

Joni Haapasalo

MacPherson-jousitukirakenteen tutkimista omarakenteisessa ajoneuvossa

Opel Astra G -auto unlimited time attack -sarjassa

MacPherson-jousitukirakenteen tutkimista omarakenteisessa ajoneuvossa

Opel Astra G auto -unlimited time attack -sarjassa

Joni Haapasalo
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Konetekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Ajoneuvo- ja työkonetekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Joni Haapasalo

Opinnäytetyön nimi: Tutkimus MacPherson-jousitukirakenteesta omavalmisteisessa ajoneuvossa

Työn ohjaaja: Janne Ilomäki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2024

Sivumäärä: 34

Tässä opinnäytetyössä keskitytään tutkimaan MacPherson-jousitukirakenteen säätöjen vaikutusta ohjausgeometriaan. Opinnäytetyön tilasi Tervola Racing Team rakenteilla olevaan ajoneuvoon. He halusivat tutkimustulosta ajoneuvon jousitukirakenteen säädöistä. Opinnäytetyö keskittyy tutkimaan ajoneuvon ohjaavan akselin ohjausgeometriaa. Tavoitteena on ollut tuottaa dataa pyöränkulmista, jotta ajoneuvo voidaan säätää optimaalisiin säätöihin ennen, kun autolla lähdetään ajamaan radalla. Toteutustapana on ollut ajoneuvon mittauksia, josta on rakennettu suunnitteluohjelmaan malli. Mallista on otettu datapisteistä mittauksia, ja mittauksista on piirretty kuvaajia. Tietoperustana on käytetty vahvistettua teoria kirjallisuutta. Tutkimusmenetelmäksi valittiin kvalitatiivinen tutkimusmenetelmä, koska tutkimuksesta on tarkoitus tuottaa yksi tai useampi tutkimustulos. Käytettyä aineistoa on muun muassa Boschin autotekninen käsikirja ja Millikenien kilpa-auton ajoneuvodynamiikka.

Tutkimuksen aikana jo mittausvaiheessa esiin nousi jousitukirakenteen rakenteellinen virhe, joka epävakautti rakennetta ja rengaskulmia. Rakenteellisen virheen mukaan luettuna rengaskulmat käyttäytyivät oletetulla tavalla, vaikka epävarmuutta käyttäytymiselle on olemassa. Johtopäätöksenä tutkimukselle on, ettei ajoneuvolle voi varmuudella tehdä optimaalista säätöhaarukkaa, koska ajettavan radan rataprofiili vaikuttaa olennaisesti ajoneuvon jousituksen säätöihin. Tutkimuksen kehitysehdotuksena on kolmiotukivarren muuttaminen jäykäksi rakenteeksi nivelöidyn rakenteen tilalle. Työntulos on ajoneuvolle tuotettu säätöprofiili, joka on suuntaa antava, koska ajoneuvosta ei ole saatavilla tarvittavia tietoja.

Asiasanat: Pyöränkulmat, ohjausgeometria, kilpa-auto, MacPherson-pyöräntuenta, Time attack

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Mechanical engineering
Option of automotive and machinery engineering

Author: Joni Haapasalo
Title of thesis: Study of MacPherson strut suspension in self-made race car
Supervisor: Janne Ilomäki
Term and year when the thesis was submitted: Fall 2024
Number of pages: 34 pages

This thesis is studying MacPherson strut suspension on self-made race car. Study was to study steering geometry and wheel alignment on steering axle. The subject of this study was Opel Astra G, which was heavily modified to meet builder's requirements for the car. The client for this thesis is Tervola Racing Team, which builds the car. The car is modified for time attack competitions in unlimited class in Finland. The class doesn't have strict rules for cars, so the client can change suspension components and modify car chassis. The client has changed front wheel drive to rear wheel drive and suspension to accommodate those changes. Changed components were steering knuckle and suspension struts from BMW E36.

The Study has a goal to come up with a conclusion, where the optimal adjustments are and collect data on how wheel alignment behaves in dynamic scenarios. The study was made with qualitative research methods, as the thesis has quantitative aspects in data collection. The result of this thesis was an adjustment profile, which is theoretical because relevant data isn't available for this study. And conclusion for this study is that racetrack profile dictates mostly optimal adjustment window on the car.

Keywords: Alignment, steering geometry, race car, MacPherson suspension, time attack

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEORIA OHJAUSGEOMETRIAAN	8
2.1	Rengas.....	8
2.2	Pyöränkulmat	8
2.2.1	Camber-kulma	8
2.2.2	Caster-kulma.....	9
2.2.3	Aurauskulma	10
2.3	Ohjaus.....	11
2.3.1	Ackermann-kääntöteoria (ohjausharitus)	11
2.3.2	Instant Center ja Instant Axis	12
2.3.3	Kallistuskeskiön korkeus	13
3	RAKENTEEN TUTKIMINEN	14
3.1	Lähtökohta.....	14
3.2	Camber-kulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa.....	15
3.3	Aurauskulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa	18
3.4	Caster-kulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa	21
4	TYÖANALYYSI	25
4.1	Säätöprofiili.....	26
5	POHDINTA	31
5.1	Työn suorittamisen pohdinta	31
5.2	Työn lopputuloksen pohdinta.....	32
5.3	Jatkotutkimuksien kohteita	33
	LÄHTEET.....	35

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheen ideointi lähti työntilaajan ja opinnäytetyön tekijän välisistä keskusteluista. Ensimmäinen kontakti Tervola Racing Teamin rakenteilla olevaan autoon oli tallin omistajan kysymyksellä: ”Onko mahdollista rakentaa mittauslaitteita, jotta saadaan mitattua jousituksen joustomatkaa? ”. Tästä keskustelu siirtyi auton rakenteeseen. Keskusteluihin tuli esille ohjausgeometria ja ajoneuvon aerodynamiikka. Aluksi sovittiin opinnäytetyön aiheeksi ajoneuvon ohjausgeometrian ja aerodynamiikan todentaminen. Aihetta rajattiin tiukasti, ja tässä opinnäytetyössä keskitytään pelkästään ajoneuvon ohjausgeometriaan ohjaavassa akselissa.

Opinnäytetyö keskittyy tutkimaan ajoneuvon muutosten jälkeistä optimaalista ohjausgeometriaa MacPherson-jousitukirakenteessa. Työssä haettiin optimaalista säätöhaarukkaa, jossa ajoneuvo käyttäytyy neutraalisti. Opinnäytetyössä ohjausgeometria rajattiin koskemaan etujousitusta. Työ tutki ainoastaan ajoneuvon poikittaista painon siirtoa. Työn tarkoitus oli tuottaa dataa ajoneuvon etuakselin käyttäytymisestä kaarreaajossa ja hakea ohjausgeometrian neutraalipistettä jousituksesta.

Ajoneuvon fyysistä mitoista rakennettiin suunnitteluohjelmaan malli, jonka mukaan rengaskulmia tilastoitiin Microsoft Excel -tiedostoon. Excelissä tilastoidusta datasta määritettiin kuvaajia rengaskulmien muutoksista, jota työn tilaaja on pyytänyt. Pyöräntuennan tukivarret on kiinnitetty ajoneuvon koriin ja olka-akseleihin pallonivelillä, ja niissä on ± 20 mm säätövaraa muuttaa tukivarsien pituuksia ja -muotoa. Joustovaraa ajoneuvossa on 50 mm. Auton akselisto perustuu BMW E36 -sarjan ratkaisuihin. Opinnäytetyössä käytettiin työkaluina Microsoft Excel ja Autodesk Fusion 360 -ohjelmaa.

Opinnäytetyön kohteena on Tervola Racing Teamin Opel Astra G, jota on valmistettu vuosien 1998–2004 välillä. Auto on neljäovinen sedan, jossa 4-sylinterinen bensiini- tai diesel moottori on asennettu poikittaisasennuksena etuvetoiseen voimansiirtoon. Autossa pyöräntuenta on toteutettu etuakselilla MacPherson-jousituennalla ja taka-akselilla osittaisella yhdyspalkkirakenteella. Opinnäytetyön tilaajan toimesta ajoneuvoa on lähdetty muuttamaan etuvetoisesta takavetoiseksi ajoneuvoksi. Etuakselin muutososat on otettu BMW:n E36 -sarjan MacPherson-jousituennasta, josta olka-akseli ja jousituki ovat varsinaisia muutososia.

Kilpailuluokka, johon auto rakennetaan, on AKK:n säätöluokkaan Time Attack -sarjaan, jossa on eri kilpailuluokkia. Autoa on lähdetty muokkaamaan unlimited-luokkaan, jossa ajoneuvoa voidaan

muokata rajattomasti. Säännöissä on kuitenkin rajoitteita, jotka rajaavat niin, ettei talli voi rakentaa täysin omarakenteista ajoneuvoa, vaan se täytyy perustua jo olemassa olevaan ajoneuvoon. (4, s. 9).

2 TEORIA OHJAUSGEOMETRIAAN

2.1 Rengas

Renkaan tehtävä on tuottaa autoon voimia ja momenteja, jotka kohdistuvat ajoneuvoon monella tavalla. Kosketuspinta renkaan ja tien välillä tarjoaa pito-, jarrutus- ja kaarreajon -voimat. Voimiin vaikuttavat renkaan kuormitus, sekä tien ja renkaan välinen kitkakerroin. Rengas tuottaa tarvittavat voimat ajoneuvon hallittavuuteen ja vakauteen vastustamalla sivuttaisvoimia, esimerkiksi tienpinnan muutoksia tai tuulikuormaa.

Renkaassa on kulutuspinnoissa yleensä kuviointi, jolla on vaikutusta renkaan ominaisuuksiin. Kuvioinnin suurin tehtävä on siirtää vettä pois renkaan kontaktipinnalta. Samalla kuviointi vaikuttaa renkaan adheesioon tienpintaan, mekaaninen pito. Lisäksi renkaaseen voi kohdistua lisäkuormitusta aerodynaamisesta kuormituksesta. (1, s. 14).

2.2 Pyöränkulmat

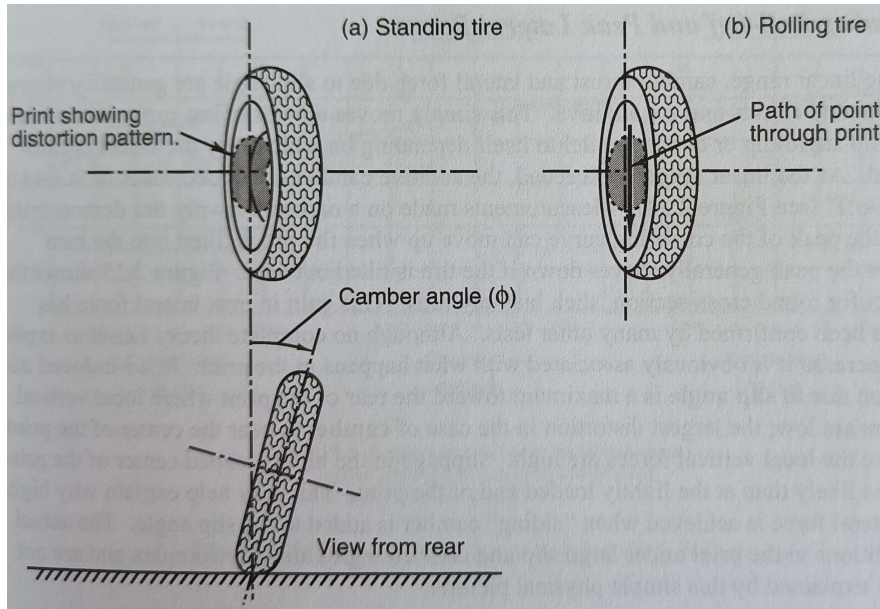
2.2.1 Camber-kulma

Camber kulma kertoo ajoneuvon korin keskilinjan ja renkaan keskilinjan välisen kulman, joka projisoituessa z-y-tasoon, kuva 1. Camber-kulma mittaa ajoneuvon renkaan sivuttaiskulmaa kohtisuoraan tienpinnan mukaisesti. Kallistuskulma ei ole vakio ajoneuvon korin kallistuessa tai jousituksen jousaessa. Kulma on positiivinen renkaan kallistuessa ulospäin korista, ja negatiivinen kallistuessa sisäänpäin. (2, s. 933.)

Camber-kulmallinen rengas tuottaa sivuttaista voimaa kallistuksen suuntaan. Kun tämä voima tuotetaan nolla murtokulmassa, tätä voimaa kutsutaan camber-työnnöksi. Lateraalista voimakomponenttia voi tapahtua camberin johdosta muissakin murtokulmissa, kuin nollassa.

Camber-työntö syntyy radiaalirenkaan sivuseinämän tai rengaskuvioinnin muodonmuutoksista, joka näkyy kuvassa 1. Radiaalirenkaissa camber-voimat nollautuvat kulman ollessa yli 5°. Kilparenkaissa maksimaalinen camber-voima saadaan pienemmillä kulmilla. (1, s. 46–47). Camberilla

on ajoneuvoa ohjaavia ominaisuuksia. Kun rengas kallistetaan, se pyrkii vetämään ajoneuvoa siihen suuntaan mihin rengas on kallistettu. Radiaalirenkaille asteen camber-kulma tuottaa samalla sivuttaisvoimaa, joka on sama kuin $0,1^\circ$ ohjauskulmaa. Camber-kulman ja ohjauskulman välinen suhde on n. 10:1. Tällä logiikalla staattinen negatiivinen camber vaatii negatiivista aurasukulmaa, haritusta, ettei renkailla tule murtokulmaa (1. s.726–727.)



KUVA 1 Camber-kulma ja sen vaikutus renkaaseen (1, s. 47)

2.2.2 Caster-kulma

Renkaan ja kingpin-linja projisoidaan ajoneuvon keskitasolle. Kingpin-linja kallistuu caster-kulmalla. Caster on positiivinen, kun kulma on kohti ajoneuvon perää. Caster ei yleensä kulje renkaan keskipisteen kautta, vaan siinä on caster offsetia ajoneuvon perään kohti (2, s. 934.) Mac Pherson

jousitukirakenteessa kingpin-linja kulkee jousituen yläkiinnityspisteen ja alapallonivelen välissä, kuten kuvassa 2 on ilmaistu.

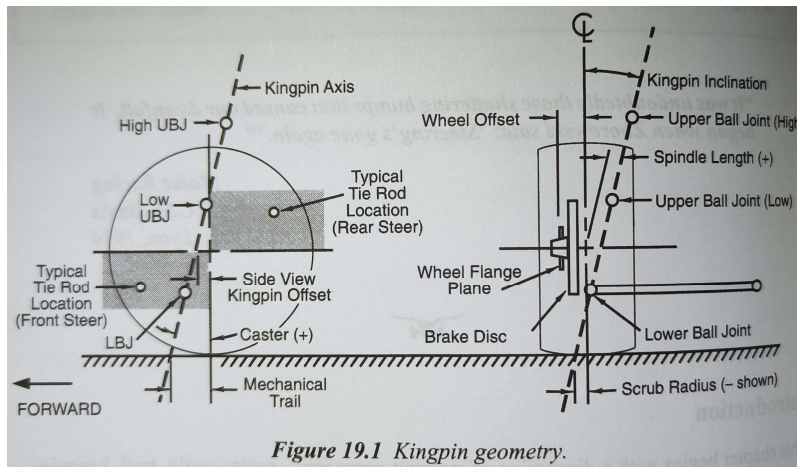
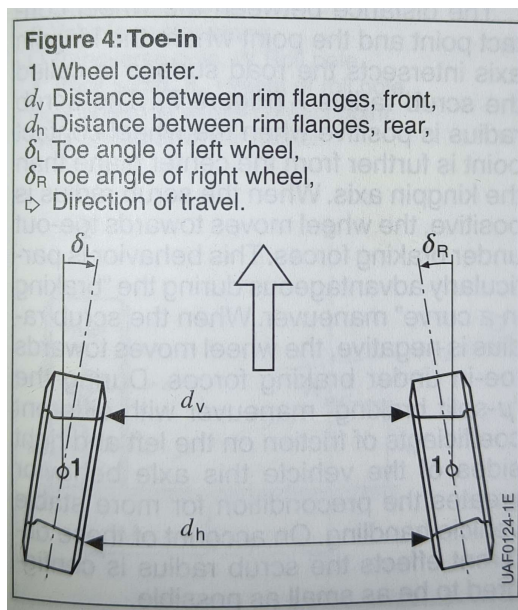


Figure 19.1 Kingpin geometry.

KUVA 2 Kingpin-geometria (1, s. 710)

2.2.3 Aurauskulma

Ohjauspyörää liikuteltaessa eturenkaat lähtevät liikkumaan samaan suuntaan, tämä vaikuttaa vasemman ja oikean renkaan aurauskulmaan. Aurauskulma on renkaan keskilinjan ja ajoneuvon keskilinjan välinen kulma tien pinnan mukaisessa tasossa (2, s. 932.) Aurauskulma ohjaavalla akselilla riippuu muista jousitusparametreista, kuten Ackerman-teoria, töyssyohjaus, hammastangon sijainti akselilla, sekä staattisesta ja dynaamisesta camberista. Minimaalinen aurauskulma parantaa ja rullausvastusta vähentää renkaiden kulumista, sillä renkailla ei ole murtokulmaa.

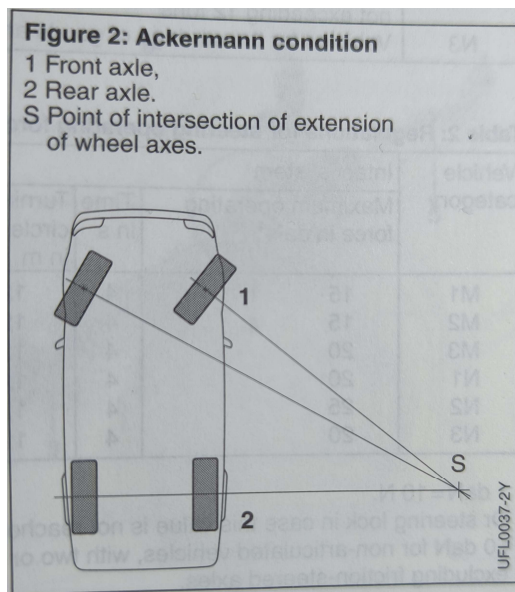


KUVA 3 Aurauskulman määritelmä (2, s. 933)

2.3 Ohjaus

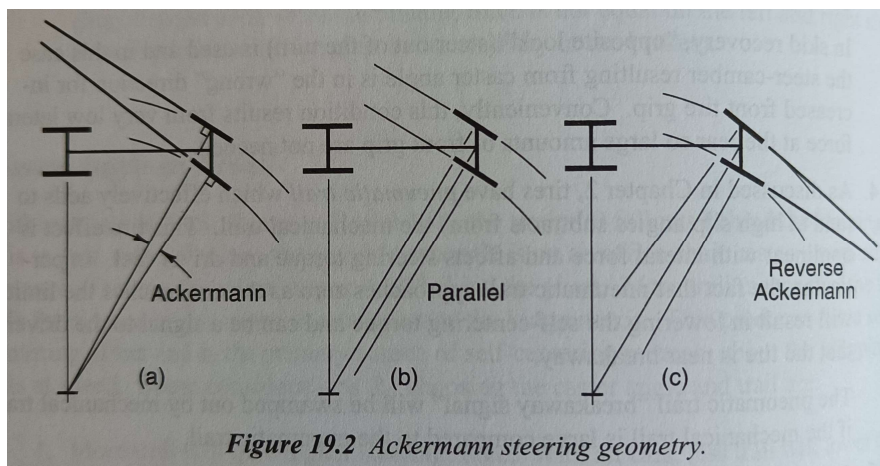
2.3.1 Ackermann-käätöteoria (ohjausharitus)

Ackermann -käätöteorian mukaan ohjaavien renkaiden kaartosäiden täytyy olla sama leikkauspiste taka-akselinjalla, tästä saadaan käätösäde ajoneuville, mikä näkyy kuvassa 4. Tämän takia ohjaavilla renkailla täytyy olla eri auras kulma, koska näillä renkailla on eri kaartosäde (2, s.1073.)



KUVA 4 Käätöteorian visualisoiminen (2, s. 1073).

Kun ohjausta lähdetään käätämään pois keskilinjasta, ohjauslaitteen rakenne määrittää pysyvätkö renkaat keskenään samansuuntaisina, vai lähtee toinen rengas käätymään enemmän kuin toinen. Tämä käyttäytyminen näkyy kuvassa 5.



KUVA 5 Käätöteorioiden eri muotoja (1, s. 712).

2.3.2 Instant Center ja Instant Axis

IC eli tukivarsilinjojen leikkauspiste, on samalla pyöräntuennan saranapiste, mikä näkyy kuvassa 6. Kolmiulotteisessa mallissa IC:t korvautuvat Instant Axisilla. Instant Axisilla voidaan kuvata olka-akselin liikettä verrattuna ajoneuvon koriin, joka on samalla laskennallinen pituus tukivarrelle. (1, s. 612.)

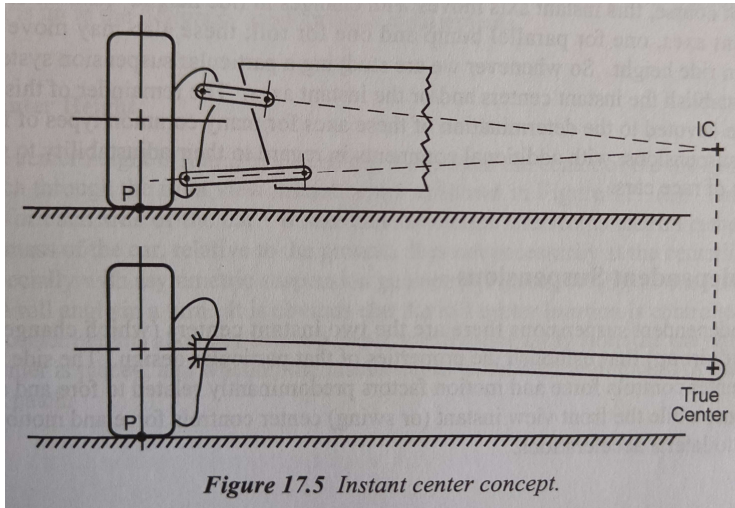


Figure 17.5 Instant center concept.

KUVA 6 IC teorian konsepti (1, s. 611).

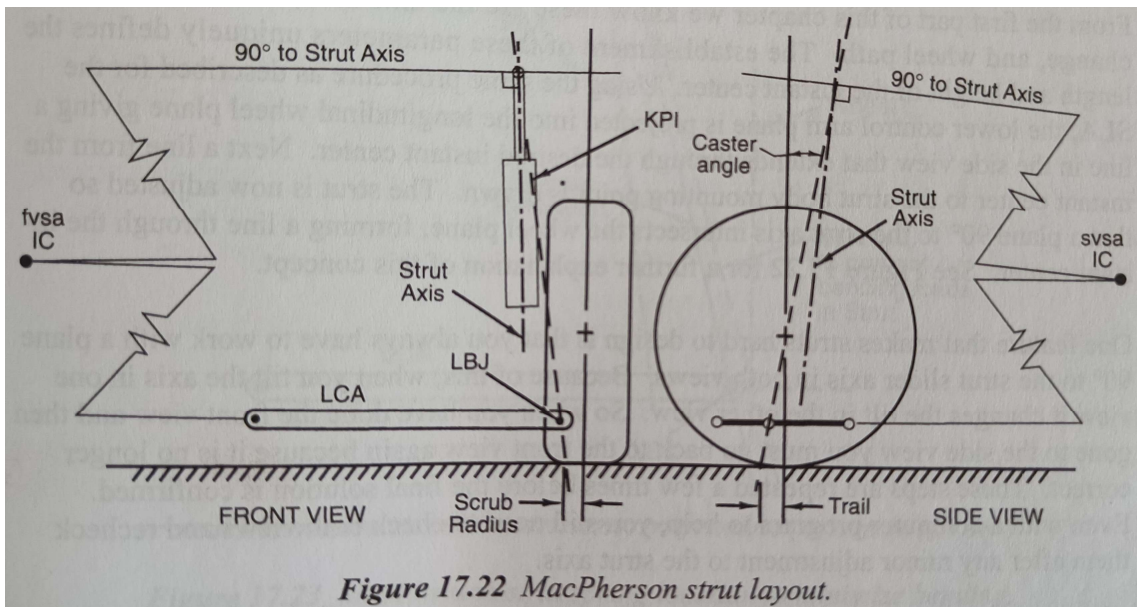
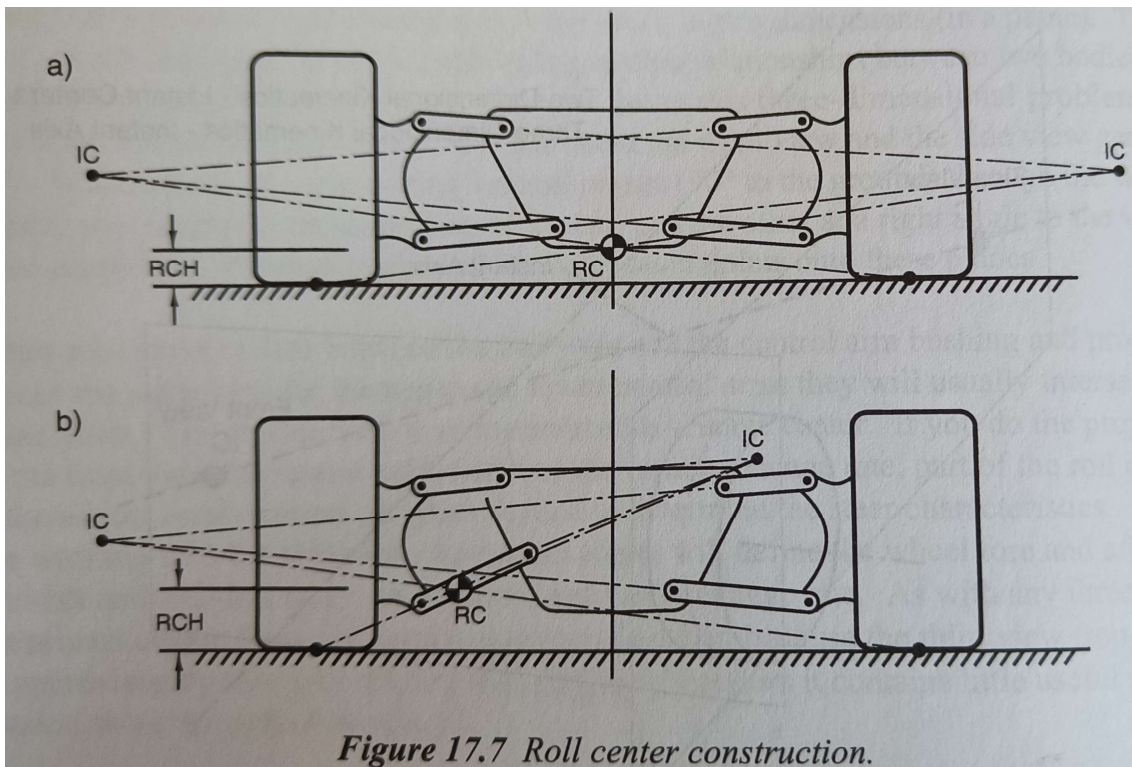


Figure 17.22 MacPherson strut layout.

Kuva 7 IC konsepti MacPherson-jousitukirakenteessa (1, s. 633)

2.3.3 Kallistuskeskiön korkeus

Kallistuskeskiö saadaan renkaan kontaktipinnan keskilinjän ja tukivarsilinjojen leikkauspisteen välisessä linjassa. Näiden linjojen leikkauspiste ajoneuvon keskilinjalla on kallistuskeskiö. Kallistuskeskiö ei välttämättä ole ajoneuvon keskilinjalla, jos jousitus on säädetty epäsymmetrisesti. Kallistuskeskiön sijaintiin vaikuttaa tukivarsilinjojen leikkauspisteen korkeus sekä leikkauspisteen etäisyys renkaasta. Kallistuskeskiö on voiman kiinnityspiste jousitetun ja joustamattoman massan välillä. Kallistuskeskiön ja ajoneuvon painopisteen välille syntyy momenttivarsi, joka pyrkii kallistamaan ajoneuvon koria, kun ajoneuvo on kaarteessa (1, s. 613–614.) Tämä momenttivarsi määrittelee, mihin suuntaan ajoneuvon kori lähtee kallistumaan kaarreaossa. Normaalisti ajoneuvoissa kallistuskeskiö on painopisteen alapuolella, joten kaarreaossa ajoneuvo lähtee kallistumaan kohti ulkokaarretta keskipakovoiman vaikutuksesta. Vastaavasti on mahdollista, että kallistuskeskiö on painopisteen yläpuolella. Tässä tapauksessa kaarreajon käyttäytyminen on päinvastainen, koska massa pyrkii pysymään lineaarisessa liikkeessään Newtonin ensimmäisen lain mukaan.



KUVA 8 Kallistuskeskiön määritelmän havainnointi (1, s. 614)

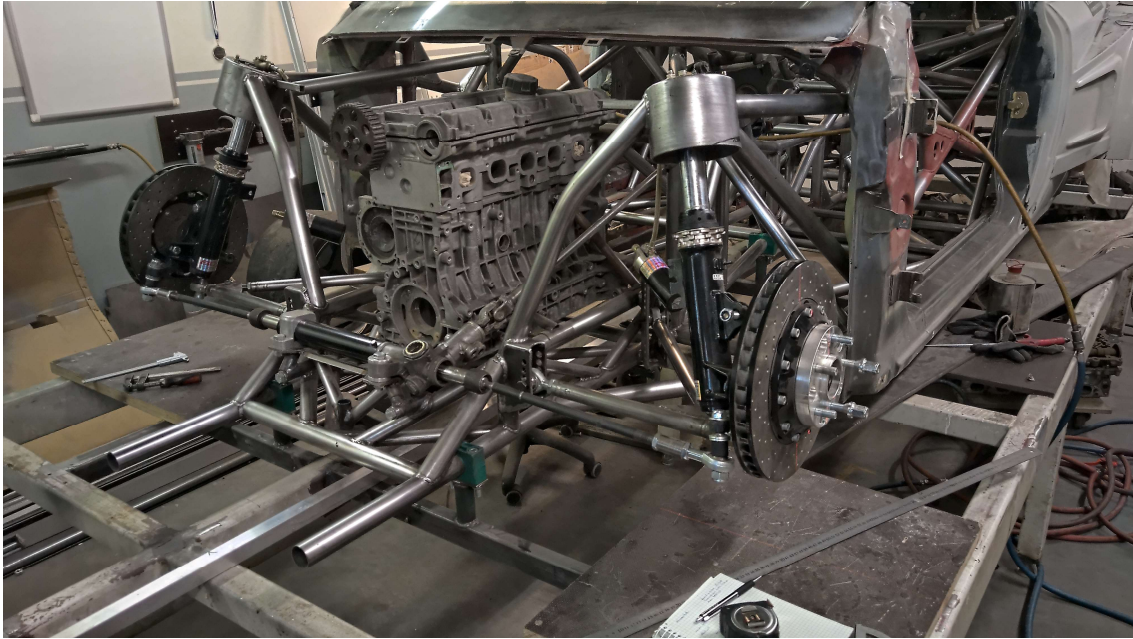
3 RAKENTEEN TUTKIMINEN

3.1 Lähtökohta

Rakennetta lähdettiin tutkimaan suunnitteluohjelmaan luodusta mallista. Malli on rakennettu mahdollisimman tarkaksi vastaamaan todellisuutta. Mittausepävarmuutta mallin rakentamiseen on olemassa, koska ajoneuvon mittaamiseen käytettiin rullamittaa ja lasertasoa, sekä vesivaakaa. Ajoneuvosta olisi voinut saada tarkempia mittaustuloksia korimittauslaitteistolla ja nelipyöräsäätölaitteistolla, mutta sellaisia laitteita ei ollut käytettävissä. Lisäksi dataa lähdettiin keräämään vasemmasta eturenkaasta ja pyöräntuennasta kuvan 9 ja 10 mukaisesta rakenteesta.



KUVA 9 MacPherson jousitukirakenne

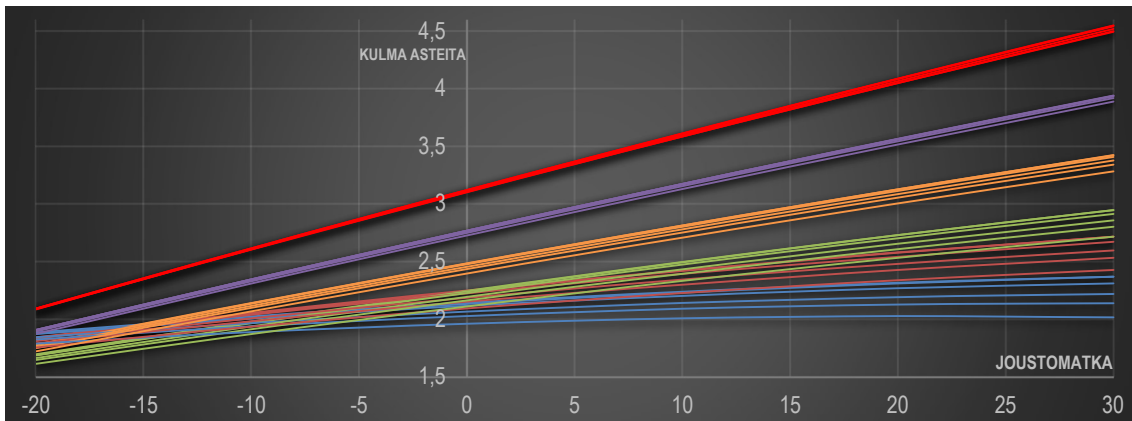


KUVA 10 Ajoneuvon keulan rakenne

3.2 Camber-kulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa

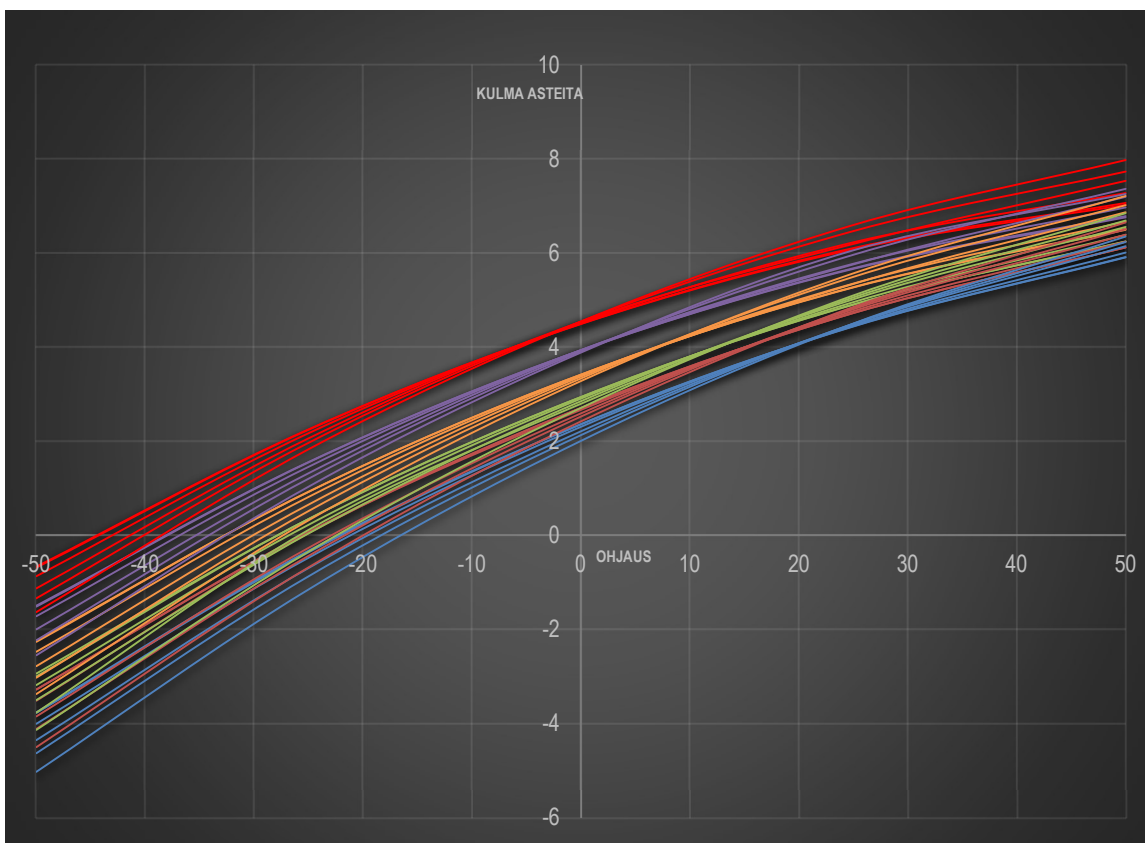
Aluksi tutkimuksessa lähdettiin ottamaan dataa yhden millimetrin joustomatkalta. Aikataulullisesti näin tarkkaa tutkimusta ei kyetä toteuttamaan, sillä kulmien tutkimiseen on varattu kaksi ja puoli viikkoa tutkimuksen aloituksesta. Siksi tutkimuksen tarkkuutta lasketaan viiden millimetrin datavälisiin, koska työhön käytettävä aika tilastointiin laskee kymmenykseen. Tätäkään tarkkuutta ei kannata toteuttaa tutkimuksessa, sillä sama tutkimustulos saadaan vielä harvemmalla datan keruuvälillä.

Datan tilastointi aloitettiin siten, että mallista kerättiin tilastoihin kolmiotukivarren kiinnityspisteiden muutosvälit ja niiden kombinaatiot. Tämän jälkeen tilastoidaan mallista mitattu camber-kulma joustomatkalla, -kulman muutos ohjauskulmassa ja tukivarsien pituudensäädössä. Taulukosta luotiin kuvaaja 1 säätöjen kombinaatioista joustomatkalla, ohjauskulmassa ja pituudensäädössä. Värit kertovat kolmiotukivarren etummaisen kiinnityspisteen korkeuden säätöä.



KUVAAJA 1 Camber-kulma joustossa

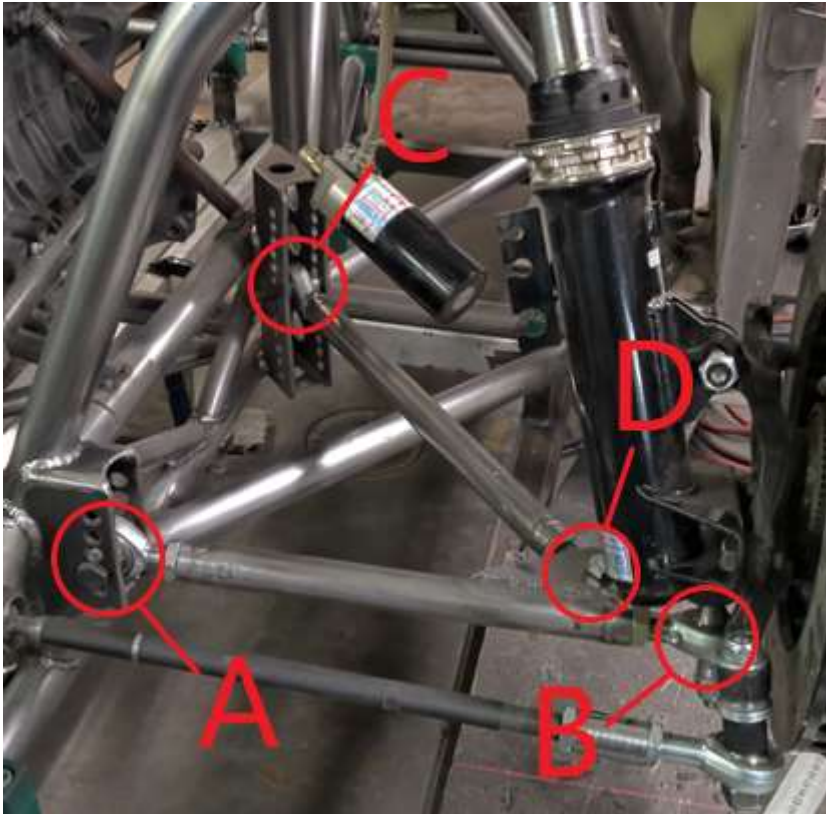
Lisäksi tilastointiin camber-kulma ohjauksen aikana, tässä tapauksessa ohjaukulma mitattiin hammastangon liikematkassa kuvaajassa 2.



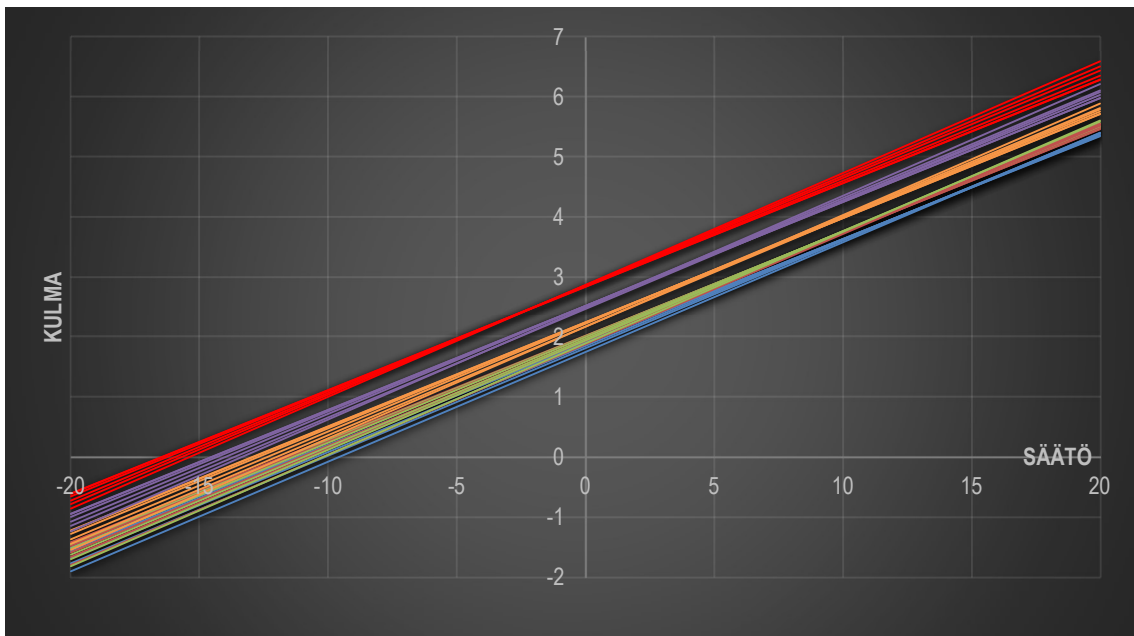
KUVAAJA 2 Camber-kulma ohjauksessa

Seuraavaksi tutkittiin tukivarsien pituudensäädön vaikutusta camber-kulmaan auton ollessa staattisesti jousitus kuormittamattomana. Pituuden muutokset otettiin jokaisesta uniball-liitoksen ruuvissäädöstä yksitellen ja datasta piirrettiin kuvaajat 3 ja 4. Kolmiotukivarren kiinnityspisteet ajoneuvonrunkoon nimettiin pisteeksi A ja pisteeksi B. Sekä kolmiotukivarren olka-akseliliitos nimettiin

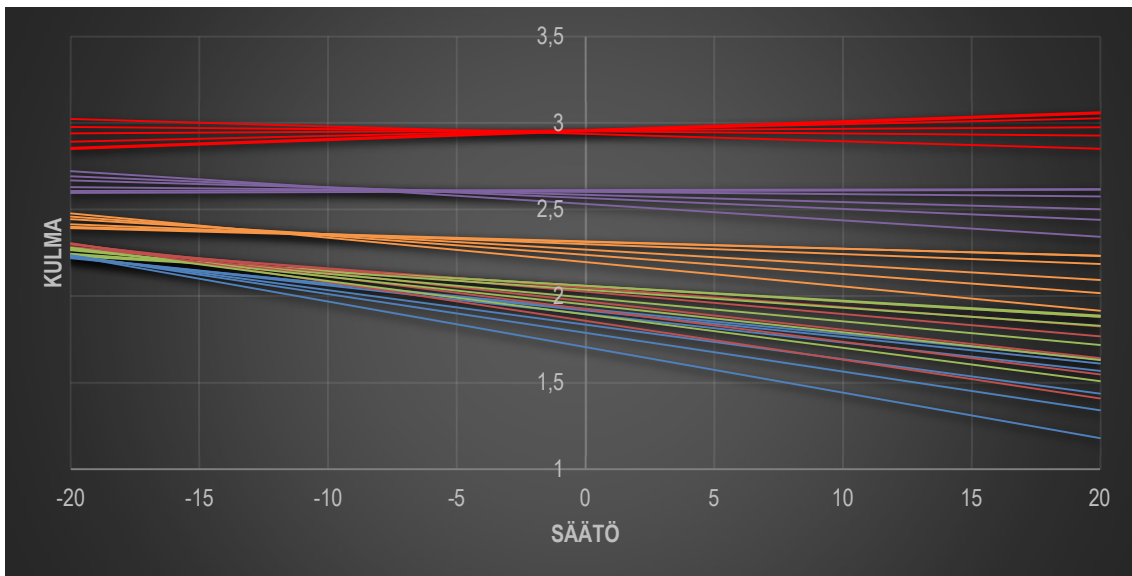
pisteeksi B. Reaktiotangon päät nimettiin pisteiksi C ja D. D-piste on kiinnitetty AB-tukivarteen uniball-liitoksella. Liitokset näkyvät kuvassa 11.



KUVA 11 Tukivarsien kiinnityspisteet



KUVAAJA 3 AB-tukivarren symmetrinen pituudensäätö



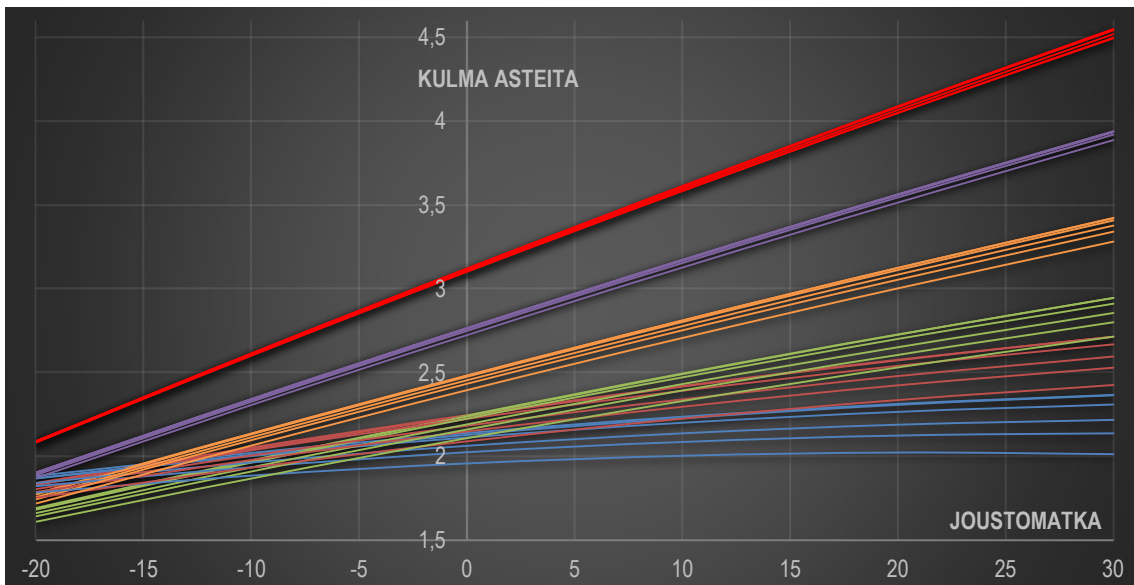
KUVAAJA 4 CD-tukivarsi symmetrinen pituudensäätö

Tutkimuksessa tulokseksi saadaan, että kolmiotukivarren A-pisteen korkeuden säätö tulisi asettaa +48 mm lähtötilanteesta, jotta C-kiinnityspisteen korkeuden säätö ei vaikuta camber-kulman muutokseen negatiivisesti. A-kiinnityspisteen korkeuden ollessa + 48 mm ohjauksen aikana oleva camber-kulman kuvaajat leikkautuvat lähimpänä ohjauksen nollakulmaa. Lisäksi ajoneuvossa huomattu rakenteellinen virhe, joka on AB-tukivarressa. Tämä virhe vaikuttaa camber-kulmaan, koska AB-tukivarsi pääsee pyörähtämään vapaasti jouston aikana. Pyörähtäessään tukivarsi vetää reaktiivartta CD. Tällöinen käyttäytyminen aiheuttaa rakenteessa värähtelyä, joka epävakauttaa renkaan camber-kulman tasaisuutta joustomatkalla.

3.3 Aurauskulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa

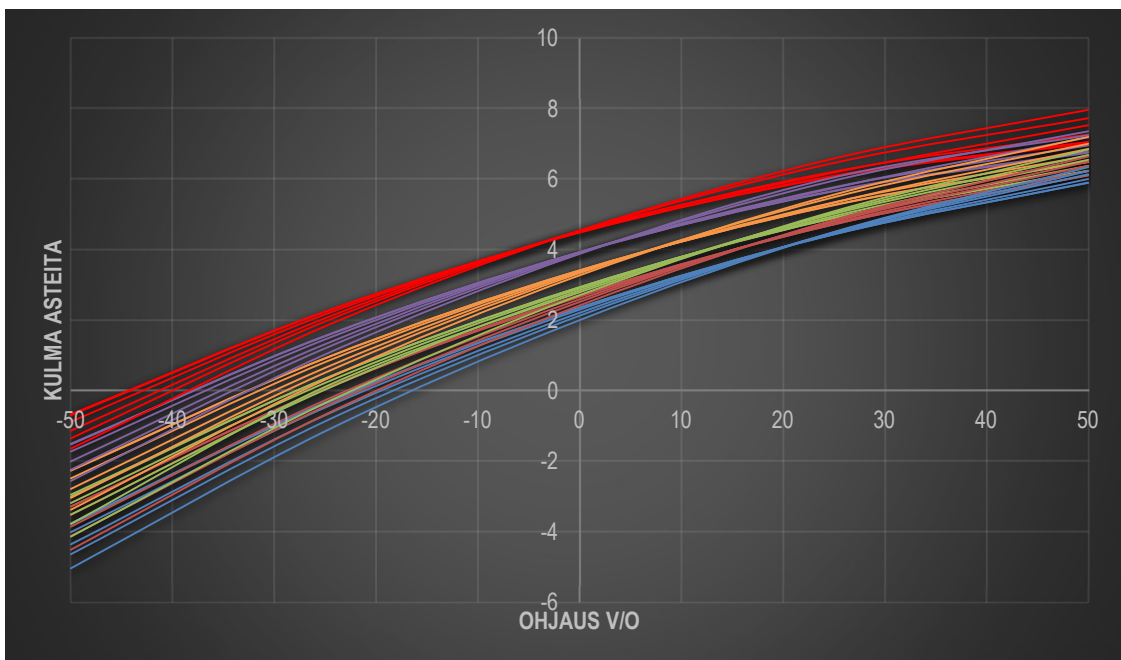
Aurauskulman tutkiminen alkoi CAD-ohjelmassa rakennetun ajoneuvon mallista määritettyyn ohjauksen nollapisteeseen. Nollapiste on mitattu olemassa olevasta ajoneuvosta hammastangon ja raidetankojen mitoilla. Aluksi lähdettiin mittaamaan aurauskulmaa tukivarsien korkeudensäädön kombinaatioilla staattisessa ohjauksikulmassa, joka oli lähtökohtaisesti suoraan. Samalla mitattiin aurauskulman muutosta joustomatkalla, vapauttamalla jouta teoreettisesta maksimi sisään joustosta maksimaaliseen ulos joustoon. Datapisteitä otettiin tutkimukseen jousituksen osalta viisi kappaletta tukivarsien korkeuden säädön kombinaatiota kohden. Kerätystä datasta piirrettiin kuvaaja

kuvastamaan aurauskulman muutosta jousituksen joustomatkalla kuvaajassa 5.



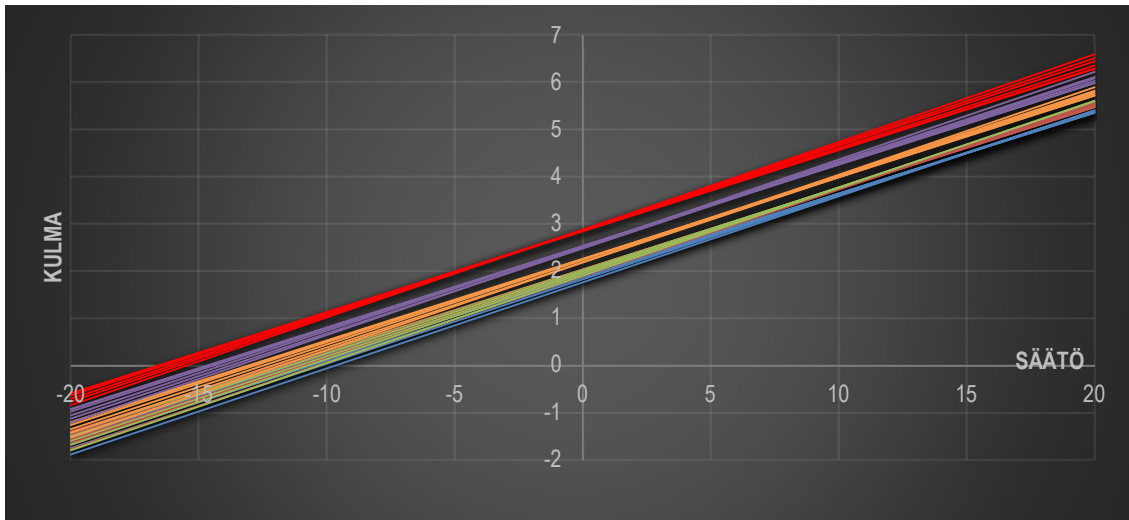
KUVAAJA 5 Aurauskulma joustossa

Seuraavaksi lähdettiin tutkimaan ohjauskulman vaikutusta aurauskulmaan. Lähtökohtaisesti osatutkimus toteutettiin vastaavalla tavalla kuin aikaisempi, mutta tähän otettiin lisämuuttujaksi ohjauskulma. Ohjauskulman muutos on otettu tutkimukseen hammastangon siirtymämatkalla. Tätä dokumenttia varten on piirretty kuvaaja 6, jossa kuvataan aurauskulmaa ohjauskulmassa. Valittu kuvaaja kuvaa tilannetta, jossa auto on tasaisesti jousituksen nolla pisteessä.

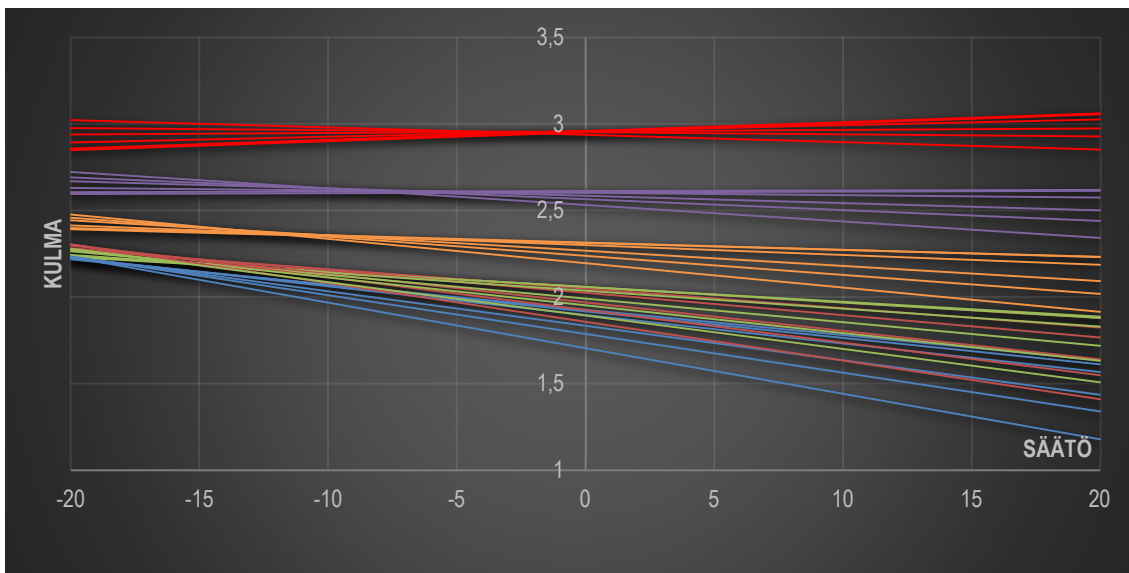


KUVAAJA 6 Aurauskulma ohjauksessa

Näiden jälkeen lähdettiin selvittämään, onko tukivarsien pituudensäädöllä vaikutusta aurasukulmaan. Tutkimuksessa on oletettu, että tukivarren pituudensäätö tapahtuu symmetrisesti kummas-takin päästä tukivartta, jolloin pituudensäätöjen ääriarvot ovat ± 20 mm. Tukivarsien pituudensäädöissä auton jousitus on tasaisella kuormittamattomana. Kolmiotukivarressa on neljä säätöpistettä, ja säätäminen tapahtuu symmetrisesti. Säätöjen vaikutus rajautuu kahteen tukivarteen, josta kolmiotukivarsi koostuu. Tästä datasta piirrettiin kaksi kuvaaja 7 ja 8, koska tukivarsia on kaksi kappaletta. Kumpikin kuvaaja kertoo säädön vaikutusta aurasukulmaan.



KUVAAJA 7 AB-tukivarsi symmetrisen pituudensäätö



KUVAAJA 8 CD-tukivarsi symmetrisen pituudensäätö

Lopuksi aurauskulman tutkinnassa huomiossa on kääntöharitus eli Ackermann-kääntöteoria. Tätä lähdettiin tutkimaan aiemmin kerätystä datasta, koska auton etuakselissa säädöt ovat symmetrisesti.

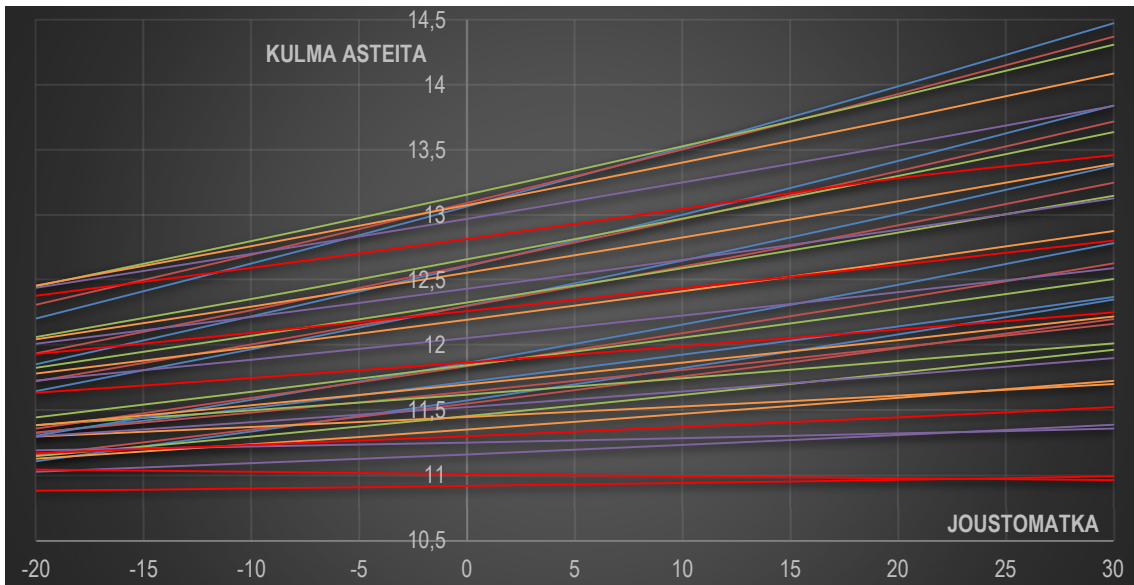
Aurauskulman tutkinnassa esiin nousi, että autossa on vähän tai ei ollenkaan töyssyohjausta, eli jouston aikana aurauskulma muuttuu vähän tai ei ollenkaan. Kuvaajassa 5 kuvaaja käyttäytyy lähes lineaarisesti riippumatta tukivarsien korkeudensäädöstä. Samalla ohjauskulman vaikutuksesta aurauskulmaan esiin nousi kuvaajan käyttäytyminen, sillä ohjauskulmassa aurauskulma lähtee muuttumaan lähes lineaarisesti. Tästä huomiosta voidaan vetää johtopäätös kääntöteorian suhteen, koska aurauskulma muuttuu lineaarisesti niin kääntöharitusta autossa ei ole. Koska Ackermann-kääntöteorian mukaisesti kuvaajan tulisi käyttäytyä parabolisesti, eli sisempi kääntöakselin rengas tulisi kääntyä jyrkempään kulmaan kuin ulompi rengas kaarteessa.

Kolmiotukivarren rakenteellinen virhe vaikuttaa aurauskulmaan viemällä olka-akselia taakse päin. Tämä johtaa siihen, että raidetangon olka-akselinpää liikkuu rakenteen liikkeessä taakse ja sisään lisäämällä aurauskulmaa enemmän positiiviselle alueelle.

3.4 Caster-kulman tutkiminen ajoneuvon rakenteessa

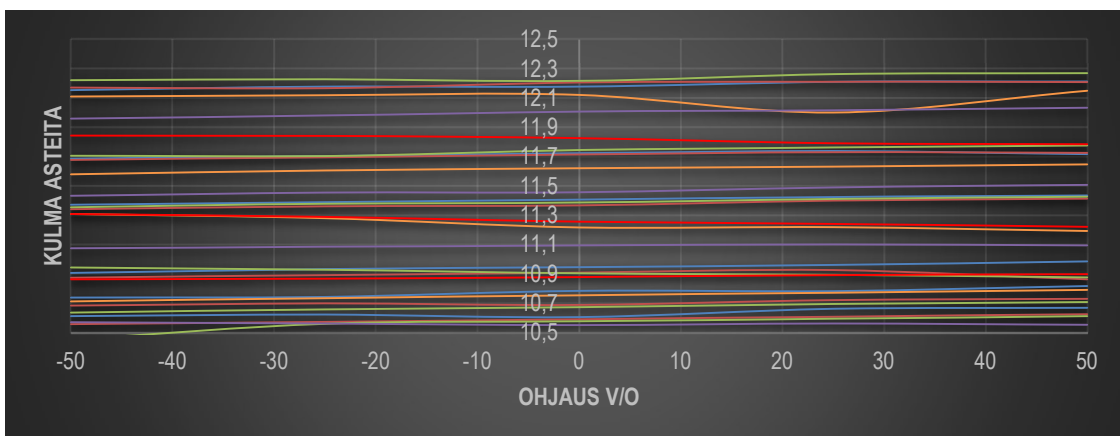
Lopuksi auton tutkimuksessa lähdettiin tutkimaan caster-kulmaa, ja sen muutoksia säädöissä. Staattinen caster-kulma määritettiin autosta CAD-ohjelmaan määritetyn mallin avulla. Aluksi caster-kulman tutkimisessa lähdettiin tutkimaan kulman muutosta tukivarsien korkeudensäätöjen kom-

binaatioilla jousituksen joustomatkalla. Näistä datapisteistä saadaan piirrettyä joustomatkan ja caster-kulma koordinaatistoon kuvaaja 9 jokaista korkeudensäätökombinaatiota kohden.



KUVAAJA 9 Caster-kulma joustomatkalla

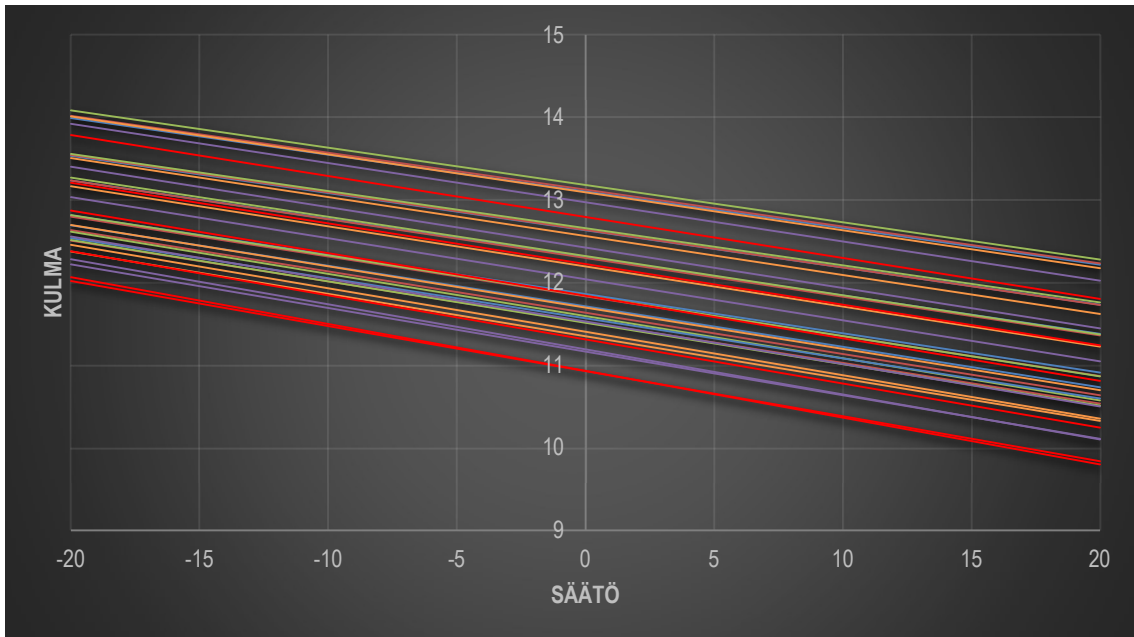
Teoriassa ohjaukulman muutos ei muuta caster-kulmaa. Tämän takia aikaisemmissa osatutkimuksissa esiin nousseella rakenteellisella virheellä voi olla vaikutusta caster-kulman muutokseen. Sitä varten CAD-mallista kerätään datapisteitä tukivarsien korkeudensäätöjen kombinaatioita ohjaukulman muutoksessa. Kerätystä datasta piirretään kuvaaja 10 ohjausmatka-caster-kulma koordinaatistoon.



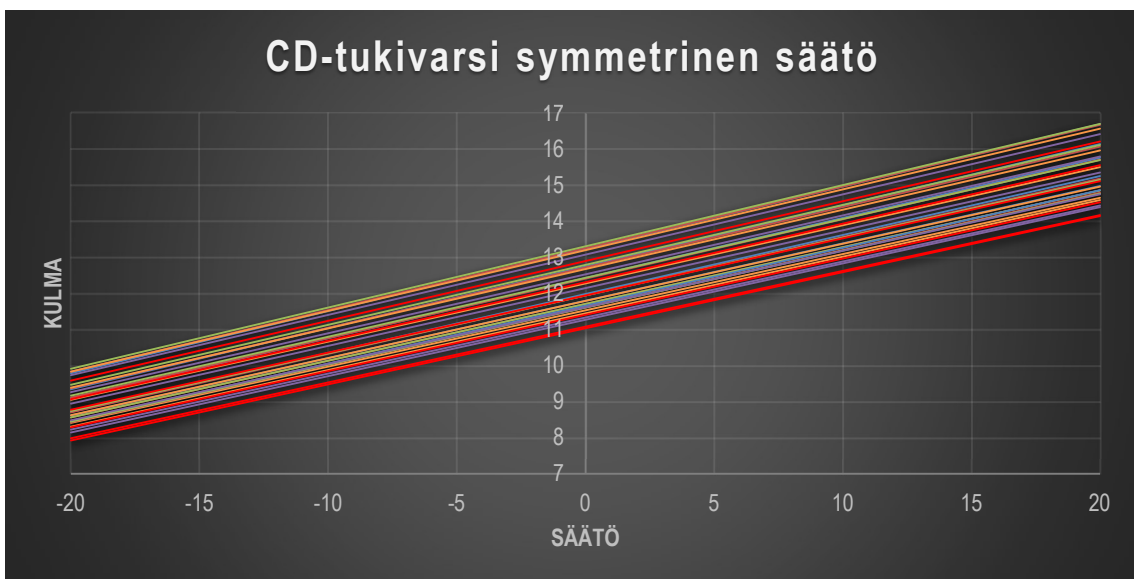
KUVAAJA 10 Caster-kulma ohjaukulmassa

Lisäksi tarkastelun kohteena on tukivarsien pituudensäädön vaikutus caster-kulmaan. Kuten edellisissä osatutkimuksissa tukivarsien pituudensäätö oletetaan tapahtuvan symmetrisesti tukivarsien molemmista päistä. Kolmiotukivarsi koostuu kahdesta tukivarresta AB ja CD. CD-tukivarren toinen pää kiinnittyy AB-tukivarteen. Tukivarsien pituudensäätöjen datan keräämisessä ajoneuvon malli

on tasaisesti jousitus kuormittamattomana. Pituuden säätö rajautuu kahteen tukivarteen, joten dataa kerättiin kahteen taulukkoon, mikä vähentää tukivarsien riippuvuuksia toisiinsa. Kerätystä datasta piirrettiin kaksi kuvaajaa 11 ja 12 kuvastamaan pituudensäätöjen vaikutusta caster-kulmaan.



KUVAAJA 11 AB-tukivarren symmetrinen pituudensäätö



KUVAAJA 12 CD-tukivarren symmetrinen pituudensäätö

Caster-kulman tutkimuksessa kulma käyttäytyy oletetulla tavalla. Jouston aikana kulma lähtee aukeamaan lineaarisesti koko joustomatalla. Caster-kulmalla on vähäinen vaikutus ajoneuvon käyttäytymiseen, mutta caster offsetilla on suurempi merkitys. Caster offset vaikuttaa ajoneuvon ohjauksen käyttäytymiseen siten, että se pakottaa ajoneuvon painolla ohjauksen keskeishakuisuutta.

Caster-kulmalla on tähän vaikutusta, mitä enemmän caster-kulmaa on, sitä enemmän on offsetia. Lisäksi caster-kulma määrittää camber- ja aurauskulman suhteellisuutta.

Caster-kulman ohjauksenaikaisen muutoksen pitäisi olla minimissään, sillä kolmiotukivarren ei pitäisi pystyä liikkumaan ajoneuvon pituussuunnassa, sillä kolmiotukivarsi on asennettu ajoneuvon runkoon pallonivelillä. Kuvaajista selviää, että kulman käyttäytyminen ei ole oletettua vaan se lähete kääntymään takaisin pystyyn, koska aikaisemmin todettu rakenteellinen virhe vaikuttaa tutkimuksissa eniten caster-kulmaan, epävakauttaen ohjauksen keskeishakuisuutta. Tällöinen käyttäytyminen tuntuu ohjauspyörässä ajoneuvon sivuttaishakeutumisenä, ts. ohjauspyörä vääntää siihen suuntaan missä caster-kulma on pienin. Rakenteellinen virhe vaikuttaa caster-kulman arvoihin välillä $0 - -0,232^\circ$ varsinaisesta säätökulmasta. Tämä virhe näkyy kuvaajassa 10 kuvaajien aaltomaisuutena.

4 TYÖNANALYYSI

Työn aloittamisen jälkeen suoritettiin mittauksia työntilaajan ajoneuvosta, josta mallinnettiin suunnitteluohjelmaan tarkka malli. Mallia käytettiin rengaskulmien, insantcenterin, instantaxisin ja kallistuskeskiön korkeudenmittaamiseen, sekä Ackermann-kääntöteorian todentamiseen. Auton mittauksissa haasteeksi koitui ajoneuvon rakenne, putkirunko, mikä esti joitakin mittauksia. Ajoneuvon asennettu moottori aiheutti samalla omat haasteensa mittauksille. Mittauslaitteistona käytettiin rulamittaa, lasertasolaitetta ja suorakulmaa, joten ajoneuvon tehdyissä mittauksissa on jonkin verran mittausepävarmuutta.

Osatutkimusten tuloksissa nousi esiin rakenteellinen virhe, mikä vaikuttaa olennaisesti ajoneuvon ohjautuvuuteen ja käyttäytymiseen. On kuitenkin huomioitava, että kaikissa henkilöautoissa on tällaista käyttäytymistä, mikäli kolmiotukivarsi on kiinnitetty ajoneuvon apurunkoon kumipuslilla. Tämän rakenteellisen virheen pystyy korjaamaan CD-tukivarren AB-pään kiinnityksen muuttaminen pallonivelestä kiinteään reikäpulttiliitokseen, mikä mahdollistaa säätöjen tekemisen ja korjaa AB-tukivarren kiertymisen kolmiotukivarsirakenteessa.

Työntilaaja haluaa tietoon, miten ajoneuvoa kannattaisi lähteä säätämään haluttuun suuntaan. Rengaskulmat käyttäytyvät muuten oletetulla tavalla, ja ovat riippuvaisia toisistaan, eli jos aurasukulmaa muutetaan, samalla muuttuu camber-kulma. Kolmiotukivarren säätämisessä vaikutus ajoneuvon käyttäytymiseen on suurta, koska nämä säädöt vaikuttavat kaikkiin kolmeen päärengaskulmaan. Esimerkiksi, jos AB-tukivarren kiinnityspistettä nostetaan camber-kulman muutos kasvaa, mutta caster-kulman muutos pienenee jousituksen jouston aikana. Aurasukulmaan korkeuden säädöllä on vaikutusta siten, että mitä korkeammalle tukivarsi asennetaan, sitä enemmän aurasukulma muuttuu jousituksen jouston aikana.

Ajoneuvon ohjausgeometria pystytään säätämään epägeometrisesti, jos halutaan painottaa kilparadalla vasemmalle tai oikealle kääntyviin kaarteisiin. Painotuksen ollessa samaan suuntaan kuin kaarre helpottaa ajoneuvon kaarrekäyttäytymistä. Kääntöpuolena painotuksessa on ajoneuvon kääntymisessä vastakkaiseen suuntaan kaartuvaan kaarteeseen.

4.1 Säätöprofiili

Kerätystä datasta voidaan valmistella tutkittavalle ajoneuvolle ratakohtaisia säätöprofileita, jotta ajoneuvolla päästään heti hakemaan optimaalisia säätöjä valitsevien olosuhteiden mukaisiksi. Esimerkkinä Kemoran moottorirata. Radasta on kaksi eri versiota, pitkä ja lyhyt, mitkä näkyvät kuvassa 12. Tässä säätöprofiilissa keskitytään ainoastaan pitkään versioon. Radalla on kuusi oikealle kääntyvää kaarretta ja kolme vasemmalle kaartuvaa kaarretta.



KUVA 12 Kemoran ilmakekuva (Google Maps 2024)

Ilmakuvasta pystytään määrittämään likiarvoiset kaarresäteet mutkille, ja tästä saadaan luotua keskiarvoinen kaarresäde vasemmalle ja oikealle kaartuviin kaarteisiin. Vasemmalle kaartuvien kaarteiden keskiarvollinen säde on 50 metriä ja oikealle kaartuvissa säde on 67 metriä. Näistä arvoista voidaan laskea mahdollinen kriittinen nopeus ajoneuvolle keskiarvoisella kaarresäteellä Kemoran moottoriradalle. Tätä varten täytyy keskeneräisestä ajoneuvosta arvioida painopisteen korkeus ja renkaan kitkakerroin tienpintaan. Ajoneuvon kriittinen kaarrenopeus määritellään seuraavalla kaavalla.

$$v_{cr} = \sqrt{\mu_s g R}$$

KAAVA 1 Kriittisen nopeuden määritelmä

Kaavan 1 kitkan tarvetta määritetään rakenneparametrillä kaavassa 2.

$$\mu_s = \frac{b}{2h}$$

KAAVA 2 Kitkakertoimen määritelmä kriittiseen nopeuteen

Rakenneparametri $b/2h$ määrittää ajoneuvon kitkantarvetta, jos $b/2h$ on suurempi kuin renkaan kitka tienpinnassa, ajoneuvo ei kaadu vaan lähtee luistamaan. Tätä varten autosta täytyy olettaa painopisteen korkeus, jotta saadaan määritettyä kitkantarve ajoneuvon kaatamiselle. Rakenneparametrissä b on ajoneuvon raideväli ja h on ajoneuvon painopisteen korkeus, joka täytyy olettaa tutkimusajoneuvosta 550 mm korkeudelle. Varsinaisissa mittauksissa ajoneuvossa raideleveys on 2000 mm. Kemoran moottoriradan keskiarvollinen kaarresäteillä saadaan laskettua kriittinen nopeus vasemmalle ja oikealle kaartuviin mutkiin. Vasemmalle kaartuvissa kurveissa kriittinen nopeus on 29,9 m/s ja oikealle 34,6 m/s.

Renkaan sivuttaiskitkan tarve kriittisessä nopeudessa saadaan kaavasta 3.

$$\mu_s = \frac{v^2}{gR}$$

KAAVA 3 Sivuttaispidon kitkakerroin

Nopeus v on ajoneuvon kriittinen nopeus. Kitkakertoimeksi saadaan 1,82 vasempaan kääntyviin ja 1,82 oikealle kääntyviin kurveihin, joten tutkittava ajoneuvo ei kaadu vaan lähteen luisumaan pidon kadotessa, koska kitkakerroin voi olla välillä 0–1. Renkaan sivuttaisvoima saadaan kaavasta 4.

$$F_s = \mu_s G$$

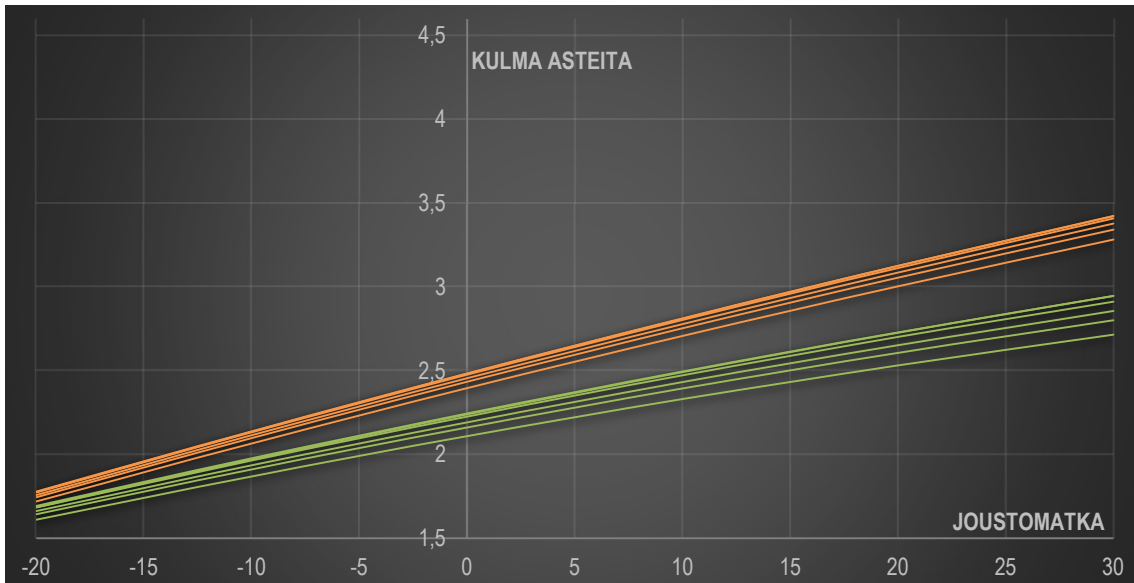
KAAAVA 4 Renkaan tuottama sivuttaisvoima

Ajoneuvon massaksi arvioidaan olevan 1000 kg. Painovoiman suuruudeksi saadaan arvioidulla massalla 9,81 kN. Sivuttaisvoimaksi saadaan 17,85 kN. Tämän takia kaarteessa ulkokaarteen rengas on hyvä asettaa kohtuulliseen camber-kulmaan, jotta osa renkaan sivuttaisvoimasta kohdistuu renkaaseen kuormittavana voimana. Kilparenkaissa suurin cambervoima voidaan saavuttaa pienemmällä camberkulmalla (1, s. 47).

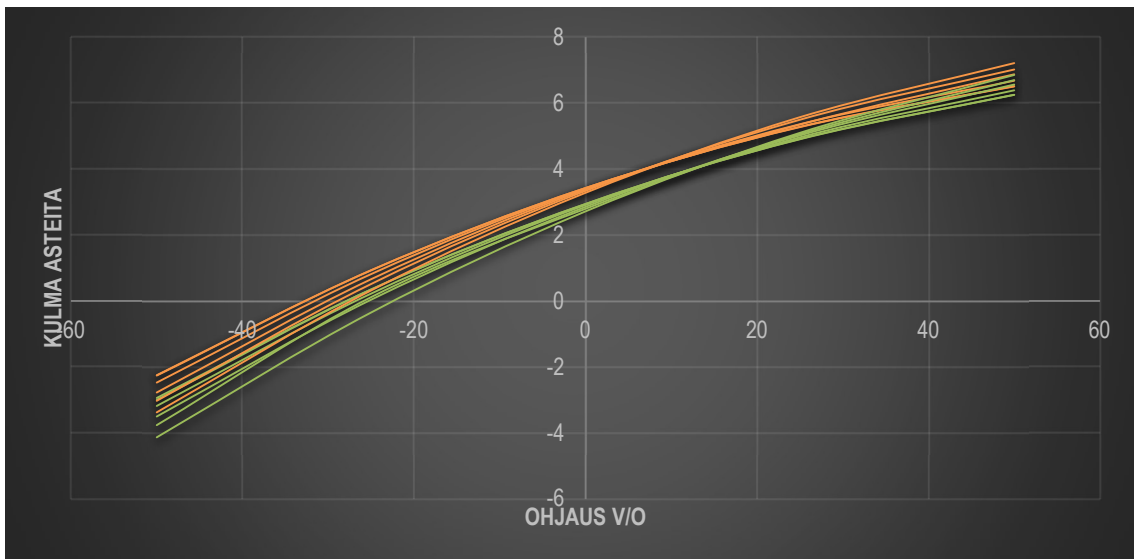
Joten kolmiotukivarren etukiinnityskohta tulisi asettaa joko ensimmäiseen tai toiseen kiinnitysreikään nollakohdan yläpuolelle. Kolmiotukivarren reaktiotanko olisi hyvä kiinnittää toiseen tai kolmanteen kiinnitysreikään nollakohdan yläpuolelle, jotta camber-kulma muuttuu riittävästi jouston- ja ohjauksen aikana. Ohjaavassa akselissa renkaiden camber-kulma tulisi olla; sisempi rengas tulisi olla lähes pystyssä tai kallellaan sisäkaarteeseen päin ja ulompi rengas kallistuu asetetusta arvosta lisää sisäkaarretta kohti. Keskipakoisvoiman vaikutuksesta kaarreajossa ajoneuvon kori kallistuu, jos ajoneuvon kallistuskeskiö on eri korkeudella painopisteeseen verrattuna. Sillä keskipakoisvoimalla on tässä tapauksessa momenttivarsi kallistuskeskiön ja painopisteen välillä. Momenttivarren suunta vaikuttaa siihen kumpaan suuntaan ajoneuvon kori lähtee kallistumaan kaarteessa. Tutkittavassa ajoneuvossa kallistuskeskiö ei ole samalla korkeudella painopisteen kanssa, joten ajoneuvon kori lähtee kallistumaan ulkokaarretta kohti. Tämän käyttäytymisen takia korin kallistuessa camber-kulmien muutos tehostuu, sisäkaarteen rengas nousee enemmän pystyyn ja ulkokaarteen renkaalla kulma kasvaa.

Aurauskulmassa säätö vaikuttaa siten, että kulman muutos on kohtuullista. Aurauskulman tutkimuksessa esiin noussut kääntöharituksen puute hankaloittaa ajoneuvon kääntymistä kaarreajossa. Kaartoharituksessa ohjaavan akselin sisäkaarteen rengas kääntyy enemmän kohti kaarteen keskipistettä. Kaartoharituksen puutteessa aurauskulma olisi hyvä asettaa nollakulmaan tai mahdollisimman lähelle sitä. Aurauskulman säädössä täytyy ottaa huomioon renkaan camber-kulma, jolla on ohjaavaa camber-työntöä suhteessa 10° camber-kulmaa aiheuttaa 1° ohjauskulmaa siihen

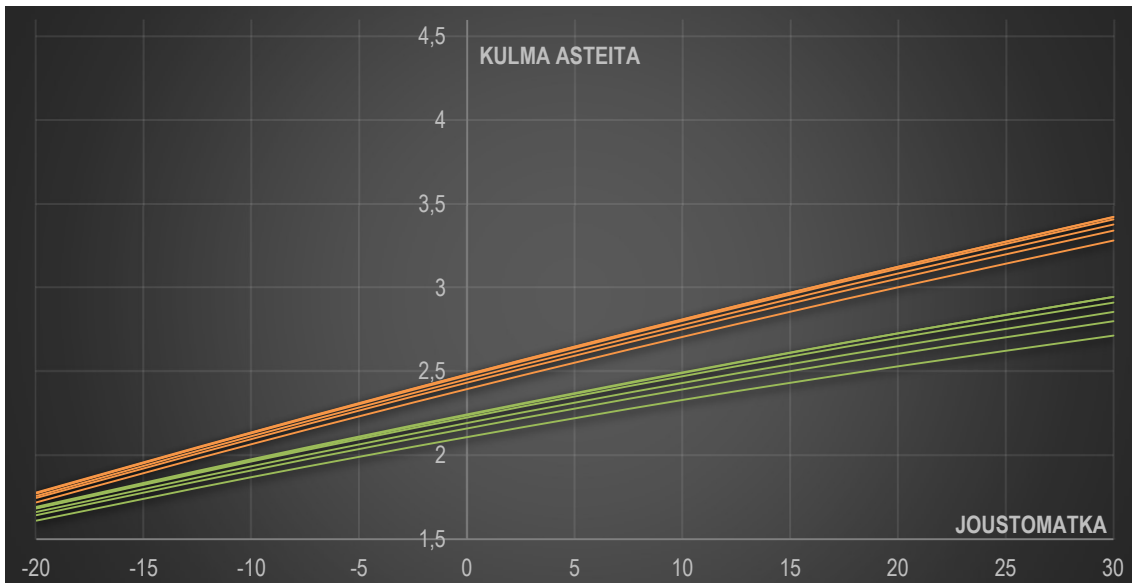
suuntaan, mihin rengas on kallistettu.



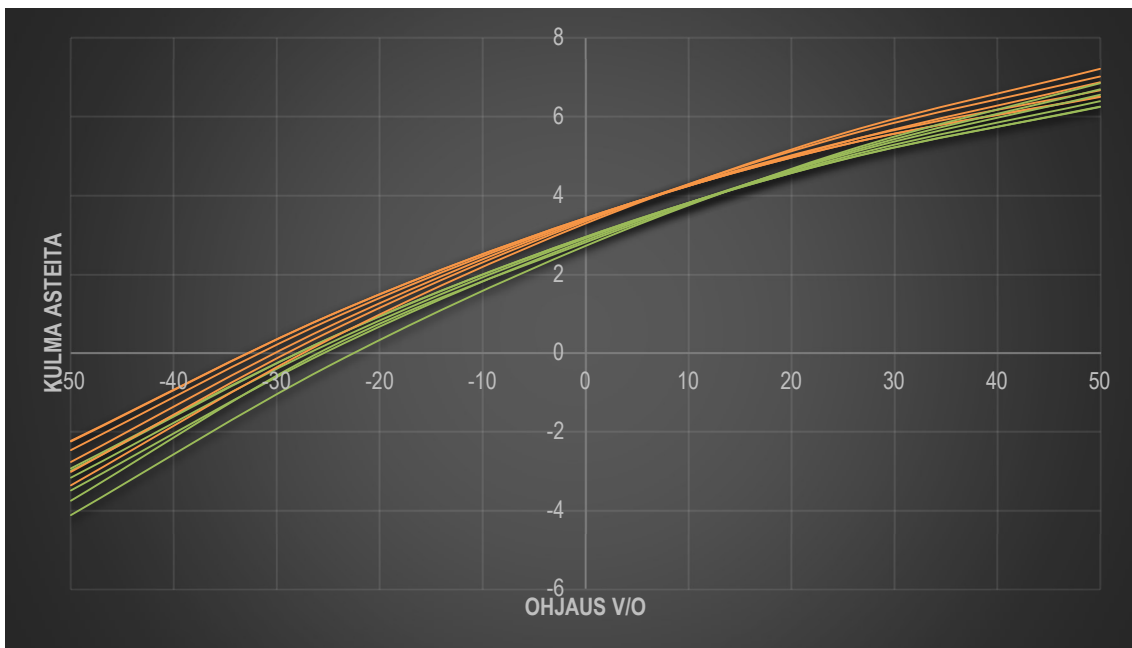
KUVA 13 Säättöprofiilin camber suositus



KUVA 14 Säättöprofiilin camber suositus ohjauksessa



KUVA 15 Säättöprofiilin suositus aurasikulmalle



KUVA 16 Säättöprofiilin suositus aurasikulmalle ohjauksessa

Säättöprofiiliin tarkasteluun nousee antidive ominaisuus jousituksessa, eli halutaanko pitkittäistä painon siirtymää jarrutuksissa ja kiihdytyksissä. Tätä varten reaktiotangon CD korkeuden säätö on tärkeässä asemassa, sillä se vaikuttaa olennaisesti ajoneuvon "niiaamiseen" jarrutuksissa, eli painuuko ajoneuvon keula jarrutuksen aikana alas. Mikäli antidive ominaisuutta halutaan käyttää, niin CD-reaktiotankoa täytyy nostaa ylöspäin, mutta reaktiona kiinnityspisteen säädölle on kiihdytyksen aikainen keulan nouseminen. Jos kiihdytyksen aikainen keulan nouseminen vaikeuttaa ajoneuvolla ajamista merkittävästi, antidive ominaisuutta on vähennettävä.

5 POHDINTA

5.1 Työn suorittamisen pohdinta

Camber-kulmaa mitattaessa työskentelyn tehostaminen nousi ensisijaiseksi tarpeeksi, koska aluksi lähdettiin taulukoimaan mittauspisteitä millimetrin tarkkuudella joustomatkalla. Tämän takia matemaattisesti korkeudensäätöjen kombinaatioiden määrä on 36 kappaletta. Mittausresoluutio on 50 mittauspistettä joustomatkalla yhtä kombinaatiota kohden. Korkeudensäädön mittauspisteiden lukumääräksi saadaan 1800 kappaletta. Työskentelynopeus mittauspisteiden taulukoinnissa on noin 200 kappaletta tunnissa, joten korkeudensäädön taulukointiin aikaa kuluisi noin 9 tuntia. Ohjauksen aikaiseen kulmanmuutoksen taulukointiin aikaa kuluisi 50 x 9 tuntia. Ohjauksen mittauspisteitä on viisikymmentä kappaletta, mikä tekee 450 tuntia tilastointia.

Lisäksi taulukointia täytyy tehdä myös tukivarsien pituudensäädöstä ja niiden yhteisvaikutuksesta. Tukivarsien pituussäädön vaikutusta aiottiin tilastoida millimetrin tarkkuudella, koska uniball-ruuvi-liitoksen kierteennousu on kaksi millimetriä. Tällöin tilastoitavan datan suuruus on 360 kappaletta aikaa kuluisi 1h 50 min taulukointiin. Yhteensä rengaskulmien tilastointiin kuluisi 451 h 50 min, mikä on vähän yli 11 viikkoa.

Tutkimuksen toteuttamiseen on varattu aikaa kuusi viikkoa. Aikarajoitteen takia tutkimuksen toteuttamista joudutaan tehostamaan mahdollisimman aikaa säästäväksi ilman, että tutkimustuloksessa ilmenee muutoksia. Tutkimuksen toteuttamisen tehostamisessa lähdettiin vähentämään datapisteteiden määrää minimiin, missä mahdolliset rakenteesta johtuvat virheelliset arvot vielä näkyvät. Tutkimuksen toteuttamisessa olevan datan määrä on pudotettu kymmenykseen alkuperäisestä määrästä, joten tilastointiin käytettävä aika on pudonnut aikaisemmasta 11 viikosta vähän yli viikon mittaiseen työaikaan, mikäli työaika on 8 tuntia päivässä.

Lisäksi tehostustoimien alaiseksi kohdistui ohjaukskulman aikaiseen rengaskulman- ja tukivarsien pituudensäädön tilastointiin. Ohjaukskulmien mittauspisteiden määrää pudotettiin alkuperäisestä 50 kappaleesta viiteen. Tukivarsien pituudensäätöjen mittauspisteitä vähennettiin alkuperäisestä kymmenestä kahteen mittauspisteeseen; minimi- ja maksimisäätö.

Ajoneuvon mittausten jälkeen huomattiin rakenteellinen virhe, joka epävakauttaa rakennetta. Huomattu rakenteellinen virhe vaikuttaa eniten caster-kulmaan ja sen käyttäytymiseen. Tämä huomattiin caster-kulman tutkimuksessa. Osatutkimuksissa ei tullut mitään ennalta arvaamatonta, sillä muut rengaskulmat käyttäytyvät oletetulla tavalla.

Lisäksi tarkastelun aiheeksi tuli tarve tuottaa mahdollinen säätöprofiili ajoneuville, tässä tapauksessa valittiin Vetelin Kemoran moottorirata, jolle tehtiin säätöprofiili, vaikka ajoneuvosta jouduttiin arvioimaan painopisteenkorkeutta ja ajoneuvon massaa. Ajoneuvon massa ja painopisteen korkeus ei ole tiedossa, niin säätöprofiili ei ole todenmukainen vaan antaa ohjeistusta, kuinka profiili voidaan rakentaa.

Säätöprofiilia lähdettiin rakentamaan, koska ajoneuvon optimaalisimmat säädöt ovat riippuvaisia rataprofiilista. Eli kuinka tiukkoja kaarteita radalla on, ja kuinka monta niitä on kumpaankin suuntaan. Lisäksi optimaaliseen säätöön vaikuttaa haluttu kaarrenopeus, jolla autolla tulisi pystyä ajamaan kaarteen läpi.

5.2 Työn lopputuloksen pohdinta

Työssä on noudatettu hyviä tieteen käytäntöjä ja eettisten näkökulmien huomioon ottamista. Validiteetilla tarkoitetaan tutkimustuloksen oikeellisuutta, eli vastaako tutkimuksen tulos tutkimuskysymykseen. Tulosta tarkastaessa osatutkimuksen- ja tutkimuksen kokonaistuloksissa ilmenee selkeää vastausta tutkimuskysymykseen, mikä on optimaalisin ohjausgeometria tutkittavassa ajoneuvossa. Ohjausgeometrian tutkinnassa tutkinnan oikeellisuudessa on epävarmuutta tuloksissa, sillä suunnitteluohjelman mallin rakentamiseen ei saatu tarkkoja mittaustuloksia tutkittavasta ajoneuvosta. Työssä ei ole esitetty eriväviä teorioita, ja työssä on käytetty pitkään hyväksyttyä ja käytettyä teoriaa rengaskulmista ja ohjausgeometriasta. Valitussa aineistossa tai valitsemattomassa materiaalissa käsitellään samaa teoriaa, mutta eri kulmasta. Tutkimuksessa on otettu tarpeeksi suurella otannalla datapisteitä, jotta kuvaajat kuvastavat parhaiten kulmien käyttäytymistä muutosparametrin aikana. Kulmien tutkinnassa on haettu muuttujia, jotka vaikuttavat niiden käyttäytymiseen.

Tutkimuksen reliabiliteetti eli tutkimuksen luotettavuus, käyttövarmuus ja toimintavarmuus. Tutkimus on luonut luotettavaa dataa ajoneuvon käyttäytymisessä dynaamisissa olosuhteissa, jossa ajoneuvoa on tarkoitus käyttää. Käyttövarmuutta lisää eri moottoriradoille määriteltäviä säätöprofiileja, joita työn tilaaja voi määrittää radoille tutkimusdatan perusteella. Lähtökohtaisesti tutkimuksella on lähdetty tutkimaan optimaalisia pyöränkulmien säätöjä.

Työssä käytettiin laadullisen tutkimuksen menetelmää, vaikka kerätyn datan määrä ilmaisee määrällistä tutkimusta. Vaikka kerätyn datan määrä on suuri, niin siitä huolimatta tutkimuksessa on pyritty pitämään laadullinen menetelmä käytössä. Tutkimuksessa on käytetty harkinnanvaraista otantaa, varsinkin datapisteiden määrässä. Aikaisemmin datapisteitä oli valtava määrä, minkä takia työtä tehdessä esiin nousi tarve laskea mittauspisteiden määrää vaikuttamatta lopputulokseen. Tutkimus voidaan toistaa tarkemmilla mittauslaitteilla ja -tekniikoilla. Toistettavissa tutkimuksissa tarkkuus paranee, mutta tutkimustulos ei muutu. Tämän takia tutkimus on toistettavissa ja tutkimustulos pysyy samana, koska tutkimuksen teoriapohja ei muutu.

5.3 Jatkotutkimuksien kohteita

Jatkotutkimuskohteita tälle opinnäytetyölle on ajoneuvon taka-akselin ohjausgeometrian tutkiminen, koska tämä työ antaa pohjan ajoneuvon sivuttaiskäyttämiseen. Taka-akselin tutkintaa varten ajoneuvosta täytyy määrittää painopisteen korkeus, joka vaikuttaa ajoneuvon korin kallistumiseen. Korin kallistus vaikuttaa taka-akselissa samalla tavalla kuin etuakselilla. Korin kallistuessa auras- ja camber-kulma lähtee muuttumaan, koska joustomatka on eri. Esimerkiksi korin kallistuksessa 5° ja ajoneuvon jousitukien kiinnityspisteiden välinen etäisyys on 1540 mm. Jousituen kiinnityspiste ajoneuvon keskilinjalta on 760 mm. Tämä kallistus vaikuttaa pystysuunnassa jousitukseen ± 66 mm. Taka-akselilla kallistusohjaus tulisi olla vastakkaiseen suuntaan mihin ajoneuvon kori kallistuu.

Toinen lisätutkimuskohde on ohjausgeometrian tutkiminnan jälkeen aerodynamiikan tutkinta ajoneuvosta, sillä kyseisestä ajoneuvosta ei ole tehty mittauksia aerodynaamisesta kuormasta. Aerodynaaminen kuorma vaikuttaa ohjausgeometriaan, ajoneuvon käyttäytymiseen vauhdissa ja määrittelee moottorin tehon tarvetta haluttuun huippunopeuteen. Moottorin tuottaman vääntömomentin suuruus määrittyy pitkälti ajodynaamisista vastusvoimista, kuten renkaiden vierin vastus ja ilmanvastus. Ilmanvastuksen suuruus määrittyy ajoneuvon ajonopeudesta, jos ajonopeutta kasvatetaan kaksinkertaiseksi niin ilmanvastus nelinkertaistuu. Kilpa-autoissa yleensä käytetään siipiä ja muita korirakenteita, jotka tuottavat ilmanvastuksesta ajoneuvoa kuormittavaa voimaa, downforcea.

Jatkotutkimuksissa voi käyttää 3D-skannausta vuokrattavilla laitteilla, josta voidaan rakentaa todenmukainen malli suunnitteluohjelmaan. Ohjelmaan rakennetulla mallilla voidaan simuloida ajoviimaa

aerodynamiikan tutkimuksessa, ja mallista voidaan määrittää jousituksenrakenteita tarkemmin. Virtaussimuloinnissa voidaan määrittää ajoneuvolle downforcen määrän tietylle ajonopeudelle, mikä vaikuttaa merkittävästi alustan säätöihin.

LÄHTEET

1. Milligen, Warrendale Pennsylvania 1995, Race car vehicle dynamics, Society of Automotive Engineer, Inc
2. Bosch, Chichester 2018, Automotive handbook 10th edition, John Wilet & Sons Ltd
3. Esko Valtanen, Mikkeli 2016, Tekniikan Taulukkokirja 21. painos, Genesis-kirjat Oy
4. Momo Racing Team ry, 2024, Time Attack kilpailut 2024, haettu 26.9.2024
<https://akk.autourheilu.fi/Public/Handlers/Attachment.ashx?id=75938&hash=e9632ce0&full=1>.
5. Suomen Akatemia, 2024, Tutkimusetiikka, haettu 13.11.2024, <https://www.aka.fi/tutkimusrahoitus/vastuullinen-tiede/tutkimusetiikka/>.
6. Tutkimuseettinen neuvottelukunta, 2023, Hyvä tieteellinen käytäntö, haettu 14.11.2024, <https://tenk.fi/fi/tiedevilppi/hyva-tieteellinen-kaytanto-htk>.
7. Opinkirjo, 2024, Aineiston kerääminen ja tutkimusmenetelmät, haettu 14.11.2024, <https://opinkirjo.fi/tutkimuksen-perusteet/aineiston-kerääminen-ja-tutkimusmenetelmat/>.
8. Kirsi Juhila, 2024, Laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet, haettu 19.11.2024, <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/mita-on-laadullinen-tutkimus/laadullisen-tutkimuksen-ominaispiirteet/>.