigeometriat

Auton kori pyrkii kiihdyttäessä ja jarruttaessa kallistumaan poikittaissuuntaisen akselin ympäri. Näihin ilmiöihin voidaan vaikuttaa kokonaispainon vähentämisellä, painopisteen alentamisella ja jousien jäykkyyttä muuttamalla. Mikäli nyökkäystä ja niiausta edelleen tapahtuu toivottua enemmän, voidaan tukivarsien geometriaa muokata anti-ominaisuuden lisäämiseksi.

Jarrutuksessa auton etupää pyrkii laskemaan eli nyökkäämään (*Anti-dive*). Kiihdyttäessä takavetoisen auton takapää pyrkii laskemaan eli niiaamaan (*Anti-squat*) ja etuvetoisen etupää pyrkii kiihdyttäessä nousemaan (*Anti-lift*). Antigeometrialla pyritään vähentämään niiausta, nyökkäystä tai nostoa. Taulukossa 1 nähdään anti-ominaisuuksien vaikutukset ajotilanteittain etu- ja takavetoisissa autoissa.

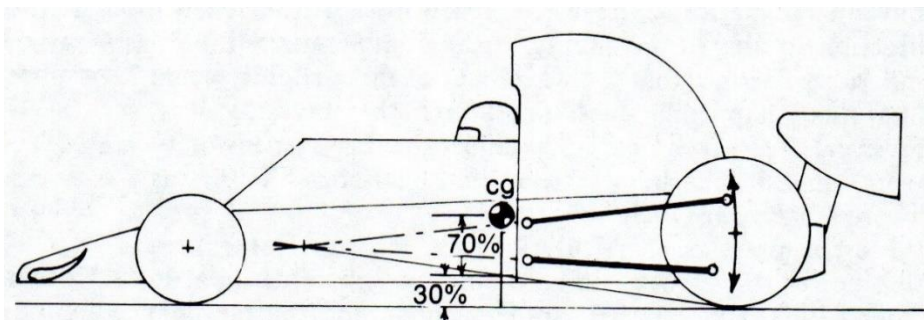
Taulukko 1. Anti-ominaisuuden vaikutus ajotilanteen mukaan.

	Anti-ominaisuuden vaikutus							
	Kiihdyttäessä				Jarruttaessa			
	Etuvetoinen		Takavetoinen		Etuvetoinen		Takavetoinen	
	Etu-akseli	Taka-akseli	Etu-akseli	Taka-akseli	Etu-akseli	Taka-akseli	Etu-akseli	Taka-akseli
Anti-dive					X		X	
Anti-lift	X					X		X
Anti-squat				X				

Anti-ominaisuus ilmoitetaan prosentteina. Prosenttimäärä ilmaisee, kuinka suuri osa painonsiirtymän aiheuttamasta kallistumasta kohdistuu auton jousitukseen. Anti-ominaisuuden ollessa 0 %, kohdistuu painonsiirtymä suoraan jousiin ja kallistelun määrä riippuu jousien jäykkyydestä. Anti-ominaisuuden ollessa 100 %, kohdistuu painonsiirtymä pyöräntuentaan ja tukivarsiin, jolloin auto ei kallistu ollenkaan kiihdyttäessä ja jarruttaessa. (Milliken & Milliken 1995, 618.)

Anti-ominaisuuksien käyttö ei suinkaan poista painonsiirtymää, joka kohdistuu renkaisiin. Renkaisiin kohdistuva painonsiirtymä jopa tapahtuu nopeammin ja äkillisemmin, jos geometriassa on anti-ominaisuutta. Painonsiirtymä tulisi jokaisessa ajotilanteessa saada mahdollisimman rauhalliseksi, jolloin auton käytöksestä tulee ennakoitavampaa ja johdonmukaisempaa. Esimerkiksi suuren anti-dive-ominaisuuden omaava geometria on jarruttaessa herkempi lukitsemaan etupyöriä, etenkin epätasaisella ajoalustalla. Anti-ominaisuuksia tulisi käyttää siis maltillisesti.

Anti-ominaisuudet määritetään sivuprojektioista katsottuna. Tukivarsien korin puoleisten nivelpisteiden läpi piirretään suorat, jotka leikkaavat toisensa jonkin etäisyyden päässä. Tätä kohtauspistettä kutsutaan sivuttaissuuntaisen pyöräntuennan kallistuskeskiöksi, jonka ympäri auton kori pyrkii ”kiertymään” kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Jos kohtauspiste leikkaa suoralla, joka piirretään renkaan kontaktipinnan keskeltä painopisteeseen, on anti-ominaisuus tällöin 100 %. Kuvassa 7 on esitetty 30 % anti-squat-ominaisuutta outboard-jarruilla. (Smith 1987, 34 - 35.)



Kuva 7. Anti-squat 30 % (Smith 1978, 35).

Anti-ominaisuuden laskentaan vaikuttaa pyöräjarrujen sijainti. Outboard-jarruilla varustetussa pyöräntuennassa anti-ominaisuuden laskennassa verrataan renkaan kontaktipinnasta kallistuskeskiöön piirretyn linjan ja painopisteestä maahan piirretyn pystysuoran linjan leikkauskohdan etäisyyttä maanpinnasta ja painopisteen korkeutta maanpinnasta. (Milliken & Milliken 1995, 617.)

Inboard-jarruilla varustetussa pyöräntuennassa leikkauskohdan etäisyyttä verrataan pyörän keskipisteen vaakasuoran korkeuteen ja painopisteen korkeutta maanpinnasta. Inboard-jarrullisessa pyöräntuennassa nivelpisteiden kautta piirrettyjen suorien tulisi kohdata pyörän keskipisteen vaakasuoran yläpuolella. Pyörän keskipisteen alapuolelle jäänyt leikkauskohta aiheuttaa niausta, nyökkäystä tai nostoa edesauttavan voiman, jota kutsutaan pro-ominaisuudeksi. (Milliken & Milliken 1995, 618 - 619.)

2.2.4 Pro-ominaisuudet

Anti-ominaisuus voi olla etumerkiltään myös miinus-merkkistä, jolloin puhutaan pro-ominaisuudesta. Pro-ominaisuutta voi olla sekä inboard-jarrullisessa geometriassa, että outboard-jarrullisessa geometriassa. Pro-ominaisuuden omaava geometria pyrkii edesauttamaan tai tehostamaan niausta, nyökkäystä tai nostoa. Esimerkiksi pro-dive-ominaisuuden omaava geometria pyrkii edesauttamaan korin nyökkäämistä jarrutustilanteessa, jolloin geometria siirtää osan jarrutusvoimasta jousien ohitse koriin.

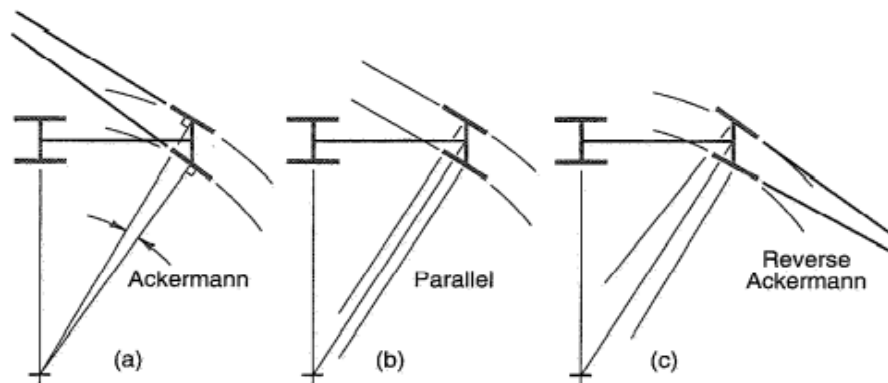
2.3 Ohjausgeometria

Ohjauksen tehtävä teoriassa on hyvin yksinkertainen, ohjauspyörän liikkeen välitys ohjaavalle akselille. Todellisuudessa suunnittelijan tulee huomioida useita eri tekijöitä. Pyörien kääntymisen lisäksi voidaan asettaa muitakin vaatimuksia ohjaukselle, kuten sopiva ohjausvoima, tasainen palautus käännöksen jälkeen ja tarkka vastaavuus ohjauspyörän liikkeisiin. Maltillinen ohjausvoiman tarve on itsestäänselvyys. Tasaisella palautuksella tarkoitetaan sitä, kun ohjauspyörästä kevennetään otetta käännöksen jälkeen, pyörät palautuvat suoraan ajoasentoon automaattisesti, eikä niitä tarvitse väkisin kääntää ohjauspyörästä. Tarkalla vastaavuudella tarkoitetaan sitä, että auton kulkusuunta muuttuisi vain ohjauspyörää kääntäessä, eikä ohjauksessa tulisi olla minkäänlaista välystä.

2.3.1 Ackermann-ohjaus

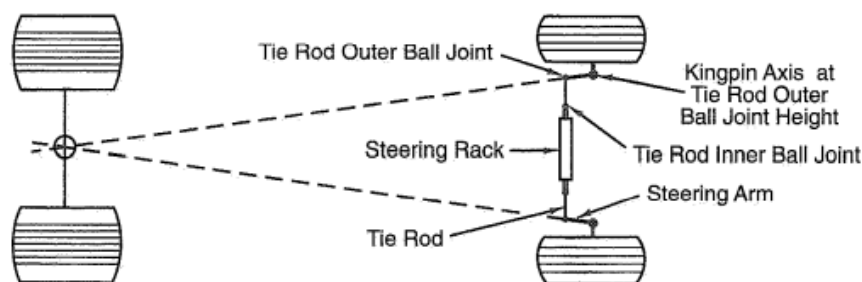
Ackermann-ehdon täyttävällä ohjauksella tarkoitetaan sellaista ohjausgeometriaa, jossa sisäkaarten puoleinen etupyörä kääntyy enemmän, koska se kulkee pienempää kaartosädettä pitkin. Erisuuruiset pyörien kääntökulmat aiheuttavat harittavan pyöräntulman ja tätä voidaan kutsua myös kaartoharituksi. Tavallisissa henkilöautoissa ohjausgeometria on suunniteltu tähän tapaan, jotta renkaiden kuluminen olisi mahdollisimman tasaista. (Mauno 1991, 78.)

Ohjausgeometria voidaan myös toteuttaa niin, että molemmat etupyörät kääntyvät yhtä paljon (*Parallel*) tai niin, että ulkokaarten puoleinen pyörä kääntyy enemmän (*Reverse Ackermann*). Nämä kolme geometriaa on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. Ackermann-, paralleeli- ja reverse-Ackermann-ohjaus (Milliken & Milliken 1995, 714).

Täydellisen Ackermann-ehdon täyttävä ohjaus voidaan toteuttaa siten, että olka-akseleiden kääntövarret ovat sellaisessa kulmassa, jossa niiden kuvitteelliset jatkeet leikkaisivat taka-akselin leveyssuuntaisessa keskipisteessä (Kuva 8). Käytännössä Ackermann-periaate toteutuu kuitenkin vain pienillä nopeuksilla. Nopeuden kasvaessa renkaaseen muodostuu sortokulma renkaan elastisuuden takia ja tällöin renkaan keskilinja ja todellinen kulkusuunta poikkeavat toisistaan. (Mauno 1991, 78-79.)



Kuva 9. Toteutunut Ackermann-ohjaus (Milliken & Milliken 1995, 714).

Ackermann-ehdon täyttävän ohjauksen käyttäminen kilpa-autoissa on suhteellisen harvinaista. Kaarreajossa sivuttaisvoima pakottaa kaikki renkaat sortokulmiin ja näistä eturenkaat jopa hieman suurempaan sortokulmaan painonsiirron vuoksi. Eturenkaista ulkokaarteeseen puoleiseen renkaaseen kohdistuu enemmän kuormitusta ja tämän vuoksi myös suurempi sortokulma.

Näin ollen ohjaus tapahtuu valtaosin ulkokaarten puolen etupyörällä. Jos tässä tapauksessa sisempi etupyörä on kääntynyt enemmän, aiheuttaa se vain pelkkää vastusta auton etenemiselle. Tästä syystä kilpa-autoissa usein käytetään paralleeli-ohjausta, tai jopa reverse-Ackermann-ohjausta. (Smith 1978, 60 - 61.)

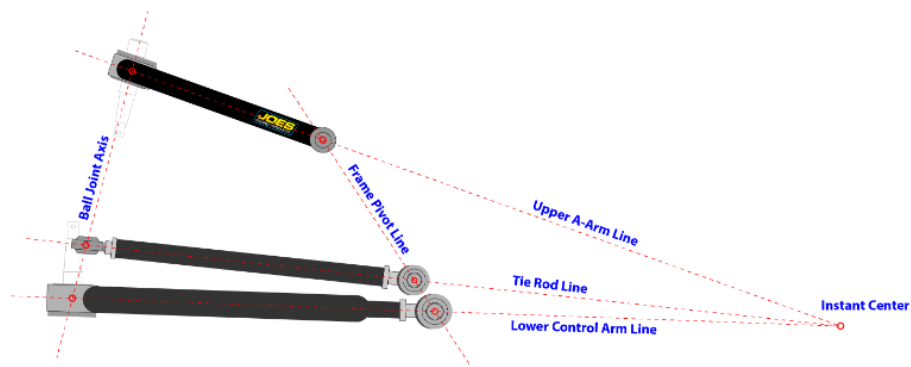
2.3.2 Ominaisohjaus

Ominaisohjauksella (*Bump Steer*) tarkoitetaan sisään- ja ulosjouston aikana tapahtuvaa aurauskulman muuttumista. Aurauskulman muutos ilman ohjauspyörän kääntämistä on yleensä haitallinen ominaisuus. Ominaisohjaus heikentää auton suuntavakautta etenkin epätasaisella alustalla.

Jarrutustilanteessa auton etupää joustaa sisään, ja jos tällöin auraus muuttuu, se saa auton käyttäytymään erittäin arvaamattomasti. Ominaisohjauksen saaminen täysin nollaksi on yleensä ja käytännössä mahdotonta, mutta sen parempi on, mitä pienemmäksi ominaisohjaus saadaan.

Ominaisohjauksen määrää pystytään tarvittaessa muuttamaan. Siihen on käytännössä kaksi eri tapaa, ne ovat olka-akselin uudelleensuunnittelu tai ohjausvaihteen kiinnityspisteiden siirtäminen. Näistä kuitenkin molemmat ovat kovin työläitä toimenpiteitä. Ohjausvaihteen paikkaa voidaan tietyissä rajoissa muuttaa maltillisella työllä, kuten välilevyjä käyttämällä tai hiomalla ainetta pois.

Ominaisohjauksen eliminoimiseksi voidaan geometria suunnitella kuvan 10 mukaisesti. Tukivarsien nivelpisteiden välisten suorien leikkauspisteessä (*Instant Center*) tulisi myös raidetangon nivelpisteiden kuvitteellisen jatkon leikata, jottei ominaisohjausta syntyisi. Raidetangon ulomman nivelpisteen tulisi leikata yläpallonivelestä alapalloniveleen piirretyllä linjalla ja raidetangon sisemmän nivelpisteen tulisi leikata tukivarsien sisempien nivelpisteiden läpi piirretyllä linjalla. (JOES Racing Products 2021.)



Kuva 10. Ominaisohjauksen eliminointi (JOES Racing Products 2021).

Ominaisohjausta voi tapahtua sekä etu- että taka-akselilla. Etu-akselilla ominaisohjaus tulisi minimoida, mutta taka-akselilla maltillisella ominaisohjauksella pystytään vaikuttamaan auton käyttäytymiseen. Kuten jo aiemmin mainittiin, on ulkokaarten puoleisella pyörällä kuormitusta enemmän kaarreajon aikana, ja näin ollen osuus auton käyttöön on ratkaisevampi. Mikäli ulkokaarten puoleinen takapyörä kääntyy sisäänjouston aikana auraavaan suuntaan, tekee se auton käytöksen aliohjaavaksi. Mikäli ulkokaarten puoleinen takapyörä kääntyy sisäänjouston aikana harittavaan suuntaan, tekee se auton käytöksestä yliohtavaan. (Mauno 1991, 82.)

3 Suunnittelu

Kun suunnittelua aloitettiin, oli jo olemassa tiettyjä komponentteja kuten vanteet, renkaat, jarrulevyt, jarrusatulat, tukivarret, pyörännavat ja pyöränlaakerit. Tämä rajoitti ja helpotti suunnitelman tekemistä huomattavasti, sillä olemassa olevien komponenttien mittaustyöt oli helppo suorittaa ja mittoja voitiin käyttää hyödyksi mallintamisessa. Kanta-autona tässä projektissa toimi vaihteistosta vioittunut Opel Corsa vuosimallia 2007. Edellä mainituista osista jarrulevyt, jarrusatulat, pyörännavat ja pyöränlaakerit olivat tästä autosta peräisin.

Suunnittelun yhtenä lähtökohtana pidettiin myös sitä, että jokaisen nivelpisteen paikkaa on helppo muuttaa maltillisella työllä, mikäli huomataan käyttäytymisen olevan epätoivottua.

Pyöräntuentageometrian suunnittelussa on useita toisensa pois sulkevia vaatimuksia, jolloin kaikkia vaadittuja ominaisuuksia ei voida yhtäikaa saavuttaa. Täydellisestä geometriasta ei juurikaan voida puhua, sillä monien ominaisuuksien parantaminen taas voi heikentää toista ominaisuutta. On siis tehtävä useita kompromisseja, ja tavoitteena on vain hyvän kompromissin löytäminen. Tarkoituksena on suunnitella toimiva kokonaisuus, jota pystytään kehittämään paremmaksi jatkossa, kun on opittu yhdenlaisen geometrian käyttäytyminen radalla.

3.1 Suunnittelussa huomioitavat tekijät

Valmistusmateriaaliksi valikoitui S355-teräs sen valmistuskustannusten ja valmistustavan vuoksi. Alumiinista jyrsimällä valmistaminen olisi ollut perinteisempi tapa valmistaa tällainen kappale, mutta käytössä ei ollut tietokoneohjattua jyrsintä, eikä kappaleen valmistusta haluttu ulkoistaa. Odotettavissa on, että teräksestä valmistettu kappale todennäköisesti tulee massaltaan suuremmaksi.

Olka-akselin valmistamiseksi oli käytettävissä plasmaleikkuri, jolla levymäisestä teräksestä valmistetaan laakeripesän ympärille nivelpisteiden kiinnitykset ylätukivarrelle, alatukivarrelle, kääntövarrelle ja kiinnitysmahdollisuus jarrusatulan kannakkeelle. Ylätukivarren ja kääntövarren kiinnikkeet päätettiin jättää pulttaviksi, jotta geometriaa pystytään muokkaamaan maltillisella työllä. Näin onnistuu esimerkiksi caster-kulman muutos ja kääntövarren pituutta pystytään tarvittaessa muuttamaan.

Tiedettiin myös, että ohjauksesta tulee tehostamaton, joten caster-kulman, caster-jättämän ja kääntövierinsäteen haluttiin pysyvän hyvin maltillisina, jotta ohjauksesta tulisi mahdollisimman kevyt. Renkaat ja vanteet ovat valikoitu myös kevyemmän ohjauksen saavuttamiseksi. Vanteiden ET-luku on 38 ja ne ovat halkaisijaltaan 16 " ja leveydeltään 7 ". Renkaat ovat niin sanotut semi-slicks-kilpa-renkaat, joiden koko on 205/55R16.

Tukivarret oli jo aiemmin valmistettu ja päätetty kiinnittää jokaisesta nivelpisteestä teräskuulanivelillä. Teräskuulanivelet antavat erittäin hyvät säätömahdollisuudet pyöräntuentaan. Tukivarret ovat symmetriset kolmiotukivarret, jotka on prässäämällä muotoiltu muottia vasten hieman litteämmäksi pyöreästä teräsputkesta. Ylempi tukivarsi on hieman lyhyempi, koska camber-käyttöön on tällä tavoin vaikutettu. Tukivarren pätyihin on valmistettu kierteet teräskuulanivelten kiinnitystä varten. Alempiin tukivarsiin on myös hitsattu poikittaiset tuet työntövarren kiinnitystä varten. Kuvassa 11 on alatukivarsi.

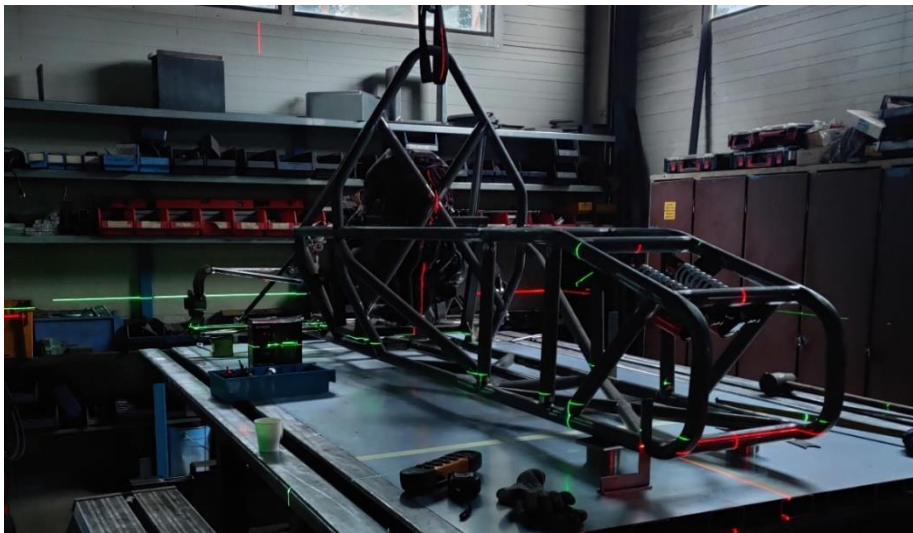


Kuva 11. Alatukivarsi teräskuulanivelillä.

Etujarrut hyödynnetään kanta-auto Opelista. Jarrut ovat perinteiset 1-mäntäiset jarrusatulat, jotka kiinnitetään olka-akseliin Opelin alkuperäisen kannakkeen avulla. Kannakkeen kiinnitys olka-akseliin piti näin ollen huomioida ja suunnitella. Jarrulevy on halkaisijaltaan 257 mm.

3.2 Geometrian mittaustyö

Ennen geometrian suunnittelua tuli nivelpisteet mitata tarkasti, jotta varmistetaan nivelpisteiden mahdolliset kiinnityspaikat. Mittauksessa auto laskettiin teräslevyn päälle, johon oli piirretty keskelle suora linja (tarkkuus 1 mm auton pituuden matkalla). Auto asetettiin levyllä siten, että auton pituussuuntainen keskilinja kohtaa tämän levyyn piirretyn suoran linjan kanssa. Suoraa linjaa käytettiin referenssilinjana mittauksessa, jolloin nivelpisteet saatiin mitattua erittäin tarkasti. Mittauksessa käytettiin apuna perinteisiä mittavälineitä, kuten rullamittaa, suorakulmaa, työntömittaa ja linjalaseria. Mittaustyö sujui ongelmitta, sillä aikaisempi kokemus vastaavasta mittaustyöstä on tullut ammattikorkeakoulun opinnoissa. Kuvassa 12 auton nivelpisteitä mitataan teräslevyn päällä SusProg3D-ohjelmaa varten.



Kuva 12. Geometrian mittaus.

3.3 Nivelpisteiden määrittäminen

Suunnittelu aloitettiin syöttämällä tukivarsien nivelpisteet SusProg3D-ohjelmaan. Tässä vaiheessa ohjausvaihteen muokkaustyöt olivat vielä käynnissä, eikä pitävää dataa ollut saatavilla ohjausvaihteen osalta, vaikka karkea suunnitelma siitäkin oli tehty. Tukivarret oli jo aikaisemmin valmistettu, joten tarvittavaa dataa kuitenkin oli olemassa parametrien tarkasteluun. Samassa jo valmistetut tukivarret toivat nivelpisteiden määrittämiseen rajoitteita, jotka helpottivat työtä.

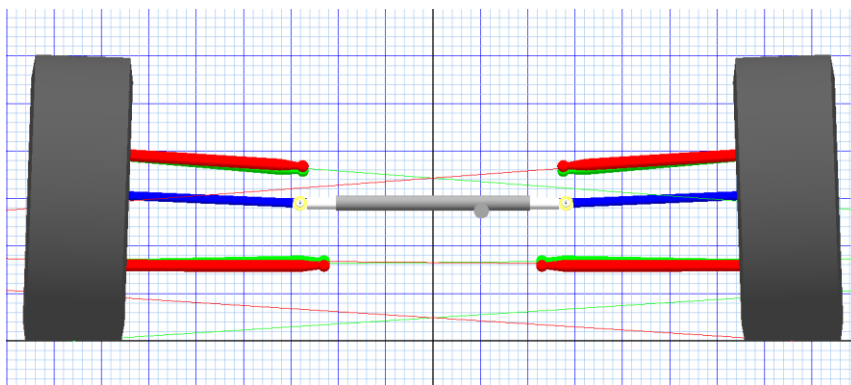
Tukivarsien sisempien nivelpisteiden määrittämisessä oli putkirunkorakenteen tuottamia tiettyjä rajoituksia. Runkorakenne on etupäästään hieman kartiomainen, joten ylätukivarren nivelpisteiden korkeusasemassa oli rajoite. Nivelpisteet haluttiin ehdottomasti runkorakenteen välittömään läheisyyteen, jotta rakenteisiin ei synny pitkiä kiinnikkeitä, jotka vaatisivat kokonaismassaa nostavia tukirakenteita. Taaemmat sisemmät nivelpisteet sijoitettiin siten, että ylempi nivelpiste sijoitettiin etummaiseen nivelpisteeseen verrattuna 10 mm alemmas, ja vastaavasti taaempi alempi nivelpiste sijoitettiin etummaista nivelpistettä ylemmäs 10 mm. Tällä tavalla geometriaan saatiin maltillinen anti-dive-ominaisuus. Anti-dive ominaisuuden määrittäminen edellyttää auton painopisteen korkeuden tietämistä, mutta tarkkaa korkeusasemaa ei tiedetty. Näin ollen painopisteen korkeus jouduttiin arvioimaan, ja sen korkeudeksi arvioitiin 420 mm.

Kun sisemmät nivelpisteet oli syötetty SusProg3D-ohjelmaan, oli aika siirtyä suunnittelemaan olka-akselin nivelpisteitä. Camber-käytöstä ja kallistuskeskiön asemaa silmällä pitäen suunniteltiin etuprojektiosta katsottuna alatukivarren sisemmät pallonivelet alapalloniveleen verrattuna hieman ylemmäs, mutta kuitenkin niin, että tukivarsi asemoituu lähelle vaakatasoa. Ylemmän tukivarren sisemmät pallonivelet suunniteltiin yläpalloniveltä alemmas. Sisemmät nivelpisteet siis määrisivät osaltaan sen, mihin etäisyyteen olka-akselin nivelpisteet tulisi sijoittaa.

Sivuprojektista katsottuna ylempi tukivarsi päätettiin sijoittaa 15 mm taaemmaksi alempaan tukivarteeseen nähden, jotta saadaan caster-kulmaa hieman kasvatettua. Tämän jälkeen olka-akselin nivelpisteitä tarkasteltiin etuprojektista, joten pystyttiin määrittämään KPI-kulman ja kääntövierinsäteen. Nämä kaksi ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, sillä KPI-kulmaa muuttaessa myös kääntövierinsäde muuttuu. Tässä päädyttiin kompromissiin, sillä KPI-kulmaa ei haluttu asettaa liian suureksi pienemmän kääntövierinsäteen tavoittelemiseksi. Ihanteellinen kääntövierinsäde tehostamattomassa ohjauksessa olisi lähellä nollaa tai jopa negatiivinen, mutta tässä geometriassa se jäi hieman positiiviseksi. Positiivinen kääntövierinsäde kasvattaa ohjausvoiman tarvetta, mutta myös jarrutusilanteessa pyrkii kääntämään pyöriä hieman harittavaan suuntaan. Kaarteeseen jarruttaessa tämä voi olla hyödyksi.

Kääntövarsi suunniteltiin siten, että Ackermann-ohjausta olisi hyvin vähäisesti, mutta kuitenkin kohtuullisen lähellä paralleeli-ohjausta. Kokemusta ei ollut Ackermann-ohjauksen käyttäytymisestä, mutta pultattavan kääntövarren uudelleen valmistaminen on maltillisessa työllä tehtävissä oleva toimenpide.

Kuvassa 13 on nivelpisteet syötetty SusProg3D-ohjelmaan ja tämän geometrian pyöräankulmien arvot ovat nähtävillä kappaleessa 3.4 suunnitellun geometrian tulokset.



Kuva 13. Tukivarsien geometria SusProg3D-ohjelmassa.

3.4 Suunnittelun geometrian tulokset

Tässä kappaleessa esitetään pyöräntuennan geometrian käyttäytymistä joustoliikkeen aikana, staattisessa lepotilassaan ja kaarreajon aikana. Esitetyt taulukot ja kuviot ovat SusProg3D-ohjelman tuloksista, jossa pyöräntuenta pystytettiin simuloimaan. Joustoliikkeen kokonaismatkaksi arvioitiin 80 - 100 mm. Taulukossa 2 on esitetty pyöräntuentaan suunniteltujen nivelpisteiden muodostamia mittoja ja etäisyyksiä, jotka vaikuttavat pyöräntuennan käyttäytymiseen.

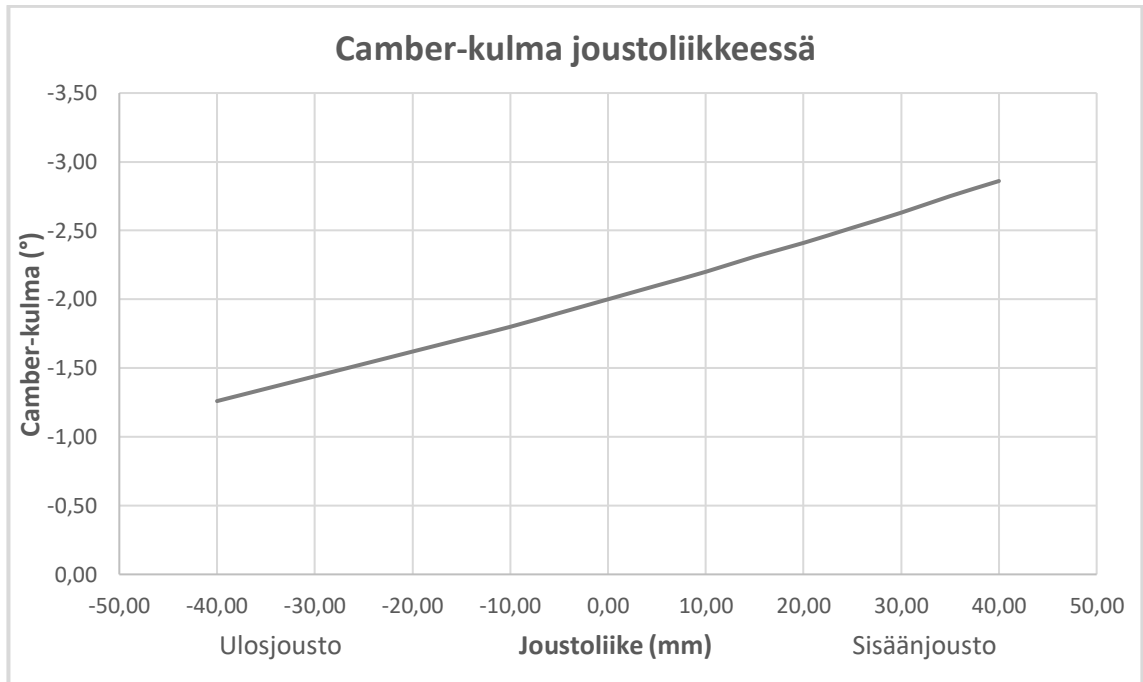
Taulukko 2. Parametreja etu-akselin pyöräntuennasta.

Auraus	0,00 °
Camber-kulma	-2,00 °
Caster-kulma	3,60 °
Geometrinen jättämä	9,86 mm
Kääntövierinsäde	18,10 mm
KPI-kulma	8,77 °
Kallistuskeskiön korkeus	48,70 mm

Teoriassa taulukon 2 tuloksiin ollaan tyytyväisiä, sillä caster-kulman, geometrisen jättämän, kääntövierinsäteen ja KPI-kulman tulisi olla hyvin maltillisia tehostamattomassa ohjauksessa ohjausvoiman tarpeen minimoimiseksi.

3.4.1 Camber käyttäytyminen

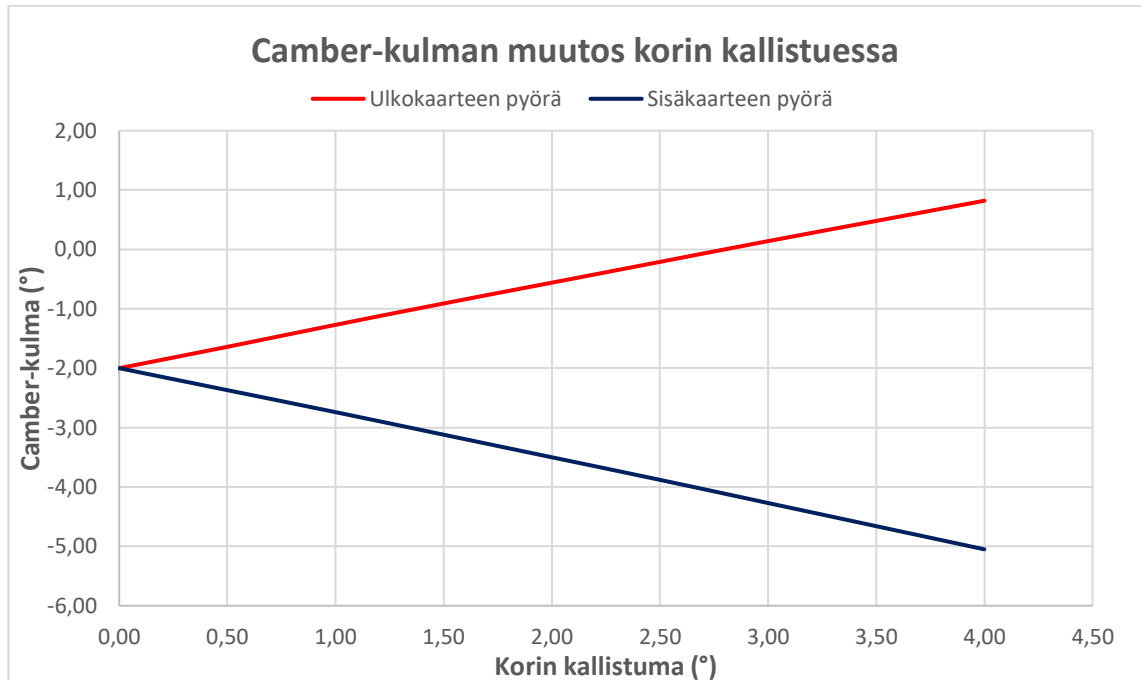
Camber-kulma muuttuu joustoliikkeen ja kaarreajon aikana, kun kori kallistuu. Tukivarsien vähäisen pituuseron vuoksi odotetaan camber-kulman muuttuvan vähäisesti niin joustoliikkeen, kuin korin kallisteluliikkeenkin aikana. Kuviossa 1 on esitetty camber-kulman muutos sisään- ja ulosjouston aikana. Maksimiksi sisään- ja ulosjoustoksi jokaisessa simulaatiossa määritettiin SusProg3D-ohjelmaan 40 mm ja maksimiksi korin kallistuskulmaksi 4 °.



Kuvio 1. Camber-kulma joustoliikkeessä.

Kuviosta 1 nähdään camber-käytöksen olevan hyvin lineaarista ja camber-kulma muuttuu sisäänjoustossa negatiivisempaan suuntaan ja tämä on myös toivottu ilmiö.

Kuviossa 2 on esitetty camber-kulman muutos korin kallistuessa. Tällä simuloidaan kaarreajotilannetta, joten voidaan tutkia sisäkaarten tai ulkokaarten puolisen pyörän toimintaa.

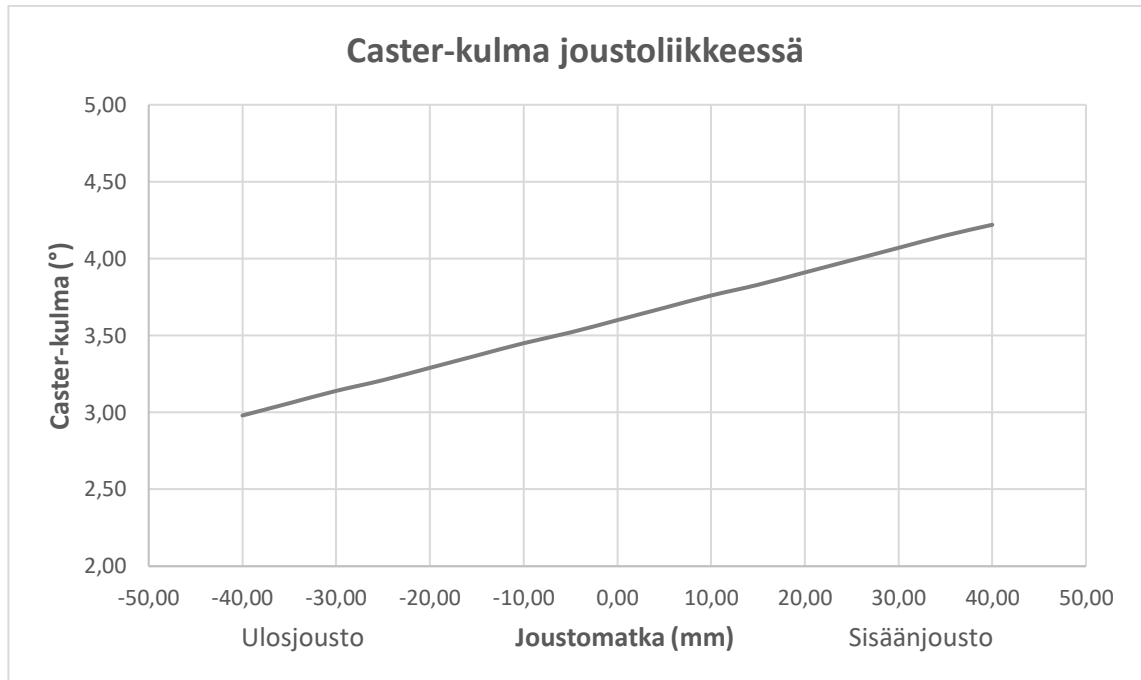


Kuvio 2. Camber-kulman muutos korin kallistuessa.

Kuviosta 2 nähdään ulkokaarten pyörän camber-kulman kääntyvän positiiviseksi, mikäli kori kallistuu kolmeen asteeseen tai enemmän. Positiivinen camber-kulma ulkokaarten pyörällä ei ole toivottavaa, koska pito-ominaisuudet heikkenevät tuolloin kaarteessa. Mikäli auton testausvaiheessa näin tulee tapahtumaan, tullaan staattisen tilan negatiivista camber-kulmaa lisäämään. Liiallista staattista camber-kulmaa tulisi välttää, koska jarrutuspito heikkenee tällöin.

3.4.2 Caster käyttäytyminen

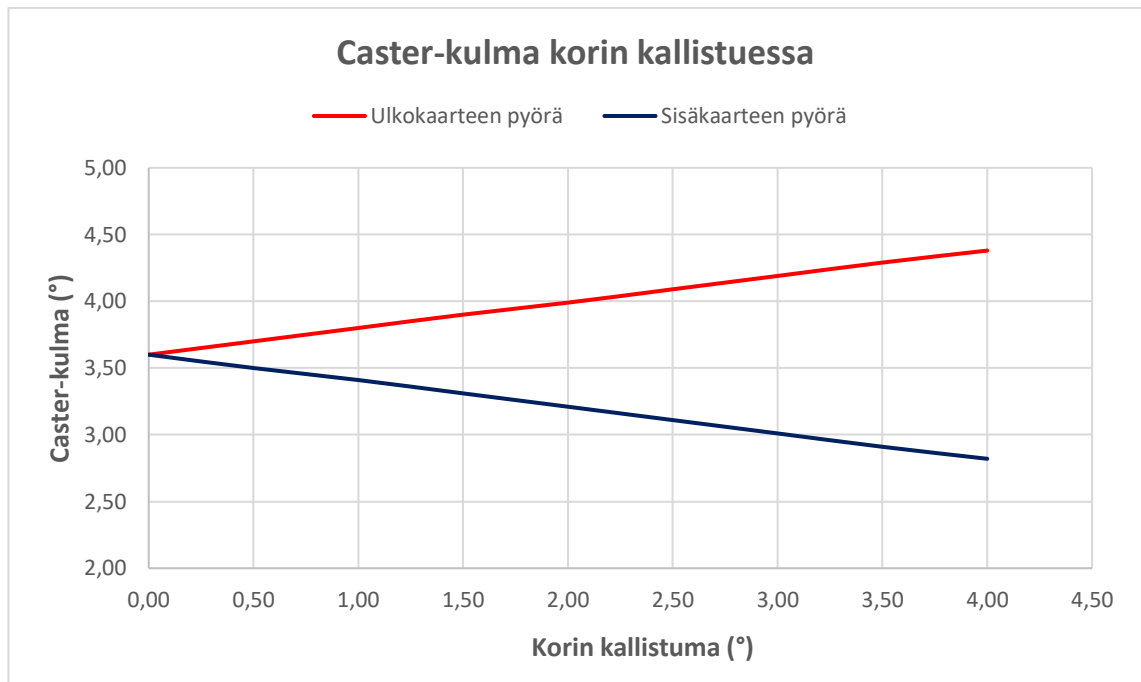
Myös caster-kulma pyrkii muuttumaan joustoliikkeen ja korin kallistusliikkeen aikana. Caster-kulman toivotaan muuttuvan hyvinkin lineaarisesti joustoliikkeen ja korin kallistuman aikana. Kuviossa 3 on esitetty caster-kulman muutos joustoliikkeen aikana.



Kuvio 3. Caster-kulma joustoliikkeessä.

Kuviosta 3 nähdään, että caster-kulma käyttäytyy hyvin lineaarisesti, eikä epätoivottuja kulman muutoksia synny. Caster-kulman muutokseen vaikuttaa tukivarsien sisempien nivelpisteiden sijainti. Esimerkiksi tukivarsien taaempien nivelpisteiden ollessa lähempänä toisiaan, caster-kulman käytös muuttuu jyrkemmäksi, ikään kuin ”aggressiivisemmäksi”.

Kuviossa 4 on esitetty caster-kulman muutos korin kallistuessa. Myös korin kallistuessa caster-kulman halutaan käyttäytyvän lineaarisesti.

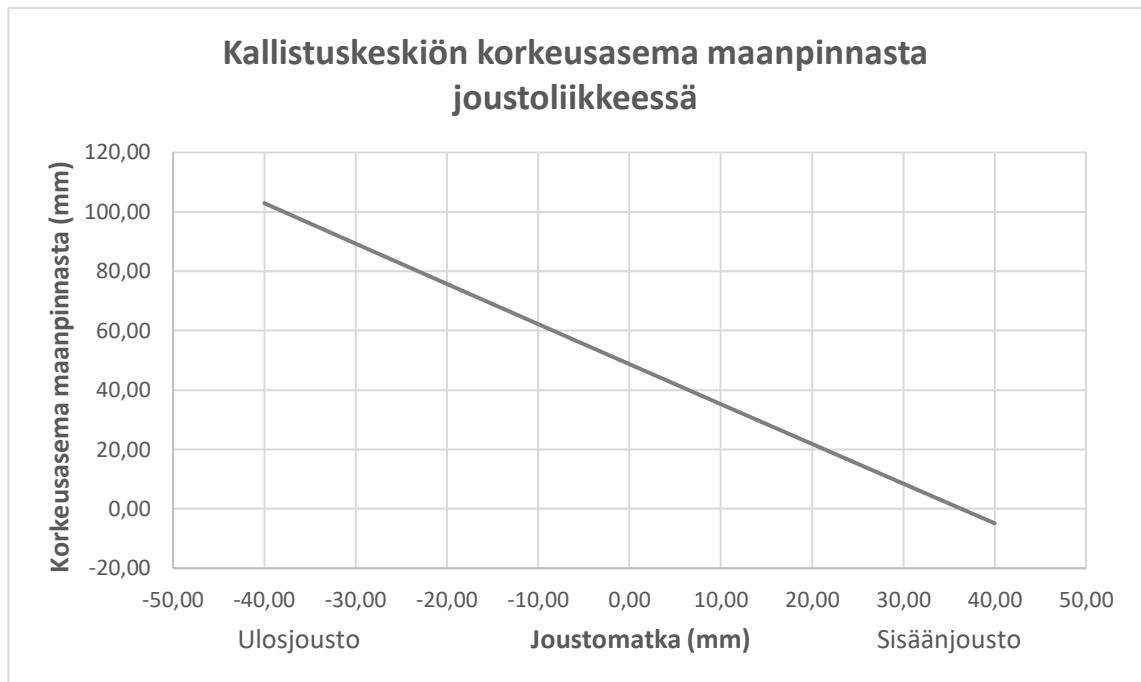


Kuvio 4. Caster-kulma korin kallistuessa.

Kuviosta 4 nähdään caster-kulman käyttäytyvän korin kallistuessa toivotulla tavalla hyvin lineaarisesti.

3.4.3 Kallistuskeskiön käyttäytyminen

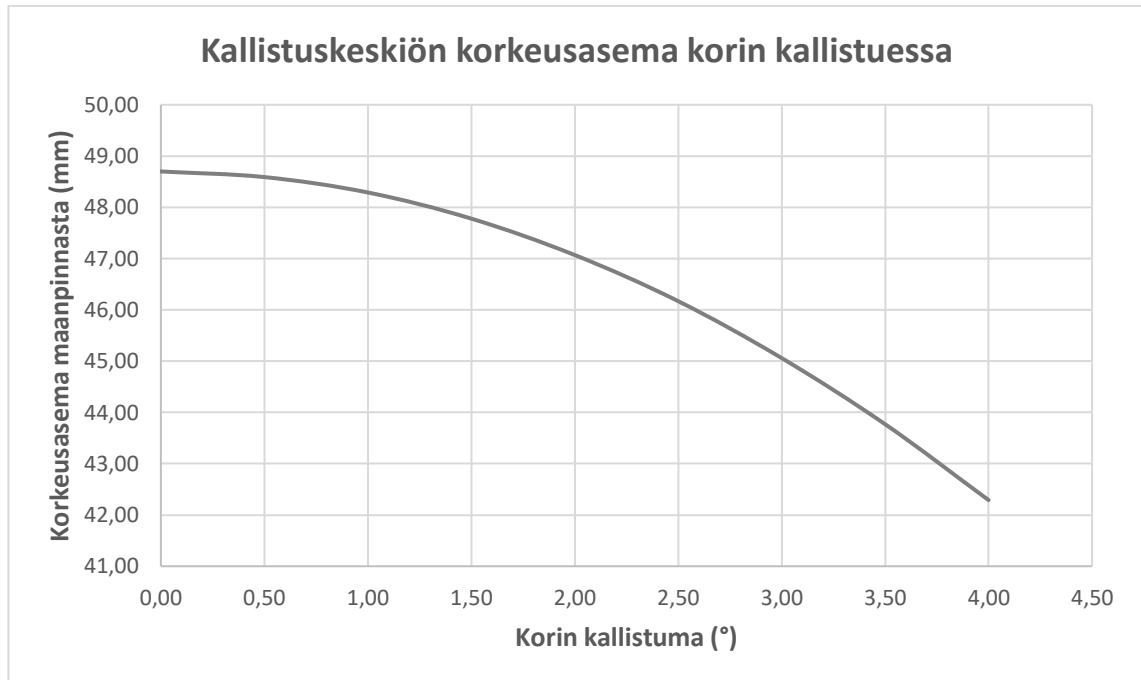
Kallistuskeskiön asema muuttuu myös joustoliikkeen ja korin kallisteluliikkeen aikana. Kallistuskeskiön aseman haluttaisiin liikkuvan mahdollisimman vähän korkeussuuntaisesti ja sivuttaissuuntaisesti. Kuviossa 5 on esitetty kallistuskeskiön korkeusasema maanpintaan nähden joustoliikkeen aikana.



Kuvio 5. Kallistuskeskiön korkeusasema maanpinnasta joustoliikkeen aikana.

Kuviosta 5 nähdään, että suurella sisäänjoustolla kallistuskeskiön asema menee maanpinnan alapuolelle. Kallistuskeskiön etäisyys painopisteestä kasvaa, joka aiheuttaa korin suurempaa kallistelua. Kaarreajotilanteessa sisäänjoustoa tässä autossa ei kuitenkaan pitäisi olla niin paljoa, että kallistuskeskiö olisi maanpinnan alapuolella. Tarvittaessa ajokorkeutta pystytään säätämään säädettävien työntövarsien avulla.

Kuviossa 6 on esitetty kallistuskeskiön korkeusasema maanpinnasta korin kallistuessa. Korin kallistuessa kallistuskeskiön ei tulisi mennä maanpinnan alapuolelle ja olisi toivottavaa, että kallistuskeskiön asema muuttuu mahdollisimman vähän.



Kuvio 6. Kallistuskeskiön korkeusasema korin kallistuessa.

Kuviosta 6 nähdään, että kallistuskeskiön korkeusasema korin kallistuessa muuttuu erittäin vähän. Neljän asteen kallistumassa korkeusasema muuttuu noin 7 mm ja tämä tulos on erittäin hyvä.

Korin kallistuessa kallistuskeskiön asema muuttuu myös sivuttaissuunnassa. Sivuttaissiirtymän halutaan pysyvän mahdollisimman pienenä ja siirtymän lineaarisena. Kuviossa 7 on esitetty kallistuskeskiön sivuttaissiirtymä auton keskilinjalta korin kallistuessa.

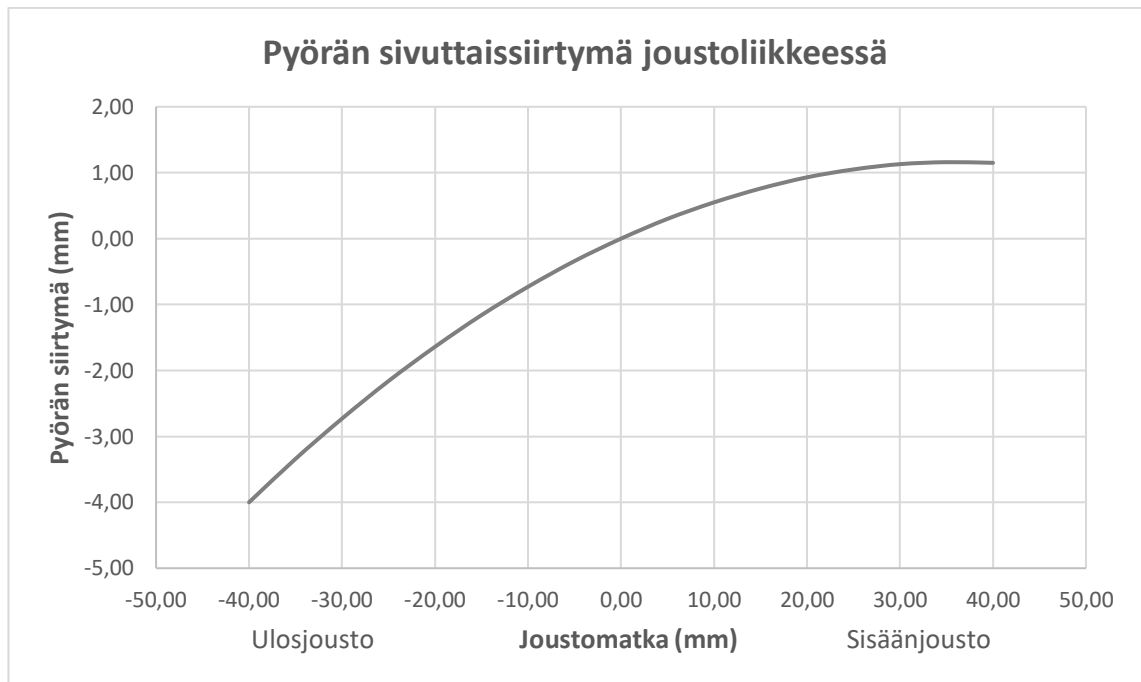


Kuvio 7. Kallistuskeskiön sivuttaissiirtymä keskilinjalta korin kallistuessa.

Kuviosta 7 nähdään, että kallistuskeskiön asema keskilinjalta muuttuu maltillisesti ja siirtymä on lineaarista.

3.4.4 Raideleveyden käyttäytyminen

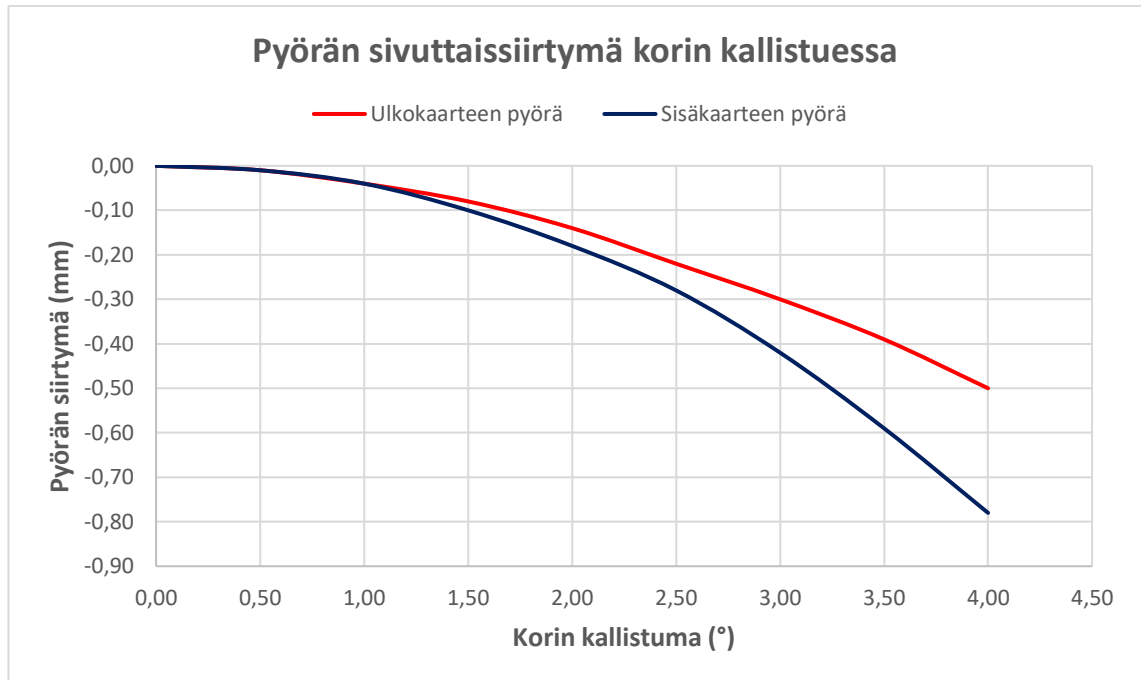
Pyörä pyrkii joustoliikkeen aikana liikkumaan sivuttaissuunnassa. Renkaan tuottamaa pitoa hukataan sivuttaissuuntaisessa liikkeessä ja tällaista ei missään tapauksessa haluta tapahtuvan. Kuviossa 8 on esitetty yhden pyörän sivuttaissiirtymä joustoliikkeen aikana. Raideleveyden muutos on luonnollisesti kaksi kertaa yhden pyörän sivuttaissiirtymä.



Kuvio 8. Pyörän sivuttaissiirtymä joustoliikkeessä.

Kuviosta 8 nähdään, että sisäänjouston aikana maksimi sivuttaissiirtymä sisäänjoustossa on hieman yli millimetrin ja sen ei uskota tuottavan ohjaukseen ongelmia, eikä olevan haitaksi renkaan pidolle. Negatiivinen lukema tarkoittaa sitä, että pyörän sivuttaissiirtymä tapahtuu kohti auton keskilinjaa, eli raideväli pienenee.

Sivuttaissiirtymää tapahtuu myös korin kallistuessa. Kuviossa 9 on esitetty ulkokaarten, sekä sisäkaarten pyörän sivuttaissiirtymä korin kallistuessa. Sivuttaissiirtymän halutaan olevan mahdollisimman vähäistä myös korin kallistuessa.



Kuvio 9. Pyörän sivuttaissiirtymä korin kallistuessa.

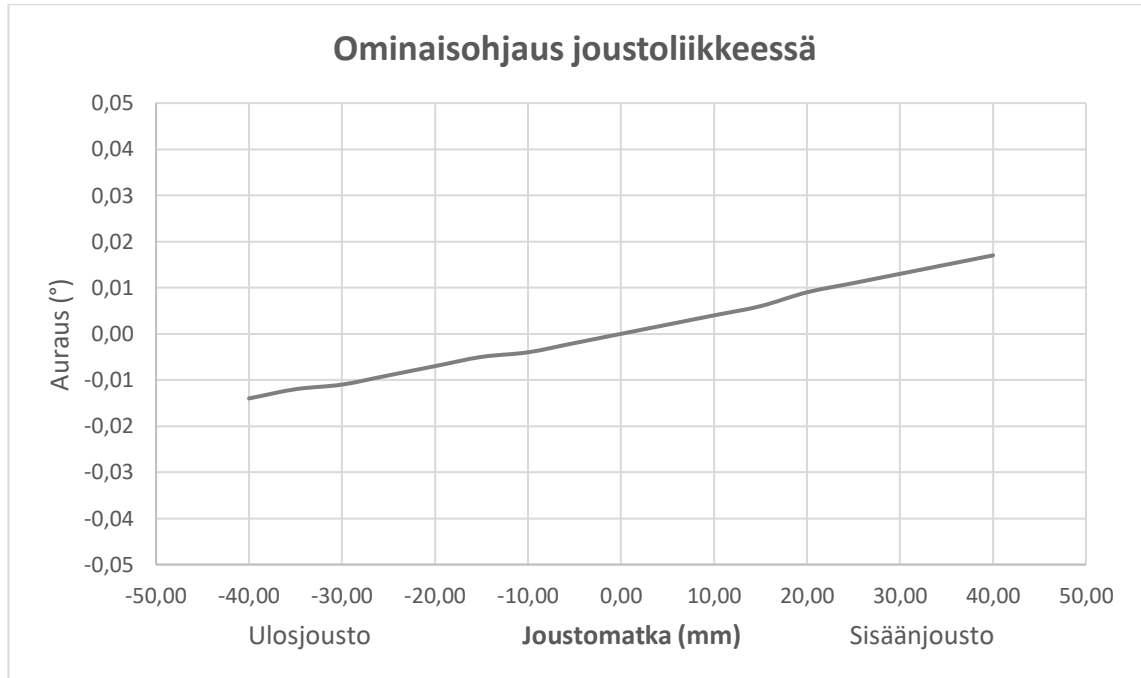
Kuviosta 9 nähdään, että pitoon enemmän vaikuttavan pyörän, eli ulkokaarten pyörän sivuttaissiirtymä pysyy kallisteluliikkeen aikana alle puolessa millissä. Vähäistä sivuttaissiirtymää pidetään hyvänä tuloksena.

3.4.5 Ohjauksen käyttäytyminen

Vaikka ohjausta ei saatu valmistettua ajan puitteissa, niin suunnitelma ohjauksesta kuitenkin tehtiin. Tässä kappaleessa esitellään suunnitellun ohjauksen käyttäytymistä.

Tärkein yksittäinen tekijä ohjausta suunnitellessa on ominaisohjauksen eliminointi. SusProg3D-ohjelmassa on toiminto, jolla ohjelma näyttää ihanteellisen ohjausvaihteen asemoinnin, jotta ominaisohjaus saadaan eliminoidua. Käytimme tätä toimintoa ja ohjelma antoi meille koordinaatit, joihin hyvin todennäköisesti pystymme ohjausvaihteen sijoittamaan ja eliminoimaan ominaisohjauksen lähes kokonaan. SusProg3D-ohjelma näytti ohjausvaihteen asemoinnin millin sadasosan tarkkuudella, ja kun pyöristimme koordinaatit millin

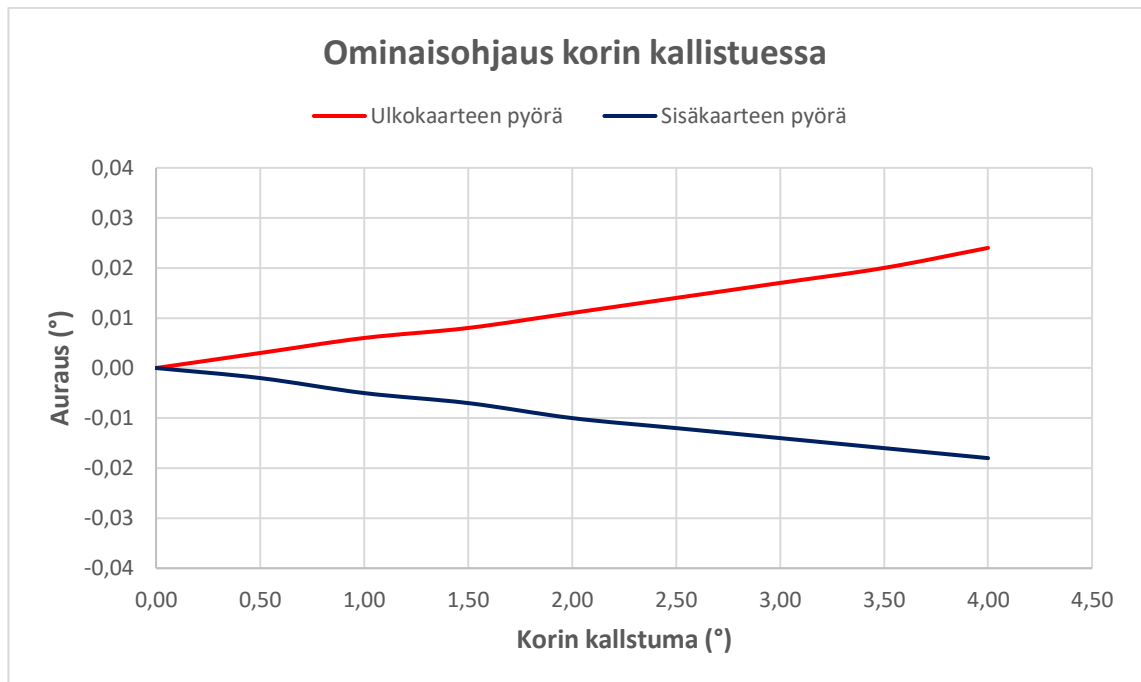
tarkkuuteen, joka oli meidän mittaustarkkuutemme, niin saimme ominaisohjauksen erittäin pieneksi. Kuviossa 10 on esitetty ominaisohjaus joustoliikkeen aikana.



Kuvio 10. Ominaisohjaus joustoliikkeessä.

Kuviosta 10 voidaan huomata ominaisohjauksen olevan hyvin vähäistä. Täydessä sisäänjoustossa pyörä kääntyy auraukselle hieman alle 0,02 °. Ulosjoustossa pyörä kääntyy negatiiviselle auraukselle, eli haritukselle hyvin vähäisen määrän. Mikäli ohjausvaihteen muutostyöt saadaan suoritettua suunnitelman mukaisesti, ollaan tähän tulokseen tyytyväisiä.

Ominaisohjausta voidaan tarkastella myös korin kallistuliikkeen aikana ja ominaisohjausta ei toivota tapahtuvan silloinkaan. Kaarreaajotilanteessa tapahtuva ominaisohjaus saattaa tehdä auton käytöksestä erittäin arvaamatonta. Kuviossa 11 on esitetty ominaisohjaus korin kallistuessa.



Kuvio 11. Ominaisohjaus korin kallistuessa.

Kuviosta 11 nähdään ominaisohjauksen olevan vähäistä ulko- ja sisäkaarteen puoleisilla pyörillä korin kallistuessa. Tämän ominaisohjauksen määrän ei uskota vaikuttavan auton käyttöön millään tavalla.

Kaartoharituksen osalta kääntövarsi suunniteltiin siten, että siinä on maltillisesti Ackermann-ohjausta, mutta kuitenkin hyvin lähellä paralleeli-ohjausta. Kuviossa 12 on esitetty kaartoharitus pyörän kääntöliikkeen aikana ja kuvion maksimiksi pyörän kääntökulmaksi on määritetty 30 °.

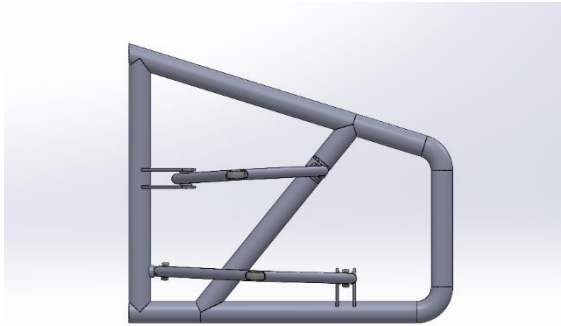


Kuvio 12. Kaartoharitus ohjausliikkeessä.

Kuviosta 12 voidaan todeta, että kaartoharituksen määrä on erittäin vähäistä. Kaartoharituksen määrä 20 ° kääntökulmalla on hieman alle puoli astetta ja tätä voidaan pitää vähäisenä tuloksena. Paralleelista-ohjauksesta ei voida puhua, mutta lähellä sellaista tämä on.

3.4.6 Anti-dive-ominaisuus jarruttaessa

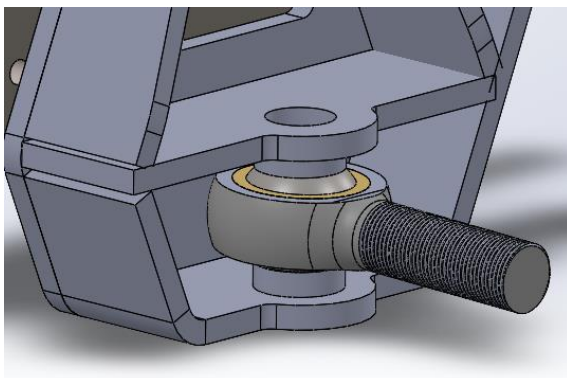
Tukivarret sijoitettiin siten, että ylemmän tukivarren taaempi nivel on 10 mm alempana etummaiseen niveleen verrattuna, kun taas alempi tukivarsi sijoitettiin siten, että taaempi nivel on etummaista niveltä 10 mm korkeammalla. Tällaisella tukivarsien sijoittelulla ja arvioidulla painopisteen korkeudella 420 mm anti-dive prosentiksi jarruttaessa määräytyy 22 %. Kuvassa 14 on havainnollistettu tukivarsien sisänivelten paikat sivuprojektioista.



Kuva 14. Tukivarsien asento.

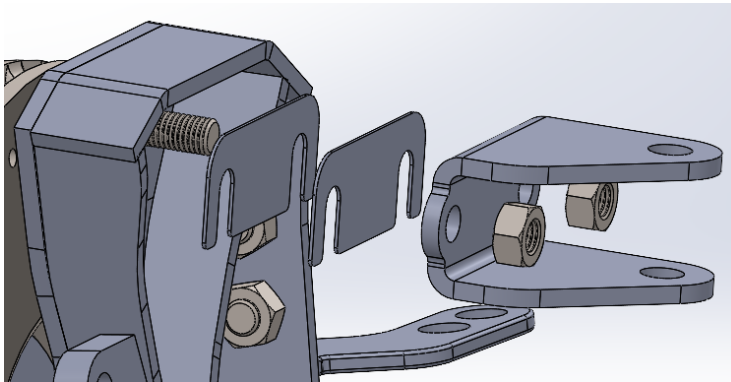
3.5 Olka-akselin 3D-mallinnus

Geometrian suunnittelun jälkeen siirryttiin suunnittelemaan olka-akselia levymäisistä kappaleista. Mallinnus tehtiin SolidWorks-ohjelmalla ja aloitettiin piirtämällä laakeripesä ja laakeripesän ympärille seinämä. Seinämää vahvistettiin ulkokehällä, johon myös alatukivarren teräskuulanivel kiinnitetään. Teräskuulanivelet kiinnitetään olka-akseliin holkkien väliin asemoiden, jotta tukivarsien liikevara kasvaa ja minimoidaan nivelen osumisen mahdollisuus olka-akseliin joustoliikkeen aikana. Alatukivarren kiinnitykseen piirrettiin vielä päälle levymäinen kappale, jotta teräskuulanivel kiinnittyy kahden levymäisen kappaleen ja kahden holkin väliin yhdellä pultilla. Kuvassa 15 on havainnollistettu alemman tukivarren kiinnitys olka-akseliin kahden holkin väliin.



Kuva 15. Alatukivarren teräskuulanivelen kiinnitys olka-akseliin.

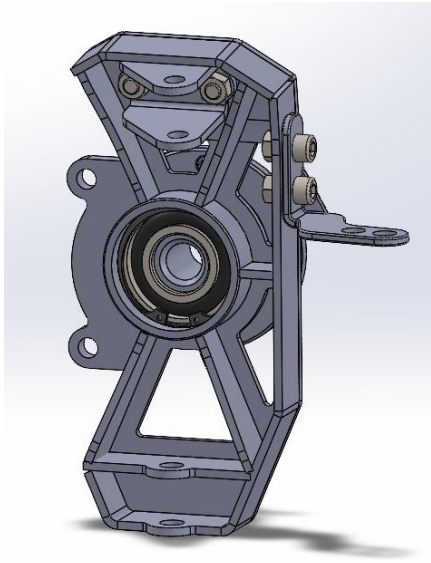
Ylätukivarren kiinnitys piirrettiin erilliseksi levymäiseksi kappaleeksi, joka pultataan kiinni olka-akseliin kahdella pultilla. Tämä rakenne siitä syystä, että geometriaa voidaan tarvittaessa muuttaa maltillisella työllä. Camber-kulman muutos voidaan toteuttaa formula-tyyppisellä säätölevy-tekniikalla, jossa vain yläkiinnikkeen pultteja hieman löysätään ja väliin voidaan sijoittaa tai välistä voidaan poistaa säätölevy camber-kulman muutosta varten. Kuvassa 16 on havainnollistettu ylätukivarren kiinnityskappale, sekä säätölevy-tekniikka.



Kuva 16. Ylätukivarren kiinnike ja säätölevy-tekniikka.

Ylätukivarsi kiinnittyy olka-akseliin samanlaisella kiinnitystavalla, kuin alatukivarsikin, eli levymäisen kappaleen väliin tulee teräskuulanivel ja kaksi holkkia. Nämä kiinnitetään pultilla, joka kulkee holkkien ja teräskuulanivelen lävitse.

Jarrusatulan kannakkeelle piirrettiin paksummasta materiaalista kiinnike, joka hitsataan suoraan laakeripesään. Laakeripesän ympärille piirrettiin vielä viisi erillistä vahvistavaa tukea. Lopuksi kääntövarsi piirrettiin erikseen kahdella pultilla pultattavaksi kappaleeksi. Kääntövarressa on raidetangolle kaksi erillistä kiinnitysmahdollisuutta, jotta ohjausta voidaan tarvittaessa nopeuttaa. Kuvassa 17 on mallinnettu kokoonpano olka-akselista levymäisillä kappaleilla.



Kuva 17. Olka-akselin kokoonpano.

3.6 Olka-akselin prototyypin 3D-tulostus

Mallinnuksen jälkeen olka-akselista tehtiin kolmiosainen 3D-tuloste, johon jarrusatulaa ja tukivarsia sovitettiin. Tuloste tehtiin PLA-muovista sen helpon tulostettavuuden vuoksi. Kestävyyttä tulosteelta ei vaadittu, joten PLA-muovi soveltui tulosteeseen hyvin. Tukivarsien ja jarrusatulan kannakkeen sovittaminen tulosteeseen sujui ongelmitta. Kuvassa 18 on 3D-tulostettu olka-akseli ilman kääntövartta.



Kuva 18. 3D-tulostettu olka-akseli.

3D-tulosteen jälkeen kappaleista tehtiin plasmaleikkaukseen sopivat DXF-tiedostot. Tiedostoja kertyi yhtä olka-akselia kohden 10 kappaletta. Viimeisessä vaiheessa tehtiin jokaisesta taivutettavasta levymäisestä kappaleesta tekniset piirustukset, joista nähdään taivutuskohdat ja taivutuskulmat.

4 Valmistus

Valmistus toteutettiin lastuavalla menetelmällä, hitsaamalla, tietokoneohjatulla särmäyspuristimella ja tietokoneohjatulla plasmaleikkurilla. Levymäiset kappaleet tehtiin plasmaleikkaamalla ja lieriömäinen laakeripesä sorvattiin manuaalisella sorvilla. Ennen hitsaamista joitakin levymäisiä kappaleita piti saada taivutettua tiettyyn kulmaan ja taivutukset tehtiin tietokoneohjatulla särmäyspuristimella. Valmistusmateriaalina laakeripesässä ja levymäisissä kappaleissa käytettiin S355-terästä. Levymäiset kappaleet olivat paksuudeltaan 5 mm.

4.1 Sorvaus

Laakeripesää alettiin valmistaa vedetystä S355-teräspyörötangosta, jonka halkaisija oli 100 mm. Aluksi akseliin tehtiin keskelle reikä sorvissa poranteriä käyttäen ja sitten laakeripesän sorvaus aloitettiin laakerille sopivaan mittaan laakerivälitys huomioiden. Laakeripesä sorvattiin mitoiltaan siten, että kanta-auton vastaavaa tarvikelaakeria pystytään käyttämään kokoonpanossa. Laakeripesään jätettiin kaulus ja sorvattiin myös sopiva ura lukitusrenkaalle, jotta laakeri ei pääse liikkumaan sivuttaissuuntaisesti. Laakeripesän ulkohalkaisija sorvattiin sopivaan mittaan ja katkaistiin tämän jälkeen vannesahalla. Lopuksi laakeripesän pinnat siistittiin sorvissa. Kuvassa 19 sovitetaan lukitusrengasta laakeripesän sorvattuun uraan.



Kuva 19. Laakeripesän sorvausta.

4.2 Särmäys ja hitsaus

Muutamia plasmaleikattuja kappaleita piti taivuttaa kokoonpanoon sopiviksi. Taivutukset suoritettiin taivutettavan levyn ulkomittojen mukaisesti, jotka syötettiin suoraan tietokoneohjattuun särmäyspuristimeen. Ennen kuin olka-akselin kappaleita aloitettiin särmäämään, haluttiin varmistua siitä, että särmäykset onnistuvat. Näin ollen leikkasimme levyleikkurilla olka-akselin kappaleita vastaavia levyjä ja särmäsimme nämä muodoiltaan sellaisiksi, että sopivuus olka-akseliin on erinomainen. Muutamien harjoituskappaleiden jälkeen saimme särmäykset onnistumaan ja olimme valmiita särmäämään myös olka-akseliin tulevat kappaleet.

Särmäysten jälkeen osat voitiin hitsata kiinni toisiinsa. Hitsaukset suoritettiin TIG-hitsaamalla. Hitsauksen ajaksi laakeripesään prässättiin sovitelaakeri, jotta laakeripesä ei pääse lämmön vaikutuksesta muuttamaan muotoaan. Kuvassa 20 on kokoonpantu valmis olka-akseli asetettu vaa'alle ilman laakeria ja pyörännapaa.



Kuva 20. Olka-akseli vaa'alla.

Kuvasta 20 nähdään olka-akselin massa, joka on 3245 grammaa. Massan vähyyteen oltiin positiivisesti yllättyneitä. Vertailukappaleeksi mainittakoon, että Opelin alkuperäinen valettu kappale oli massaltaan 3590 grammaa. Vertailussa toki pitää huomioida se, että autot ovat kokonaismassaltaan täysin eri luokkaa.

5 Pohdinta

Todellinen käsitys työn onnistumisesta saadaan vasta, kun autoa on päästy testaamaan radalla. Mikäli joku ominaisuus ei tule toimimaan halutulla tavalla, pystytään kokoonpanoa säätämään teräskuulanivelistä tiettyynajaan asti. Mikäli teräskuulanivelien säätövara ei ole tarpeeksi suuri, voidaan tiettyjä komponentteja simuloida ja valmistaa uudelleen.

Ohjauksen osalta valitettavasti pitävää dataa ei tähän opinnäytetyöhön saatu aikaan, koska ohjausvaihteen muutostyöt olivat edelleen kesken opinnäytetyötä tehdessä. Mikäli kuitenkin pystytään jo tehtyä suunnitelmaa noudattamaan ja muokkaustyöt onnistuvat, ollaan tyytyväisiä siihen. Ohjausvaihteen valmistuessa siitä saatava data aiotaan simuloida SusProg3D-ohjelmalla tämän opinnäytetyön ulkopuolella. Ohjausvaihteen ja sen sijoittelun tärkeimpänä huomiona olisi ominaisohjauksen minimointi.

Valmistusmateriaalina S355 teräs on kestävä ja helposti muokattavaa, mutta myös valitettavan painavaa. Optimalisempi valmistusmateriaali olka-akselille olisi ollut alumiini. Alumiininen olka-akseli olisi varmasti saatu painoltaan hieman kevyemmäksi, mutta materiaalikustannukset olisivat olleet suuremmat. Tulevaisuudessa alumiinisen olka-akselin suunnittelua ja valmistusta ei ole poissuljettu.

6 Lopuksi

Komponentin suunnittelu tyhjältä pohjalta vaatii valtavan määrän suunnittelua ja simulointia. Kokemusta ei ollut siitä, että miten mikäkin kulma tai mitta vaikuttaa pyöräntuentaan ja sen toimintaan. Tästä syystä oli nojauduttava paljon teoriaan, koska käytännön kokemusta ei ollut. Simuloinnin avulla on mahdollista luoda hyvä perusta geometrialle ja sen kehittäminen jatkuu vasta, kun ensimmäiset testiajot on suoritettu.

Täydellisestä geometriasta on kai vaikea puhua, sillä tietyn ominaisuuden optimointi ja muokkaaminen voi tehdä jostakin toisesta ominaisuudesta selvästi haluttua huonomman. On tarkoin määriteltävä ominaisuuksille tärkeysjärjestys ja sen mukaan on usein tehtävä kompromisseja ominaisuuksien välillä.

Työ kokonaisuudessaan oli erittäin mielenkiintoinen ja ennen kaikkea se oli opettava. Työn kannalta oli ehdottoman tärkeää käyttää jousitusgeometriaan tarkoitettua simulointiohjelmaa. Ilman simulointia geometriasta on lähes mahdotonta saada johdonmukaisesti toimivaa.

Lähteet

Adams, H. 1992. Chassis Engineering: Chassis design, building & tuning for high performance handling. New York: The Berkley Publishing Group

JOES Racing Products 2021. Bump Steer & Bump Stops. Viitattu 15.11.2022.
<https://www.joesracing.com/bump-steer-bump-stops/>

Karhima, M. 2008. Auto- ja kuljetusalan perusoppi 1: Auton käytön ja rakenteen perusteet. Helsinki: Otava

Mauno, E. 1991. Virittäjän käsikirja 2: Alusta. 1. painos. Helsinki: Alfamer Oy

Milliken, W. and Milliken, L. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. SAE Publications Group

Smith, C. 1978. Tune to Win: The art and science of race car development and tuning. California: Aero publishers, Inc