

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2021

Max Ylitalo

DRIFTING-KILPA-AUTON PYÖRÄNTUENNAN GEOMETRIA

Max Ylitalo

DRIFTING-KILPA-AUTON PYÖRÄNTUENNAN GEOMETRIA

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan drifting-auton alustageometriaa. Kohteena on alustaltaan lähes alkuperäinen Japanista tuotu Toyota Mark II vm. 1998. Auto on korimalliltaan JZX100, joka on suosittu varsinkin Japanissa drifting-käytössä. Tämä kyseinen auto on valittu työn kohteeksi koska autossa on viritysmielessä hyvä moottori sekä voimansiirto. Automalli on hyvä lähtökohta drifting-auton rakentamiseksi. Auton akseliväli on pitkä, mikä tekee ajamisesta helpompaa, se on liikkeissään hitaampi kuin lyhyellä akselivälillä varustettu auto. Auton pyöräntuennan geometrian toiminta ei ole lähtökohtaisesti kovinkaan hyvä koska auton ajokorkeutta on muutettu merkittävästi alkuperäiseen verrattuna. Tähän epäkohtaan opinnäytetyö etsii parannuksia. Autoon on asennettu coilover-tyyppiset jousi-heilahtelunvaimentimet, joilla auton korkeutta on mahdollista portaattomasti säätää.

Työssä esitellään drifting autourheilulajina ja perusteet pyöräntuennan geometriasta. Työssä perehdytään, mitä teknisiä muutoksia drifting-auton alustarakenteisiin saa tehdä ja mitä tämä laji vaatii auton pyöränripustukselta. Lopuksi simuloinnin avulla saada selville, mitä muutoksia kohdeauton pyöränripustukselle on tehtävä, jotta se soveltuisi drifting-käyttöön. Tarkastelun kohteena olevasta autosta mitataan ensin pyöränripustukset, jonka jälkeen sitä simuloidaan SusProg3D-simulointiohjelmalla. Auton pyöränripustuksista mitataan tarkasti kaikki nivelpisteiden sijainnit kolmiulotteisessa koordinaatistossa. Kun kaikki tarvittavat mitat ovat tiedossa, ne syötetään simulointiohjelmaan.

Lopputuloksena on pyöränripustus, joka on hyvä pohja kohdeauton pyöränripustuksen suunnittelulle. Valittu ajokorkeus poistaa suunnittelusta yhden vapausasteen ja tämä yhdessä lajin tekniikan sääntörajoitusten kanssa rajaa muutokset tehtäväksi olka-akseleihin ja tukivarsiin. Optimointi on tehty siis rajoitukset huomioiden. Tästä johtuen kallistuskuski sijainti ei ole paras mahdollinen, mutta muilta osin pyöränripustuksen simulointi oli onnistunut.

ASIASANAT:

autourheilu, suunnittelu, simulointi, pyöräntuenta, ohjausgeometria.

Max Ylitalo

SUSPENSION GEOMETRY OF A DRIFT CAR

In this thesis will dive into the suspension geometry of a drift car. The car we will be studying is a Toyota Mark II from 1998. The JZX100 chassis is very popular in drifting, especially in Japan. The car we will be studying is almost stock, in terms of suspension geometry. The only thing that has been added is the set of adjustable coilovers and the ride height has been lowered by 70 mm. This car is chosen for this thesis because it is a good platform to start building a drift car from. The engine and driveline is very strong from factory and has a good tuning support that is necessary for a drift car. Also the wheelbase is rather long, which makes it easier to handle.

First we will go through the basics of suspension geometry and the sport of drifting. After that, we will take a look at what modifications can be done suspension wise to a drift car and also what is needed from a drift cars suspension. All the suspension components will be measured precisely and then simulated with SusProg3D-simulation program. By simulating the suspension geometry under different conditions we will get an insight on what modifications need to be done in order to get the car to perform at the best possible way in drifting. This is for example adding steering angle and adding more adjustability to all suspension components.

The result will be a simulated and planned suspension geometry that makes for good base to start designing and planning the manufacturing process of all the new suspension components needed. It was chosen that the ride height would remain the same through this thesis, so that the benefits of the modifications to the geometry would be clearer. By doing this, the roll center remained too low. Otherwise, the simulations were very successful.

[Click here to enter text.](#)

KEYWORDS:

Motorsport, Design, Simulation, Suspension, Steering geometry

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 DRIFTING AUTOURHEILU	8
2.1 Kilpailun kulku	8
2.2 Drifting-kilpa-auton tekniset säännöt	10
3 PYÖRÄNTUENTA DRIFTING-AUTOISSA	12
3.1 Perusteet	12
3.1.1 Camber	12
3.1.2 Pyörien auraus tai haritus	13
3.1.3 Caster	14
3.1.4 Kääntöakselin sivukallistuma, SAI	16
3.1.5 Kääntöharitus	17
3.1.6 Kallistuskeskiö	18
3.2 Drifting-auto ja pyöräntuennan geometria	19
3.2.1 Etuakseli	19
3.2.2 Taka-akseli	22
3.3 Jousitus ja kallistuksenvakaajat	22
4 ALUSTAN MITTAUS JA SIMULOINTI	24
4.1 Kohdeauto	24
4.2 Kohdeauton pyöräntuennan mittaustyö	25
4.3 Geometrian simulointi	28
4.4 Etuakselin simulointi	28
4.4.1 Ohjaus	30
4.4.2 Etuakseliston uudelleensuunnittelu	31
4.4.3 Taka-akselin simulointi	33
5 POHDINTAA	37
6 LOPUKSI	39
LÄHTEET	40

KUVAT

Kuva 1. Toyota Mark II	7
Kuva 2. Pariajoa Formula Drift Japan (KW News 2019).	9
Kuva 3. Semi-slick-rengas Federal 595 RS-R (Engineered to Slide 2011).	10
Kuva 4. Camber-kulma (Suomen työkalu 2019).	12
Kuva 5. Aorauskulma havainnollistettuna (Suomen työkalu 2019).	13
Kuva 6. Kääntöakselin takakallistuma eli caster-kulma (Modern Automotive Technology 2014).	15
Kuva 7. Ostoskärry-esimerkki (Suomen työkalu 2019).	15
Kuva 8. SAI-kulma (Suomen työkalu 2019).	16
Kuva 9. Kääntövierinsäde (Modern Automotive Technology 2014).	16
Kuva 10. Ackermann-ehto havainnollistettuna (Racecar Engineering 2021).	17
Kuva 11. Kallistuskeskiö (<i>Roll center, RC</i>).	18
Kuva 12. Olka-akselin kääntövarren vipuvarsi A:n ja B:n välissä (Stack Exchange 2014).	19
Kuva 13. Esimerkki ohjausvaihteen jatkokappaleesta (Drift-it 2017).	20
Kuva 14. Auton kallistuminen (Driven 2020).	21
Kuva 15. Toyota Mark II etupään pyöränripustus (Powervehicles 2021).	24
Kuva 16. Toyota Mark II takapään pyöränripustus (jälkiasenteisilla säädettävillä tukivarsilla) (R-Parts-Store 2021).	24
Kuva 17. Auto mittausalustalla.	25
Kuva 18. Auton keskittäminen mittausalustalle.	26
Kuva 19. Mittauksessa käytetty apuna ristilaseria.	27
Kuva 20. Alkuperäinen etuakseli staattisessa tilanteessa.	29
Kuva 21. Alkuperäinen etuakseli sisäänjoustossa (40 mm).	29
Kuva 22. Alkuperäinen etuakseli ulosjoustossa (45,5 mm).	29
Kuva 23. Alkuperäinen etuakseli 35 ° kääntökulmassa.	30
Kuva 24. Alkuperäinen etuakseli 25 ° kääntökulmassa.	31
Kuva 25. Muokattu etuakseli sisäänjoustossa (40 mm).	31
Kuva 26. Muokattu etuakseli ulosjoustossa (45,5 mm).	32
Kuva 27. Muokattu etuakseli 55 ° kääntökulmassa.	32
Kuva 28. Muokattu etuakseli staattisessa tilanteessa.	32
Kuva 29. Muokattu etuakseli 40 ° kääntökulmassa.	33
Kuva 30. Alkuperäinen taka-akseli staattisessa tilanteessa.	33
Kuva 31. Alkuperäinen taka-akseli joustossa (60 mm).	34
Kuva 32. Alkuperäinen taka-akseli ulosjoustossa (62 mm).	34
Kuva 33. Muokattu taka-akseli staattisessa tilanteessa.	35
Kuva 34. Muokattu taka-akseli sisäänjoustossa (55 mm).	35
Kuva 35. Muokattu taka-akseli sisäänjoustossa (30 mm).	35
Kuva 36. Muokattu taka-akseli ulosjoustossa (62 mm).	35
Kuva 37. Esimerkki multilink-takapään pyöränripustuksesta drifting-käyttöön (Wisefab 2021.)	38
Kuva 38. Esimerkki etupään pyöränripustuksesta drifting-käyttöön vastaavalla kaksois-kolmiotukivarsi-ripustuksessa (Wisefab 2021.)	38

TAULUKOT

Taulukko 1. Muokatun etuakselin kallistuskeskiön korkeus joustoliikkeiden alla.	33
Taulukko 2. Muokatun taka-akselin kallistuskeskiön korkeus joustoliikkeiden alla.	36

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä perehdytään drifting-auton alustageometriaan. Tavoitteena on laatia suunnitelma, kuinka tehdä alkuperäisestä auton pyöräntuennasta kilpailukykyinen versio driftingiin. Tärkeimpinä vaiheina ovat pyöräntuennan mittaaminen, eli kaikkien nivelpisteiden asettaminen XYZ-koordinaatistoon. Sen jälkeen tulokset syötetään SusProg3D-ohjelmaan, jossa simuloidaan eri pyöräntuennan käytöstä jousitusliikkeen aikana. Muuttamalla kiinnityspisteiden sijaintia on mahdollista saada erilaisia ominaisuuksia. Tällä tavalla pyritään kehittämään auton pyöräntuennan paremmaksi drifting-käyttöön.

Kohteena on Toyota Mark II (Kuva 1). Tämä on yksi JZX100-koriin perustuvista malleista, josta Toyota on tehnyt myös kaksi muuta automallia.



Kuva 1. Toyota Mark II

Kyseinen auto on valittu työn kohteeksi koska autossa on viritysmielessä hyvä moottori ja voimansiirto. Tämä on toivottu ja hyvä lähtökohta drifting-autossa. Myös auton akseliväli on pitkä, tämä tekee ajamisesta helpompaa, auto on liikkeissään silloin hitaampi kuin lyhyemmällä akselivälillä varustettu auto. Auton pyöräntuennan geometria ei ole lähtökohtaisesti hyvä alkuperäistä matalammalla ajokorkeudella, ja työssä etsitäänkin parannuksia tuennan geometriaan madallus huomioiden. Työssä pidetään ajokorkeus nykyisenlaisena ja muokataan tuennan geometriaa siinä tilanteessa mahdollisimman hyväksi.

JZX100-koreihin on saatavilla valmiita drifting-käyttöön tarkoitettuja jälkimarkkinointiosia etuakselille, mutta taka-akselille on saatavissa vain säädettäviä tukivarsia. Tavoitteena on saavuttaa eheä ja kokonainen tuentaratkaisu, jossa etu- ja taka-akseli toimivat hyvin yhdessä.

2 DRIFTING AUTOURHEILU

Drifting sai alkunsa Japanissa 70-luvun lopulla, kun siellä ajettiin mutkaisilla vuoristoteillä kilpaa takavetoisilla autoilla. Tästä drifting kehittyi vähitellen kilpailulajiksi. Rantauduttuaan USA:han ja Formula Drift-kilpailun myötä autojen tekniikka on kehittynyt räjähdysmäisesti 2000-luvun puolivälistä eteenpäin. Kilpailuissa käytetään nykyään noin 1000-hevosvoimaisia autoja, joissa vetävillä pyörillä on suuri mekaaninen pito.

Drifting on monella tavalla poikkeuksellinen moottoriurheilulaji. Voittaja ei tässä lajissa ole monien muiden moottoriurheilulajien tapaan ole se, joka ylittää maaliviivan ensin tai suorittaa radan lyhyimmässä ajassa, vaan se, jolle tuomaristo antaa parhaimmat pisteet/arvostelut. Kysymys on siis tyyllilajista, jossa tuomaristo pisteyttää ajosuorituksen sen onnistumisen perusteella. Tuomaristo arvio kuljettajan käyttämää ajonopeutta, luistokulmaa, tyyliä sekä tarkkuutta. Radan kaikki kaarteet ovat ajettava sivuluisussa, yhdestä auton luistokulman suoritumisesta annetaan suoraan nolla pistettä koko ajosuorituksesta.

Driftingiä ajetaan asfalttipinnoitteisilla moottoriurheiluradoilla tai joissain tapauksissa myös suljetuilla katuosuuksilla. Drifting-tuomareiden on nähtävä koko ajosuorite, joten rata rajataan siten, että käytössä on useimmiten kolme tai neljä kaarretta. Tämä on myös yleisön kannalta hyvä asia, koska katsomosta voi seurata koko ajosuoritetta lähtöviivalta maaliviivalle saakka.

Drifting on erityisesti ulkomailla hyvin suosittu laji. Kilpailut ovat näyttäviä ja yleisöystävällisiä tapahtumia, minkä vuoksi yhden kilpailutapahtuman yhteydessä voi kilpailua tulla seuraamaan jopa 20000 katsojaa. Merkittävimpiä kilpailuja on Drift Masters European Championship Euroopassa, Japanissa D1 GP ja Venäjällä Russian Drift Series. Formula Drift-sarjan taso USA:ssa edustaa kuitenkin korkeinta tasoa koko lajissa. Näissä kaikissa kilpailusarjoissa on usein neljästä yhdeksään osakilpailua yhdessä kilpailukaudessa.

2.1 Kilpailun kulku

Kilpailu alkaa lajitteluilla. Lajitteluissa kaikki ajavat yksitellen ja tuomarit antavat pisteitä 1-100 väliltä riippuen muun muassa luistokulmasta, nopeudesta, tarkkuudesta ja tyylistä. Näillä pisteillä luodaan Top 32 -kaavio, jossa ajetaan pariajoo (Kuva 2). Lajitteluiden hei-

koimmin ja parhaimmin pärjänneet ajavat vastakkain, jonka jälkeen toiseksi heikoin vastaan toiseksi paras jne. Parit ajavat aina kaksi kertaa, niin että molemmat pääsevät ajamaan edellä ("johtamaan") ja ajamaan perässä ("seuraamaan"). Tuomarit päättävät, kumpi pääsee jatkoon, kun molemmat ajot on ajettu. Näin kilpailu jatkuu loppuun asti.



Kuva 2. Pariajota Formula Drift Japan (KW News 2019).

Kilpailussa on kolme tuomaria, josta jokaisella on oma alue arvioitavana. Yksi arvioi luisetukulmaa, toinen nopeutta ja kolmas tyyliä ja tarkkuutta. Jokainen tuomari antaa oman äänensä, kumpi kuljettajista menee jatkoon kaaviossa. Enemmän ääniä saanut etenee kaaviossa. Joskus tulee tilanteita, kun molemmat kuljettajat ajavat pariajot niin tasavertaisesti, että ei voi arvioida kumpi menee jatkoon. Tätä varten tuomareilla on käytettävissä "OMT - One More Time" -vaihtoehto, jossa kuljettajat ajavat pariajot uudestaan. Jos kahden kuljettajan suoritukset ovat tasavertaiset, he voivat saada OMT-arvion monta kertaa peräkkäin. Silloin he ajavat uudestaan, kunnes toinen tekee virheen.

Renkaat voi kilpailusääntöjen mukaan vaihtaa jokaisen pariajon välissä, eli renkaiden on kestettävä kaksi kilpailusuoritusta. Tämä on suurin syy miksi drifting-autojen moottoritehot eivät ole kasvaneet yli 1200 hevosvoiman. Vaikka nopeutta saataisiin lisää, renkaat eivät kestäisi kahta ajosuoritusta. Tällä hetkellä monet kilpailijat tasapainoilevat auton tehon ja rengaskulutuksen kanssa jokaisella radalla erikseen. Toistaiseksi ei ole vielä kehitetty sellaista rengasta drifting-käyttöön, joka käyttöikä olisi pidempi. Renkaita koskevat säännöt vaihtelevat eri kilpailusarjoissa, kaikissa on aina käytössä semi-slick-renkaat (Kuva 3).



Kuva 3. Semi-slick-rengas Federal 595 RS-R (Engineered to Slide 2011).

Driftingin viimeaikainen trendi on ollut se, että autoilla ajettavat nopeudet ovat selvästi aiempaa suurempia. Tämä vaatii enemmän auton suorituskyvyiltä, suurempaa moottoritehoa ja enemmän rengaspitoa. Voisi luulla, että niissä ei pidolla ole merkitystä, kun auto etenee kuitenkin sivuluisussa, mutta itseasiassa pito on yksi oleellisimmista kehityksen kohteista. Autoissa tulee olla hyvä rengaspito, jotta kilpailijat pystyvät seuraamaan mahdollisimman lähellä edellä ajavaa ja auton hyvän hallittavuuden myötä myös mukautumaan eri tilanteisiin nopeasti. Tällä saavutetaan ajamiseen tarkkuutta ja nopeutta, joita tuomarit arvioivat. Etupään pyöränripustukselta vaaditaan myös paljon, kun ohjauskuulmaa tarvitaan usein kaksinkertaisesti kuin mitä alkuperäisesti autossa on ollut. Renkaiden tulisi pysyä koko etupyörien kääntöalueen läpi mahdollisimman lähellä pystyasennossa maata vasten.

2.2 Drifting-kilpa-auton tekniset säännöt

Drifting-auton on oltava alun perin sarjavalmisteinen auto. Sarjatuotannossa käytetyt ratkaisut ovat lähtökohta, josta muokataan kilpakäyttöön soveltuvaa autoa. Auton koriin ei saa tehdä suuria rakenteellisia muutoksia heilahtelunvaimentimien kiinnitystornien väliin pituussuunnassa. Drifting-auton on oltava takavetoinen lajin luonteen vuoksi. Auto saa kuitenkin olla alun perin neli- tai etuvetoinen, joka on muutettu takavetoiseksi. Etuvetoisen auton muuttaminen takavetoiseksi vaatii usein liian paljon muokkausta muun muassa tulipeltiin ja taka-apurunkoon, että se olisi vielä drifting-sääntöjen mukainen. Sääntöjen mukaan tulipeltiä ei saa siirtää. Olemassa olevaa vaihteistotunnelia saa suurentaa niin, että autoon voi tarvittava vaihteiston asentaa. Keskeisimpiä ongelmia muutostyössä

olisi vaihdelaatikon sovittaminen moottorin jatkeeksi auton pituussuunnassa, kun vaihteistotunnelia tai sitä muistuttavaa rakennetta ei alkuperäisessä korissa ole. Myös tasauspyörästäön sijoittaminen taka-apurunkoon, jossa ei tasauspyörästäötä ole alun perin ollut, on haaste. Etu- ja taka-apurunkoihin ei saa tehdä muutoksia. Apurunkoihin saa tehdä lisävahvistuksia ja ohjausvaihteen siirtäminen on myös sallittua. Tukivarsien kiinnityspisteiden siirtäminen korin puolella on siis kiellettyä, joten alustageometriaa parannettaessa muutoksia voi tehdä ainoastaan tukivarsiin ja olka-akseleihin. Näihin ei ole mitään rajoituksia. Voimalinja on kokonaan vapaa, eli moottoriin ja voimansiirtoon ei ole mitään rajoituksia.

Turvakaaret kuuluvat kilpa-autoihin, niin myös drifting-kilpa-autoihin. Niiden ensisijainen tarkoitus on suojata kuljettajaa loukkaantumiselta mahdollisessa onnettomuudessa, mutta samalla ne jäykistävät koria merkittävästi. Tämä on oleellista, jotta jousituksen suunnittelussa saavutetaan hyvin ja johdonmukaisesti toimiva rakenne. Korin kiertojäykkyys on tietysti aina rajallinen, mutta turvakaaret jäykistävät koria merkittävästi. Vääntymistä ei tarvitse huomioida pyöräntuennan geometrian suunnittelussa, se vaikuttaa jousijäykkyyksien ja vaimentimien säätöjen valintaan. Drifting-autojen jäykkä etupään jousitus menettäisi merkitystään, jos kori kovin paljon vääntyilisi ajon aikana.

3 PYÖRÄNTUENTA DRIFTING-AUTOISSA

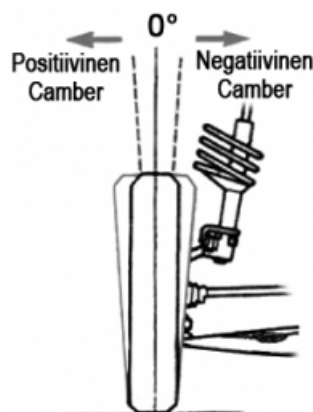
3.1 Perusteet

Pyöräntulmat määrittävät auton pyörien asennon. Yleisesti on toivottavaa, että pyörän keskilinja autoa takaapäin katsottaessa olisi kaikissa ajotilanteissa kohtisuorassa tai lähes kohtisuorassa tienpintaan nähden. Drifting-auton ajotapa poikkeaa täysin sarjavalmistetun auton ajotavasta, jolloin pyöräntuennan geometrian ja sen toiminnan tarkasteluun on otettava toisenlainen lähestymistapa. Virheelliset pyöräntulmat vaikuttavat renkaiden liialliseen kulumiseen kuten myös auton käyttäytymiseen. On huomioitava, että pyöräntuennassa olevat elastiset materiaalit, kuten esimerkiksi kumista tai uretaanista valmistetut helat, vaikuttavat pyöräntuennan käytökseen kovan rasituksen aikana.

Seuraavassa on esitelty muutamia pyöräntuentaan liittyviä tärkeimpiä parametreja. Esimerkkinä käytetään joustintukityyppistä tuentaa, mutta siinä esiintyvät määritelmät pätevät yhtä lailla myös muissa pyöräntuentatyypeissä.

3.1.1 Camber

Camber (*Camber*) on pyörän pystysuuntainen sivukallistuma (Kuva 4). Kun auton pyörää katsotaan takaapäin, ja pyörän yläosa on lähempänä auton keskiviivaa kuin alaosa, on camber-kulma silloin negatiivinen. Pyörän yläreunan kallistuessa ulospäin on kyse positiivisesta camber-kulmasta.



Kuva 4. Camber-kulma (Suomen työkalu 2019).

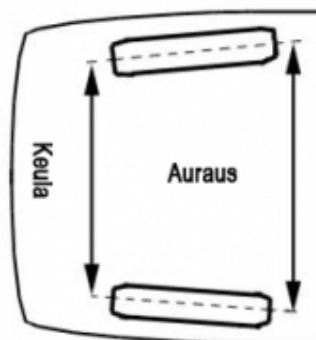
Camber-kulma ei pysy jousitusliikkeen aikana vakiona, vaan se muuttuu pyöräntuennan määräämän geometrian mukaisesti. Tämä on auton korin liikkua osin toivottua, osin ei. Kaarreajon aikana jousituksen vuoksi auton kori kallistuu ulkokaarteeseen suuntaan. Silloin ulkokaarteeseen puoleinen jousitus painuu kasaan ja pyörä ikään kuin liikkuu koriin nähden ylöspäin. Koska kori kallistuu ulkokaarteeseen suuntaan, ja jos camber-kulma pysyisi koriin nähden vakiona, kallistuisi pyörän yläosa silloin positiivisen camber-kulman suuntaan. Renkaan tarjoama sivuvoima paranee, jos pyörä ulkokaarteeseen puolella pyörii maltillisella negatiivisella camber-kulmalla. Sivuvoiman kehitys toisaalta siis heikkenee, jos pyörä on ulkokaarteeseen puolella positiivisella camber-kulmalla.

Toisaalta jarrutus- ja kiihdytystilanteissa pyörien tulisi pysyä mahdollisimman tarkasti pystyssä ajoalustaan nähden. Jarrutus- ja kiihdytystilanteissa samalla akselilla tapahtuu joustoliike samaan suuntaan, jolloin kaarreajoon optimoitu tuentageometria ei annakaan optimaalista käytöstä näissä tilanteissa.

Jousitusliikkeen aikana camber-kulman muuttumisen määrää pyöräntuennan geometria. Muuttumisen määrää ja luonnetta kutsutaan camber-käytökseksi (*Camber gain*). Se on hallittava hyvin, jotta pyörän camber-kulma olisi eri ajoalustoissa riittävän lähellä oikeaa. Liiallinen camber-kulma saattaa aiheuttaa pahimmillaan lyhyessäkin ajassa liiallista kulumista renkaiden sisä- tai ulkopinnoissa.

3.1.2 Pyörien auras tai haritus

Pyörien auras (*Toe in*) tarkoittaa sitä, että samalla akselilla olevien pyörien etuosat ovat lähempänä toisiaan kuin takaosat (Kuva 5). Renkailla ei siis ole sama kulkusuunta.



Kuva 5. Aurasikulma havainnollistettuna (Suomen työkalu 2019).

Päinvastaista ilmiötä auraukselle kutsutaan haritukseksi (*Toe out*), jolloin pyörien etuosat ovat kauempana toisistaan kuin takaosat.

Ominaisohjaus (*Bumpsteer*) tarkoittaa auraukskulman muuttumista joustoliikkeen alla. Ominaisohjauksen voi tuntea kaarreaajossa, kun ajaa tienpinnan epätasaisuuden yli, niin auto voi joko kääntyä enemmän tai vähemmän tämän jouston aikana, vaikka ohjauspyörä olisikin ollut täysin samassa asennossa koko ajan. Epätasaisella tienpinnalla auton suuntavakavuus on huono, jos autossa on jommallakummalla akselilla tai molemmilla epäedullista ominaisohjausta. On tärkeää, että tämä ominaisuus minimoidaan. Tämä on merkittävä asia varsinkin driftingissä, kun kääntökulmat vaihtelevat paljon ja epätasaisuuksia löytyy monelta radalta. Raidetangon pään sijainti olka-akselissa ja sen suhde hammastangon sijaintiin on tehtävä hyvin huolellisesti.

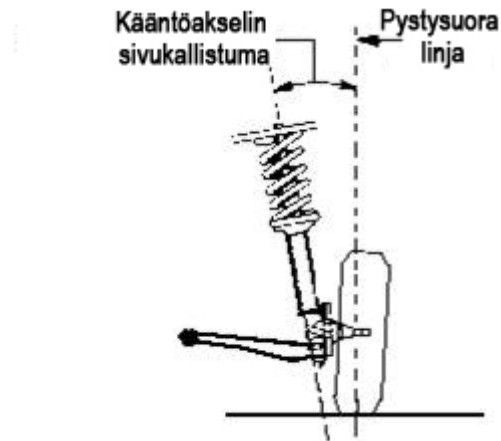
Ominaisohjausta voi myös olla taka-akselilla, ja se voi väärin säädettynä tehdä auton käytöksestä levottoman joustoliikkeen aikana. Hallitusti käytettynä taka-akselin ominaisohjauksella voidaan vaikuttaa esimerkiksi auton yli- tai aliohjautumiseen kaarreajon aikana.

3.1.3 Caster

Positiivinen caster-kulma (*Caster*) on kääntöakselin (*Steering Axis*) takakallistuman ja kuvitteellisen pystysuoran välille muodostuva kulma (Kuva 6). Positiivinen caster-kulma pyrkii palauttamaan ohjauksen kaartein jälkeen alkuperäiseen asemaansa. Caster-kulman avulla saadaan vakautettua auton ohjausominaisuuksia suoraan ajettaessa. Ohjaavalla akselilla caster vaikuttaa pyöriä kääntäessä myös pyörän camber-kulmaan. Kun pyöriä käännetään ja caster-kulma on positiivinen, silloin ulkokaarten puoleisen pyörän camber-kulma muuttuu hetkellisesti negatiiviseen suuntaan. Sisäkaarten puoleisen pyörän camber-kulma muuttuu vastaavasti positiiviseen suuntaan.

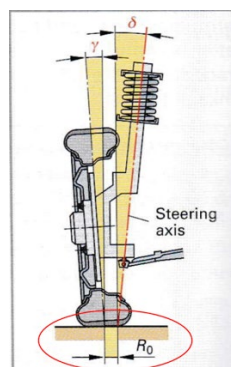
3.1.4 Kääntöakselin sivukallistuma, SAI

Kääntöakselin sivukallistuma (*Steering Axis Inclination, SAI*) tarkoittaa kääntöakselin sisäänpäinkallistumaa auton takaa katsottuna (Kuva 8).



Kuva 8. SAI-kulma (Suomen työkalu 2019).

Kääntövierinsäde (*Scrub radius*) on kääntöakselin ja pyörän keskilinjan välinen etäisyys R_0 tienpinnassa (Kuva 9). Tämä on ohjauksen kannalta vipuvoima, joka heikentää ohjaustuntumaa. Jos kääntövierinsäde olisi nolla, eli kääntöakseli kohtaisi pyörän keskilinjan tienpinnassa, ohjaustuntuma olisi kevyt ja pyörä kääntyisi paikallaan oman keskiakselinsa ympäri.



Kuva 9. Kääntövierinsäde (Modern Automotive Technology 2014).

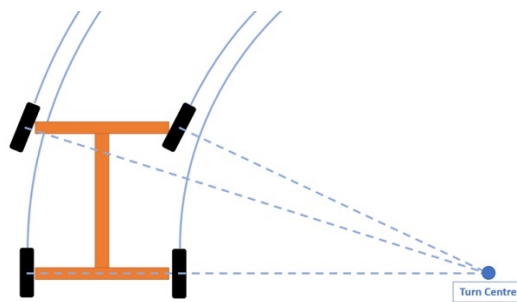
Tämä on kuitenkin vaikea toteuttaa nykyajan autoissa, joissa on joustintuki-tyyppinen ripustus, isokokoiset levyjarrut ja autossa on leveät renkaat. Ohjaustehostinta joudutaan käyttämään keventämään tästä johtuvaa raskaampaa ohjausta. Driftingissä kääntövierinsäde on pidettävä pienenä myös toisesta syystä kun pelkästään

ohjaustuntuman takia. Kun etupyörien on käännettävä todella paljon, ja siihen lisätään vielä suuri kääntövierinsäde, tarvittaisiin todella paljon tilaa sisälokasuojassa, jota monesti ei ole tarpeeksi.

3.1.5 Kääntöharitus

Tavallisessa kaarreajossa sisemmän ohjaavan pyörän täytyy kääntyä enemmän kuin ulompi. Tämä johtuu siitä, että sisempi pyörä kulkee pienemmällä säteellä olevaa ympyrän kaarta pitkin kuin ulompi. Asian korjaamiseksi etupyörien kääntökulmat tulee olla auton kaartaessa eri suuruiset, yleensä niin, että sisempi pyörä kääntyy enemmän kuin ulompi. Etupyörien kääntökulman ero on nimeltään kääntöharitus.

Niin sanottu Ackermann-ehto täyttyy, kun takapyörien kulkusuunnan suhteen piirretty kohtisuora yhtyy samassa pisteessä etupyörien suhteen piirrettyjen kohtisuorien kanssa (Kuva 10).

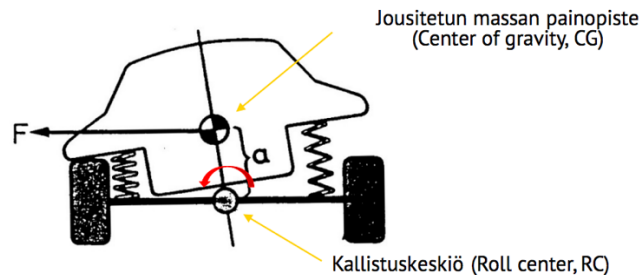


Kuva 10. Ackermann-ehto havainnollistettuna (Racecar Engineering 2021).

Ackermann-ehto on kuitenkin eräänlainen ihannetila, joka itse asiassa voidaan täyttää vain yhdellä ohjaavien pyörien kääntökulmalla joissakin tietyissä ajonopeuksissa. Nopeuden muuttuessa renkaiden elastisuudesta johtuvat sortokulmat nimittäin muuttuvat samalla kääntökulmalla, jolloin aiemman kuvan suorien kohtaamispiste siirtyy. Ackermann-ehdon täyttyminen voidaan suunnitella positiiviseksi, neutraaliksi tai negatiiviseksi. Kilpa-autoissa käytetään lajista riippuen erilaisia variaatioita tarpeen mukaan. Negatiivinen Ackermann tarkoittaa sitä, että ulompi pyörä kääntyy enemmän kuin sisempi.

3.1.6 Kallistuskeskiö

Kallistuskeskiö (*Roll center*) on pyöräntuennan geometrinen piste, johon tuennan voimat kaarreajotilanteessa ajatellaan kohdistuvan (Kuva 11).



Kuva 11. Kallistuskeskiö (*Roll center, RC*).

Etu- ja taka-akselille määritetään erikseen kallistuskeskiöt. Näiden pisteiden välille vedetty suora on auton niin sanottu kallistusakseli. Tavoitteena on, että kallistusakseli olisi autoa sivusuunnasta katsottuna lähellä vaakatasoa.

Kallistuskeskiön ja auton massakeskipisteen korkeussuuntainen etäisyys toisistaan vaikuttaa siihen, kuinka paljon auton kori jousien varassa kallistuu, kun koriin kohdistuu sivuvoima. Suurempi massakeskipisteen ja kallistuskeskiön etäisyys tarkoittaa, että auto kallistuu kaarreajossa enemmän.

Auton ajokorkeuden madaltaminen tietysti tuo massakeskipistettä alaspäin, mutta samalla pyöräntuennan geometria muuttuu niin, että kallistuskeskiö laskee alaspäin. Tuki- varsirakenteesta riippuen kallistuskeskiö voi laskea paljon enemmän kuin mitä massakeskipiste laskee, joten auton madaltaminen voimistaa auton korin kallistelua. Ilmiö kompensoituu pois yleensä huomaamatta niin, että madalluksen yhteydessä jouset vaihdetaan aiempaa jäykempiin, jolloin auton todellinen kallistelu pysyy lopulta kuitenkin maltillisena.

Kallistuskeskiön paikan olisi hyvä pysyä jousitusliikkeen aikana mahdollisimman paikallaan. Jos se liikkuu jousitusliikkeen aikana voimakkaasti, ja eri tavalla etu- ja taka-akselilla, se aiheuttaa auton ajokäyttöön pahimmillaan oikukkaasti käyttäytyvää yli- ja ali-ohjautumista. Eri pyöräntuentatyytit käyttäytyvät kallistuskeskiön osalta eri tavalla, koh-

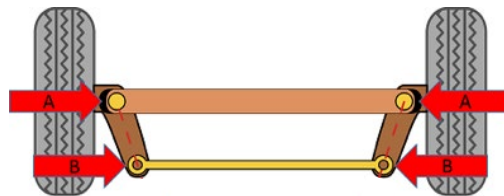
deautossa käytetty päällekkäiset kolmiotukivarret ja monivarsituenta ovat tässä suhteessa yksi ongelmattomimmista tyypeistä. Niissä kallistuskeskiön paikka ja käytös on nivelpisteiden sijoittelun avulla erittäin monipuolisesti säädettävissä.

3.2 Drifting-auto ja pyöräntuennan geometria

Drifting-autojen pyöränripustukselta vaaditaan pääpiirteiltään kahta asiaa. Taka-akselilta tarvitaan maksimaalinen pito. Etuakselilta tarvitaan hyvä ohjaustuntuma koko kääntöalueen läpi, ja kääntöalue on poikkeuksellisen suuri. Tärkeää on myös riittävät säätömahdollisuudet, jotta auto saadaan kuljettajalle mieluisaksi. Drifting on osittain tyyllilaji ja kuljettajien ajotyyleissä on pieniä variaatioita, joiden mukaan auton käyttäytyminen on säädettävä. Driftingissä kiinnitetään huomiota näyttävään auton ulkonäköön madaltamalla voimakkaasti ajokorkeutta, mutta siitä joudutaan vähitellen luopumaan. Teknisissä säännöissä määrättyjen rajoitusten vuoksi ei ole mahdollista tehdä tarvittavia muutoksia, jotta auto toimisi nykyisellä kilpatasolla erittäin matalalla ajokorkeudella. Kun drifting-autot ovat kehittyneet lajissaan entistä kilpailukykyisemmiksi, on tyyli kuitenkin viimeinen asia missä useimmat kilpailijat haluaisivat tehdä kompromisseja.

3.2.1 Etuakseli

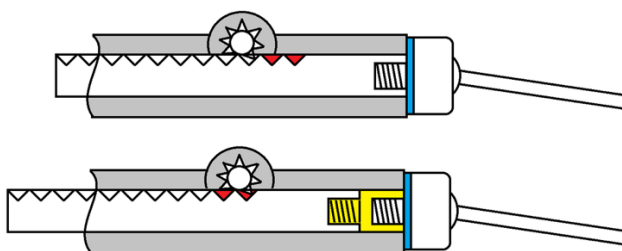
Drifting-auton ohjauksen suunnittelussa on huomioitava ohjaavien pyörien suuri kääntökulman tarve, jotta autoa voitaisiin ajaa suurilla luistokulmilla hallitusti. Ohjaavien pyörien suurin kääntymiskulma määräytyy kahdesta tekijästä, hammastangon liikematkasta ja raidetangon ulkopään sijainnista olka-akselin kääntöakseliin nähden. Tätä välimatkaa raidetangon ulkopään ja kääntöakselin välillä voi ajatella vipuvartena (Kuva 12).



Kuva 12. Olka-akselin kääntövarren vipuvarsi A:n ja B:n välissä (Stack Exchange 2014).

Jos hammastangon liikematka pidetään samana, mutta lyhennetään vipuvartta, suurin mahdollinen ohjauskulma kasvaa. Samalla ohjauksen välitys muuttuu myös nopeammaksi ja ohjaus tulee raskaammaksi käyttää. Tämä on yleisin tapa lisätä ohjauskulmaa drifting-autoissa.

Tietyissä ohjausvaihteissa voi lisätä hammastangon liikematkaa. Tämä tehdään lisäämällä jatkoholkit raidetangon sisäpään kierreosan ja hammastangon väliin. Jatkoholkit ovat erilaisia ohjausvaihteesta riippuen. Jossain tapauksissa ne voivat olla aluslevy, jotka antavat muutaman millimetrin lisää liikematkaa kumpaankin suuntaan. Kuvan 13 tapauksessa on esitetty hammastangon päähän kierrettävät jatkoholkit.



Kuva 13. Esimerkki ohjausvaihteen jatkokappaleesta (Drift-it 2017).

Hammastangon liikevaran kasvattaminen edellä mainitulla menetelmällä toimii vain, jos liikevaran rajoittajina ovat raidetangon sisäpään nivelet. Tällä tavalla voi saada lisättyä ohjauskulmaa nopeuttamatta ohjausta, lisäys vaihtelee mallista ja jatkoholkista riippuen 5-10 °.

Kun autoon lisätään pelkästään kääntökulmaa ja käännetään pyörät ääriasentoon, ne ovat harvoin halutussa asennossa. Koska camber-kulma muuttuu kääntäessä kääntöakselin takakallistumasta johtuen. Tavoite olisi se, että etupyörät koskettaisivat koko kulutuspinnallaan maata, kun $\frac{3}{4}$ ohjauskulmasta on käytössä. Edellä olevan etupyörän merkitys on kuitenkin suurin koska auto voi kallistua niin paljon siihen suuntaan, että seuraava etupyörä jää ilmaan. Useimmissa tilanteissa molemmat etupyörät kuitenkin koskettavat maata, mutta seuraavan etupyörän paino maata kohden on paljon pienempi kuin edellä olevan. Ilmassa tai lähes ilmassa olevan pyörän ohjausvaikutus on hyvin pieni (Kuva 14).



Kuva 14. Auton kallistuminen (Driven 2020).

Kääntäessä edellä olevan pyörän camber-kulma muuttuu positiiviseen suuntaan. Kääntökulman kasvaessa positiivisen casterin aiheuttamaa camber-muutosta voi kompensoida lisäämällä negatiivista staattista camber-kulmaa, eli kääntäessä pyörän camber-kulma lähenee siis nollaa. Tämä johtuu kääntöakselin takakallistumasta. Staattinen suuri negatiivinen camber-kulma etupyörissä on suoraan ajettaessa ja voimakkaissa jarrutuksissa tietysti huono ratkaisu, mutta toisaalta saadut edut auton ohjattavuudessa sivuluisun aikana ovat merkittävät. Tämän seurauksena edessä halutaan yleensä paljon negatiivista camber-kulmaa staattisessa tilanteessa, neljästä asteesta jopa seitsemään.

SAI:ta ja caster-kulmaa joudutaan monesti vähentämään, jotta kääntöakseli olisi lähempänä pystysuoraa. Tämän myötä pyörä olisi lähellä nolla camber-kulmaa koko kääntöalueen läpi ja staattisen negatiivisen camber-kulman tarve edessä vähenee. Caster-kulma on yleisesti kuitenkin kolmesta kuuteen astetta drifting-autoissa. Sitä ei kuitenkaan voi asettaa kokonaan nollaksi, jotta ohjauspyörän palauttava momentti säilyisi. Tämä ei ole drifting-autoissa toivottavaa, koska auton odotetaan ohjaavan itsestään puolenvaihdossa. Tätä korjataan lisäämällä caster-jättämää. Tällä tavalla saa säilytettyä ohjauspyörän vahvan palauttavan momentin pienellä caster-kulmalla.

Drifting-autoissa voidaan käyttää etuakselilla hieman haritusta, jotta ohjaus olisi helpempi ja että auton saaminen luisuun olisi vaivatonta. Kääntöharitus pidetään pienenä tai jopa nolla asteessa. Jos kääntöharitus on nolla, silloin molemmat ohjaavat pyörät kääntyvät saman verran. Tällä on suuri vaikutus, miten auto haluaa luonnollisesti mennä kaarteiden läpi. Kun halutaan auton kulkevan loivemmin tai syvemmällä kaarteissa, voidaan kääntöharitusta säätämällä vaikuttaa tähän. Joissakin tapauksissa on käytetty negatiivista kääntöharitusta, mikä on käytännössä osoittautunut varsin harvinaiseksi.

3.2.2 Taka-akseli

Auton takapäässä camber-kulman tarvitsisi olla lähes nolla täydessä vedossa, jotta kaikki pito saataisiin takarenkailta ja niiden kulutus olisi tasaista. Drifting-autot on rakennettu sarjatuotantovalmisteen auton pohjalta, ja tekniset säännöt estävät apurunkojen muokkaamisen. Lisäksi kun auto ulkonäkösyistä madalletaan paljon, staattinen camber-kulma voi olla erittäin suuri. Sisäänjouston aikana camber-kulma kasvaa vielä entisestäänkin. Lähes nollan camber-kulman saavuttaminen täydessä vedossa tarkoittaa siis olka-akselin muutoksia camber-kasvun vähentämiseksi. Vaihtoehtoisesti positiivista camber-kulmaa voi lisätä jopa yhteen asteeseen staattisessa tilanteessa. Takapäässä pieni auraus lisää pitoa takarenkaille, joten pieni määrä on suotavaa.

3.3 Jousitus ja kallistuksenvakaajat

Drifting-autoissa käytetään yleisesti pehmeää takapään jousitusta ja jäykkää etupään jousitusta. Esimerkiksi Nissan S13/14/15:ssä käytetään yleisesti jäykkyydeltään 220 N/mm jousia edessä ja 50 N/mm jousia takana. Nissaneiden massa kilpakunnossaan on noin 1200 kg ja jousirakenne on suoraan kiinnitetty olka-akseliin, eli varsinaista vipuvaiikutusta jouseen ei kohdistu. Pehmeällä takajousituksella tavoitteena on saada takarenkaille mahdollisimman hyvä pito, kun taas jäykkä jousitus edessä estää auton liiallisen kallistumisen. Pehmeä takajousitus myös myötäilee epätasaisempiakin ratoja paljon paremmin kuin jäykkä jousitus.

Kallistuksenvakaajat ovat hyvin yksilöllinen aihe driftingissä, mutta hyvä lähtökohta on, että edessä olisi alkuperäistä hieman jäykempi vakaaja, jossa on säätömahdollisuus. Takana sarjatuotantoauton alkuperäinen on usein riittävä ja siinä on myös tärkeää olla myös säätövaraa. Näiden säätäminen tai ylipäättänsä käyttäminen on täysin riippuvaista kuljettajan mieltymyksistä, ajotavasta ja radasta. Karkeasti sanottuna takakallistuksenvakaajan ollessa jäykempi, sivuttaispitoa on vähemmän, mutta auto on vakaampi ajaa. Löysempi vakaaja antaa enemmän sivuttaispitoa mutta vähemmän vakautta. Kun käyttää jäykkää vakaajaa edessä yhdistettynä jäykkään etujousitukseen, etupään pito heikenee mutta ohjaustuntuma on paljon tarkempi. Tämä ratkaisu sopii, jos käytössä on paljon moottoritehoa ja kuljettaja ”ajaa autoa taka-akselilta”. Kun taas tehoa on vähemmän käytettävissä, etujousitus täytyy säätää pehmeämmäksi ja takapäättä jäykemmäksi. Takajousitus ei kuitenkaan saa missään vaiheessa olla lähelläkään yhtä jäykkä kuin etupään jousitus.

Jos edessä ei käytetä kallistuksenvakaajaa, niin takapään pito pysyy täysin samana, jopa puolenvaihdossaakin. Sen myötä eturenkailla on maksimaalinen pito myös koko ajan ja ohjaukseen liittyviä virheitä ei saa olla. Vakaaja lisää enemmän tilaa virheille, kun eturenkaat voivat luistaa hieman. Tämä on täysin kuljettajasta kiinni, että kuinka tarkka hän on ohjausliikkeissään.

Auton pyöräntuentaan ja jousitukseen liittyvät kaikki valinnat ovat riippuvaisia toisistaan ja kokonaisuus onkin hyvin monimutkainen. Lisäksi asiaan vaikuttaa kuljettajan tapa käyttää autoa ja hänen mieltymyksensä. Sama koskee myös kaikkia muita alustan säätöjä, tärkeintä on se, että lähtökohta on sellainen, mistä pystytään säätämään kuljettajalle toimiva auto.

4 ALUSTAN MITTAUS JA SIMULOINTI

4.1 Kohdeauto

Kohdeauton Toyota Mark II:n alusta on työtä aloittaessa alkuperäinen lukuun ottamatta coilover-jousi-vaimentimia, jotka ovat korkeus- ja jäykkyys-säädettävät. Auton ajokorkeutta on madallettu 70 mm alkuperäisestä. Etu-akselille on myös asennettu säädettävät alatukivarret, jotta casterille olisi säätömahdollisuus.

Auton etupään pyöräriipustus perustuu päällekkäisiin kolmiotukivarsin, eli yksi ala- ja yksi yläkolmiotukivarsi sekä raidetanko (Kuva 15). Tässä tapauksessa iskunvaimennin kiinnittyy alatukivarteen.



Kuva 15. Toyota Mark II etupään pyöräriipustus (Powervehicles 2021).

Takapäässä on multilink-pyöräriipustus (Kuva 16). Tukivarsia on neljä, joista ylätukivarsi on kolmiotukivarsi.



Kuva 16. Toyota Mark II takapään pyöräriipustus (jälkiasenteisilla säädettävillä tukivarsilla) (R-Parts-Store 2021).

Auton pyöräntuennassa olevien kaikkien nivelpisteiden paikat on pystyttävä määrittämään, jotta geometrian toimintaa voi simuloida. Autossa oleva rakenne on kyettävä mittaamaan tarkasti. Autosta tulee mitata kaikki korissa ja apurungoissa olevat tukivarsien nivelpisteiden paikat kolmessa suunnassa (X,Y,Z). Olka-akseleissa olevat nivelpisteet mitataan omassa erillisessä kolmiulotteisessa koordinaatistossaan. Edellisten lisäksi mitataan tukivarsissa olevien nivelpisteiden etäisyydet toisistaan. Näillä tiedoilla tehdyllä laskennalla ja simuloinnilla saadaan jo varsin paljon selvyyttä pyöräntuennan toimivuudesta kohdeautossa

4.2 Kohdeauton pyöräntuennan mittaustyö

Nivelpisteiden paikat voi mitata simulointia varten monellakin eri tavalla, mutta tässä työssä mittaus tehtiin varsin vähäisin ja lopulta aika yksinkertaisin välinein. Korin nivelpisteiden paikat määrättiin siten, että auto asetettiin nykyiseen ajokorkeuteensa nelipilarinosturilla olevan jäykän levyn päälle (Kuva 17). Levy vastaa siis maanpintaa, jonka suhteen kaikki korin nivelpisteiden koordinaatit mitat mitattiin.



Kuva 17. Auto mittausalustalla.

Levyyn oli piirrettynä pituussuuntainen viiva, joka asemoitiin niin, että se oli auton keskellä ja keskiviivan suuntainen (Kuva 18). Auton keskiviiva arvioitiin tässä työssä niin, että se on helmakoteloiden alareunassa olevien pystypokkauksien puolivälissä. Auton korin keskilinja voidaan määrittää myös muillakin tavoilla, joissakin tapauksissa korissa on valmistajan määrittämiä referenssipisteitä, joita esimerkiksi korinoikaisussa käytetään hyödyksi. Kohdeauton osalta näitä tietoja ei ollut, joten referenssi valittiin helmakoteloiden avulla. Tässä on huomioitava pieni epätarkkuus, kun nämä pokkaukset ovat myös auton nostokohdat, joten niitä joutui ensin hieman suoristamaan pihdeillä ja vasaralla.

Muitakin mittauspisteitä käytettiin varmistamaan auton keskilinja olevan samassa kohdassa kuin levyn keskilinja. Auton helmakoteloiden alle laitettiin pino vanerilevyn palasia, joiden korkeus vastasi ajokorkeudella olevaa korkeutta. Näin tehtynä auton pyörät voi irrottaa ja saada lisää työskentelytilaa pyöräholvissa.



Kuva 18. Auton keskittäminen mittausalustalle.

Jokaisen korissa olevan alustan nivelpisteen koordinaatit on mitattava (X, Y, Z). Simulointiohjelman koordinaatiston voi valita useammallakin eri tavalla. Tässä työssä valittiin niin, että X-suunta on leveyssuunta, Y on korkeussuunta ja Z on auton pituussuuntainen koordinaattiakseli. Nollakohdat vastaavasti X-suunnassa auton pituussuuntainen keskilinja, Y-suunnassa levyn pinta ja Z-suuntaan etuakseliston pyöränapalinja. Näissä mitauksissa apuna oli tavallinen ristilaser, rullamitta ja työntömitta. Arviointikykyä oli käytettävä esimerkiksi suljetun pallonivelen pallon keskipisteen paikanmäärittämisessä, kun käytössä ei ollut ylimääräisiä palloniveliä, joista olisi voinut halkaisemalla varmistaa tarkkaa keskipistettä. Ristilaser oli todella hyvä työkalu mittauksessa (Kuva 19). Sen pystyi asettamaan niin, että se osoittaa mitattavan akselin mukaiseen suuntaan ja samalla valitun nivelen yli. Tällä tavalla X ja Z-suuntaiset koordinaatit pystyi mittaamaan rullamitalla suoraan mittausalustan pinnasta. Tämä nopeutti mittauksia ja mittauksista tuli tarkkoja.



Kuva 19. Mittauksessa käytetty apuna ristilaseria.

Renkaat ja vanteet mitattiin myös. Vannemerkintöjen mukaisia mittatietoja voitiin pitää luotettavina, joten pelkästään renkaat mitattiin. Renkaiden mittausten tärkein tieto on todellinen vierintähalkaisija. Muut renkaista mitatut tiedot ovat lähinnä SusProg3D-ohjelman visualisointitarpeita varten. Vanteiden oleellisin tieto on ET-luku, koska se vaikuttaa suoraan vierintäsäteen suuruuteen.

Olka-akselissa olevat nivelpisteet mitattiin erillisenä, koska tämä todettiin helpoimmaksi tavaksi syöttää koordinaatit ohjelmaan. Ohjelmaan syötetään koordinaatit siten, että olka-akselit ovat omassaan ja kori omassa koordinaatistossa. Olka-akselit mitattiin niin, että erilliseen vanerilevyyn tehtiin reiät pyörän pinnapulteille ja keskireiälle. Vanerilevy tuli kiinni napaosaan samaan kohtaan kuin auton vannekin asennetaan. Olka-akselin nivelpisteiden paikat mitattiin tähän vanerilevyyn niin, että x-suuntainen leveyssuunta (nollakohta vanteen ja samalla vanerilevyn kiinnityspinta), y-suunta korkeussuunta ja z-suunta auton pituussuunta. Näin siihen oli hyvä mittausalusta, kun kaikki koordinaatit ilmoitetaan ohjelmaan niin, että se taso mihin vanne kiinnitetään, on nolla.

Korin mittauksien osalta huomattiin, että leveyssuuntaisissa mittaustuloksissa oli aina saman verran eroa samaan suuntaan (3 mm). Tämä systemaattinen ero johtui tässä tapauksessa todennäköisimmin siitä, että helmakoteloiden perusteella valittu keskiviiva ei olekaan sama linja kuin mitä aikanaan korin valmistusvaiheessa on keskiviivana käytetty.

Yksittäisissä mittauksissa voi vasen/oikea-puolierot kertoa korin vinoudesta, joka on syntynyt valmistusteknisestä epätarkkuudesta tai vaikkapa suurpiirteisesti tehdystä korinokaisusta/korjauksesta. Tässä tapauksessa offset oli kuitenkin näkyvissä kaikissa mitatuissa X-koordinaateissa, joten kysymys oli valitusta keskiviivasta. Tämän voi helposti kompensoida pois simulointivaiheessa. Mitat on korin osalta otettu kaikki tästä lähtökohdasta. Kun tehtaalla auto on aikanaan valmistettu, kori on hitsattu, voi siellä valittu referenssitaso, linja tai piste olla eri tavalla valittu. Tämä vaikuttaa siihen, että mittauksiin voi tulla systemaattinen "offset", joka näkyy kaikissa X-suuntaisissa mitoissa.

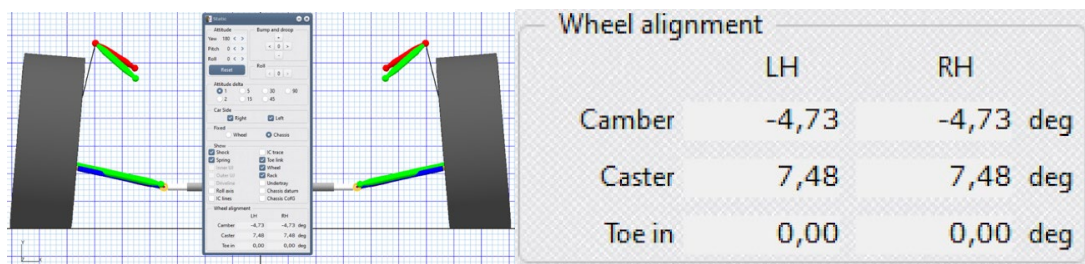
Offsetin voi kompensoida pois muuttamalla mittoja oikeaan suuntaan, silloin auto olisi symmetrinen vasemman ja oikean puoliskonsa suhteen. Muuten auto oli suora ja mitat olivat melkein millin tarkkuudella identtiset molemmin puolin, mikä ei ole itsestään selvää näin iäkkäässä autossa.

4.3 Geometrian simulointi

Kun mitat olivat niin lähellä toisiaan molemmin puolin, ainoastaan toisen puolen mitat syötettiin SusProg3D-ohjelmaan, mutta vähentämällä havaitun leveyssuuntaisen "offsetin" puolikas eli 1,5 mm. Tämän jälkeen oli mahdollista käyttää ohjelman toimintoa, joka tekee toisen puolen peilikuvana. Jos auton vasemman ja oikean puolen välisissä mitoissa olisi ollut paljon erisuuntaan meneviä mittoja, tätä ei olisi voinut tehdä. Silloin molemmat puolet täytyisi syöttää ohjelmaan erikseen. Simuloinnissa käytetyt arvot kuuluisivat olla mahdollisimman tarkasti samanlaiset kuin on todellinen tilanne korissa ja pyöräntuennassa. Jotkut ominaisuudet, kuten esimerkiksi ominaisohjaus, ovat todella herkkiä pienillekin muutoksille.

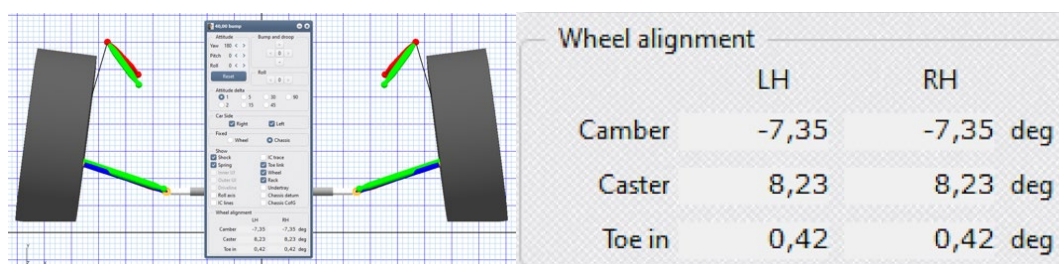
4.4 Etuakselin simulointi

Etuakselin simulaatiotulokset toivat esille jo useamman aavistetunkin ongelman. Suurimpana ongelmana ovat jo silmin nähtävätkin ala- ja ylätukivarsien epäedulliset asennot (Kuva 20).

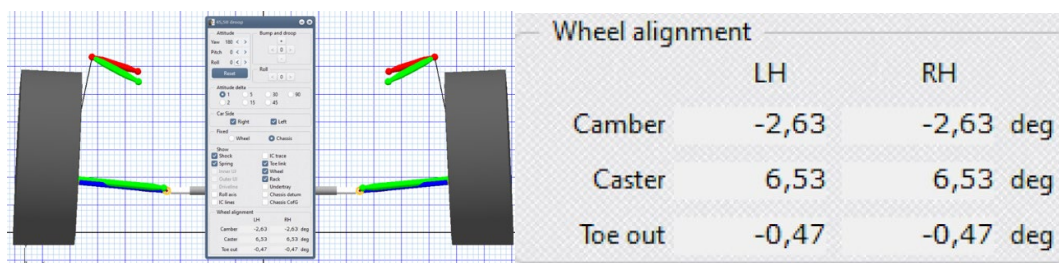


Kuva 20. Alkuperäinen etuakseli staattisessa tilanteessa.

Olisi eduksi, jos ala-tukivarret olisivat edes suunnilleen vaakatasossa, tai paremminkin niin, että alapallonivel olisi hieman alempana kuin sisempi. Tämä vaikuttaa pääasiassa auton kallistumiseen. Jos alatukivarsien sisemmät nivelpisteet ovat alempana kuin ulommat, niin kallistuskeskiö (*Roll Center*) on hyvin matalalla ja tällöin kaarretilanteessa auton kori kallistuu voimakkaasti ulkokaarteeseen suuntaan. Ylätukivarsien asennossa olisi eduksi, jos ne ovat hieman kallistuneet ylöspäin, mutta ei niin radikaalisti kuin tässä tilanteessa. Ylätukivarren raju kulma kasvattaa camber-kasvua joustossa. Tämä ei ole haluttua näissä määrin (Kuvat 21 ja 22), kun edessä on muutenkin reilusti negatiivista camberia staattisessa tilanteessa.



Kuva 21. Alkuperäinen etuakseli sisäänjoustossa (40 mm).



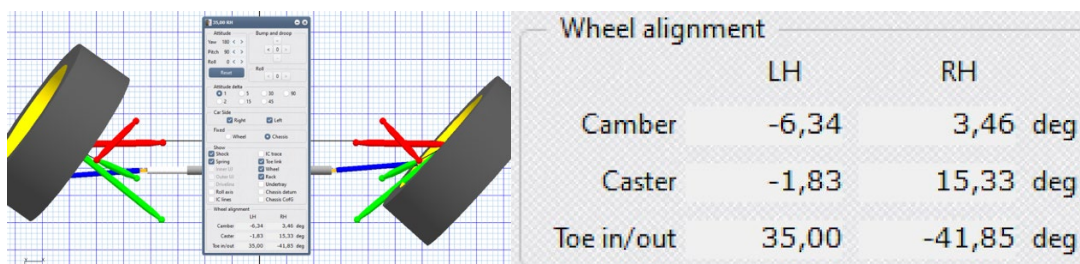
Kuva 22. Alkuperäinen etuakseli ulosjoustossa (45,5 mm).

Camberin muuttuminen riippuu kahdesta mitoituksesta, ylätukivarren pituudesta suhteessa alatukivarren pituuteen sekä ylätukivarren kulma suhteessa vaakatasoon. Pituuksien erolla tehdään camber-kulman muutoksesta lineaarista, joustoliikkeen aikana camber-kulma muuttuu silloin rauhallisesti. Kohdeauton tapauksessa ylätukivarren pituus on noin $\frac{3}{4}$ -osaa alatukivarren pituudesta, mikä tuottaa maltillisen camber-käyttäytymisen.

Kun ylätukivarren asento on kohdeauton kaltainen, camber ei käyttäydykään lineaarisesti joustoliikkeen aikana. Camberin kasvu on staattisen asennon ympärillä paljon maltillisempaa kuin lähellä jousitusliikkeen ääriasentoja. Mitä jyrkemmässä kulmassa ylätukivarsi on, sitä suurempaa on camberin muuttuminen. Nämä ongelmat ovat valitettavasti täysin tavanomaisia madalletulla ajokorkeudella.

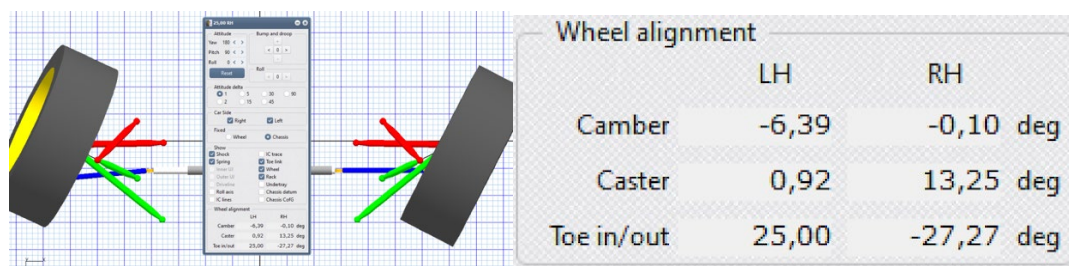
4.4.1 Ohjaus

Etuakselin pyöräntuenta on suunniteltava kokonaan uusiksi, jotta ohjauskulmaa saadaan kasvatettua. Kun simuloinnissa tarkastellaan etuakselin liikettä kääntäessä, ensimmäiset korjausten kohteet ovat ohjauskulma, joka rajoittuu mittausten perusteella jo noin 35° kulmaan (Kuva 23).



Kuva 23. Alkuperäinen etuakseli 35° kääntökulmassa.

Drifting-autoissa olisi hyvä olla noin 60° - 70° kääntyvyyttä, jotta voi saada pienet virheet pelastettua, ettei auto pyörähdä. Tällaisten ohjauskulmien saavuttamiseksi pyörää on tuotava ulospäin niin, että se mahtuu kääntymään ottamatta runkoaisoihin kiinni. Myös tukivarsien suunnittelussa on huomioitava pyörän suuri liikkumisen tarve. Camber-muutosta kääntäessä on myös vähennettävä, jotta saataisiin tasaisempi pito eturenkaille, tämä ratkaistaan pääosin casteria vähentämällä. Staattista camberia täytyy todennäköisesti lisätä, jotta sisempi pyörä olisi pystysuorassa noin $\frac{3}{4}$ täydestä ohjauskulmasta (Kuva 24).

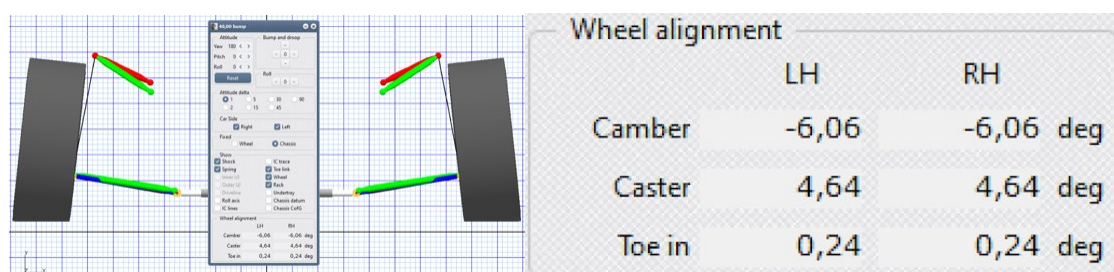


Kuva 24. Alkuperäinen etuakseli 25 ° kääntökulmassa.

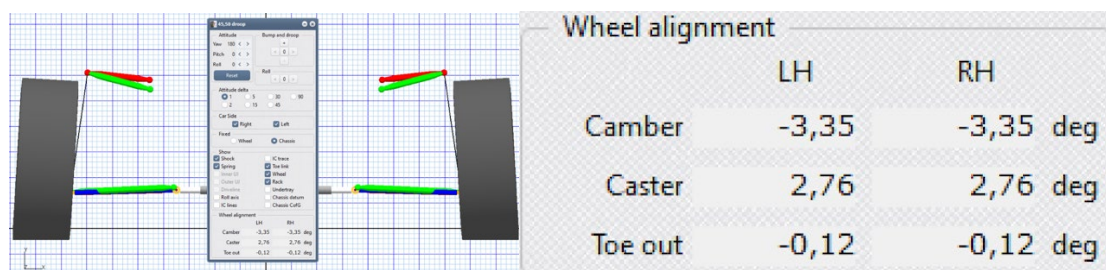
Raidetangon kulmat täytyy näiden muokkausten jälkeen tarkastaa niin, että ne eivät nyrjähdä (*Over center*). Tämä aiheuttaa sitä, että autoa on todella raskasta ohjata pois suuremmista ohjauskulmista eikä ohjaus palaudu niistä itsestään. Kun hammastanko on etuakselin takapuolella, hammastankoa joutuu todennäköisesti siirtämään eteenpäin. Tällä saadaan raidetankojen asentoa korjatuksi. Kun tarkastellaan etupyörien asentoa kääntäessä, voi huomata, että kun $\frac{3}{4}$ kääntökulmasta on käytössä eli noin 25 °, niin edellä olevan etupyörän camber on lähes nolla astetta. Tämä sama tilanne täytyy saada myös, kun $\frac{3}{4}$ kääntökulmaa on käytössä kasvatetulla kääntökulman määrällä.

4.4.2 Etuakseliston uudelleensuunnittelu

Näiden havaintojen perusteella etuakselin pyöräntuenta aloitettiin muokkaamaan. Etuakselin raideleveyttä kasvatettiin 120 mm:ä, jotta etupyörillä olisi tarpeeksi paljon tilaa kääntyä, kun haluttu kääntyvyys olisi 65 °. Myös ylä- ja alapalloniveliä siirrettiin alaspäin olka-akseliin nähden parantaen camber-käytöstä ja kallistuskeskiön paikkaa (Kuvat 25 ja 26). Yläpalloniveltä siirrettiin samalla myös eteenpäin, jotta casteria saatiin vähennettyä hieman. Caster-jättämää lisättiin myös hiukan niin, että ohjauspyörän palauttava momentti säilyisi. Tätä tehtiin siirtämällä pyörännapaa taaksepäin olka-akselissa.

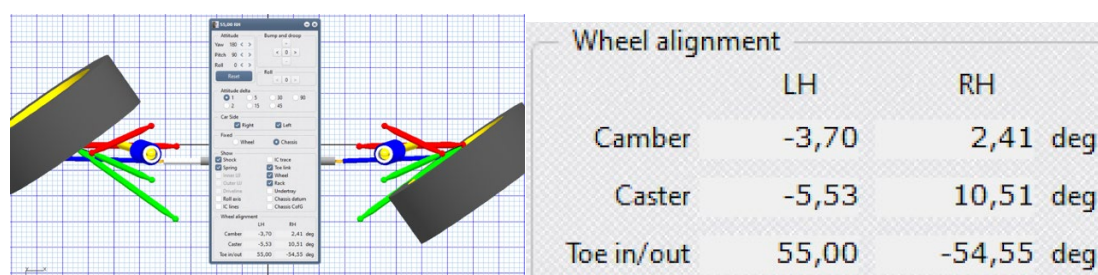


Kuva 25. Muokattu etuakseli sisäänjoustossa (40 mm).



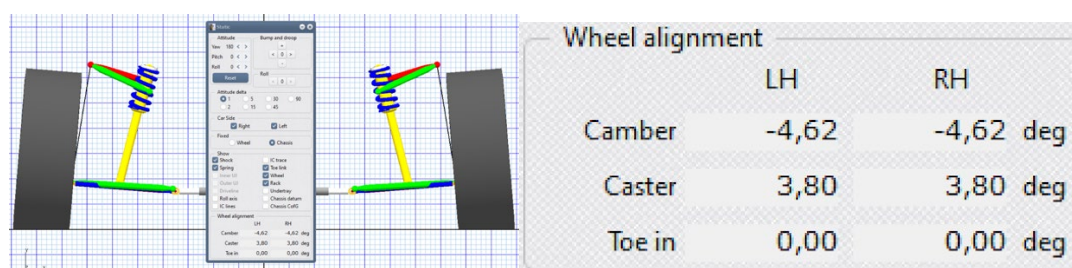
Kuva 26. Muokattu etuakseli ulosjoustossa (45,5 mm).

Kääntökulman lisäämiseksi alapallonivelen ja raidetangon ulomman pään välistä matkaa vähennettiin huomattavasti. Tämän muutoksen jälkeen raidetangot alkoivat nyrjähtää suuremmilla kääntökulmilla. Hammastankoa siirrettiin eteenpäin, kunnes nyrjähtäminen saatiin loppumaan. SusProg3D-ohjelmassa olevan rajoituksen takia kääntökulmaa ei voinut simuloida yli 55° (Kuva 27). Pyöräntulmien muuttuminen ja raidetangon asennon muuttuminen viimeisellä 10° kääntökulmasta oli arvioitava aiemman liikkeen perusteella.



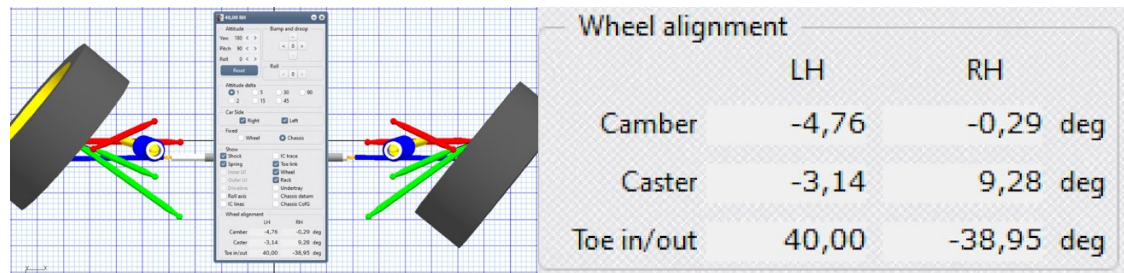
Kuva 27. Muokattu etuakseli 55° kääntökulmassa.

Lopputuloksessa päädyttiin $3,8^\circ$ casteriin ja $-4,6^\circ$ camberiin staattisessa tilanteessa (Kuva 28). Tämä oli hyvin lähellä mitä oli odotettavissa, kun etupään pyöränripustus on suunniteltu drifting-käyttöön. Raidetangon ulomman pään tarkalla sijoittamisella ominaisohjaus puolittui lähtökohdasta. Tämän näkee seuraamalla aurasukulmaan kohdistuvaa muutosta joustoliikkeessä.



Kuva 28. Muokattu etuakseli staattisessa tilanteessa.

Muokkausten jälkeen, kun $\frac{3}{4}$ kääntökulmasta on käytössä, ulomman pyörän camber-kulma on lähes nolla, kuten kuuluukin (Kuva 29).



Kuva 29. Muokattu etuakseli 40 ° kääntökulmassa.

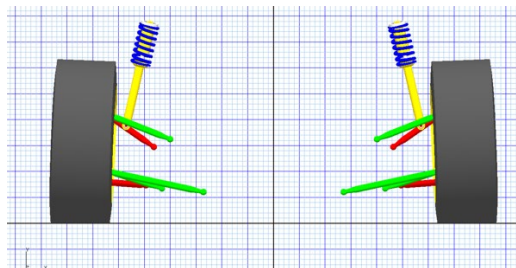
Etuakselin kallistuskeskiö liikkuu muokkausten jälkeenkin liian paljon ja on turhan matalalla sisäänjouston aikana. Tähän auttaisi ajokorkeuden nostaminen noin 50 mm:llä (Taulukko 1).

Taulukko 1. Muokatun etuakselin kallistuskeskiön korkeus joustoliikkeiden alla.

RH and LH wheel	roll centre height	
	chassis	ground
40,00 bump	9,77	-30,23
static	22,29	22,29
45,50 droop	42,99	88,49

4.4.3 Taka-akselin simulointi

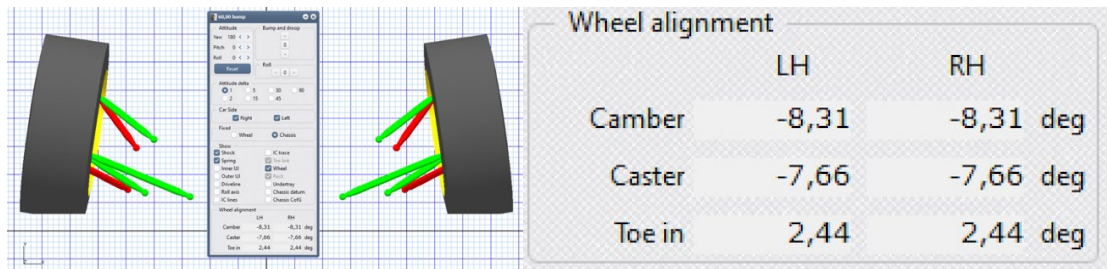
Ennen simuloinnin aloittamista oli jo tiedossa, että takapyörien ripustukseen ei ole tarvetta lähes yhtä radikaaleille muutoksille kuin edessä (Kuva 30).



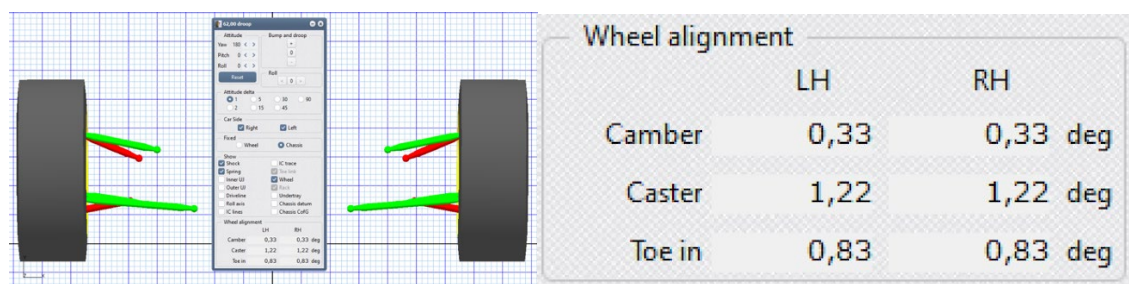
Kuva 30. Alkuperäinen taka-akseli staattisessa tilanteessa.

Tavoite on, että takapyörien camber-kulma olisi mahdollisimman lähellä 0 ° koko joustomatkan aikana. Tässä on odotettavissa suurin muutos, koska camber-kasvu on tämän

auton kohdalla todella suurta 70 mm ajokorkeuden madaltamisen seurauksena (Kuvat 31 ja 32).



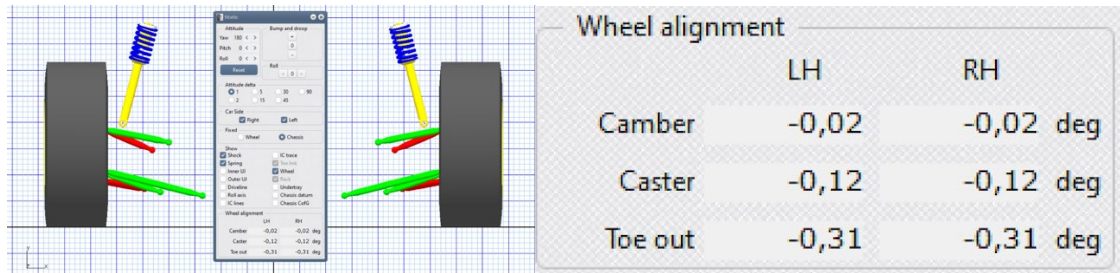
Kuva 31. Alkuperäinen taka-akseli joustossa (60 mm).



Kuva 32. Alkuperäinen taka-akseli ulosjoustossa (62 mm).

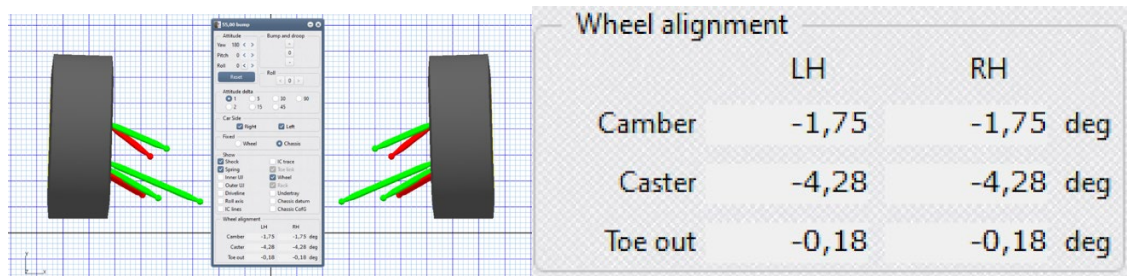
Tavoitteena on myös, että auraus pysyisi samana joustomatkan ajan, siinä olisi hyvä lähtökohta lähteä hakemaan erilaisia säätöjä ominaisohjaukselle jouston alla ajossa. Tämän voi toteuttaa esimerkiksi tiettyjen tukivarsien säädettävillä kiinnityspisteillä olka-akselissa.

Tukivarsien asentoja voi parantaa nostamalla pyörännavan sijaintia olka-akselissa korkeammalle. Sitten auton ajokorkeutta voi nostaa saman verran ja ajokorkeus pysyy ennallaan, ja tukivarsien asennot ovat paremmat. Tällä yksinkertaisella muutoksella oli suurin vaikutus taka-akselin camber-käytöksen ongelmiin. Tämä muutos ei kuitenkaan ratkaissut ongelmaa kokonaan, joten yläpallonivelen sijaintia oli vielä laskettava (Kuva 33). Vetoakselin nivel oli hyvin lähellä yläpalloniveltä pyörännavan nostamisen jälkeen. Tämän johdosta oli yläpalloniveltä siirrettävä myös hieman eteenpäin, jotta sitä saisi vielä vähän laskettua. Tällä tavalla camber-kasvu saatiin minimoitua.

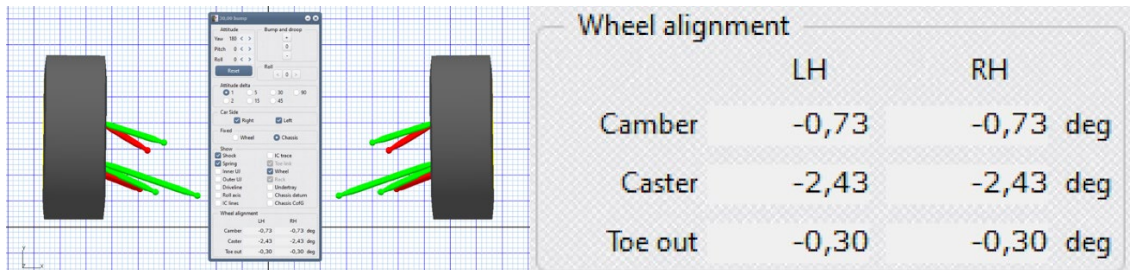


Kuva 33. Muokattu taka-akseli staattisessa tilanteessa.

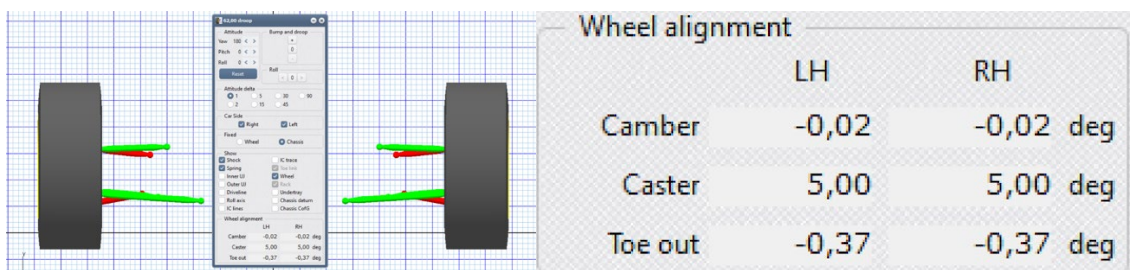
Siirtämällä muiden tukivarsien kiinnityspisteitä olka-akselissa, myös aurauksen muutoksen minimoitui. Nämä muutokset olivat kuitenkin erittäin pieniä (Kuva 34, 35 ja 36).



Kuva 34. Muokattu taka-akseli sisäänjoustossa (55 mm).



Kuva 35. Muokattu taka-akseli sisäänjoustossa (30 mm).



Kuva 36. Muokattu taka-akseli ulosjoustossa (62 mm).

Simuloinnin ja muutosten ansiosta tuloksena on hyvin toimiva takapään pyöräripustus, jos tarkastellaan pyöräntulmia ja niiden muutoksia joustoliikkeiden alla. Takapyörät pysyvät lähes samassa asennossa koko joustoliikkeen läpi. Tässä on hyvä lähtökohta minkä pohjalta voi suunnitella auton pyöräripustuksen valmistamisen. Ongelmaksi jäi kuitenkin kallistuskeskiön liian matala sijainti taka-akselilla. Kallistuskeskiö nousisi hie-
man nostamalla ajokorkeutta noin 50 mm, koska kun tarkastellaan kallistuskeskiötä ulos-
joustossa, se on paljon paremmassa paikassa, kuin nykyisellä ajokorkeudella (Taulukko 2).

Taulukko 2. Muokatun taka-akselin kallistuskeskiön korkeus joustoliikkeiden alla.

RH and LH wheel	roll centre height	chassis	ground
55,00 bump	-125,14	-180,14	
50,00 bump	-130,81	-180,81	
40,00 bump	-140,72	-180,72	
30,00 bump	-148,88	-178,88	
20,00 bump	-155,52	-175,52	
10,00 bump	-160,81	-170,81	
Static	-164,91	-164,91	
62,00 droop	-171,74	-109,74	

Tämä kannattaa ottaa huomioon, kun auton ajokorkeus päätetään. Tässä työssä ei kuitenkaan ollut tarkoitus koskea ajokorkeuteen, vaan pelkästään tekemällä ripustuksiin muutoksia ja tämän myötä parantaa geometriaa.

5 POHDINTAA

Simulointia voisi jatkaa vielä pidemmälle ja hienosäätää tuentojen ominaisuuksia vieläkin paremmaksi. Saatavilla oleva parannus simulaatioiden jatkamisella olisi käytännössä enää todennäköisesti varsin pieni. Koska monet asiat täytyy säätää ajotuntuman ja kuljettajan mieltymysten mukaan, simulointia ei tule jatkaa loputtomiin. Simuloinnissa ei myöskään voi tuntea esim. ohjauksen palauttavaa momenttia, jolloin muun muassa casterin ja caster jättämän välillä oleva tasapaino jää suurimmaksi osaksi testiajojen aikana tehtäväksi säätämiseksi.

Näiden mittauksien ja simulaatioiden tuloksena on hyvä resepti millä voi aloittaa uuden pyöräripustuksen suunnittelun ja lopuksi vielä valmistamisen. Nostamalla ajokorkeutta voitaisiin ratkaista jäljelle jääneet kallistuskeskiön ongelmat. Työssä oli kuitenkin tarkoitus tutkia pyöräripustukseen kohdistuvia muutoksia ja niiden vaikutusta. Tämän takia ajokorkeus pidettiin samana, jotta muutosten vaikutukset olisivat selkeämmät.

Uuden pyöräripustuksen valmistamisessa on paljon asioita, joita täytyy ottaa huomioon kuten lujuuskestävyys, nivelöintitavat ja valmistustavat, jotta lopputulos olisi toimiva ja mahdollisimman helppo säätää varikolla. Simulaatioita tehdessä on huomioitu todellisuudessa oleva tilantarve esimerkiksi vetoakselille, kun tukivarsien ja olka-akselin nivelpisteitä on siirretty. Etupäässä on myös huomioitu, kuinka paljon etupyörät vaativat tilaa kääntyessään. Tämä helpottaa uuden pyöräripustuksen valmistamista, kun aiemmassa vaiheessa on huomioitu jo seuraavaa vaihetta.

Tukivarsien rakenteisiin on monta vaihtoehtoa, mutta kaksi perinteisintä tapaa on joko valmistaa ne putkesta tai laser/plasma leikatusta levystä (Kuva 37 ja 38).



Kuva 37. Esimerkki multilink-takapään pyöränpustuksesta drifting-käyttöön (Wisefab 2021.)



Kuva 38. Esimerkki etupään pyöränpustuksesta drifting-käyttöön vastaavalla kaksois-kolmiotukivarsi-ripustuksessa (Wisefab 2021.)

Molemmissa on omat etunsa ja on hyvin tapauskohtaista, minkälainen tukivarsirakenne autoon valitaan. Tukivarsien nivelinä voi kilpakäytössä pääasiassa käyttää joko polyuretaaniheloja tai teräksisiä kuulaniveleitä. Näistä vaihtoehtoista kuulanivelet antavat paremman liikkuvuuden, jos tukivarren täytyy päästä kiertymään. Niissä tapauksissa on ehdotonta käyttää kuulaniveleitä, kun polyuretaanihelat antavat kovuudesta riippumatta vähän periksi. Olka-akselit valmistettaisiin todennäköisesti teräslevyistä, jotka ovat laser- tai plasmaleikatut, nämä liitettäisiin hitsaamalla ja ne muodostaisivat toivotun olka-akselin rakenteen.

6 LOPUKSI

Pyöränripustuksen uudelleensuunnittelu ei ole yksinkertainen asia, vaikka tavoite ja nykyinen alustageometrian toiminta olisi tarkasti tiedossa. Pyöränripustusta suunnitellessa on usein tehtävä kompromisseja. Yhden ominaisuuden parantaminen voi heikentää toista ominaisuutta ja yksi muutos vaikuttaa samalla moneen eri asiaan. On tiedettävä tarkasti, mitkä ominaisuudet ovat tärkeimmät ja mistä voi hieman tinkiä. Tämän ansiosta ei voida koskaan puhua täydellisestä alustageometriasta, koska jokaisessa suunnittelussa rakenteessa joudutaan tekemään eri ominaisuuksien välillä kompromisseja.

Työssä päätettiin pitää ajokorkeus samana, jotta suunnitellun yksi vapausasteista olisi rajattu pois. Tällä tavoin tehtävä on vähän helpompi ja selkeämpi. Rajauksen vuoksi lopputuloksessa suunnitelmissa kallistuskeskiö jäi matalammalle kuin mitä ehkä olisi ollut toivottavaa. Tämä asia on korjattavissa ajokorkeutta nostamalla, joten se ei ole suuri ongelma, jos ajokorkeus on kuitenkin jatkossa säädettävissä.

Monet asiat, varsinkin drifting-kilpa-autojen pyöräntuennassa, vaikuttavat asioihin, jotka ovat säädettävä autosta saadun palautteen pohjalta. Simulaation avulla luodaan hyvä perusta ja jatkokehittäminen tapahtuu ensimmäisten testiajojen perusteella. Pyöräntuennan simulaation avulla saadaan paljon perusasioita kuntoon, ja myöhemmässä vaiheessa autoa kehitettäessä alustan säätäminen on enemmänkin vain hienosäätöjen tekoa.

LÄHTEET

Drift-it 2017. Rack spacers - What are they and do they work? Viitattu 22.9.2021.
<http://www.drift-it.uk/blog2-rackspacers.html>

Driven 2020. Fanga Dan and his 3- wheeling mustang win chaotic d1nz Pukekohe battle. Viitattu 22.9.2021.
<https://www.driven.co.nz/motorsport/fanga-dan-and-his-3-wheeling-mustang-win-chaotic-d1nz-pukekohe-battle/>

Engineered to Slide 2011. Tyre tech whats on the front. Viitattu 29.12.2021.
<https://engineeredtoslide.com/2011/09/tyre-tech-whats-on-the-front/>

Everythingdrift 2018. Formula D Streets of Long Beach 2018 Coverage. Viitattu 11.10.2021.
<http://www.everythingdrift.com/blog/?p=29498>

Fischer etc. Modern Automotive Technology. Europa Lehrmittel 2014. Viitattu 27.12.2021.

KW News 2019. Drift: Our friend Mad Mike wins Formula Drift Ebisu. Viitattu 10.11.2021.
<https://blog-int.kwautomotive.net/drift-our-friend-mad-mike-wins-formula-drift-ebisu/>

Powervehicles 2021. TOYOTA JZX100 MARK 2 WITH 2JZ & G35 FOR SALE. Viitattu 31.12.2021.
<https://powervehicles.com/jzx100-mark-2-with-2jz/>

Racecar Engineering 2021. Tech explained: Ackermann Steering Geometry. Viitattu 10.11.2021.
<https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-ackermann-steering-geometry/>

R-Parts-Store 2021. Bushings. Viitattu 29.12.2021.
<https://r-parts-store.com/Hardrace-Rear-Subframe-Bushings-Aluminium-91-00-Lexus-SC-Z30-/Toyota-Chaser-JZX90/JZX100-/Toyota-Mark-II-JZX90/JZX100-/93-02-Toyota-Supra-JZA80>

Stackexchange 2014. Designing an ackermann steering mechanism. Viitattu 10.11.2021.
<https://mechanics.stackexchange.com/questions/13499/designing-an-ackermann-steering-mechanism>

Suomen työkalu 2019. Pyörän asentokulmien perusteet. Viitattu 7.3.2021.
<https://www.suomentyokalu.fi/tekninen-tuki/pyoran-asentokulmien-perusteet.html>

Wisefab 2021. Shop. Viitattu 12.12.2021.
<https://www.wisefab.com/shop>