

Jarno Arkko

**Kilpa-auton jousitusgeometrian tutkiminen**

Opinnäytetyö

Kevät 2012

Tekniikan yksikkö

Auto- ja työkonetekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Jarno Arkko

Työn nimi: Kilpa-auton jousitusgeometrian tutkiminen

Ohjaaja: Ari Saunamäki

Vuosi: 2012

Sivumäärä: 73

Liitteiden lukumäärä: 10

---

Tässä työssä perehdytään kilpa-ajoneuvojen jousitusgeometriaan ja sen parantamiseen. Työssä jousitusta tutkitaan jousitusgeometria ohjelmalla, jolloin muutokset nähdään välittömästi.

Tutkimuksen kohteena on Ferrarin urheiluauto 308 GTB, joka on rakennettu asfalttirallia silmälläpitäen. Jousitusgeometrian suunnittelua rajoittavat historic-luokan säännöt, jotka kieltävät useampia muutostarpeessa olevien kohteiden muokkauksen. Sääntöjen mukaan kaiken on näytettävä alkuperäiseltä (muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta), joitakin osia saa vahvistaa ja ne ovat saatavilla luokitus-todistuksesta.

Työn pohjana on syksyllä 2011 projektiopinnoissa suoritettut työt Mäkelä Auto-Tuning Oy:lle, joissa mallinnettiin kohdeajoneuvon runkorakenne, jousituskomponentit ja turvakaaret tarkoilla mitoilla. Tämä antoi hyvät lähtökohdat tarkkojen lähtöarvojen määrittämiseen jousitusgeometriaohjelmaan.

Muutos kohteina ovat tässä työssä hammastangon kiinnityspaikka ja kolmiotuki-var sien sisäpään kiinnityskohdat. Nämä muutokset voidaan toteuttaa muutosten näyttäessä alkuperäisiltä. Vakioauton jousitusgeometria on harvoin hyvä kilpailukäytössä ja tässä tapauksessa taipuisa vakiorunkorakenne on vahvistettu turvakaarilla ja muilla tukiosilla, jolloin alustageometria muuttuu alkuperäisestä käytöksestä. Kuitenkin perustana oleva ajoneuvo on urheilullinen automalli, joten odotettavissakin on, ettei kaikkia osa-alueita ole tarpeellista muuttaa. Joka tapauksessa kilpa-autot säädetään lopuksi aina kuljettajan toivomusten ja tuntemusten mukaan.

Avainsanat: kilpa-auto, jousitusgeometria, ralli

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical and Production Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Jarno Arkko

Title of thesis: Examination of the race car suspension geometry

Supervisor: Ari Saunamäki

Year: 2012

Number of pages: 73

Number of appendices: 10

---

This thesis deals with the Ferrari 308 GTB suspension geometry and how to improve it. The suspension is examined via the suspension geometry program so the results of changes are seen immediately.

The subject of the development is Ferrari 308 GTB which is built for the asphalt rallies. Originally it had some minor faults in its suspension and also inserting the roll cage changed the chassis bending characteristics.

The rules of this historic rally car class were very strict; everything has to look original the way it was at that period. The results were quite surprising when the engineers designed this suspension in the 1970's, the chassis bending was one factor in suspension geometry. Now when the roll cage prevents chassis bending there must be changes made to the suspension geometry.

The modeling work which was done during autumn 2011 to Mäkelä Auto-Tuning Oy is the basis of this thesis. The modeling included the complete chassis, suspension components and roll cage. The accurate measurements of the modeled car gave an advantage to the usage of the suspension program.

Small position changes of the brackets that hold a-arms in chassis were the adjustments. With these small adjustments it was possible to get more out of this suspension geometry and improve its behavior in the racing situations. In the suspension program the original wheel angles at different grades of the suspension travel were bad at the rally but comfortable and safe on the road. All this was made in the simulated circumstances which probably are different in the real situations. After all every car is tuned to its driver, not a single car behaves exactly the same way.

Keywords: racing car, suspension, geometry, rally

## SISÄLTÖ

|   |    |
|---|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä.....                | 2  |
| Thesis abstract.....                          | 3  |
| SISÄLTÖ.....                                  | 4  |
| KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO .....              | 6  |
| KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET.....             | 8  |
| 1 JOHDANTO .....                              | 9  |
| 2 TUTKITTAVA AJONEUVO.....                    | 10 |
| 2.1.1 Historia.....                           | 11 |
| 2.1.2 Pyöräntuennan tyyppi .....              | 12 |
| 2.1.3 Pyöräntuennan ominaisuudet .....        | 13 |
| 3 PYÖRÄN ASENTOKULMAT .....                   | 15 |
| 3.1 Auras ja haritus .....                    | 15 |
| 3.2 Camber .....                              | 16 |
| 3.3 Caster .....                              | 18 |
| 3.4 KPI .....                                 | 19 |
| 4 PAINOJAKAUMAT JA PAINONSIIRTO .....         | 22 |
| 4.1 Pitkittäinen painonsiirto .....           | 22 |
| 4.2 Poikittainen painonsiirto .....           | 22 |
| 4.3 Diagonaalinen painonsiirto.....           | 23 |
| 5 RENGAS.....                                 | 24 |
| 6 AJODYNAMIIKKA JA JOUSITUSGEOMETRIA .....    | 28 |
| 6.1 Painopiste .....                          | 29 |
| 6.2 Kallistuskeskiö.....                      | 33 |
| 6.3 Antigeometriat – nyökkäys ja niiaus ..... | 36 |
| 6.3.1 Anti-dive .....                         | 36 |
| 6.3.2 Anti-squat.....                         | 37 |
| 6.3.3 Käyttö ja ominaisuudet.....             | 38 |
| 6.4 Bumb steer – ominaisohjaus.....           | 38 |
| 6.5 Raide- ja akseliväli .....                | 40 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 6.6 Kallistuksenvakaaja.....        | 41 |
| 6.7 Jouset .....                    | 42 |
| 6.8 Iskunvaimentimet .....          | 43 |
| 7 OHJAUSGEOMETRIA .....             | 45 |
| 8 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT .....    | 47 |
| 8.1 Pyöräntuenta kilpa-autossa..... | 47 |
| 8.2 Group 4 -luokan säännöt.....    | 49 |
| 8.3 Ohjelmisto .....                | 50 |
| 9 GEOMETRIAN TARKASTELU.....        | 51 |
| 9.1 Etujousituksen geometria.....   | 52 |
| 9.2 Takajousituksen geometria ..... | 59 |
| 9.3 Yhteiset tekijät.....           | 67 |
| 10 POHDINTA .....                   | 69 |
| LÄHTEET .....                       | 71 |
| LIITTEET .....                      | 73 |

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

|  |    |
|--|----|
| Kuvio 1. Ferrari 308 GTB (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2010). .....   | 12 |
| Kuvio 2. Ferrari 308 GTB (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2010). .....   | 12 |
| Kuvio 3. Päällekkäiset kolmiotukivarret.....   | 13 |
| Kuvio 4. Camber-kulma verrattuna maanpinnan kohtisuoraan (Milliken & Milliken 1995, 47).....                                 | 16 |
| Kuvio 5. Esimerkki camber-kulman vaikutuksesta kitkakertoimeen (Smith 1978, 18).....   | 17 |
| Kuvio 6. Caster-kulma.....   | 19 |
| Kuvio 7. Esimerkki renkaan set-offista. ....   | 20 |
| Kuvio 8. Kisarenkaan kosketuspinta 1,4 barin paineella ja 454 kg rengaspainolla (Rowley 2011, 2/3).....                      | 24 |
| Kuvio 9. Esimerkki renkaan kitkakertoimesta pystysuuntaisen voiman funktiona (Smith 1978, 17). ....                          | 25 |
| Kuvio 10. kitkakertoimen käytös luiston funktiona (Rowley 2011, 2/15).....   | 26 |
| Kuvio 11. esimerkki voiman siirto kyvystä, pystysuuntaisen voiman funktiona (Smith 1978, 18). ....                           | 26 |
| Kuvio 12. Esimerkki sortokulman vaikutuksesta kilpa-auton renkaan ominaisuuksiin (Rowley 2011, 3/6). ....                    | 27 |
| Kuvio 13. Painopiste ja sen pituussuuntainen akseli (Smith 1978, 29). ....   | 30 |
| Kuvio 14. Painopiste pituus- ja poikittaisakselilla (Mutsaer 2009). ....   | 31 |
| Kuvio 15. Painopisteen korkeussuuntainen komponentti (Laine 1985, 131).....  | 32 |
| Kuvio 16. Geometrinen kallistuskeskiö ja hetkellinen keskipiste (Instant center) erillistuennassa. ....                      | 35 |
| Kuvio 17. 100 % Anti-dive ja anti-squat esimerkki (Smith 1978, 35).....  | 37 |
| Kuvio 18, Esimerkki yhdensuuntaisilla tukivarsilla toteutetusta anti-dive ja anti-squat ominaisuudesta (Smith 1978, 35)..... | 37 |
| Kuvio 19. Ei bumb-steer ominaisuutta (Rowley 2011, 7/9). ....  | 39 |
| Kuvio 20. Geometriasta johtuva bumb-steer (Rowley 2011, 7/9).....  | 40 |
| Kuvio 21. 308 GTB takapään kallistuksenvakaaja .....   | 42 |
| Kuvio 22. Jousi ja iskunvaimennin 308 GTB:n eturipustuksessa .....   | 43 |
| Kuvio 23. Ackermann-ohjauksen periaate (Gillespie 1992, 278).....  | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Kuvio 24. Olka-akseleiden kulma 100 % Ackermann ohjauksessa (Milliken & Milliken 1995, 715)..... | 46 |
| Kuva 25. Ferrari 308 GTB kaarteessa (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2009).....                            | 48 |
| Kuvio 26. Kallistuskeskiön ja massakeskipisteen välinen momenttivarsi. ....                      | 49 |
| Kuvio 27. Mallinnettu Ferrari 308 GTB:n runko ja jousituskomponentit.....                        | 51 |
| Kuvio 28. Ylätukivarren kiinnityspisteiden muutoksen vaikutus kallistuskeskiön korkeuteen. ....  | 53 |
| Kuvio 29. Alatukivarren kiinnityspisteiden muutoksen vaikutus kallistuskeskiön korkeuteen. ....  | 53 |
| Kuvio 30. Kiinnityspisteen muutoksen vaikutus anti-dive ominaisuuteen.....                       | 55 |
| Kuvio 31. Ylätukivarren pituuden muutoksen vaikutus camber kulmaan .....                         | 56 |
| Kuvio 32. Ylätukivarren kiinnityspisteiden korkeussuunnan vaikutus camber kulmaan. ....          | 57 |
| Kuvio 33. Alatukivarren kiinnityspisteiden korkeuden vaikutus camber-kulma muutokseen. ....      | 58 |
| Kuvio 34. Ajokorkeuden muutoksen vaikutus kallistuskeskiöön.....                                 | 61 |
| Kuvio 35. Taka-alatukivarren kiinnikkeiden asennot (ylempi käännetty kiinnikkeet).62             |    |
| Kuvio 36. Takajousituksen tukivarsien kiinnityspisteiden vaikutus kallistuskeskiöön.62           |    |
| Kuvio 37. Anti-squat ominaisuus tukivarsien kiinnityspisteiden muutoksessa.....                  | 63 |
| Kuvio 38. Alatukivarren kiinnityspisteiden vaikutus camber-kulmaan. ....                         | 65 |
| Kuva 39. Ylätukivarren kiinnityspisteiden vaikutus camber-kulmaan. ....                          | 66 |
| Kuvio 40. Kallistuskeskiöiden poikittainen asema.....  | 67 |
| Kuvio 41. Etu- ja takajousituksen momenttivarret. ....   | 68 |
| <br>   |    |
| Taulukko 1. Säädettyjen pyöränkulmien arvot. ....  | 52 |
| Taulukko 2. Tukivarren pituuden muutos .....   | 56 |
| Taulukko 3. Ylätukivarren korkeusmuutokset esimerkissä.....                                      | 57 |
| Taulukko 4. Alatukivarren korkeusmuutokset esimerkissä.....                                      | 58 |
| Taulukko 5. Tukivarsien kiinnityspisteiden muutosten vaikutus. ....                              | 64 |
| Taulukko 6. Alatukivarren kiinnityspisteiden korkeusmuutos. ....                                 | 65 |

## KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

|                   |   |
|-------------------|---|
| $h'$              | Painopisteen korkeus ajoneuvon akselin keskikohdasta          |
| $l_{av}$          | Akselivälin pituus  |
| $m$               | Ajoneuvon kokonaismassa                                       |
| $m_{eo}$          | Ajoneuvon oikeaan, etummaiseen renkaaseen vaikuttava massa    |
| $m_{ev}$          | Ajoneuvon vasempaan, etummaiseen renkaaseen vaikuttava massa  |
| $m_{to}$          | Ajoneuvon oikeaan, takimmaiseen renkaaseen vaikuttava massa   |
| $m_{tv}$          | Ajoneuvon vasempaan, takimmaiseen renkaaseen vaikuttava massa |
| $PP_{pitk}$       | Painopisteen sijainti ajoneuvon pitkittäisakselilla           |
| $PP_{poik}$       | Painopisteen sijainti ajoneuvon poikittaisakselilla           |
| $PP_{kork}$       | Painopisteen korkeus maanpinnan tasosta                       |
| $R$               | Renkaan dynaaminen säde                                       |
| $\Delta m$        | Ajoneuvon akseli massojen erotus                              |
| $\Delta m_{etu}$  | Ajoneuvon etuakselille vaikuttava kokonaismassa               |
| $\Delta m_{taka}$ | Ajoneuvon taka-akselille vaikuttava kokonaismassa             |



# 1 JOHDANTO

Moottoriturheilua on harrastettu jo vuosikymmenien ajan. Ensimmäinen autourheilukilpailu järjestettiin 1887 Pariisissa. Kilpailuksi tapahtumaa oli hankala sanoa, koska osanottajia oli vain yksi. Vuonna 1894 järjestettiin ensimmäinen merkittävä kilpailutapahtuma, maantiekilpailu johon osallistui useita autoja sekä moottoripyöriä. Voitokkaasti maalin pääsivät Panhard ja Peugeot, heillä oli käytössä Daimlerin polttomoottorit. Ensimmäiset autojen jousitukset olivat erittäin yksinkertaisia ja nopeuksien kasvaessa kiinnitettiin huomiota, etteivät ne enää ole ajettavuuden ja turvallisuuden kannalta ajan tasalla. Tämä johti autonvalmistajien ja kilpailutoiminnan harjoittajien jousituksen kehittämisen aloittamiseen. Nykyaikainen jousitus on tarkkaan laskettu sille asetettujen tiukkojen vaatimusten vuoksi. Auton on oltava turvallinen, eli sen käytös on oltava ennalta arvattava ja helposti hallittava.

Työn pohjana on syksyllä 2011 projektiopinnoissa suoritettut työt Mäkelä Auto-Tuning Oy:lle, joissa mallinnettiin Ferrari 308 GTB:n runkorakenne, jousituskomponentit ja turvakaaret tarkoilla mitoilla. Tämä antoi hyvät lähtökohdat tarkkojen lähtöarvojen määrittämiseen jousitusgeometriaohjelmaan. Jousitusgeometriaohjelma, joka tuli käytettäväksi Seinäjoen ammattikorkeakoululle vuonna 2011, on käytössä useilla kilpailutoimintaa harjoittavilla yrityksillä.

Työssä tutkitaan erillisjousitetun auton jousitusgeometriaa ja sen suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä moottoriturheilun kannalta. Tarkoituksena on tutkia valmiin kilpa-auton jousitusta ja sen ominaisuuksia. Kohdeajoneuvo on tarkoitettu ajettavaksi kestopäällysteellä, joten työssä on arvioinnin kohdalla keskitytty vain tähän. Työn tarkoituksena on luoda helposti luettava ja ymmärrettävä ”opas” jousitusgeometri-an saloihin, josta olisi helppo lähteä tutkimaan siinä esiintyviä ilmiöitä. Työssä luodaan katsaus erillistuennalla toteutettuihin jousitusgeometrioihin ja niiden eri ominaisuuksiin sekä niihin vaikuttaviin tekijöihin. Työ ei paneudu tarkasti johonkin tiettyyn aihealueeseen tai ominaisuuteen jousitusgeometriassa. Jousitusgeometri-an tarkasteluun löytyy useita erittäin hienoja teoksia, joihin paneutumalla voi tämän työn pohjalta suorittaa geometrisia tarkasteluita.

## 2 TUTKITTAVA AJONEUVO

Tässä työssä tutkitaan Ferrarin vuosina 1975–1984 valmistamaa urheilullista keskimoottori autoa, 308 GTB:tä. Auton on rakentanut kilpakäyttöön kannukselainen Mäkelä Auto-Tuning Oy, ja se on vuosimallia 1976. Huomionarvoinen seikka on, että vuodesta 1975 vuoden 1977 kesäkuuhun asti valmistetut 308 GTB:t ovat lasikuitukorisia. Lasikuitukorisia 308 GTB Ferrareita valmistettiin 200 kappaletta.

308 GTB (Gran Turismo Berlinetta) (kuviot 1 ja 2) oli ensimmäinen Ferrarin rakentama lasikuitukorinen ja V8-moottorilla varustettu tieliikenneajoneuvo. Aikaisemat olivat olleet, Ferrarin jo tavaramerkiksi muodostuneella, V12-moottorilla. Alustarakenne oli muuten sama kuin edeltäjällä 308 GT4, vain akseliväliä lyhennettiin 210 mm. Euroopan markkinoille tarkoitetut GTB:t olivat varustettu kuivasumppu-voitelujärjestelmällä ja tuottivat noin 250 hevosvoimaa. Yhdysvaltoihin viedyissä 308 GTB Ferrareissa oli 240 hevosvoimaa tiukkojen päästövaatimusten vuoksi. (Ferrari 308 and 328, [Viitattu 23.3.2012].)

Vuoden 1977 alkupuolella Ferrari korvasi lasikuitukoripaneelit teräksisillä, ja samana vuonna myös esiteltiin 308 GTS. GTS oli targa-katolla, tunnuksessa olevan S-kirjaimen tarkoittaessa Spyderiä. Ferrari korvasi kaasuttimet Bosch:in K-Jetronic polttoaineen ruiskutuksella vuonna 1980. Tällöin kuitenkin hevosvoimalukemat olivat tippuneet päästövaatimusten vuoksi Euroopassa 214 ja Yhdysvalloissa 205 hevosvoimaan. 308 quattrivalvoline esiteltiin vuonna 1982 ja nimensä mukaisesti moottori oli toteutettu neljällä venttiilillä sylinteriä kohden. Tällä toteutuksella ja puristussuhteen nostolla myös hevosvoimat nousivat takaisin 240 ja 230 hevosvoimaan. Mallisarjan uusinta tuli ajankohtaiseksi vuonna 1985, jolloin esiteltiin 328 GTB ja GTS. (Ferrari 308 and 328, [Viitattu 23.3.2012].)

### 2.1.1 Historia

Ferrarin perustanut Enzo Ferrari syntyi Italian Modenassa 1898. Tapahtumarikkaan nuoruuden jälkeen Enzo työskenteli 20 vuotiaana kilpa-ajajana Construzioni Maccaniche Nazionalissa osallistuen ensimmäiseen kisaansa vuonna 1918. Hän perusti Scuderia Ferrarin, ja vuonna 1938 hänet valittiin Alfa Romeon kilpailuosaston johtajaksi. Vuonna 1940 hän lopetti työnsä Alfa Romeolla ja keskittyi omaan yritykseensä ja vuonna 1943 Ferrarin tehdas muutti Maranelloon, jossa se toimii nykypäivänäkin. (Ferrari History, [Viitattu 28.2.2012].)

Vuonna 1946 tehdas rakennettiin uudestaan vuoden 1944 pommitusten takia, tällöin Ferrari alkoi tehdä katuautoja. Ensimmäinen automalli, joka tehtaalta valmistui, oli V12-moottorilla varustettu 125 S vuonna 1947. Sen jälkeen yritys on kasvanut tasaisella tahdilla. Vuonna 1969 Enzo Ferrari myi Fiat Groupille 50 prosentin osuuden yrityksestään pysyäkseen mukana markkinoiden kasvussa. Enzo Ferrari menehtyi vuonna 1988. (Ferrari History, [Viitattu 28.2.2012].)

1970-luvun jälkeen tehdyt autot olivat pääsääntöisesti keskimoottorisia, ennen sitä suurin osa oli etumoottorisia. Valmistusmäärät olivat 80-luvulle asti vain muutamia tuhansia, mutta siitä eteenpäin valmistusmäärät kasvoivat rajusti. Tällöin valmistusmääriä alettiin rajoittaa, jolloin uusia autoja saattoi joutua odottamaan vuosia. (Ferrari History, [Viitattu 28.2.2012].)



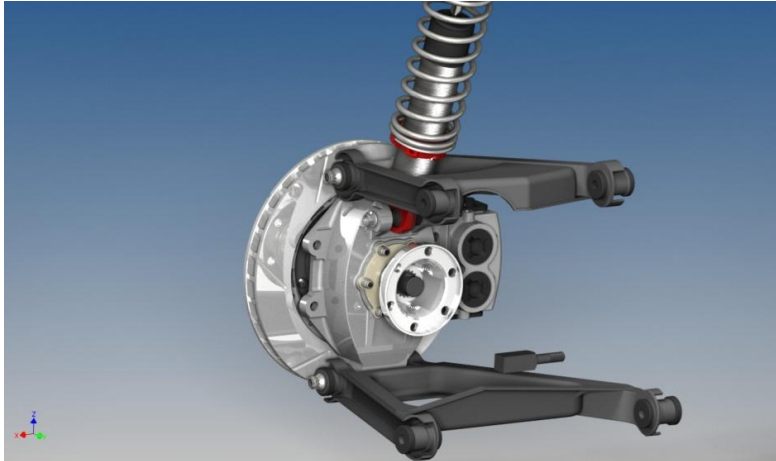
Kuvio 1. Ferrari 308 GTB (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2010).



Kuvio 2. Ferrari 308 GTB (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2010).

### 2.1.2 Pyöräntuennan tyyppi

Ferrari 308 GTB käyttää sekä etu- että takapäässä kahdella päällekkäisellä kolmiotukivarrella ja kallistuksenvakaajalla toteutettua pyöräntuuntaa (Kuvio 3). Iskunvaimennin on etupäässä kiinnitetty alatukivarteen ja takana navan yläkulmaan. Iskunvaimentimet ovat räätälöidyt kynäiskunvaimentimet, jotka on valmistanut Intrax Suspension Technology BV, kuten myös kierrejouset.



Kuvio 3. Päällekkäiset kolmiotukivarret.

**Historia.** Jo hyvin aikaisessa vaiheessa alettiin kilpa-autoissa käyttää etujousitusessa kaksois-kolmiotukivarsi tai nelilinkkipyöräntuenta. Se oli hyvin alkeellinen ja vaati aluksi kehitystyötä. Tukivarret olivat samanpituisia ja yhdensuuntaisia sekä useasti poikittainen lehtijousi muodosti ylä- tai alalinkin, näitä versioita nähtiin vielä 1950-luvulla. Kehityksen mentyä eteenpäin alettiin kiinnittää huomiota cambermuutoksiin joustotilanteissa. Se johti siihen, että alempi tukivarsi alkoi pidentyä. Tällöin camber muuttui runsaasti negatiiviseksi sisäänjoustossa kaarreajotilanteissa. Tällöin myös kaarteeseen sisäpuolen pyörän ennen kovin positiiviseksi pääsyt camber rajoittui huomattavasti. 1950-luvun loppupuolella herrat nimeltä Chapman ja Broadley alkoivat kehittää kyseistä jousitusyyppeä. Tästä alkoi nykyäänkin suurimmassa osassa kilpa-autoista käytössä olevan tuennan aikakausi. Jokaisella tuntuu olevan omat ideat, kuinka saadaan paras jousitusgeometria aikaiseksi kyseisestä jousitusyypistä, mutta periaatteeltaan ne kaikki ovat silti samankaltaisia. (Smith 1978, 42–43.)

### 2.1.3 Pyöräntuennan ominaisuudet

Kahdella päällekkäisellä kolmiotukivarrella toteutetussa tuennassa saavutetaan hyvät kineettiset mahdollisuudet. Muuttamalla tukivarsien pituuksia ja niiden kulmia ajoneuvoon ja toisiinsa nähden, voidaan vaikuttaa useisiin tärkeisiin ominaisuuksiin, kuten sisäänjouston camber ja raidevälin muutoksiin sekä kallistuskeskiön asemaan. (Reimpell, Stoll & Betzler 2001, 8–9).

**Samanpituiset ja suuntaiset tukivarret.** Tällä konstruktiolla camber muutosta jousituksen sisäänjoustossa ei olisi, kun korilla ei ole kiertokulmaa. Kaarteessa korin kiertyessä camber-muutos olisi ulko- ja sisärenkaalla täsmälleen korin kallistumisasteen verran. Tällöin ulkorengas pyrkisi positiiviseen camber-kulmaan, mikä ei ole paras mahdollinen tilanne. Muutoksia tapahtuisi myös raidelevydydessä, mikä yhdistettynä sisäänjoustoon on huono asia. Raidevälin muutos sisäänjoustossa pienentää renkaan suurinta voimansiirtokykyä, joka johtaa heikentyneeseen suorituskykyyn tai renkaan luistoon. Kallistuskeskiö pysyy maanpinnan tuntumassa koko ajan ja hetkellinen keskipiste pysyy äärettömänä tukivarsien ollessa samansuuntaisia sekä maanpinnan suuntaisia. (Smith 1978, 47.; Gillespie 1992, 243.)

**Eripituiset, samansuuntaiset tukivarret.** Kun ylätukivartta lyhennetään, camber-kulman muutos ulkokaarteeseen puoleisessa pyörässä on parempi ja sisäkaarteeseen pyörässä positiiviseen suuntaan huomattavasti pienempi. Tämä johtuu ylemmän tukivarren pienemmästä säteestä, joka pyrkii kääntämään renkaan ylälaitaa korin keskilinjaa kohti. Joustossa, jossa ei ole korin kiertymistä, tukivarret eivät pysy samansuuntaisina pituuseroista johtuen. Jos taas kori kiertyy joustossa, tukivarret pysyvät miltei samansuuntaisina. Jos joustomatka on erittäin pitkä, camber-kulman muutoksesta tulee erittäin jyrkkä. Tätä voidaan torjua asettamalla tukivarret lähes yhtä pitkiksi. Kallistuskeskiön ja akselin massakeskipisteen välinen etäisyys pysyy joustossa miltei muuttumattomana, mikä takaa painonsiirron lineaarisen käyttäytymisen. (Smith 1978, 47–54.)

**Eripituiset, erisuuntaiset tukivarret.** Tällä ratkaisulla saa määrättyä staattisessa tilanteessa tarkasti kallistuskeskiön paikan sekä hetkellisten keskipisteiden muutokset. Myös camber-kulman muutokset ovat hyvin hallittavissa. (Smith 1978, 54.; Gillespie 1992, 242.)

### 3 PYÖRÄN ASENTOKULMAT

Pyörien asentokulmat ovat erittäin tärkeitä ajoneuvon vakauden, pidon ja ohjattavuuden kannalta. Asentokulmilla saadaan ajoneuvolle määrättyä tiettyjä ajokäytöksiä, mutta niillä on väärin säädettyinä myös mahdollista muuttaa ajokäytös arvaamattomaksi tai jopa vaaralliseksi.

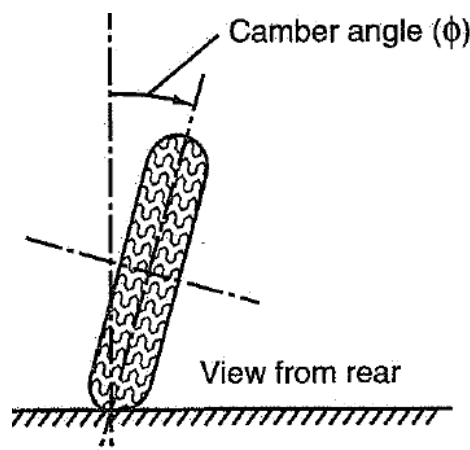
#### 3.1 Aoraus ja haritus

Pyörien pitkittäissuuntaista kulmapoikkeamaa ajoneuvon keskilinjasta kutsutaan auraukseksi tai haritukseksi. Mikäli pyörien etureunat ovat lähempänä ajoneuvon keskilinjaa kuin takareunat, on kyseessä aoraus. Jos etureunat ovat taas kauempana kuin takareunat, on kyseessä tällöin haritus. Camber-kulmasta, vierintävas- tuksesta ja vetovoimasta aiheutuu voimia, jotka pyrkivät kääntämään pyörää ajo- vakaudelle epäedulliseen suuntaan. Näitä muutoksia pyritään kumoamaan au- rauskulmilla. Tästä saatava voimatasapaino ei kuitenkaan tarkoita että renkaan pinnassa olevat voimat häviäisivät, eli esimerkiksi suurella negatiivisella camber- kulmalla varustetun ajoneuvon pyörän sisäreunan kulumista ei näin saa loppu- maan. (Mauno 2002, 20–23.)

Dynaamisissa tilanteissa auraukulmaan vaikuttavat pyöräntuennan joustavuus ja korin kiertokulma. Pyöräntuennan joustavuutta voidaan vähentää esimerkiksi vaih- tamalla tukivarsien kumiholkit jäykempiin tai jopa kiinteisiin. Ajonaikana voidaan yleisenä ohjeena pitää, että aurauksen lisääminen tuo ajoneuvolle vakautta suo- raan ajettaessa suuremmilla nopeuksilla ja aurauksen vähentäminen yliohjautu- vuutta kaarteissa sekä vaeltelua suoraan ajettaessa. Aurauksen määrän ilmoitta- miseen on kaksi eri tapaa. Yleisesti käytössä on millimetrit sekä asteet, joista tark- kuuden kannalta parempi olisi astemittaus. (Mauno 2002, 20–23.)

### 3.2 Camber

Camber-kulma on yksi tärkeimmistä kaarrekäyttäytymiseen vaikuttavista kulmista. Se tarkoittaa renkaan keskilinjan kallistuskulmaa verrattuna maanpinnan tai ajoneuvon keskilinjan kohtisuoraan, ajoneuvon taka- tai etupuolelta katsottaessa (kuvio 4). Negatiivisen camber-kulman tunnistaa siitä, että pyörän yläreuna on lähempänä ajoneuvon pitkittäistä keskilinjaa kuin alareuna. Positiivisen kulman tunnistaa kun taas alareuna on lähempänä ajoneuvon pitkittäistä keskilinjaa. (Mauno 2002, 6.)



Kuvio 4. Camber-kulma verrattuna maanpinnan kohtisuoraan (Milliken & Milliken 1995, 47).

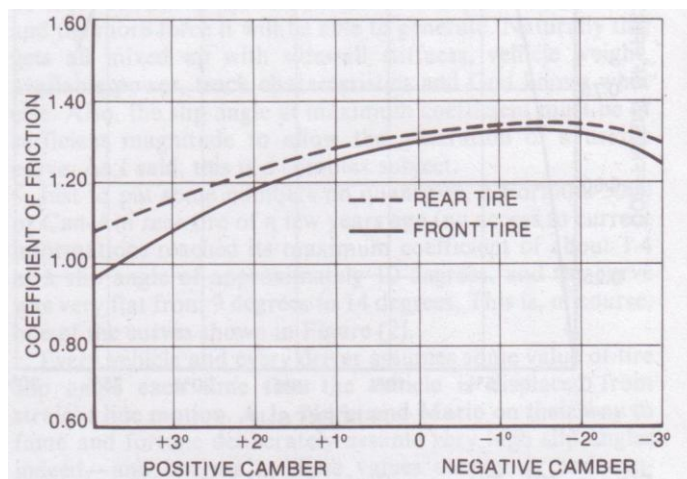
Dynaamisessa tilanteessa camber-kulmaa tutkiessa pitää huomioida, mihin sitä vertaa: ajoneuvon vai maanpinnan kohtisuoraan. Jos esimerkiksi joustotilanteessa saman akselin molemmat pyörät suorittavat saman joustomatkan, ei ole väliä, kumpaan kohtisuoraan kulmaa vertaa. Jos jousto on kuitenkin vain toisella puolella, kulma saattaa olla reilusti positiivinen, kun verrataan ajoneuvon kohtisuoraan. (Mauno 2002, 7.) Kaarrepidon kannalta on maanpinnan kohtisuoraan vertaaminen tärkeämpää, joten tässä työssä camber-kulmaa verrataan aina ajoradan pinnan kohtisuoraan.

Kun rengas pyörii enemmän toisella sivulla, eli renkaan toisella sivulla on pienempi vierintäsäde kuin toisella, tulee renkaaseen vaikuttaviin voimiin myös poikittais-suuntainen komponentti. Tämä aiheuttaa sen, että rengas pyrkii kääntymään pienemmällä vierintäsäteellä olevan reunan suuntaan hyrrävoimien vaikutuksesta.



Tästä johtuen negatiivinen camber vakauttaa suoraan ajaessa ja pyrkii suoristamaan ohjausta kaartotilanteen jälkeen. (Mauno 2002, 7-8.)

Camber-kulman muutos sisäänjoustossa riippuu suuresti pyöräntuennan geometriasta. Useasti sarjatuotantoautoissa camber kääntyy negatiiviseen suuntaan sisäänjoustossa, jolloin staattiseksi kulmaksi määrätään hieman positiivinen camber-kulma. Suurimman sivuttaispidon saamiseksi kaarteessa tulee camber-kulman olla mahdollisimman lähellä nollaa astetta täyden sisäänjouston tilanteessa. Kaarteessa korin kallistuessa pyöränkuorma lisääntyy ulkokaarten puoleisessa renkaassa voimakkaasti, jolloin on otettava huomioon auton kallistusjäykkyys, joka vaikuttaa ajoneuvon kallistuskulmaan. Kun pyöränkuorma lisääntyy, on tärkeää, että rengas on siinä asennossa, jossa se omaa parhaan mahdollisen kitkan tienpintaan. (Mauno 2002, 8-9.)



Kuvio 5. Esimerkki camber-kulman vaikutuksesta kitkakertoimeen (Smith 1978, 18).

Camber-kulma vaikuttaa siis sivuttaispitoon, ja sen kytkentä siihen tapahtuu kitkakertoimen vaikutuksesta (Kuvio 5). Useimmiten kisarenkiaan parhaimman pidon saamiseksi on renkaalle saatettava hieman negatiivista camber-kulmaa dynaamisessa tilanteessa, jossa korin kiertyminen on maksimiarvossa. (Smith 1978, 18.)

Se, että onko renkaalla täydessä korinkiertymistilanteessa negatiivista camber-kulmaa vai onko se täysin pystysuorassa, riippuu paljolti renkaan ominaisuuksista ja korin kiertojäykkyydestä.

### 3.3 Caster

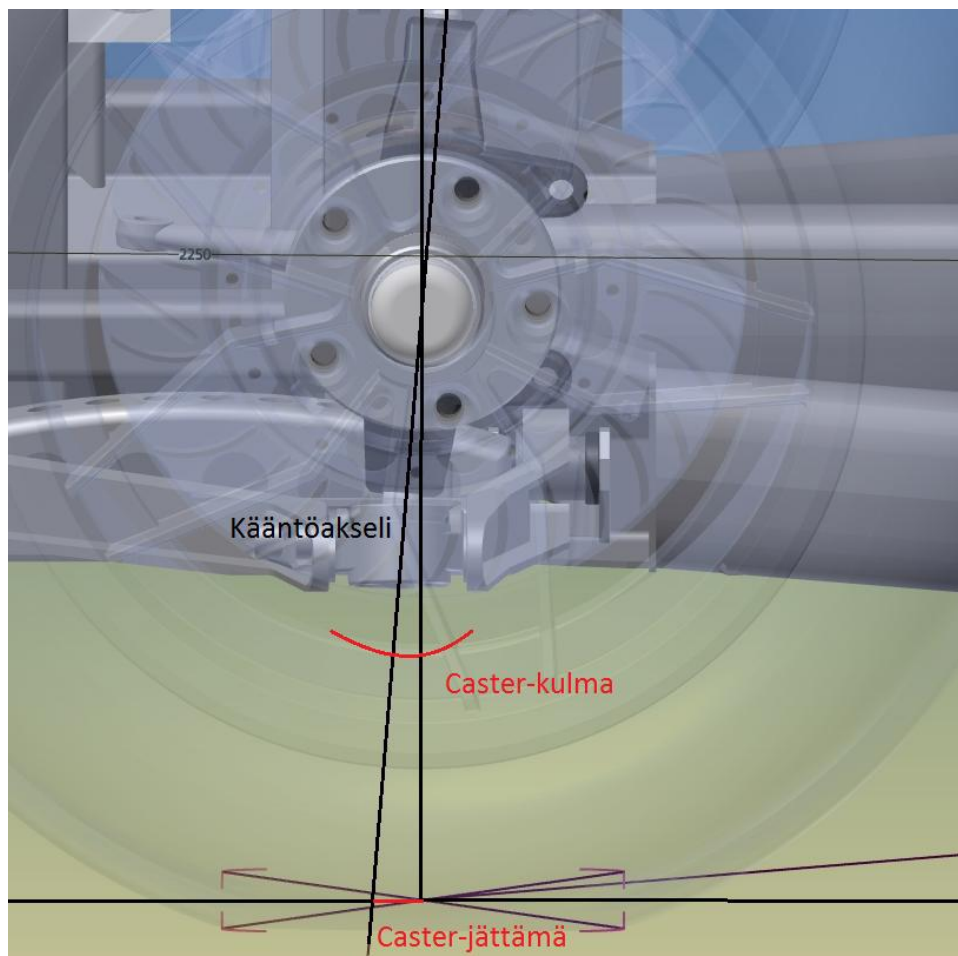
Caster-kulmalla tarkoitetaan pyörän kuvitteellisen kääntöakselin ja maanpinnan kohtisuoran välistä kulmaa. Pyörän kuvitteellinen kääntöakseli on se akseli, jonka ympäri rengas kääntyy ohjauspyörää käännettäessä. Esimerkiksi jos pyörä on tuettu kahdella kolmiotukivarrella, kääntöakseli on ylä- ja alapallonivelen välinen suora (Kuva 6). Caster-kulma on negatiivinen, kun olkatappilinja on kallistuneena eteenpäin, eli yläpallonivel on edempänä kuin alapallonivel. Kulma on positiivinen taas silloin, kun yläpallonivel on taempana kuin alapallonivel. Negatiivisen caster-kulman käyttö on harvinaista. (Mauno 2002, 14.)

Renkaat asettuvat itsestään painopisteen suuntaan positiivisella caster-kulmalla, mikä on erittäin tärkeä tekijä ajateltaessa ajoneuvon suuntavakavuutta. Tällöin auto kulkee suoraan pienin ohjausliikkein ja myös pyrkii palauttamaan ohjauksen keskiasentoon voimakkaammin. Positiivinen caster lisää tarvittavaa ohjausvoimaa, jolloin ajoneuvo tarvitsee esimerkiksi ohjaustehostimen. Positiivinen caster kuitenkin vähentää pyörän vipotustaipumusta, parantaa ohjaustuntumaa sekä pienentää kaarteissa tapahtuvaa kaarteiden ulkoreunan puoleisen pyörän sortoa. Haittapuolia positiivisessa casterissa on sivutuulen tai kaltevan tien aiheuttama etupyörien kääntyminen häiriötä pahentavaan suuntaan. Kun käytetään niin sanottua taakse vedettyä olkatappia, positiivisen casterin hyödyt voidaan säilyttää suurentamatta ohjausvoiman tarvetta tai sivutuuliherkkyyttä. Tällöin olkatappilinjan suora kulkee renkaan keskipisteen kautta kulkevan maanpinnan kohtisuoran takapuolella. Negatiivinen caster-kulma vähentää ohjausvoiman tarvetta, mutta suuntavakavuus kärsii huomattavasti. (Mauno 2002, 16.)

Caster-jättämä on renkaan keskikohdan kautta kulkevan maanpinnan kohtisuoran ja olkatappilinjan suoran sekä maanpinnan leikkauskohdan välinen etäisyys toisistaan (kuvio 6). Caster-kulman muutos vaikuttaa jättämään, ja ainoa keino muuttaa

caster-kulmaa jättämän pysyessä samana, on käyttää taakse vedettyä olkatappia. Casterin säätöä normaaleissa henkilöautoissa ei yleisesti ole. Henkilöautoissa caster-kulmat ovat yleisesti välillä 1–5 astetta (poikkeuksiakin on), ja kilpa-autoissa ne vaihtelevat hyvin paljon. (Mauno 2002, 16–17.)

Caster-kulma vaikuttaa myös camber-kulmaan käännettäessä renkaita. Positiivinen caster-kulma pyrkii kääntäessä muuttamaan ulkokaarten puolen renkaan camber-kulmaa negatiiviseen suuntaan ja sisäkaarten positiiviseen suuntaan. (Milliken & Milliken 1995, 626.)



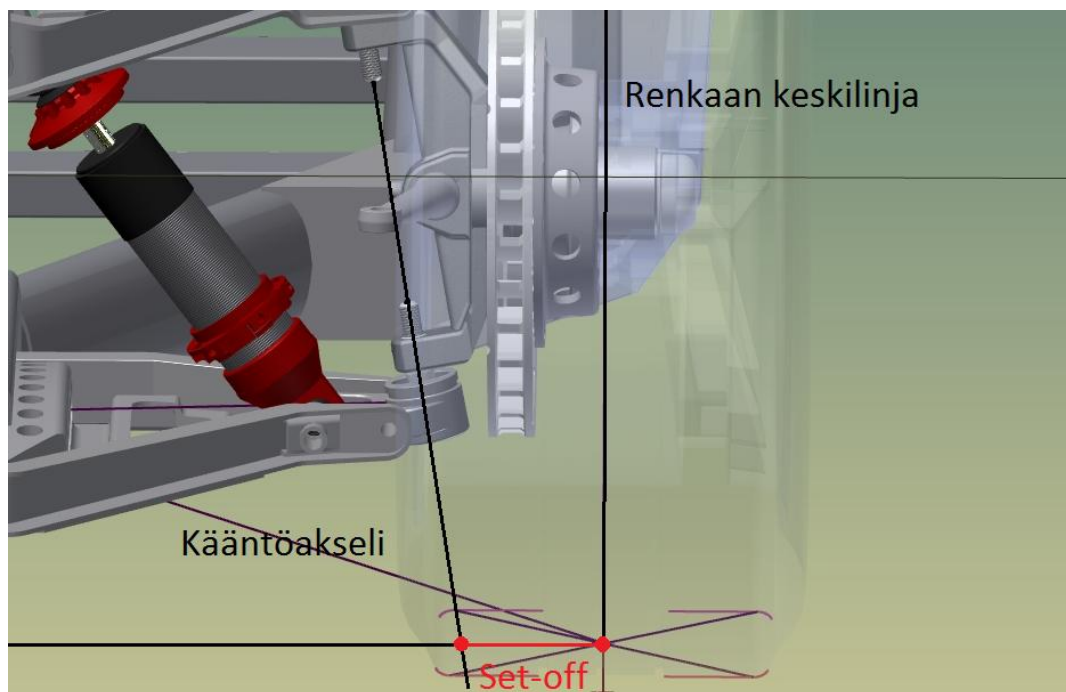
Kuvio 6. Caster-kulma.

### 3.4 KPI

KPI-kulma eli eng. King Pin Inclination on olkatappilinjan sivukallistuma, eli ajo-neuvoa taka- tai etupuolelta katsoessa olkatappilinjan suoran ja renkaan keskipis-teen kautta kulkevan maanpinnan kohtisuoran välinen kulma. Se määrää renkaan

kääntösäteen suuruuden ja vaikuttaa muun muassa iskuihin, jotka välittyvät tiestä tai ajotilanteesta ohjauspyörään. (Mauno 2002, 18.)

Kääntösäde eli set-off (kuvio 7) on pyörän kääntöakselin suoran ja pyörän keskilinjän maanpinnan leikkaavien pisteiden välimatka. Positiivinen set-off tarkoittaa sitä, että kääntöakselin suoran leikkauskohta maanpinnan kanssa pysyy ajoneuvon keskilinjän puolella, negatiivinen kääntösäde on silloin, kun leikkauskohta on ulompana ajoneuvon keskilinjasta kuin renkaan keskilinja. Jos tämä välimatka on erittäin pieni, tällöin momenttivarsi renkaan ja kääntöakselin välillä on pieni. Silloin myös pyöriin vaikuttavat voimat eivät tunnu niin voimakkaasti ohjauspyörässä. (Mauno 2002, 18–19.)



Kuvio 7. Esimerkki renkaan set-offista.

Suuntavakavuuden kannalta KPI-kulmalla on merkitystä. Tämä johtuu olkatappilinjän ollessa sisäänpäin kallellaan ajoneuvon keulan pyrkimyksestä nousta renkaiden kääntyessä. Tällöin ajoneuvon oman massan voima pyrkii suoristamaan renkaita. Kilpa-autoilussa KPI-kulmaan ei juurikaan kiinnitetä huomiota. Tämä johtuu

hyvin pienistä käytettävistä kääntökulmista. KPI-kulman suuruus määräytyy halutun caster- ja camber-kulman perusteella. (Mauno 2002, 19–20.)

Pienet KPI-kulmat ovat kuitenkin mieluisia kilpa-autoilussa. Tämä johtuu suuren KPI-kulman taipumuksesta vähentää positiivisella caster-kulmalla hankittua camber-kulman muutosta. Jos jostain syystä joudutaan käyttämään suurta KPI-kulmaa, joudutaan myös käyttämään suurta positiivista caster-kulmaa camber-kulma edun saamiseksi ulkokaarten renkaalle. (Milliken & Milliken 1995, 626.)

## 4 PAINOJAKAUMAT JA PAINONSIIRTO

Painonsiirto on erittäin tärkeä osa ajatellessa ajodynamiikkaa. Ajoneuvon vaikuttavista hidastuvuuksista aiheutuu aina painonsiirtoa hidastuvuuden suuntaan massan inertian vuoksi. Tämän momenttivartena toimii ajoneuvon painopisteen ja renkaiden kontaktipintojen välinen korkeus. Mitä korkeammalla painopiste on, sitä enemmän painonsiirtoa tapahtuu. Painonsiirtoa pyritään minimoimaan painopistettä madaltamalla, jolloin ajoneuvosta saadaan paremmin ja johdonmukaisemmin käyttäytyvä. (Beckam 1991, 1.)

### 4.1 Pitkittäinen painonsiirto

Pitkittäiseen painonsiirtoon vaikuttaa auton pituusakselin kautta vaikuttavat kiihtyvyydet. Käytännössä nämä ovat kiihdytys- ja jarrutustilanteet. Kiihdytyksessä painoa siirtyy taka-akselille ja jarrutuksessa etuakselille. Kiihdytyksessä painonsiirto on takavetoisessa autossa toivottavaa, jarrutuksessa painonsiirto ei missään tapauksessa ole toivottavaa. Kun jarrutuksessa painoa siirtyy etuakselille, vähenee mahdollinen kokonaisjarrutusteho. Pitkittäiseen painonsiirtoon vaikuttavat painopisteen korkeus maanpinnasta, kiihtyvyys, ajoneuvon paino ja akseliväli (kaava 1). (Smith 1978, 32.)

$$\frac{\text{Kiihtyvyys } (g) \cdot \text{Paino } (kg) \cdot \text{Painopisteen korkeus } (m)}{\text{Akseliväli } (m)} \quad (1)$$

### 4.2 Poikittainen painonsiirto

Poikittaisessa painonsiirrossa vaikuttavat samankaltaiset voimat kuin pitkittäisessä painonsiirrossa. Ajoneuvon ajaessa kaarteeseen keskipakoisvoima pyrkii ohjaamaan ajoneuvon painopistettä kaarteeseen tangentin suuntaan. Tätä voimaa renkaat vastustavat. Painonsiirto poikittaisakselilla on joka tilanteessa huono, tällöin pai-

noa siirtyy ulkokaarteeseen puoleisille renkaille, jolloin renkaiden kokonaispito huononee. Poikittaiseen painonsiirtoon vaikuttaa samat tekijät kuin pitkittäiseen painonsiirtoon, erona akselivälin muuttujan vaihtuminen raideväliksi (kaava 2). (Smith 1978, 36.)

$$\frac{\text{Kiihtyvyys (g)} \cdot \text{Paino (kg)} \cdot \text{Painopisteen korkeus (m)}}{\text{Raideväli(m)}} \quad (2)$$

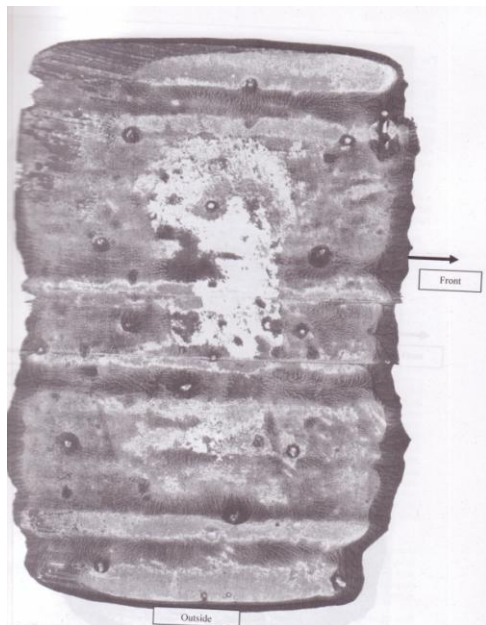
### 4.3 Diagonaalinen painonsiirto

Ajoneuvossa tapahtuu myös diagonaalista painonsiirtoa esimerkiksi kääntäessä jarrituksen jälkeen kaarteeseen sisälaitaan. Tämä painonsiirto on riippuvainen rungon kiertojäykkyydestä, akselivälistä, raidevälistä ja jousien sijoituksesta. Kun ajoneuvoon vaikuttaa keskipakoisvoimaa ja pitkittäis-suuntaista kiihtyvyyttä tapahtuu aina pitkittäistä, poikittaista ja diagonaalista painonsiirtoa. Tämä tarkoittaa suurimman painon muodostumista edellä mainitussa tilanteessa ulkokaarteeseen puoleiselle renkaalle eteen tai taakse, riippuen pitkittäisakselin kiihtyvyyden suunnasta. (Smith 1978, 40.)

## 5 RENGAS

Ainoa komponentti, joka kilpa-autosta koskee tiehen, on rengas. Kaikki voimat, jotka kiihdyttävät ajoneuvoa, vaikuttavat näissä neljässä kosketuskohdassa (Kuvio 8). Kosketuskohdista myös heijastuu kuljettajalle tärkeää tietoa ajoneuvon käytöksestä. (Smith 1978, 12.)

Voima siirtyy kitkan vaikutuksesta ja renkaassa merkittäviä kitkoja ovat adheesio- ja hystereesikitka. Muitakin kitkatyyppejä kyllä esiintyy, mutta ne ovat merkittäviä vain eräissä erikoistilanteissa. Hystereesikitka eli niin sanottu muodonmuutoskitka johtuu renkaan muodonmuutoksista, jotka epätasainen tienpinta aiheuttaa. Adheesiokitka toimii molekyyalitasolla. Se aiheutuu molekyylien sähköisistä sidoksista, joita kutsutaan Van der Waalsin sidoksiksi. Adheesio kitkaan vaikuttaa materiaalit ja kosketuspinta-ala. (Tuononen & Koisaari 2010, 6-7.)

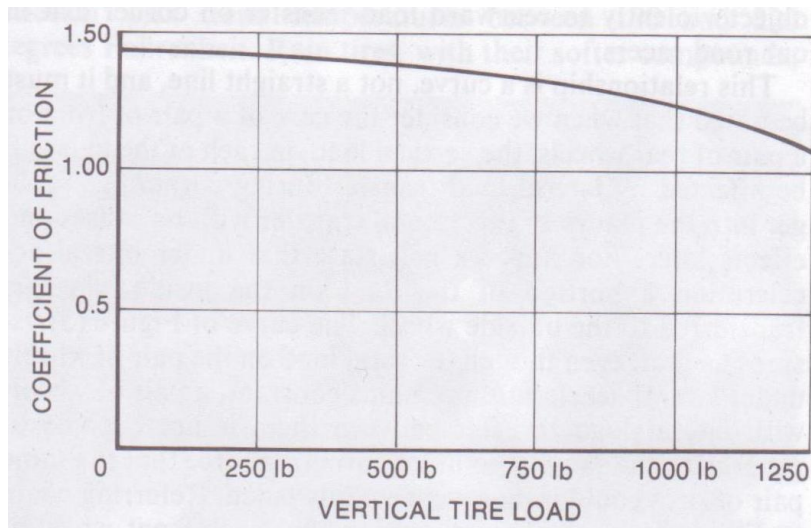


Kuvio 8. Kisarenkaan kosketuspinta 1,4 barin paineella ja 454 kg rengaspainolla (Rowley 2011, 2/3).

Renkaaseen vaikuttavia voimia muodostuu tiestä ja kuljettajan ohjaustoiveista. Pystysuuntainen voima koostuu ajoneuvon nurkkapainosta ja aerodynaamisesta voimasta, joka painaa autoa tienpintaan. Painon siirroista erilaisissa ajotilanteissa sekä tienpintojen epätasaisuuksista johtuen voiman suuruus vaihtelee suuresti. Kun renkaaseen vaikuttaa suureneva pystysuuntainen voima, renkaan kitkakerroin



pienenee hieman suhteessa voiman määrään (Kuvio 9). Tämä ei kaikissa tapauksissa kuitenkaan tarkoita sitä, että renkaan pitokyky heikkenisi. Tämä siksi, että renkaan painuessa enemmän kiinni tien pintaan voiman vaikutuksesta, myös tien ja renkaan välinen kosketuspinta suurenee. (Smith 1978, 13–17.) Kuvassa 11 näkee esimerkin kosketuspinnan suurenemisen vaikutuksen renkaan voiman siirtämiskykyyn.

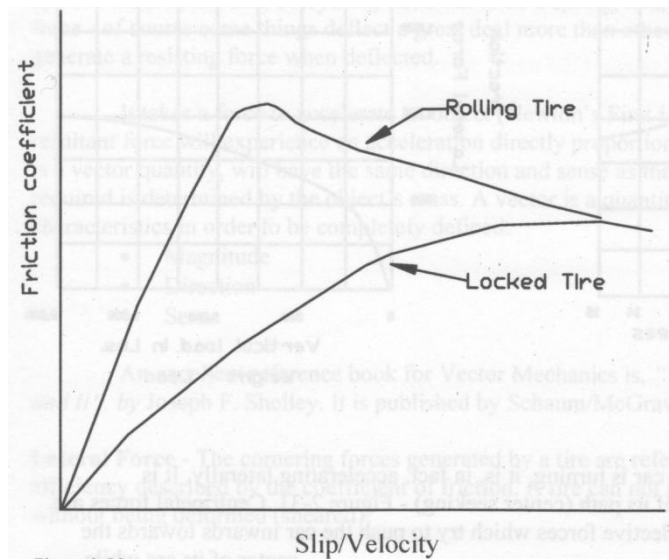


Kuvio 9. Esimerkki renkaan kitkakertoimesta pystysuuntaisen voiman funktiona (Smith 1978, 17).

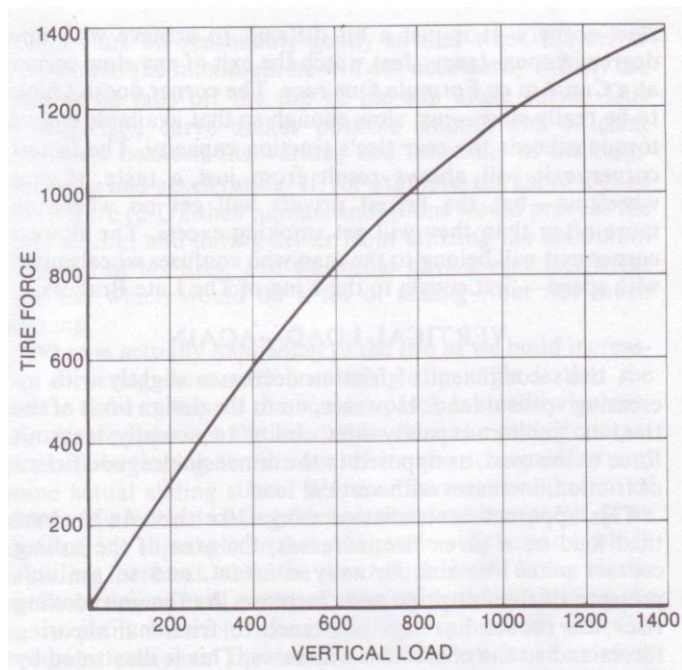
Normaalirenkaalle sisäänpainuma on keskimäärin noin 14 mm staattisessa tilanteessa, dynaamisessa tilanteessa renkaan halkaisija kosketuspinnan kohdalta yleisesti suurenee aiheuttaen kosketuspintaa vähentävän vaikutuksen (Dixon 2009, 84).

Pitkittäissuuntainen renkaan voiman välityskyky vaikuttaa kiihdytys- ja jarrutuspiitoon. Pitkittäissuuntaisen voiman siirrossa, renkaan lukkiutuessa, nopeus on yksi liukumisen kitkakerrointa pienentävä tekijä. Lukkiutuminen saattaa tapahtua esimerkiksi kokemattoman kuljettajan kiihdyttäessä tehokkaalla autolla yli pidon rajan tai jarruttaessa kurviin tullessaan liikaa. Märällä pinnalla ajettaessa tämä kitkakerroin pienenee vielä nopeammin, koska adheesiokitkan osuus kokonaiskitkasta laskee ja rengas joutuu työskentelemään myös syrjäyttääkseen vettä. (Gillespie 1992, 346–347.)

Pitkittäispidosta puhuttaessa luistolla on myös osansa kitkakertoimen muodostumisessa. Renkaan rakenteen ja kumin ominaisuuksien vuoksi pieni luisto kasvat-  
taa kitkakerrointa tiettyyn rajaan asti (kuvio 10).

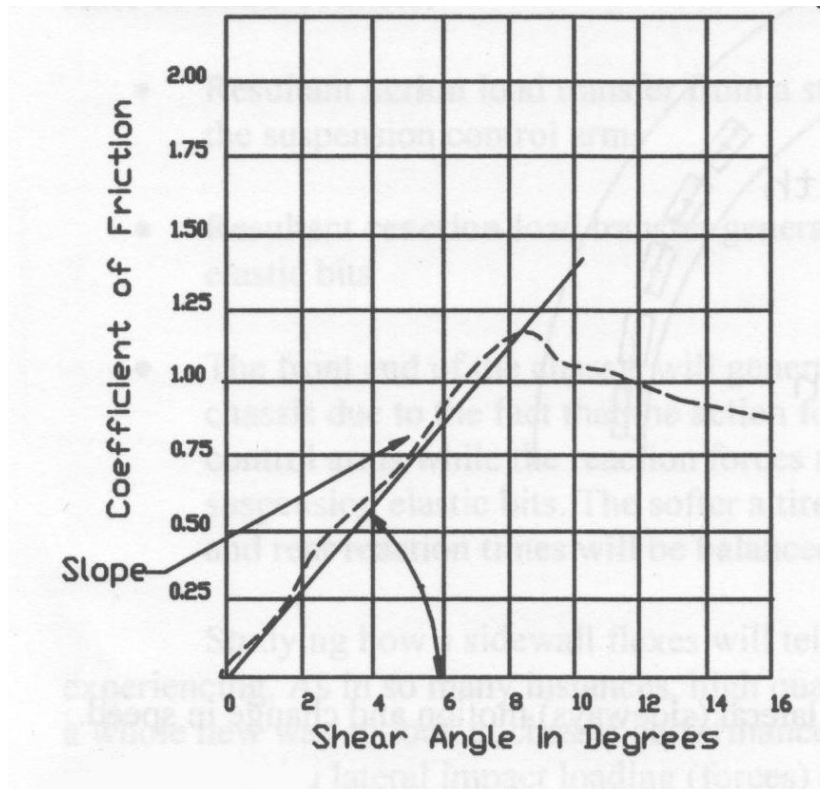


Kuvio 10. kitkakertoimen käytös luiston funktiona (Rowley 2011, 2/15).



Kuvio 11. esimerkki voiman siirto kyvystä, pystysuuntaisen voiman funktiona (Smith 1978, 18).

**Sortokulma.** Kun rengasta kääntää ohjauspyörällä, renkaaseen vaikuttaa sen kulkusuunnan vastainen voima. Tällöin rengas pyrkii muotoutumaan tilanteen mukaan. Tämä johtuu renkaan elastisuudesta vääntöä ajatellen. Renkaan kosketuspinnan vierintä suunta on eri kuin renkaan keskilinja kulkusuunta. Tämä johtuu renkaan sortokulmasta, joka muodostuu renkaan muodonmuutoksesta. (Smith 1978, 14.)



Kuvio 12. Esimerkki sortokulman vaikutuksesta kilpa-auton renkaan ominaisuuksiin (Rowley 2011, 3/6).

Ilmiö tapahtuu kumin kitkan vastustaessa renkaan kääntömomenttia. Sortokulma vaikuttaa renkaan kitkakertoimeen: sortokulman kasvaessa kitkakerroin kasvaa myös (kuvio 12). Tietyn rengaskohtaisen sortokulman ylittyessä kitkakerroin alkaa vähentyä. Kitkakertoimen huippulukema suhteessa sortokulmaan kertoo suurimman poikittaissuuntaisen voima komponentin, minkä rengas voi välittää ideaalitapauksessa. (Smith 1978, 15.)

## 6 AJODYNAMIIKKA JA JOUSITUSGEOMETRIA

Kilpa-autossa huono alusta takaa huonon kilpailutuloksen. Vaikka ajoneuvossa olisi runsaasti tehoa, ei siitä ole hyötyä, jos ajoneuvolla ei voi ajaa kaarteeseen kilpakumppaneita lujempaa tai kuljettajalla ei ole luottoa ajoneuvon arvaamattoman ajokäytöksen takia. Ajoneuvon alustan muutoksilla kilpailua silmälläpitäen voidaan katsoa jakautuvan muutamaaan alueeseen: ajovakauden ja ohjattavuuden saamisen halutunlaiseksi sekä renkaiden kokonaispidon lisäämiseksi. Alustan geometrian muutoksilla voidaan näitä kaikkia muuttaa, mutta useasti joutuu tyytymään jonkinlaiseen kompromissiin, alustan muutoksissa kun vallitsee periaate ”kaikki vaikuttaa kaikkeen”. (Mauno 2002, 5.)

Yksittäinen tärkein tekijä kilpa-autossa ei ole huiman korkea huippunopeus eikä yllättäen kaarrenopeus, vaan se, että autosi kiihtyy nopeampaa kuin kilpakumppanin. Poikkeuksena ovat heikon moottoritehon kilpa-autot, joille jarruttaminen ja kaarrenopeuden ylläpitäminen on tärkeää. Nopean kiihdytyksen salaisuus on useassa tekijässä, muun muassa ilmanvastuksessa ja vetävien pyörien pidossa. Jarruttaminen ei ole läheskään niin tärkeää kuin kiihdyttäminen, kilpa-ajaja jarruttaa kierroksen aikana vähemmän kuin kiihdyttää. Kilpa-auto pysähtyy nopeammin kuin se kiihtyy. (Smith 1978, 9.)

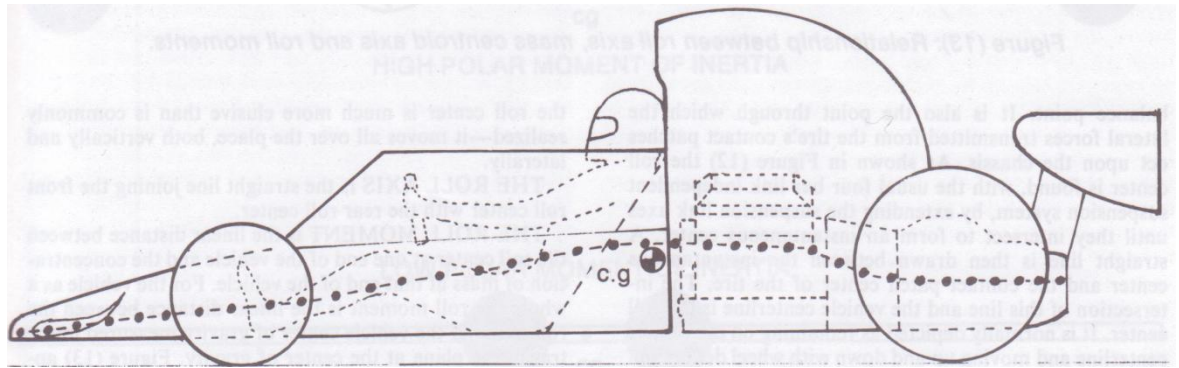
Kilpa-auton täytyy ajaa kaarteita kovilla nopeuksilla, lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia, ja tällöin täytyy ottaa huomioon muutamia seikkoja jotka vaikuttavat kilpa-auton kaarreajokykyyn: renkaiden kaarreajokyky, ajoneuvon bruttopaino ja painopisteen korkeus. Renkaiden kaarreajo kykyyn liittyy useampia tekijöitä, joita ovat muun muassa pyöräntuennan geometria ja renkaan omat ominaisuudet. Selvästikin on eroa kilpa-autolla, joka voi suorittaa kaarteeseen 100 km/h kuin saman kaarteeseen 80 km/h suorittavalla ajoneuvolla. Hitaammin kaarteesta ulos pääsevä ajoneuvo joutuu tuhlaamaan aikaa kiihdyttääkseen edes tuohon 100 km/h:ssa. (Smith 1978, 9.)

## 6.1 Painopiste

Kaikilla kappaleilla, olkoon minkä muotoisia tai kokoisia tahansa, on oma painopiste. Painopisteen voi kuvitella olevan se piste josta pidettäessä kiinni koko kappale olisi täydellisessä tasapainotilassa. Tämän pisteen ympäri ei tapahtuisi rotaatiota ilman ulkoisia voimia. Kilpa-autossa painopiste halutaan mahdollisimman alas. Kaikkien kiihtyvyyksien voima tai vaikutus vektorien, jotka vaikuttavat koriin, voidaan ajatella kulkevan massakeskipisteen eli ajoneuvon painopisteen kautta. (Smith 1978, 29.)

Painopisteellä on suuri vaikutus ajoneuvon käyttäytymiseen eri tilanteissa. Se vaikuttaa esimerkiksi niiuaukseen kiihdyttäessä, nyökkäykseen jarruttaessa ja kaarrekallistumiseen. Painopisteen alentamiseen on monia keinoja, tarkoituksena suuren massan omaavien kappaleiden massapainopisteiden korkeuden madaltaminen. Esimerkkinä moottorin kiinnityspisteiden vieminen alemmaksi, ajoneuvon madaltaminen, akun vieminen alemmaksi tai kuljettajan istuimen vieminen alemmaksi. Jos ajoneuvoa madaltaa, on otettava huomioon sen käyttötarkoitus. Kilpa-autoilussa on huomioitava alusta jolla ajetaan: ajokorkeudella on esimerkiksi rallissa tarkoituksena yrittää välttää pohjakosketuksia. (Mauno 2002, 29.)

Toinen tärkeä tekijä painopistettä ajatellessa kilpa-autoissa on painopisteen kuvitteellinen pitkittäissuuntainen akseli. Tämä akseli kuvastaa ajoneuvon painopisteen paikkaa eri kohdissa ajoneuvoa (Kuvio 13). Tähän, kuin myös painopisteen sijaantiin, vaikuttaa muun muassa kuljettajan paikka, moottorin sijoitus ja polttoainetankin paikka. Akseli ei suinkaan ole suora, vaan mutkittelee eri massakeskittymien vaikutuksesta. Tähän voi käyttää arvioitua suoraa, joka antaa kohtuullisen tarkan tuloksen painopisteen pystysuorasta sijainnista esimerkiksi akseleiden kohdalta. (Smith 1978, 29.)



Kuvio 13. Painopiste ja sen pituussuuntainen akseli (Smith 1978, 29).

Tutkittavassa kilpa-autossa painopiste oli odotetusti matalalla. Ferrari oli varta vasten halunnut madaltaa painopistettä verrattuna edelliseen malliin ja asiaa auttaa myös auton lasikuituiset koripaneelit. Ennen mittausta tiedossa oli moottorin sijoituksen perusteella suurpiirteinen pitkittäissuuntainen painopisteen paikka, joka tulisi olemaan hieman takapyörien etupuolella.

Painopisteen pitkittäinen ja poikittainen paikka selviää punnitsemalla ajoneuvo neljällä eri vaa'alla jokaisen renkaan kohdalta. Tällöin tietää mikä on ajoneuvon painojakauma jokaisen renkaan kesken staattisessa tilanteessa. Tästä saa pitkittäisen paikan esimerkiksi muuttamalla jakauman akseleiden kesken suhteeksi ja kertomalla se akselivälillä (kaava 3).

$$\frac{\Delta M_{etu}}{\Delta M_{taka}} \cdot L_{av} = PP_{pitk} \quad (3)$$

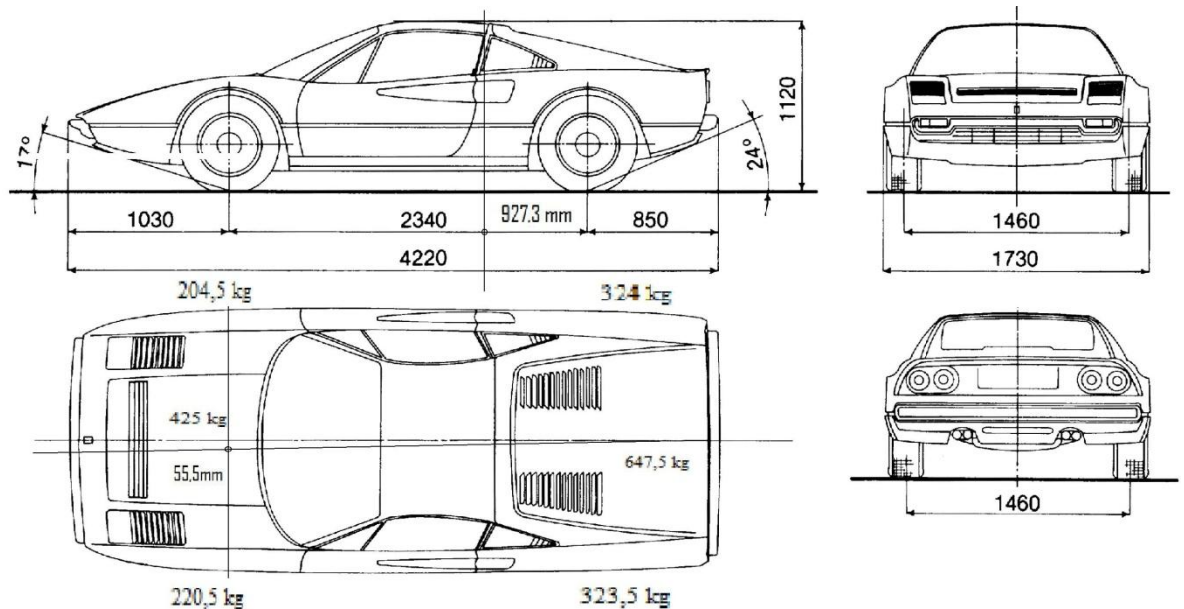
$$\frac{425kg}{647,5kg} \cdot 2,34m = 1,536m$$

Tästä saadaan siis pitkittäinen paikka, joka kertoo matkan painopisteeseen etuakselista. Poikittaispaikka saadaan niin ikään akseleiden suhteellisista painoista oikean ja vasemman renkaan välillä (kaava 4). Kun nämä on laskettu, voidaan piirtää akseleiden välille suora viiva jolla painopiste sijaitsee.

$$\frac{M_{eo}}{\Delta M_{etu}} \cdot L_r = PP_{poik} \quad (4)$$

$$\frac{204,5kg}{425kg} \cdot 1,46m = 0,703m$$

Tästä siis saadaan matka painopisteeseen oikeasta etupyörästä. Sama toistetaan taka-akselille ja piirretään suora, josta näkee painopiste suoran poikkeaman auton pituussuuntaisella akselilla (Kuvio 14).

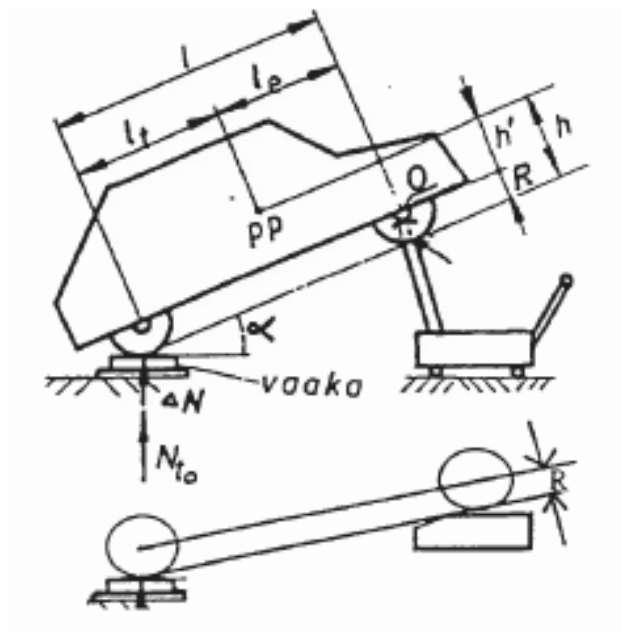


Kuvio 14. Painopiste pituus- ja poikittaisakselilla (Mutsaer 2009).

Painopisteen paikan poikkeama ajoneuvon pituussuuntaisella akselilla on mahdollista säätää kyseessä olevassa tapauksessa jousituksen komponenteilla, joten tässä työssä oletetaan ettei poikkeamaa ole. Kuvassa on merkittynä painopiste 927,3 millimetriä taka-akselin etupuolella ja painopiste suoran poikkeama etuakselin kohdalla 55,5 millimetriä.

Ajoneuvon painopisteen korkeuden mittaaminen onkin hieman mutkikkaampaa. Jollei kyseisestä ajoneuvosta ole painopisteen korkeussuuntaista kohtaa tiedossa voidaan käyttää muutamaa eri menetelmää: eri osien painopisteiden summaami-

nen tai ajoneuvon akselipainojen muutoksen mittaaminen kallistumistilanteessa (Kuvio 15). Mittaustavan monimutkaisuuden vuoksi työssä ei käytetty painopisteiden summaamiseen perustuvaa menetelmää joskin se olisi ollut hieman tarkempaa. Ajoneuvon akselipainojen muutoksen mittaamisessa on ideana se, että kun ajoneuvoa kallistaa johonkin kulmaan, paino siirtyy nostettavalta akselilta tuetulle akselille.



Kuvio 15. Painopisteen korkeussuuntainen komponentti (Laine 1985, 131).

Ennen ajoneuvon nostamista, on mietittävä miten mittaa kulman jossa ajoneuvon on. Hyvä keino on käyttää digitaalista mittaria, tällöin tulos on erittäin tarkka. Silloin on huomioitava myös ajoneuvon lepotilan kulma. Tässä mittauksessa on oltava tarkka mittaustaikinan suhteen, joka on oltava täsmälleen sama kuin nostettunakin. Työssä tutkittavan auton kulma runkopalkista katsoen lepotilassa on  $0,4^\circ$ . Painopisteen korkeussuuntainen paikka saadaan kaavasta viisi.

$$h' = \frac{l}{m} \cdot \frac{\Delta m}{\tan \alpha} \quad (5)$$

$$h' = \frac{2,34m}{1215kg} \cdot \frac{7kg}{\tan 8,38^\circ} = 0,09172m$$



Koska  $h'$  on mitta akselin keskikohdalta pitää siihen lisätä vielä renkaan dynaaminen säde (kaava 6).

$$R + h' = PP_{\text{korok}} \quad (6)$$

$$91,72\text{mm} + 285,8\text{mm} = 378\text{mm}$$

Mittauksia suoritettiin useampia ja eri kulmilla, joko takapäätä tai etupäätä nostoen. Mittaukset suoritettiin ilman kuljettajaa. Paras tulos saadaan kun eri kulmilla saadut tulokset huomioidaan ja lasketaan niistä keskiarvo (Milliken & Milliken 1995, 671).

$$\frac{378\text{mm} + 375\text{mm} + 389\text{mm}}{3} = 380\text{mm}$$

Painopisteen korkeus vaikuttaa oikealta ja useampien mittausten todistaessa näin on tulos riittävän tarkka. 3D mallinnusohjelmalla mallinnetulla 308 GTB:n rungolla ja jousituskomponenteilla, on painopisteen korkeus 319,3 millimetriä maanpinnasta. Tämän tuloksen turvin voi pitää saatua 380 millimetrin tulosta valmiista autosta suhteellisen tarkkana.

## 6.2 Kallistuskeskiö

Kallistuskeskiö on eräänlainen jousitusgeometrian painopiste, sen kautta välittyvät muun muassa renkaan kosketuspintaan vaikuttavat sivuttaisvoimat ajoneuvon alustaan. (Smith 1978, 30.)

Kaarreaajo synnyttää keskipakovoimaa, joka taas pyrkii kallistamaan ajoneuvoa. Akseli, jonka suhteen ajoneuvo pyrkii kallistumaan, on etu- ja taka-akselin kallistuskeskiöiden välinen akseli. Kallistuskeskiön paikka riippuu täysin pyöräntuennan geometriasta. Teoriassa jos kallistusakseli kulkisi painopisteen kautta ei kaarrekallistumista juurikaan tapahtuisi. Jos esimerkiksi etupään kallistuskeskiö on kor-

keammalla kuin takapään, pyrkii ajoneuvo aliohjautumaan painonsiirron ollessa suurempi taka-akselilla olevilla pyörillä. Vastaavasti jos etupään kallistuskeskiö on alempana kuin takapään kallistuskeskiö, pyrkisi ajoneuvo teoriassa yliohjautumaan. Näissä edellä mainituissa tilanteissa oletuksena on, että painopiste sijaitsee suunnilleen ajoneuvon puolivälissä pituussuuntaisella akselilla. (Mauno 2002, 33–34.)

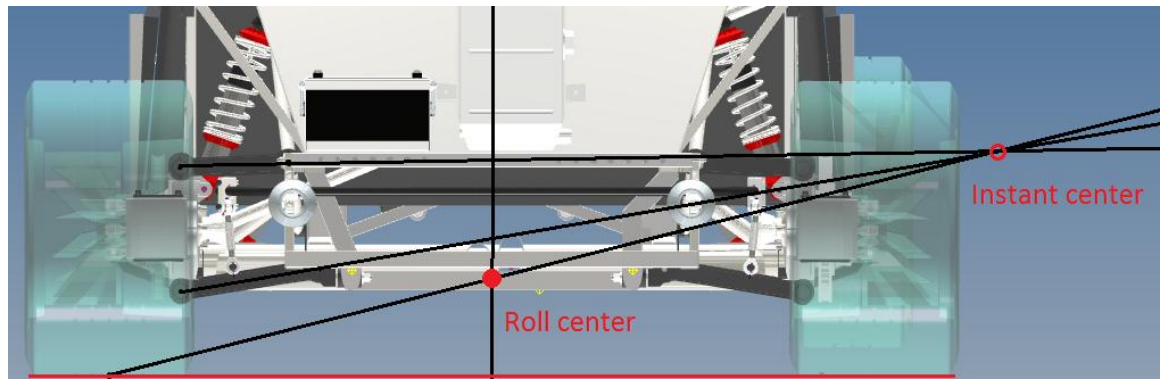
Edellä mainittu kallistuskeskiö on niin sanottu geometrinen kallistuskeskiö, se siis tulee pyöräntuennan geometriasta. Kallistuskeskiö ei ole vain yksi liikkumaton piste, se liikkuu riippuen jousitusilanteesta pysty- ja vaaka-akselilla. Todellisuudessa ei ole olemassa vain yhtä kallistuskeskiötä, vaan jopa neljä, ja jokainen on erilainen. (Dixon 2009, 157.)

**Voimakallistuskeskiö.** Voimakallistuskeskiö piste on se piste, jossa jousituksen tukivarret siirtävät poikittaissuuntaisen voiman jousitettuun massaan. Tämän pisteen korkeus vaikuttaa kallistuskulmaan ja tukivarsiin vaikuttavaan momenttiin. (Dixon 2009, 157–158.)

**Kinemaattinen kallistuskeskiö.** Kinemaattinen kallistuskeskiö vaikuttaa kokonaispainonsiirtoon, se on piste jonka ympäri kori kääntyy suhteessa renkaiden keskiöiden väliseen akseliin. (Dixon 2009, 157–158.)

**Momenttikallistuskeskiö.** Etu- ja taka-akselin momenttikallistuskeskiö pisteet ovat tavallisimmin massa hitaus akselin pitkittäissuuntaisella suoralla, akseleiden kohdalla. Tutkittaessa korin dynaamisia tilanteita, momentit saadaan näistä pisteistä. (Dixon 2009, 157–158.)

**Geometrinen kallistuskeskiö.** Riippuu jousitustyyppistä ja pyöräntuennan geometriasta, sen löytää pyöräntuennan geometrian tarkastelulla. Yleisesti se piste jonka avulla jousitusgeometriaa ja akseleiden painonsiirtoa tutkitaan. (Dixon 2009, 157–158.) Tässä työssä ei tutkita muita kallistuskeskiöitä kuin geometristä kallistuskeskiötä. Se esiintyy myös ohjelmassa, jolla tässä työssä on tutkittu jousitusgeometriaa.



Kuvio 16. Geometrinen kallistuskeskiö ja hetkellinen keskipiste (Instant center) erillistuennassa.

Kuviossa 16 Instant center merkitsee paikkaa jossa tukivarsista piirretyt suorat leikkaavat toisensa. Tätä pistettä voidaan kutsua myös hetkelliseksi keskipisteeksi. Kun renkaan kosketuspinnan keskikohdasta piirretään suora hetkelliseen keskipisteeseen, voidaan geometrinen kallistuskeskiö osoittaa tälle suoralle ajoneuvon keskilinjan kohdalle.

Jos kallistuskeskiö on maanpinnan yläpuolella syntyy renkaaseen vaikuttavasta poikittaisesta voimasta momenttia tukivarsista muodostuvan hetkellisen keskipisteen ympäri. Tällöin jousitettu massa pyrkii nousemaan ja rengas painuu tiukemmin maanpintaan. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä jacking. Jos taas kallistuskeskiö on maanpinnan alapuolella, painaa momentti jousitettua massaa alaspäin. (Milliken & Milliken 1995, 614.)

Jacking ilmiö voimistuu mitä korkeampi kallistuskeskiö on, mikä huonontaa kaarrepitoa. Kun poikittaista voimaa muodostuu kaarteessa, kulkee voima vektori kallistuskeskiön kautta. Tällöin osa voimasta siirtyy tukivarsien kautta, eikä jousen välityksellä. Mitä korkeampi kallistuskeskiö on, sitä suurempi pystysuuntainen komponentti voimalle tulee. Tämän pystysuuntaisen komponentin suuruus, on jacking ilmiön jousitettua massaa nostava voima. Tämä ilmiö ei ole toivottava, koska sen taipumuksena on luonnollisestikin nostaa painopisteen korkeutta sekä aiheuttaa camber-kulma muutoksia. Ilmiön pystysuuntainen komponentti on tietenkin pois myös kaarreajon pito komponentista. Kilpa-autoissa tulisi yrittää saada kallistuskeskiö mahdollisimman lähelle maanpintaa. (Smith 1978, 38.)

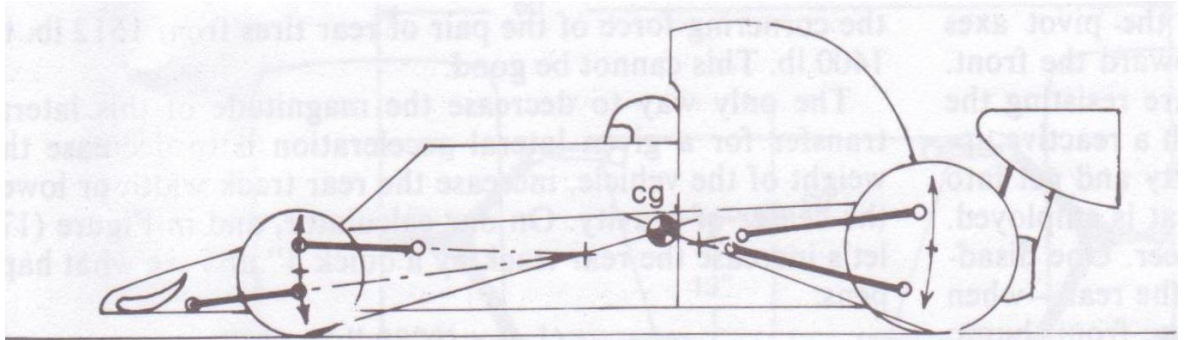
### 6.3 Antigeometriat – nyökkäys ja niaus

Nyökkäys ja niaus johtuvat useista eri tekijöistä, nyökkäystä tapahtuu jarruttaessa ajoneuvoa suurista nopeuksista ja niausta kun ajoneuvoa kiihdyttää. Molempiin ilmiöihin voi vaikuttaa jousitusgeometrian, kokonaispainon vähennyksen, painopisteen alentamisen tai alustan säätöjen avulla. Kuten pyöräntuennalla on oma kallistuskeskiö, on myös näillä ilmiöillä oma poikittainen kallistusakselinsa jonka ympäri ajoneuvo pyrkii kääntymään jarruttaessa tai kiihdyttäessä. (Mauno 2002, 41.)

Antigeometrioissa määritetään ajoneuvon tukivarsien kautta kulkevan voiman määrä. Ajoneuvossa jota tässä työssä tutkitaan, painopiste ja paino on viety mahdollisimman alas suunnitteluvaiheessa. Mahdolliset keinot antigeometrioiden ominaisuuksien muuttamiseen ovat pyöräntuennan geometrian muutokset ja jousituksen komponenttien säädöt.

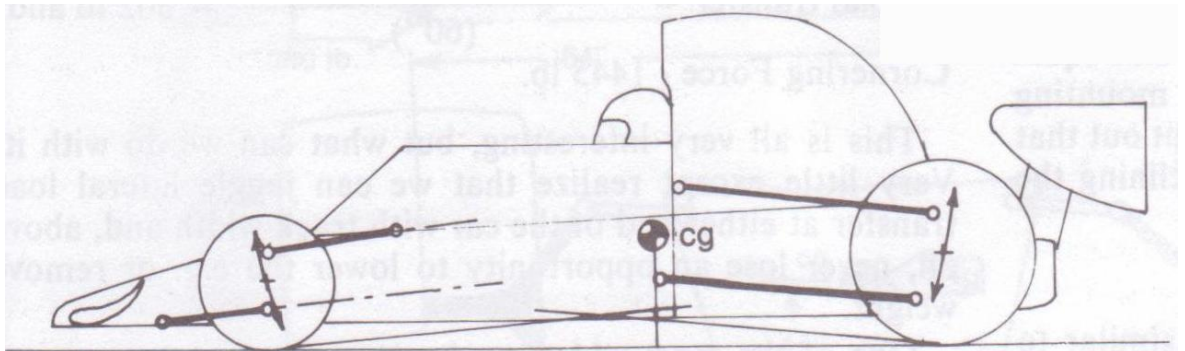
#### 6.3.1 Anti-dive

Nyökkäyksessä geometrian avulla voidaan saavuttaa jopa 100 % anti-dive ominaisuus. Ensimmäinen tapa on käyttää jarrutuksesta tulevaa momenttia tukivarsien välityksellä kumoamaan etuakselin pystysuuntaista liikettä. Tämä tapahtuu muuttamalla etutukivarsien asentoa siten, että tukivarsien suorien leikkauskohta eli sivuttaissuuntainen pyöräntuennan kallistuskeskiö, sijaitsee renkaan kosketuspinnasta painopisteeseen piirretyllä suoralla (Kuvio 17). Tämä leikkauskohta määrää kuinka paljon geometria vastustaa jarrutustilanteessa auton pituussuuntaista kiertymistä. (Smith 1978, 34.) Se kuinka paljon antigeometria ominaisuutta on, kerrotaan yleisesti prosenttilukuna. Tukivarsien kallistuskeskiön on oltava renkaan keskiön vaakasuoran yläpuolella. Kallistuskeskiön etäisyyden suhde renkaan keskiön vaakasuoran ja painopisteen välillä kertoo ominaisuuden määrän. (Milliken & Milliken 1995, 619.)



Kuvio 17. 100 % Anti-dive ja anti-squat esimerkki (Smith 1978, 35).

Toinen tapa on muuttaa tukivarsien asennot yhdensuuntaisiksi renkaan kosketuspinnasta lähtevän suoran kanssa. Renkaan kosketuspinnasta lähtevän suoran ja painopisteen kohtisuoran leikkauspiste kertoo tässä tapauksessa anti-dive määrän (Kuvio 18). Eli jos leikkauskohta on korkeussuunnassa painopisteen tasolla, käytössä on tällöin 100 % anti-dive ominaisuus. Tässä tapauksessa käytetään jousitetun massan inertiaa hyväksi tukivarsien geometrian avulla. Tämä ratkaisu sopii ajoneuvoille, missä esimerkiksi jarrut ovat sijoitettuna jousitettuun massaan kuten muun muassa formuloissa. (Smith 1978, 34.)



Kuvio 18, Esimerkki yhdensuuntaisilla tukivarsilla toteutetusta anti-dive ja anti-squat ominaisuudesta (Smith 1978, 35).

### 6.3.2 Anti-squat

Anti-squat toimii samalla tavalla kuin anti-dive, se vastustaa geometrian avulla massan luontaista kiertymistä taka-akselin suhteen kiihtyvyyden vaikutuksesta. Samat toimenpiteet mitkä toteuttivat anti-dive ominaisuuden toimivat peilikuvana myös taka-akselilla. (Smith 1978, 36.)

### 6.3.3 Käyttö ja ominaisuudet

Anti-dive on yleisimmin käytetty tavallisissa henkilöautoissa ja maa-efekti kilpa-autoissa. Suurimpana arvona henkilöautoissa voidaan pitää 50 prosenttia. Maa-efekti autoissa arvo saattoi olla ylikin tuon, johtuen taipumuksesta nyökätä voimakkaasti aerodynamiikan avustuksella. (Dixon 2009, 193.) Suurimmat ”normaali” kilpa-auton arvot anti-dive ominaisuudelle voidaan asettaa 30 prosentin tietämille erittäin etupainoisissa ajoneuvoissa (Smith 1978, 35).

Jarrujen momenttia hyväksi käyttävän anti-dive ominaisuuden huonoksi puoleksi luetaan muun muassa caster-kulma muutos, joka suurentaa ohjausvoiman tarvetta (Smith 1978, 35; Gillespie 1992, 255). Suuret anti-dive arvot myös koventavat jousitusta paljon jarrutustilanteessa ja jousituksesta tulee tunnoton painonsiirroille tienpinnan muutoksissa. Yhdensuuntaisien tukivarsien tapauksessa rengas pyrkii eteenpäin anti-dive vaikutuksesta, jolloin se välittää tiestä johtuvat iskut terävimpinä ohjauspyörään. Liialla anti-dive arvolla on myös taipumus aiheuttaa vaeltelua jarrutuksessa. (Dixon 2009, 193.)

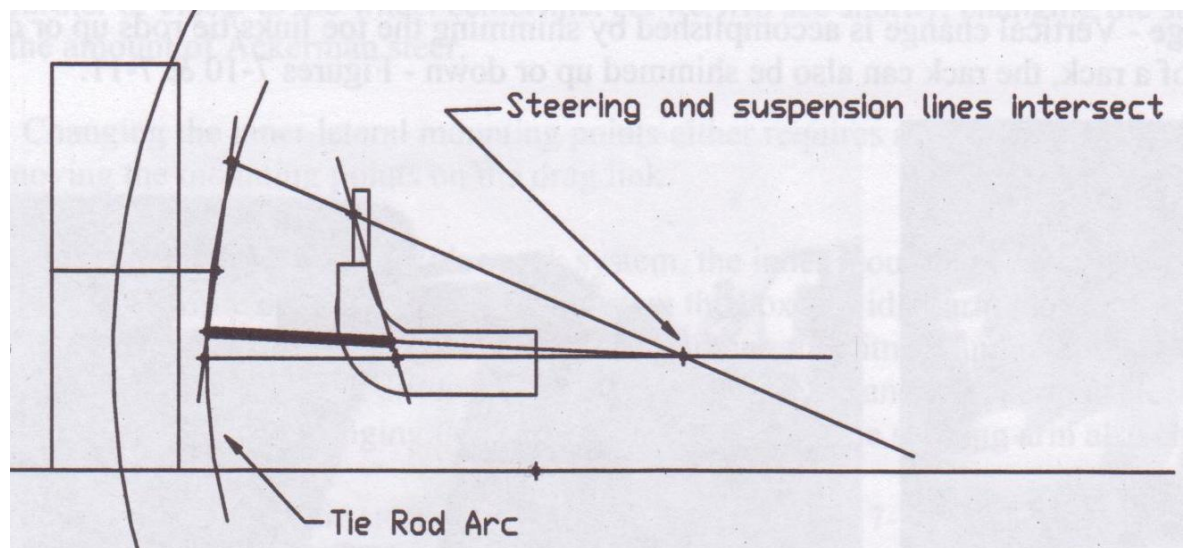
Anti-squat on varsinkin tehokkaissa kilpa-autoissa käytännöllinen. Se pienentää kiihdytystilanteessa takapyörien camber-muutosta, jolloin vetopito on parempi. Anti-squat tilanteessa takarengas pyrkii kääntymään taaksepäin, jolloin se vaimentaa siihen kohdistuneita iskuja paremmin. Takatuennan geometria on tällöin suunniteltava tarkoin, esimerkiksi renkaan liikkuessa taaksepäin on pidettävä silmällä mahdollisesti tapahtuvaa ei toivottua renkaan aurauksen muutosta. Liika anti squat saattaa johtaa ajotuntuman heikentymiseen saman periaatteen vuoksi kuin anti-dive, maksimi arvoksi kilpa-autoissa voidaan ajatella 20-prosenttia. Anti dive ja anti squat eivät vaikuta painonsiirtoon etu- ja taka-akselilla huomattavia määriä. (Smith 1978, 36.)

## 6.4 Bumb steer – ominaisohjaus

Jousitusgeometriasta johtuvaa renkaan sisäänjoustossa tapahtuvaa auraukskulman muutosta ilman ratin liikettä, kutsutaan nimellä ominaisohjaus tai bumb-steer. Bumb-steer ominaisuuden määrää voi säädellä liikuttamalla raidetangon sisä- ja

ulkopään paikkaa. Takana se onnistuu muuttamalla takanavan kallistumiskulmia. Edessä ei olisi toivottavaa olla muutoksia aurasikulmassa joustossa ainakaan harituksen puolelle. Jos ajoneuvo kiertyessään pitkittäisakselin ympäri pyrkii aliohjautumaan, voi sitä esimerkiksi kompensoida pienellä määrällä taka-akselilla tapahtuvalla harituksella ulosjoustossa. Tämän kanssa on oltava erityisen varovainen, se saattaa aiheuttaa epätasapainoisuutta ja vaeltelua jarrutuksessa jos kulma muutosta on runsaasti joustossa. Takana voi myös käyttää sisäänjoustossa tapahtuvaa auruksen kasvua, jolloin voimakkaassa kiihdytyksessä ajoneuvon vakavuus on parempi. Tällöin on huomioitava mahdollinen anti-squat ominaisuus. Ajoneuvon jousitusgeometriasta johtuva auruksen muutoksella voidaan nostaa suorituskykyä huomattavasti oikein säädettyinä. (Smith 1978, 62–63.)

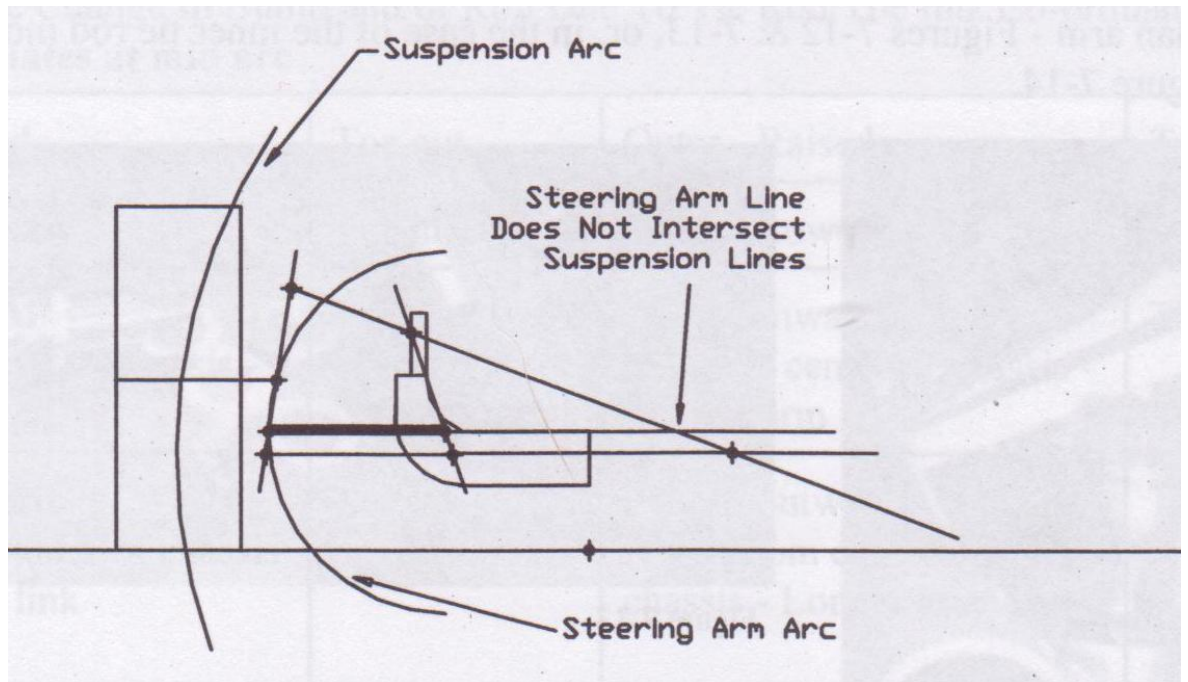
Jotta saisi bumb-steer ominaisuuden mahdollisimman pieneksi geometria avulla, on verrattava tukivarsien jatkeiden leikkauskohdan (hetkellinen keskipiste) ja raidetangon piirtämän kaaren keskipisteen suhdetta (Kuvio 19). (Rowley 2011, 7/9.)



Kuvio 19. Ei bumb-steer ominaisuutta (Rowley 2011, 7/9).

Jos tukivarsien geometrian määrittelemä renkaan keskikohdan piirtämä kaari ja raidetangon pään kuulanivelen keskikohdan piirtämä kaari eivät ole yhdensuuntaisia tulee auras muuttumaan joustossa (Kuvio 20). Kaksiulotteinen tarkastelu ei ole täsmällistä, tähän tarkoitukseen on kolmiulotteisia jousitusgeometrian mallinushjelmia. (Rowley 2011, 9.)





Kuvio 20. Geometriasta johtuva bumb-steer (Rowley 2011, 7/9).

## 6.5 Raide- ja akseliväli

Raidevälillä tarkoitetaan saman akselin renkaiden keskilinjojen välistä etäisyyttä. Akseliväli on etu- ja taka-akseleiden renkaiden keskilinjojen välinen etäisyys.

Suuremmalla raidevälillä poikittainen painonsiirto on vähäisempää verrattuna keskipakoisvoimaan, mutta se suurentaa aerodynaamisesti tärkeää ajoneuvon etupinta-alaa. Tällöin ilmanvastuskerroin suurenee. Etuna mainittakoon myös mahdollisuus käyttää pidempiä tukivarsia, jolloin saadaan hallitumpi camber-kulman käytös joustossa. Raidevälin ollessa suurempi edessä kuin takana, vastustaa se diagonaalista painonsiirtoa enemmän. (Smith 1978, 56.)

Akseliväliä tarkastellessa voidaan huomata pidemmän akselivälin tuovan vakautta ja vähentävän pitkittäistä painonsiirtoa sekä pitkittäisiä kiertymis momentteja. Lyhyemmällä akselivälillä saadaan ajoneuvosta ketterämpi ja saadaan vähennettyä kokonaispainoa. *”Periaatetasolla, kilpa-ajoneuvo jossa on pitkä akseliväli ja verrattain lyhyt raideväli, on stabiili suorilla, mutta mutkanopeuden ja ketteryyden kustannuksella. Sillä on myös hankalampi ajaa äärirajoilla. Ajoneuvo jossa on lyhyt*



*akseliväli ja suurempi raideväli, on vähemmän stabiili, mutta ketterämpi ja sillä voi ajaa mutkiin kovempaa.” (Smith 1978, 56.)*

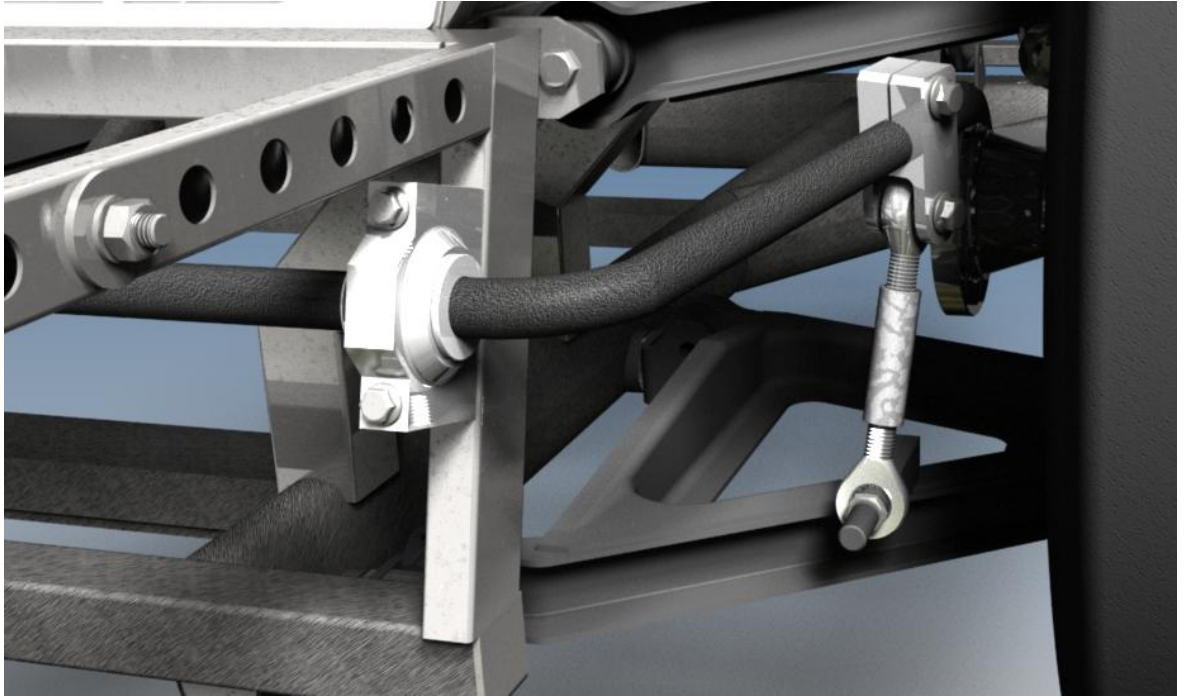
Tarkastelun kohteena olevan kilpa-ajoneuvon akseliväli on vakiona 2,34 metriä ja raideväli takana sekä edessä 1,46 metriä. Kyseessä on siis suhteellisen pieni auto, jossa kuitenkin akselivälin suhde raideväliin on 1,6. Vertailuna Ferrari Testarossan akselivälin suhde keskiarvoiseen raideväliin on 1,57.

## 6.6 Kallistuksenvakaaja

Kallistuksenvakaajalla on tarkoitus vähentää korin kiertymistä pitkittäisakselin ympäri poikittaissuuntaisen voiman vaikutuksesta. Vakaajalla voidaan korvata jousivoimaa, joka tarvittaisiin kiertymisen estämiseksi. Tällöin voidaan käyttää tunnokkaampia jousia. Vakaajalla saadaan yleisesti ohjattua kilpa-auton ali- tai yliohjauvutta neutraaliin tai ajajan haluamaan suuntaan. (Smith 1985, 210–211.)

Ongelmaksi kallistuksen vakaajissa ääritilanteissa muodostuu sen siirtämä paino. Kiertymistilanteessa vakaaja painaa ulkokaarten puoleista pyörää maanpintaa vasten, joka tarkoittaa taas sisäpuolen renkaan maanpintaan kohdistaman voiman vähenemistä. Ulkokaarten puoleisen renkaan saavuttaessa sivuttaispidon kannalta rajansa vakaajan aiheuttaman painonsiirron takia, ei rengas pari yllä parhaaseen mahdolliseen voimansiirto kykyynsä. Tämä johtuu sisäkaarten puoleisen renkaan reservissä olevan voimansiirtokyvyn käyttämättä jättämisestä. Jos tähän yhdistää pitkittäissuuntaisen kiihtyvyyden, eli kiihdytyksen tai jarrutuksen, osa renkaan voimansiirto kyvystä menee pitkittäiskomponenttiin. Tällöin renkaan luistamista on erittäin vaikeaa välttää ja parasta ajoneuvon teoreettista suorituskykyä ei voida käytännössä saavuttaa. (Rowley 2011, 11/1-11/4.)

Tutkittavassa ajoneuvossa on käytössä sekä edessä että takana u-mallinen säädettävä kallistuksenvakaaja (Kuvio 21).



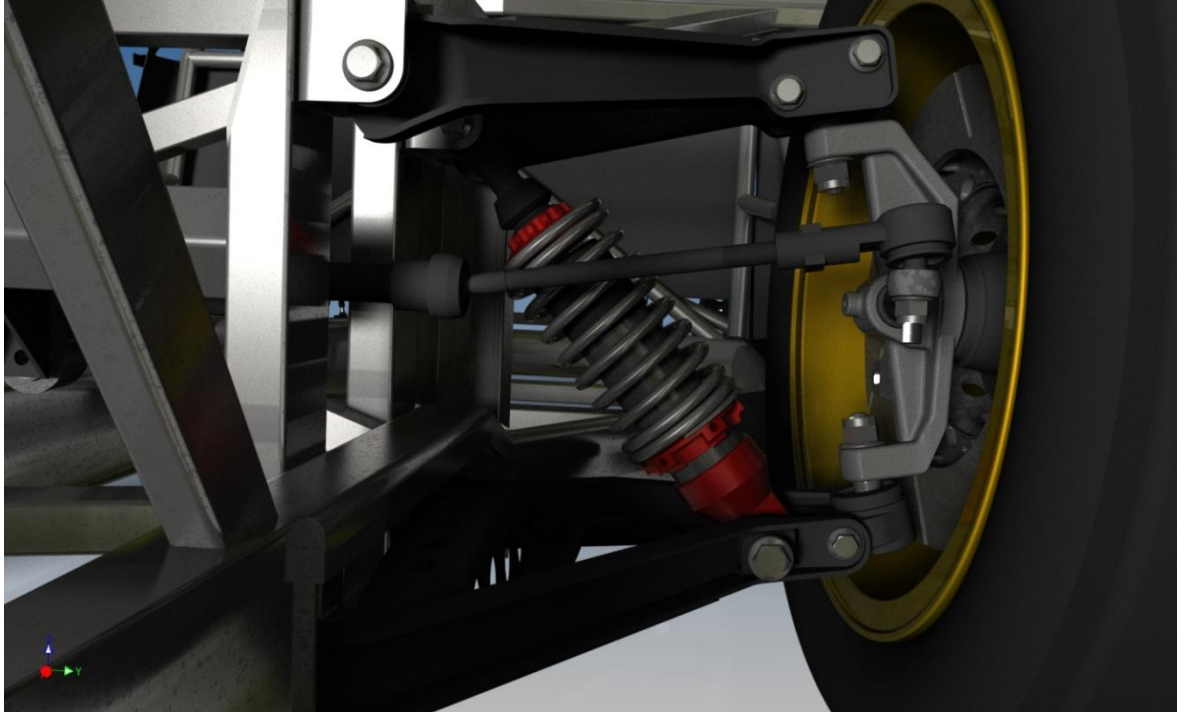
Kuvio 21. 308 GTB takapään kallistuksenvakaaja

## 6.7 Jouset

Kun autoon kohdistuu epätasaisesta tien pinnasta johtuen iskumainen voima, tarvitaan jousi vaimentamaan se. Korkeammilla nopeuksilla iskut saattavat jopa irrottaa renkaan kosketuksen tienpinnasta ilman jousia. (Mauno 2002, 50.) Auton jousitus on erittäin monimutkainen, se ei ole pelkkä jousi jousittamattoman ja jousitetun massan välissä vaan erilaisista joustavista komponenteista koostuva monimassa järjestelmä. Kilpa-autoilussa kiinnostavin asia on renkaan ja jousen jousivakiot sekä jousituksen komponenttien joustavuus. Jousen paras suorituskyky saadaan, kun sen joustosuunta saadaan tarkalleen kohti korin kiertoliikettä. Tällöin jousella on paras teho sisään painunutta mittayksikköä kohden.

Jousien tehtäviin kuuluu myös autoon vaikuttavien pitkittäisten ja poikittaisten momenttien vastustaminen. Jousi yleisesti on kierre tyyppinen puristusjousi, jossa olotilan muutosta vastustava voima syntyy jousen kiertymisestä. (Rowley 2011, 10/1). Jousen tehtävää on autossa suorittanut aikaisemmin muun muassa lehti-jouset, mutta nykypäivänä miltei kaikki ajoneuvot ovat varustettu kierrejousin raskasta kalustoa lukuun ottamatta.

Työssä tutkittavaan Ferrariin on asennettu kynäiskunvaimentimet, joissa jousi on sijoitettu iskunvaimentimen ympärille (kuvio 22). Tällä rakenteella saadaan jousi ja iskunvaimennin hyvin pieneen tilaan (Smith 1984, 207).



Kuvio 22. Jousi ja iskunvaimennin 308 GTB:n eturipustuksessa

## 6.8 Iskunvaimentimet

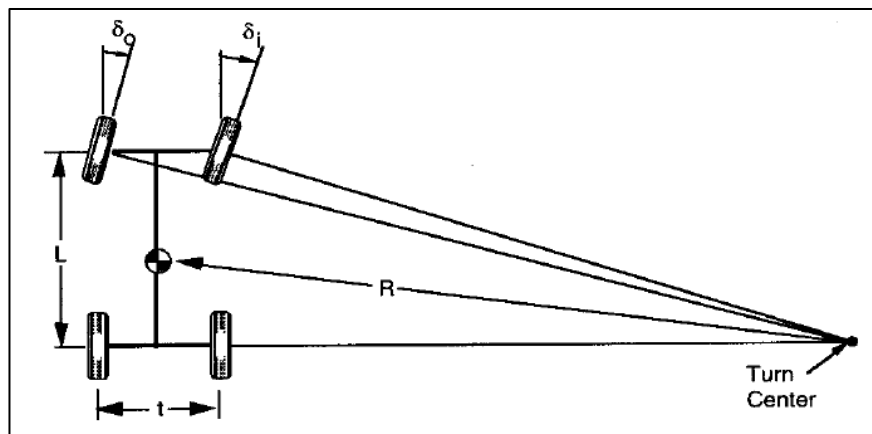
Kun isku kohdistuu autoon tien pinnasta ja jousi vaimentaa sen, jää jousi heilahtelemaan ominaistaajuudellaan. Tarvitaan ulkoinen vaimennus vaimentamaan tämä liike, se tapahtuu iskunvaimentimilla. Vaimennin muuttaa jousen kineettisen energian lämpöenergiaksi sisään ja ulosjouston aikana. Iskunvaimennin miltei poikkeuksitta perustuu nesteen virtausvastukseen ja kilpa-autoissa sisään ja ulosjousto on useasti mahdollista säätää yhdessä tai erikseen. Vaimentimien tehtävä on jousen kanssa pitää rengas mahdollisimman tiiviisti tien pinnassa. Vaimennuksen ollessa liian suuri ulos- tai sisäänjoustossa, pyrkii rengas irtoamaan tiestä tai auto pohjaamaan ja nyökkimään. Renkaan mahdollinen irtoaminen tiestä voi tapahtua pyöräntuennan saadessa tien pinnasta kohdistuvan iskun ja sisäänjouston vaimennuksen ollessa säädettynä liian jäykälle, ajoneuvo pyrkii nousemaan runsaasti ja jatkaa liikettä tiestä kohdistuneen voiman loppuessakin. (Mauno 2002, 69–70.)

Iskunvaimentimien säätö voidaan tehdä myös kuljettajan kokemien tuntemusten mukaan. Tällöin iskunvaimentimien säätö aloitetaan sisäänjouston pehmeimmästä asetuksesta ja jatketaan portaittain jäykempään päin. Kun ajettaessa huomaa ajo-neuvon hieman ”pomppivan” kaarteissa sivuttaissuunnassa tai tuntuva muuten hieman kovalta, muutetaan asetus viimeisimpään arvoon jossa säätö tuntui hyvältä tai sillä oli huomattava vaikutus ajettavuuteen. Sama toistetaan ulosjouston säädön kohdalla. Tällöin tosin tarkkailtava asia on kurvin sisääntulossa tapahtuva korin kiertyminen ulkokurvin suuntaan. Säätö on suurennettava asteittain kunnes kurvin sisääntulo on sulavaa ja korin kiertoliikkeet hillittyjä. (Smith 1984, 205–206.)

## 7 OHJAUSGEOMETRIA

Ajettaessa ajoneuvo kaarteeseen sisäpuolen renkaan tulee kääntyä enemmän kuin ulkopuolen. Muulloin sisäpuolen rengas joutuisi luistamaan tai sortamaan. Tätä kutsutaan Ackermann-ohjaukseksi. Täydellisessä Ackermann-ohjauksessa kuvitellut eturenkaiden kohtisuorat kohtaavat kuvitellulla taka-akselin suoralla täsmälleen samassa kohdassa riippumatta, kuinka paljon ohjauspyörää käännetään (kuvio 23). (Rowley 2011, 7/20)

Geometrian osalta Ackermann saadaan halutuksi muuttamalla pyörännapojen olkavarsien kulmaa verrattuna ajoneuvon pitkittäisakseliin (kuvio 24). Ackermann-periaate toimii käytännössä vain pienillä nopeuksilla edellä mainituista sortokulmista johtuen. Kilpa-autoissa harvoin käytetään Ackermann-periaatetta johtuen painonsiirron aiheuttamista sortokulman muutoksista. (Mauno 2002, 78–79)

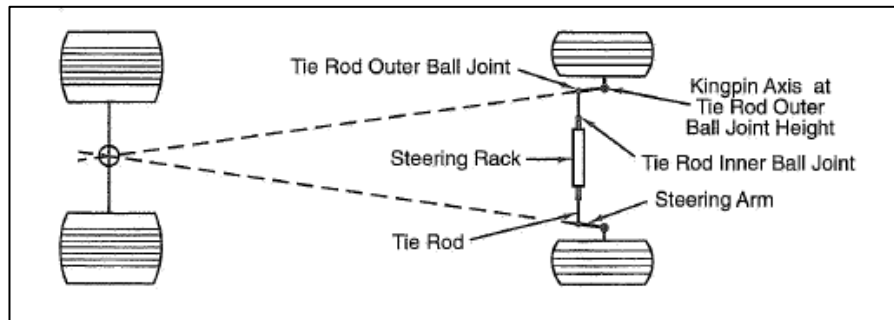


Kuvio 23. Ackermann-ohjauksen periaate (Gillespie 1992, 278).

Kilpa-autoilussa sortokulmien vaikutuksesta kuvassa 23 nähtävä tilanne muuttuu paljolti. Kurviin tultaessa sivuttaisvoima pakottaa kaikki renkaat sortokulmiin, näistä etummaiseta renkaat enemmän painonsiirron vaikutuksen vuoksi. Jotta etummaiseta renkaat saataisiin lähemmäksi takarenkaiden sortokulmia, on käytettävä vähempää Ackermann-ominaisuutta tai jopa anti-Ackermann-ominaisuutta. Tällöin renkaiden ominaisuudet saadaan hyödynnettyä paremmin. (Smith 1984, 60–61.)

Ackermann-ohjaus on kuitenkin helpommin käsiteltävissä kuin esimerkiksi ominaisohjaus tai ajoneuvon kiertymisen aiheuttama ohjaus. Sen ominaisuuksia voi

muuttaa suhteessa ohjauspyörän kääntymiseen, joko auraukselle tai haritukselle. Milloin Ackermann ohjausta käytetään kilpa-autoilussa, on monien eri osa-alueiden summa, muun muassa kuljettajan taitojen. (Rowley 2011, 7/21.)



Kuvio 24. Olka-akselien kulma 100 % Ackermann ohjauksessa (Milliken & Milliken 1995, 715).

Huomioitavaa on, että kilpa-autoilussa suurin osa kurveista on suhteellisen laajalla kääntösäteellä ajettavissa, jolloin Ackermann-ohjauksesta ei ole hyötyä. Suositus onkin kilpa-autoilussa, ettei Ackermann-ohjausta olisi tai olisi jopa anti-Ackermann-ohjausta. Tällöin renkaiden sortokulmat pysyvät rajoissa ja saavutetaan paremmat kaarreominaisuudet. (Milliken & Milliken 1995, 714–716.)

Ackermann ohjauksen valitseminen on kuitenkin aina kompromissi ja vaatii käytettävien renkaiden sortokulmien, painonsiirron ja ajoneuvon käyttäytymisen tutkimisen. Smith sanoo kirjassaan *Tune To Win*, että jos ajoneuvossa tapahtuu esimerkiksi paljon poikittaista painonsiirtoa etuakselilla kaarteessa, Ackermann-ohjauksen vaikutus pienenee. Parasta hänen mielestään olisi, jos käännettäessä ohjauspyörää sisäkurvin pyörä kääntyisi progressiivisesti enemmän kohti Ackermann ohjausta. Smith kiinnittää huomiota myös mukavuusseikkoihin; jos ajoneuvoa aiotaan työntää varikkoalueella, on miltei mahdotonta työntää sitä tiukkoja mutkia anti-Ackermann-ohjauksella. (Smith 1978, 60–61)

Ralliautoilua ajatellen on tärkeää, että auto on hyvin ohjattavissa ja ohjaus on tunnokas sekä terävä. Tällöin ei oletettavasti olisi ajettavuuden kannalta hyödyksi poistaa Ackermann-ohjausta kokonaan, vaan käyttää hillittyjä arvoja. Kohdeajoneuvon olka-akselien kulma on noin 14 astetta. Tällöin olkavarsien suuntaisten suorien leikkauskohta piirtyy noin 200 millimetriä taka-akselinlinjan takapuolelle. Ackermann-ominaisuus on tällöin noin 92 prosenttia.

## 8 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT

Tämä työ perustuu tarpeeseen kehittää 70-luvun kilpa-auton jousitusgeometriaa. Tarkoituksena on tutkia, millainen kyseisen auton jousitusgeometria on alun perin, tarkastella muutosmahdollisuuksia ja tutkia muutosten vaikutusta geometriatasolla. Työn tilaaja Mäkelä Auto-tuning Oy on pitkän linjan historiallisten autojen ja kilpa-autojen restauroija. Yritys toimii Kannuksessa, Keski-Pohjanmaalla.

### 8.1 Pyöräntuenta kilpa-autossa

Kilpa-autossa eduksi on erillisjousitus jokaisella pyörällä. On myös tärkeää, että joustomatka olisi riittävä, jolloin tiestä aiheutuvat voimat saadaan vaimennettua riittävästi. Aorauskulma ei saisi muuttua sisäänjouston aikana, tai ainakin olisi hyvä jos sen saisi säädettyä. Parhaan pidon saadakseen renkaan tulisi olla pystysuorassa kiihdytys- ja jarrutustilanteissa, kuten myös kaarre ajossa. Kallistuskeskiön tulisi pysyä joka tilanteessa saman etäisyyden päässä akselin massakeskipisteestä, jolloin pyöränkuorman muutos olisi lineaarinen. Näiden kaikkien ominaisuuksien saaminen kohdalleen yhteen kokoonpanoon ei ole kuitenkaan mahdollista. (Smith 1978, 43.)

Kun jousitusgeometriaa suunnittelee, on siis valmistauduttava kompromisseihin. Kaikkea ei voi saavuttaa samanaikaisesti. Joitakin suunnittelun kannalta olennaisia asioita on kuitenkin muistettava. Koska painonsiirron ollessa kaarteessa etu-ulkorenaan suhteen suurin, tulee etu-camber geometrian joustossa olla johdonmukainen ja riittävä. Takana tapahtuu vähemmän painonsiirtoa ja kiertymistä. Eli camber-kulmassa ei saisi tapahtua geometriasta johtuvaa äkkinäistä runsasta negatiivisen camber-kulman lisäystä jouston loppuvaiheessa. Tällöin ohjaus tuntuma pysyy tarkkana ja johdonmukaisena. Tähän pääsisi muun muassa pitkällä tukivarilla, jolloin camber-kulma muutos olisi joustossa pienempi, kuten myös raidevälin kasvu. (Smith 1978, 54.)

Kallistuskeskiön liikkeen tulisi olla samankaltaista ja samansuuntaista akseleiden kesken. Kallistuskeskiö on etuakselilla useasti matalampi kuin taka-akselilla, muttei se saa olla liian alhainen. Tällöin ajoneuvon käytös kaarteeseen tullessa on epävarmaa ja kaarteesta kiihdyttäessä se pyrkii nostamaan eturangasta (kuva 25). Halutessa ajoneuvon käyttäytyvän rauhallisesti, tulisi camber muutosten siis olla lineaarisia ja kallistuskeskiöiden liikkua edellä mainitusti siirryttäessä jarrutuksesta kiihdytykseen kaarteeseen jätöissä. (Smith 1978, 54.) Geometria tulisi suunnitella niin, ettei turhaa raidevälin muutosta tapahtuisi sisäänjouston aikana. Jos raideväli muuttuu, menettää rengas sivuttaispitoa ja pitkittäispitoa sekä kuluu nopeammin. (Gillespie 1992, 243.)



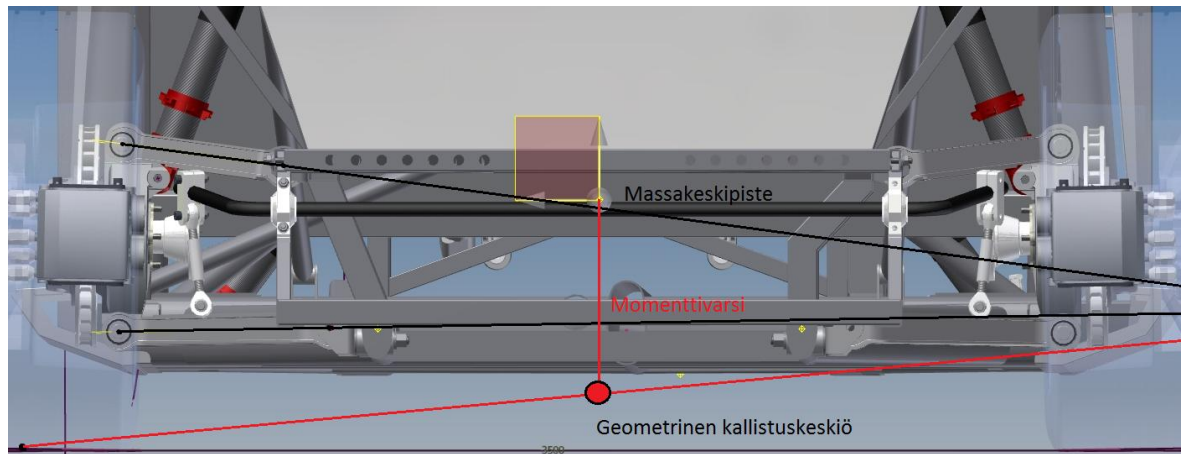
Kuva 25. Ferrari 308 GTB kaarteessa (Mäkelä Auto-Tuning Oy 2009).

Kilpa-autossa korin kiertymisen hallinta on tärkeää, se mahdollistaa tarkemman pyöränkulmien hallinnan. Kiertymistä voi rajoittaa kaarretilanteessa kallistuksen vakaajalla, jäykemmillä jousilla tai kallistuskeskiön sijoituksella korkealle jolloin kiertymismomentti on pienempi. Tämä momentin pieneneminen johtuu kallistuskeskiön ja massakeskipisteen välisen momenttivarren pienenemisestä (kuvio 26).

Kallistuskeskiön nostaminen ei kuitenkaan välttämättä ole hyvä ratkaisu, se ajaa geometrian väkisin huonoon camber muutokseen kaarteessa. Jousien jäykentäminen vain korin kiertymisen estämiseksi, on myös hieman huono vaihtoehto. Tällöin tiestä kohdistuvat iskut tulisivat turhan kovana alustaan ja renkaan tiessä kiinni



pitäminen vaikeutuisi. Jos jousien sijoitus korin ja jousituksen välissä olisi muokattavissa, voisi sillä tehostaa niiden vaikutusta korin kiertymiseen. (Smith 1978, 54.)



Kuvio 26. Kallistuskeskiön ja massakeskipisteen välinen momenttivarsi.

Keskimoottorisessa ajoneuvossa on moottorin ja vaihteiston sijoituksen vuoksi muutamia huomioitavia ominaisuuksia: yleisesti suuret caster-kulmat ajovakavuuden turvaamiseksi, hyvä jarrutusjakauma etu- ja taka-akselin kesken sekä ketteryys pienien pystyakselin ympäri vaikuttavien momenttien ansiosta. (Reimpell ym. 2001, 42.)

## 8.2 Group 4 -luokan säännöt

Säännöt ovat hyvin tiukat, koska kyseessä on historic luokan kilpa-auto. Osat on oltava vastaavia, kuin kyseisen aikakauden kilpa-autossakin. Joitain osia saa vahvistaa ja joitain alkuperäisestä vaihtaa vahvempiin (Appendix K 2011, 1).

Auto on valmistettu noudattaen luokitustodistusta ja se kertoo mihin vahvistuksia saa laittaa, sekä mahdolliset vaihtoehdot tietyille osille. Ohjeet historic autojen määrittämiselle löytyvät muun muassa Internetistä, AKK Motorsportin sivuilta. Suomessa sovellettavia sääntöjä voi käyttää, vaikka kilpailisikin kansainvälisesti (Autourheilun sääntökirja 2012, 372).

Luokitustodistus kertoo, että rakentaessa 308 GTB group-4 kilpa-auton tukivarsia on mahdollista vahvistaa ja raidetangonpää on mahdollista vaihtaa uniball-tyyppiseen ratkaisuun. Nämä muutokset on esitetty kuvallisesti luokitustodistuksessa.

### 8.3 Ohjelmisto

Ennen kuin tietokonepohjaiset jousitusgeometria ohjelmat tulivat, tehtiin geometria tarkastelut paperilla tai pienoismalleilla. Nykyisten tietokonepohjaisten analysointityökalujen valtti on niiden käyttömahdollisuudet. Kattavimpiin ohjelmiin voidaan ajaa esimerkiksi Matlab-tiedosto rataprofiilista, joka sitten ajetaan simuloinnilla läpi ja tutkitaan kaarrekohtaisia tilanteita. Näin voidaan ajaa rata läpi erilaisilla jousitusgeometrian vaihtoehdoilla ennen kisa ajankohtaa. Näin saavutetaan merkittävä kustannussäästö, tulosten parannus ja kisainsinöörien jatkuvan kehityksen mahdollisuus.

Jousitusgeometrian tarkasteluun tässä työssä käytetään Yhdysvaltalaisen Mitchell Softwaren, WinGeo Suspension Geometry ohjelmaa. Se on kolmiulotteinen jousitusgeometrian tarkastelu ja suunnitteluohjelma. Ohjelmalla on myös mahdollista luoda tukivarsia ja muita jousituksen komponentteja haluttujen ominaisuuksien perusteella. Ohjelmassa on huomattava määrä ominaisuuksia, joita ei ole tarkoitus käydä tässä työssä läpi laajemmin.

## 9 GEOMETRIAN TARKASTELU

Geometrian tarkastelu tehtiin jousitusgeometriaohjelmalla. Mitat tukivarsille ja muille mittapisteille, kuten iskunvaimentimien kiinnityskohdille, saatiin mallinnetusta rungon ja jousituskomponenttien kokonaisuudesta (kuvio 27).



Kuvio 27. Mallinnettu Ferrari 308 GTB:n runko ja jousituskomponentit

Muutoksia alustaan on rakennusvaiheessa tehty muun muassa kallistuksenvakaa-  
jien kohdalla. Lähtökohtana on luokitustodistus nro 648 mukainen group-4 -kilpa-  
auto. Ajoneuvon pyöränkulmien lähtöarvot on ohjelmassa asetettu arvoihin, jotka  
yleisesti säädetään kohdeyrityksessä ennen luovutusta (taulukko 1).

Uutta geometriaa on tunnusteltava varovasti, koska auto on sinänsä jo hienosti  
toteutettu ja sen tasapainon säilyttäminen on tärkeää. Muutokset, joita geometri-  
aan tehdään, ovat pieniä, mutta tiettyihin arvoihin vaikutukset ovat verrattain isoja.

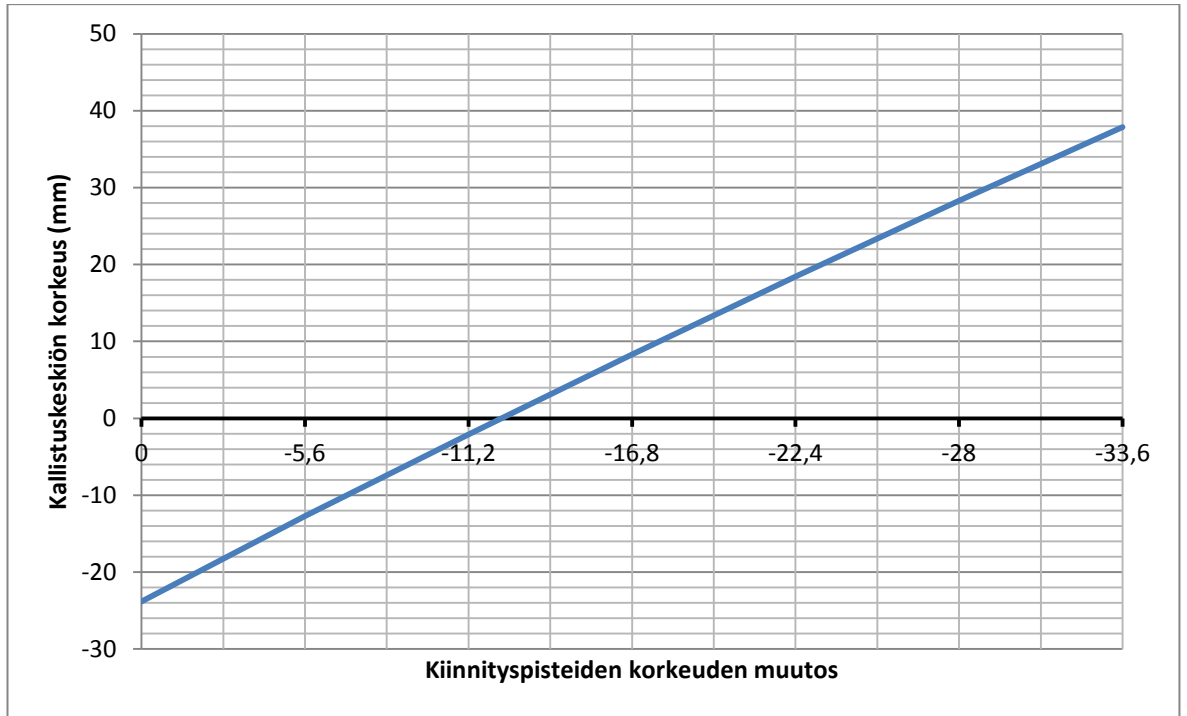
Taulukko 1. Säädettyjen pyöränkulmien arvot.

| CAMBER |       | AURAUS/HARITUS |      | CASTER | KPI   |
|--------|-------|----------------|------|--------|-------|
| FRONT  | REAR  | FRONT          | REAR | 4°     | 9°30' |
| -0,5°  | -1,9° | -2mm           | -4mm |        |       |

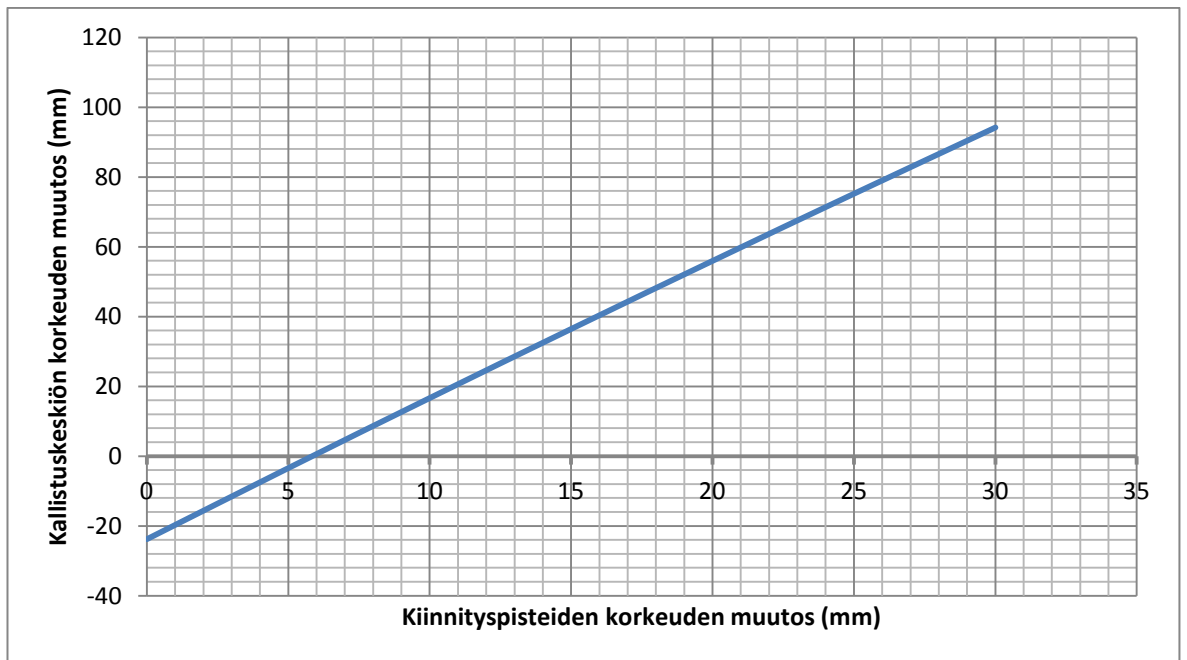
### 9.1 Etujousituksen geometria

**Kallistuskeskiö.** Ensimmäisenä huomion kiinnittää matala kallistuskeskiö, se on maanpinnan alapuolella 23,8 millimetriä. Tämä ilmenee silloin, kun tukivarsien pallonivelten väli on pienempi, kuin tukivarren sisäpään puslien. Tällöin hetkellinen keskipiste piirtyy ajoneuvon ulkopuolelle ja renkaan kosketuspinnasta piirtyvä suora risteää ajoneuvon keskilinjan kanssa maanpinnan alapuolella. Tämä rakenne aiheuttaa sen, että kaarteessa geometria pyrkii laskemaan keulaa. Tämä taas saattaa aiheuttaa suurella poikittaispainonsiirrolla, että sisäkurvin rengas nousee ilmaan ja osa rengasparin voimansiirtokyvystä jää käyttämättä. Jotta kallistuskeskiön saisi maanpinnan tasoon, täytyisi muuttaa tukivarsien sisäpään tai ulkopään kiinnityspisteitä tai korottaa ajokorkeutta. Ajokorkeuden korotuksella, jotta kallistuskeskiön saisi maanpinnan tasoon, joutuisi ajoneuvoa korottamaan yli 12 millimetriä. Tällöin myös painopiste nousisi. Korin kiertyessä korotetulla ajokorkeudella kallistuskeskiö pysyy maanpinnan yläpuolella 4 asteen kierrossa, jos korotusta on yli 40 millimetriä (liite1). Ulkopään kiinnityspisteiden muuttaminen on erittäin hankalaa muuttamatta pyörän navan tai tukivarsien rakennetta, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jäisi sisäpään kiinnityspisteiden muuttaminen.

Kiinnityspisteiden muutos on helpointa suorittaa ylätukivarsien kiinnityspisteille. tällöin kallistuskeskiön aseman nostaminen tapahtuisi ylätukivarren etu- ja takakiinnityspisteiden laskemisella. Kuvio 28 kertoo kiinnityspisteiden pystysuuntaisen muutoksen vaikutuksen kallistuskeskiöön. Kuviossa 29 näkee alatukivarren kiinnityspisteiden korkeuden vaikutuksen kallistuskeskiön korkeuteen.



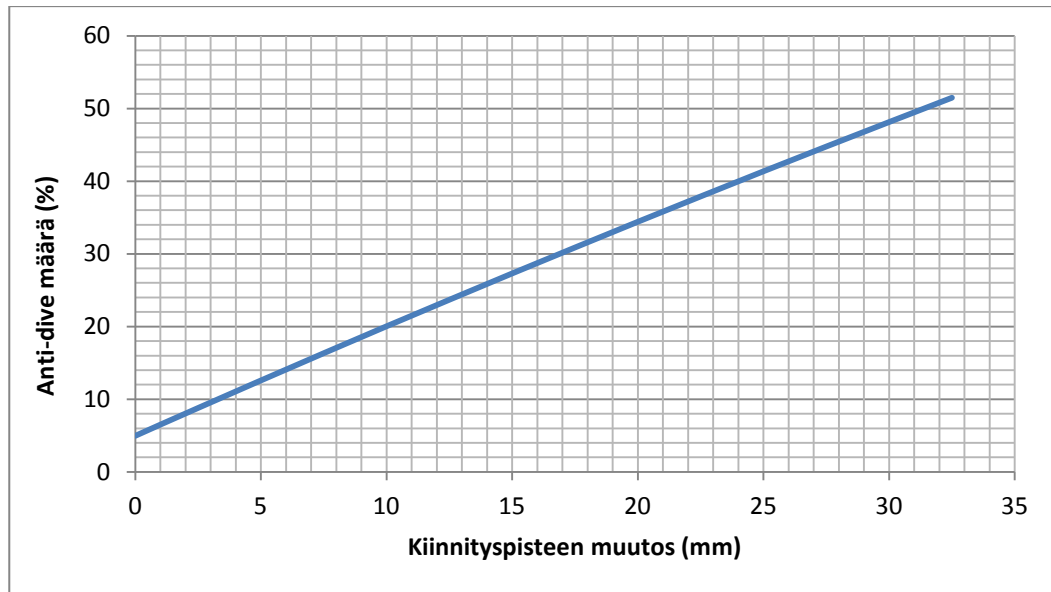
Kuvio 28. Ylätukivarren kiinnityspisteiden muutoksen vaikutus kallistuskeskiön korkeuteen.



Kuvio 29. Alatukivarren kiinnityspisteiden muutoksen vaikutus kallistuskeskiön korkeuteen.

Kallistuskeskiön ja painopisteen välinen **momenttivarsi** vaikuttaa painonsiirtoon jousien kautta, ja siten se vaikuttaa myös kallistumiseen. Jotta ajoneuvon käytös olisi johdonmukaista, momenttivarren tulisi liikkua mahdollisimman lineaarisesti kiertoliikkeessä. Tutkittavassa ajoneuvossa momenttivarren etäisyys korin kiertymisen funktiona on suhteellisen hyvä. Se ei ole ihan lineaarinen, mutta kuvaaja ei myöskään ollut kovin progressiivinen (liite 3). Tästä voi päätellä, että painonsiirron ollessa johdonmukainen ajoneuvon käytös olisi sitä myös. Liitteessä 3 näkee myös kallistuskeskiön korkeuden ja poikittaissijainnin vaikutuksen momenttivarteen.

**Anti-dive.** Anti-dive-ominaisuus ei ole kilpa-autoissa toivottavaa, ainakaan etupäässä. Poikkeuksena ovat formulat, joissa aerodynamiikan vaikutus on erittäin suuri. Etupään anti-dive kohdeajoneuvon jousitusmallissa on noin 5 %. Anti-dive-ominaisuutta olisi mahdollista lisätä esimerkiksi alatukivarren takapäen kiinnityspisteen nostamisella. Tutkimisen aikana on todettu alatukivarren taemman kiinnityspisteen muutoksella 20 mm ylemmäs olevan jousitusgeometria ohjelman mukaan saavutettavissa noin 40 prosentin anti-dive. Huomattavaa on, että etupään pitkittäissuuntaisessa kiertoliikkeessä, kuvitellussa jarrutus tilanteessa, anti-dive-arvo liikkuu hieman positiiviselle. Mallinnetusta ajoneuvosta huomaa, että alatukivarren kiinnityspisteiden muuttaminen olisi hieman hankalaa muuttamatta kiinnityspisteiden ympärillä olevia runkorakenteita. Tällöin vaihtoehdoksi anti-diven muuttamiseksi jää ylätukivarren kiinnityspisteiden muuttaminen. Vaikuttava tekijä on tukivarren kulma alatukivarteen nähden. Jos muuttaa esimerkiksi molempia tukivarrenpisteitä, muutos etu- ja takakiinnityspisteissä on puolet kuviossa 30 nähdystä muutoksesta.



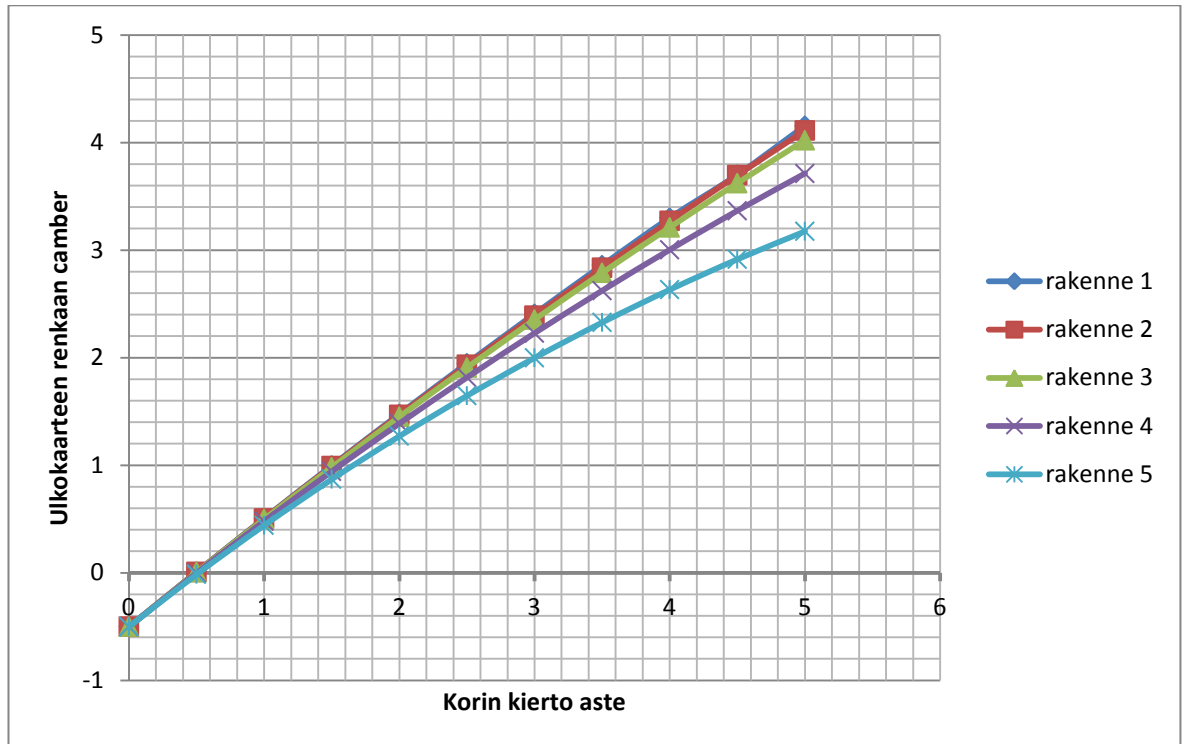
Kuvio 30. Kiinnityspisteen muutoksen vaikutus anti-dive ominaisuuteen.

**Camber.** Muutos camber-kulmassa sisäänjoustossa on hyvin maltillinen. Kiertoliikkeen camber-muutos taas on ulkokaarten renkaalla runsaasti positiivinen (liite 2), mikä saattaa heikentää kaarrepitoa. Camber-muutos on jo 1,5 asteen korin kallistuksella ulkokaarten renkaalla 1 asteen positiivisella, jos staattinen camber on 0,5 astetta. Jousen sisään painuma on tällöin noin 12 millimetriä.

Muuttamalla ylätukivarren pituutta voidaan vaikuttaa camber muutokseen, mutta muutos on hyvin pieni kiertoliikkeessä (kuvio 31). Taulukko 2 osoittaa kuviossa 31 käytettyjen rakenteiden muutoksen suuruuden. Simulaatio on tehty siirtämällä yläpalloniveltä lähemmäksi ajoneuvon keskilinjaa. Muuttamalla alapallon sijaintia ulospäin, vaikutus on myös marginaalinen. Jopa 100 millimetrin siirrolla ei ole suurta vaikutusta kiertoliikkeen camber muutokseen. Rakenteiden muutoksessa on myös huomioitava hetkellisen keskipisteen paikka. Sen paikka korkeussuunnassa vaikuttaa joustossa tapahtuvaan raidevälin muutokseen. Alunperin raidevälin muutos kiertoliikkeessä on 3 asteen kierrossa yhteensä, tärkeämmässä ulkokaarten puoleisessa renkaassa, noin 2,3 millimetriä ajoneuvon keskilinjan suuntaan ja tasajoustossa 80 millimetrin sisäänjoustossa noin 11,6 millimetriä yhdellä puolella. Esimerkkinä rakenne 5, jossa tasajoustossa raidevälin muutos on yhdellä renkaalla 7,3 millimetriä ajoneuvon keskilinjan suuntaan ja 3 asteen kiertoliikkeessä ulkokaarten puolen renkaan 1,2 millimetriä.

Taulukko 2. Tukivarren pituuden muutos

| Rakenne      | Tukivarren pituus |
|--------------|-------------------|
| alkuperäinen | 226,245           |
| 1            | 221,245           |
| 2            | 216,245           |
| 3            | 206,245           |
| 4            | 176,245           |
| 5            | 136,245           |



Kuvio 31. Ylätukivarren pituuden muutoksen vaikutus camber kulmaan

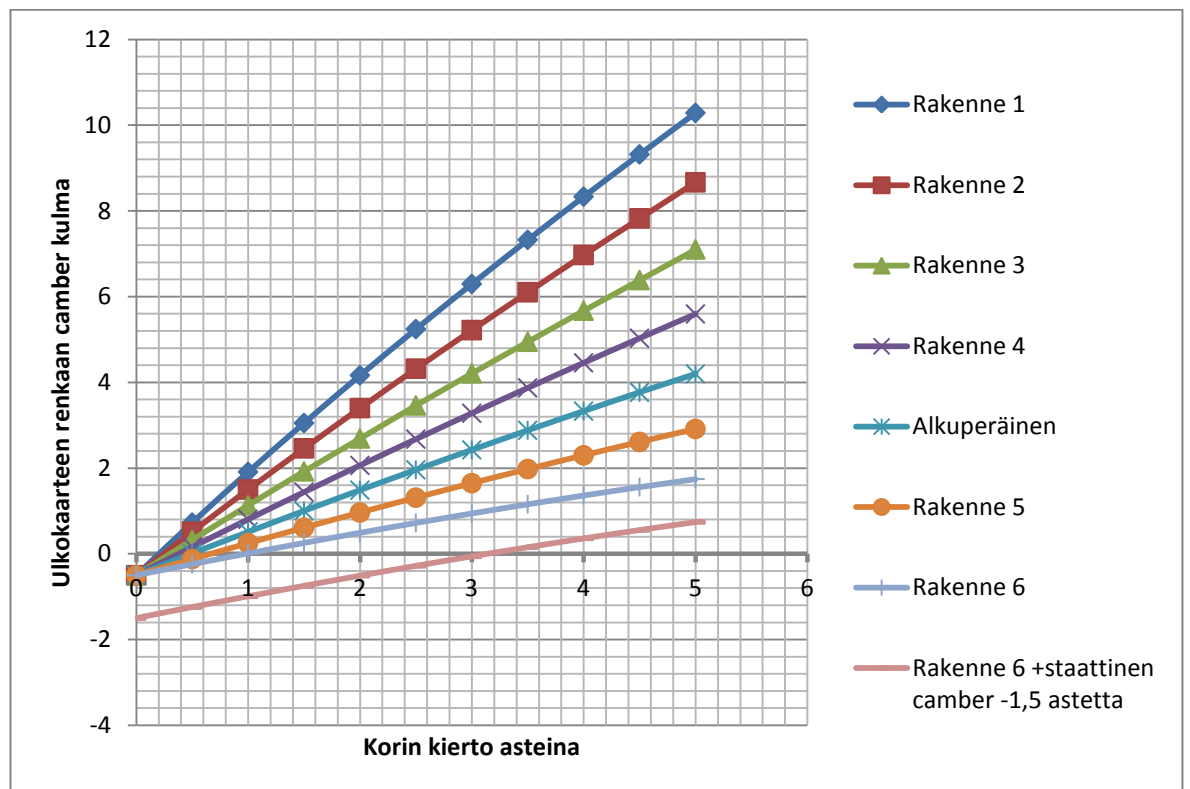
Tukivarren korkeutta muuttamalla camber kulman käytös muuttuu enemmän. Ylätukivarren kiinnityspisteen muutos pystysuunnassa vaikuttaa jo huomattavasti, kun muutos tehdään ylöspäin. Esimerkissä on myös esitetty staattisen camber kulman muutoksen vaikutus käyrään (kuvio 32). Taulukko 3 esittää kuvion 32 muutosten suuruuden. Esimerkkinä rakenteen 1 aiheuttama raidevälin muutos on 80 millimetrin suuruisella tasajoustolla 23,4 millimetriä ajoneuvon keskilinjan suuntaan ja 3 asteen kiertoliikkeessä 3,7 millimetriä ulkokaarteen renkaalla samaan suuntaan. Vaihtoehtoisessa rakenteessa 6 tasajoustopon arvo on miltei sama 23,2 millimetriä, mutta kiertoliikkeessä hieman isompi eli 6,8 millimetriä ajoneuvon keskilinjan suun-



taan. Näinkin lähellä olevat arvot johtuvat hetkellisen keskipisteen piirtymisestä eri puolille tukivarsia, mutta yhtä korkealle.

Taulukko 3. Ylätukivarren korkeusmuutokset esimerkissä.

| Rakenteet    | korkeus muutos (mm) |
|--------------|---------------------|
| Rakenne 1    | 100                 |
| Rakenne 2    | 75                  |
| Rakenne 3    | 50                  |
| Rakenne 4    | 25                  |
| Alkuperäinen | 0                   |
| Rakenne 5    | -25                 |
| Rakenne 6    | -50                 |



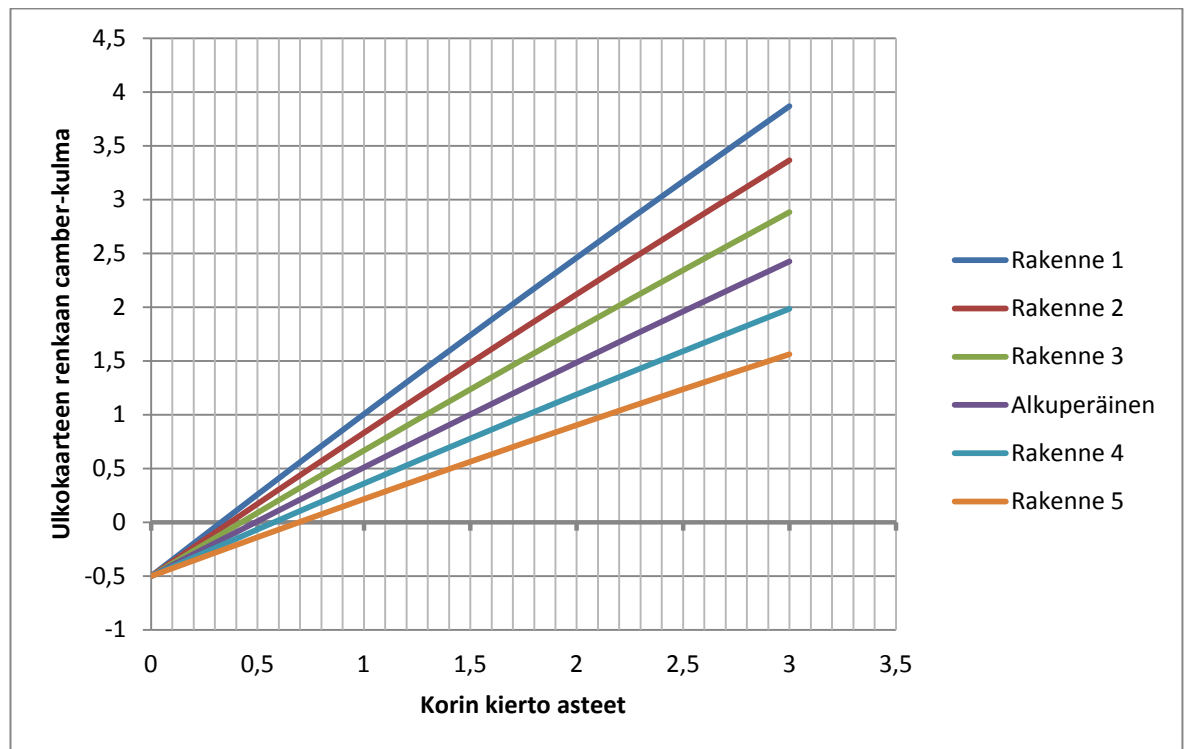
Kuvio 32. Ylätukivarren kiinnityspisteiden korkeussuunnan vaikutus camber kulmaan.

Huomioitavaa on kuitenkin esimerkiksi rakenteessa 6, että normaali jarrutustilanteessa camber muutos on sitten huomattavasti dramaattisempi kuin alkuperäisessä rakenteessa. 60 millin sisäänjoustossa on camber jo liikkunut -0,5:stä -3:een asteeseen. Kiertoliikkeen camber kulmaa suunniteltaessa rakenteen määrää haluttu

kallistuskulma. Kuviossa 33 nähdään vastaava kiinnityspisteiden vaikutus alatukivarressa. Kuvion 33 muutokset on nähtävissä taulukosta neljä.

Taulukko 4. Alatukivarren korkeusmuutokset esimerkissä.

| Rakenne      | Korkeus muutos |
|--------------|----------------|
| 1            | -45            |
| 2            | -30            |
| 3            | -15            |
| Alkuperäinen | 0              |
| 4            | 15             |
| 5            | 30             |



Kuvio 33. Alatukivarren kiinnityspisteiden korkeuden vaikutus camber-kulma muutukseen.

**Ominaisohjaus.** Ohjauskulman muutos kyseessä olevassa rakenteessa on kiertoliikkeessä hyvin pientä (liite 4). Sisäänjoustossa muutos on hieman suurempaa: sisäänjoustossa ohjaus pyrkii haritukselle päin ja ulosjoustossa auraukselle. Tämä saattaa aiheuttaa vaeltelua ohjauksessa ajoneuvon jarruttaessa esimerkiksi ennen kaarretta, mutta kääntyminen helpottuu. Tosin näin pienet kulmamutokset eivät luultavasti huomattavasti vaikuta ohjaukseen. 50 millimetrin sisäänjoustolla kulma

muuttuu 0,1 astetta haritukselle, tarkoittaen säteeltään 300 millimetriä olevan renkaan pinnassa noin 0,5 millimetrin suunnan muutosta. Jos ajoneuvoon haluttaisiin ohjaus jossa ei ole Ackermann ominaisuutta, esimerkiksi muutos rata-autoon, täytyisi ominaisohjaus ottaa huomioon. Tutkimuksen alaiseen ajoneuvoon on mahdollista vaihtaa olkavarsi, jolloin Ackermann ohjauksen määrää voi muuttaa. Tilannetta on simuloitu siirtämällä raidetangon pään kiinnityskohta navassa, poikittais-suunnassa siihen pisteeseen jolloin olkavarsi olisi suoraan kohdistettuna ajoneuvon pitkittäisakselin mukaan. Tällöin Ackermann ohjausta ei ole. Muutos rakenteessa ei ole kovin suuri, noin 33 millimetriä, mutta ohjausgeometriassa huomattava. Sisään ja ulosjouston ohjauskulma muutos on nyt samaan suuntaan, auraukselle (liite 5). Tämä geometria vakauttaa ajoneuvoa jarrutustilanteissa ja muissa sisäänjoustoa aiheuttavissa tilanteissa. Kiertoliikkeessä on luonnollisesti sama tilanne, molemmat renkaat pyrkivät auraukselle. Tämä voi rata-ajossa olla hyväksi, johtuen sortokulmien taipumuksesta kasvattaa kitkakerrointa. Ennen tämänkaltaisten muutosten tekemistä, tulisi käytettävien renkaiden ominaisuuksia tutkia tarkoin parhaiden sortokulmien selvittämiseksi.

## 9.2 Takajousituksen geometria

Takatuennassa on mahdollista tehdä geometriaa muuttavia toimenpiteitä hyvin helposti. Alatukivarsien sisäpäähän kiinnityspisteet on mahdollista kääntää 180 astetta ympäri, jolloin kiinnityspiste nousee 35,95 millimetriä alkuperäisestä (kuvio 34). Kiinnityspisteiden kääntämisen vaikutusta on tutkittu muiden muuttujien ohella.

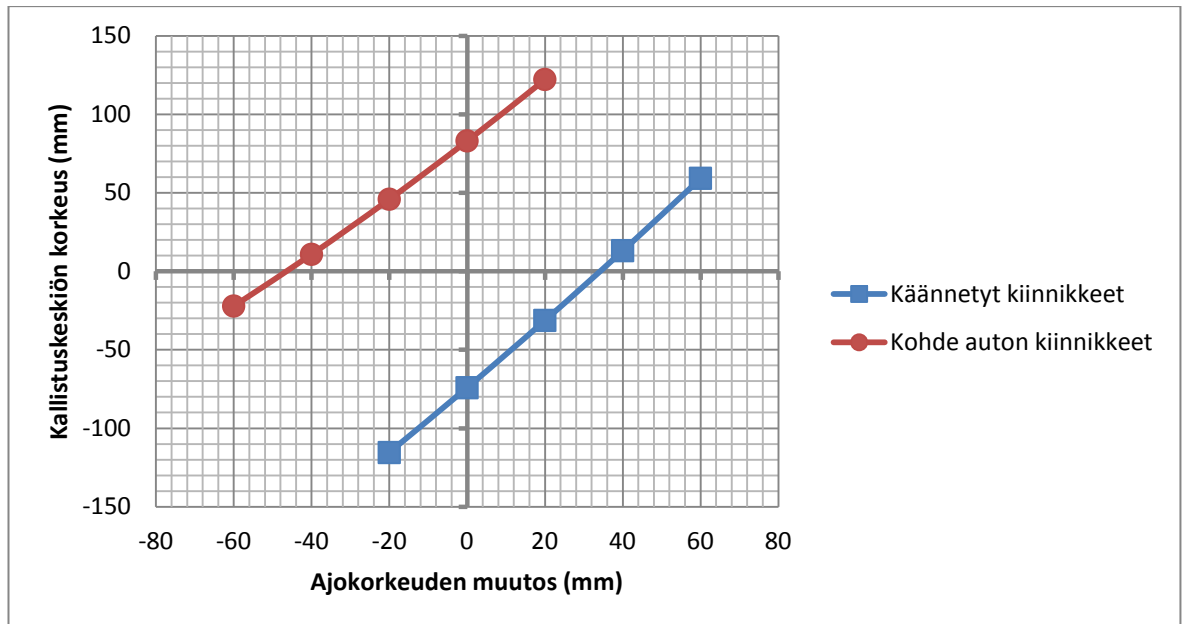
**Kallistuskeskiö.** Takapäässä kallistuskeskiö on noin 83 millimetrin korkeudella. Kallistuskeskiö on luultavasti suunniteltu näin, jotta kallistuminen olisi pienempää, kyseessä on keskimooottorinen auto. Huono puoli, eli jacking voima, voimistuu mitä korkeammalla kallistuskeskiö on. Tässä vaiheessa kallistuskeskiön paikka vaikuttaisi suhteellisen hyvältä, ehkä hieman korkeahkolta. Taka kallistuskeskiö saisi olla hieman korkeammalla kuin edessä, ainakin keskimooottorisessa autossa jossa takarenkaille vaikuttaa suurempi paino. Liitteestä 6 selviää kallistuskeskiön liike kiertoliikkeessä, sekä painopisteen ja kallistuskeskiön välisen momenttivarren suuruus samassa liikkeessä. Kallistuskeskiön liike on hyvä, se ei liiku korkeus-

suunnassa kovin paljon ja poikittaissuuntainen liike on tasaista. Tämä johtaa siten momenttivarren johdonmukaiseen liikkeeseen ja tällöin painonsiirron lisäys on tasaista.

Kun alatukivarren kiinnikkeet käännetään toisinpäin, kallistuskeskiön asema tippuu huomattavasti. Kallistuskeskiön sijainti on tällöin 69,5 millimetriä maanpinnan alapuolella. Liitteestä 6 näkee käännettyjen tukien vaikutuksen kallistuskeskiön liikkeeseen kiertotilanteessa. Kallistuskeskiön sijainti voimistaa perän kallistumista ja aiheuttaa negatiivista jacking voimaa, joka pyrkii laskemaan perää kaarretilanteessa. Momenttivarren muutos ei ole progressiivista, mutta huomattavasti suurempaa kuin toisella rakenteella.

Kallistuskeskiön korkeussuuntaista sijaintia muuttaessa on otettava huomioon hetkellisen keskipisteen sijainnin muutos. Kohde ajoneuvon takajousituksessa edullisinta olisi muuttaa alatukivarren sisäpäiden korkeussuuntaa, jolloin hetkellinen keskipiste siirtyy kauemmaksi ja lähemmäksi maanpintaa. Tällöin on otettava kuitenkin huomioon camber-kulma muutoksen pieneneminen joustotilanteessa. Tämä on luonnollisesti hyvä tasajoustopuoli, mutta kiertoliikkeessä ei välttämättä. On muistettava, että tasajoustopuoli on mahdollista rajoittaa anti-dive ominaisuudella. Kiertoliikettä on mahdollista rajata myös kallistuksen vakaajalla, mutta sen aiheuttama suuri renkaiden välinen painonsiirto ei joka tilanteessa ole hyväksi.

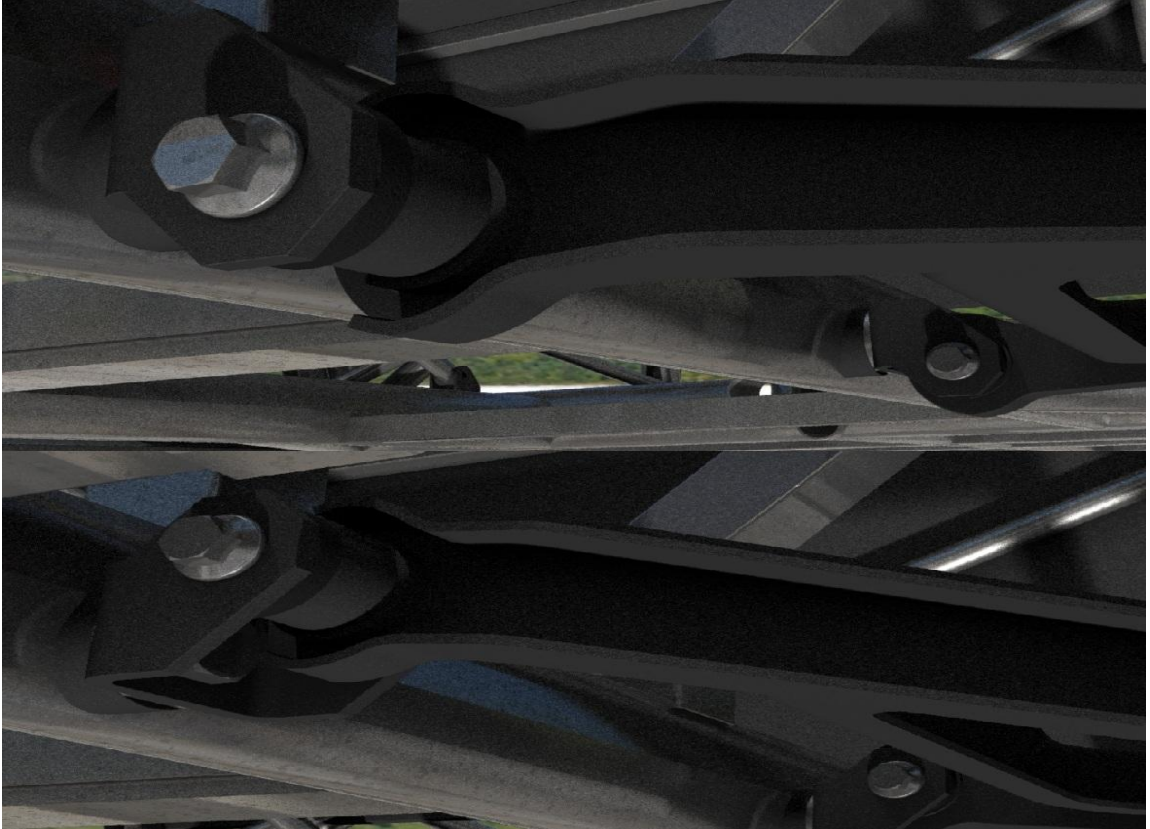
Kuviossa 36, näkee takajousituksen kallistuskeskiön aseman korkeussuunnassa, kun sisäpään kiinnityspisteitä muutetaan myös korkeussuunnassa. Huomion arvoista on, että muuttamalla ylätukivarren kiinnityspisteitä, muutos kallistuskeskiön asemaan on suurempi. Tämä tapahtuu tukivarsien yhdensuuntaisuuden lähentyessä. Tällöin hetkellinen keskipiste piiryy äärettömän kauas ja kallistuskeskiön aseman korkeussuunnassa määrittää yhdensuuntainen suora renkaan kosketuspinnasta, tukivarsien kanssa. Kallistuskeskiön asema on siis renkaan kosketuspinnan ja ajoneuvon keskilinjan leikkauskohta, ja hetkellisen keskipisteen ollessa maanpinnan yläpuolella, on kallistuskeskiö maanpinnan alapuolella.



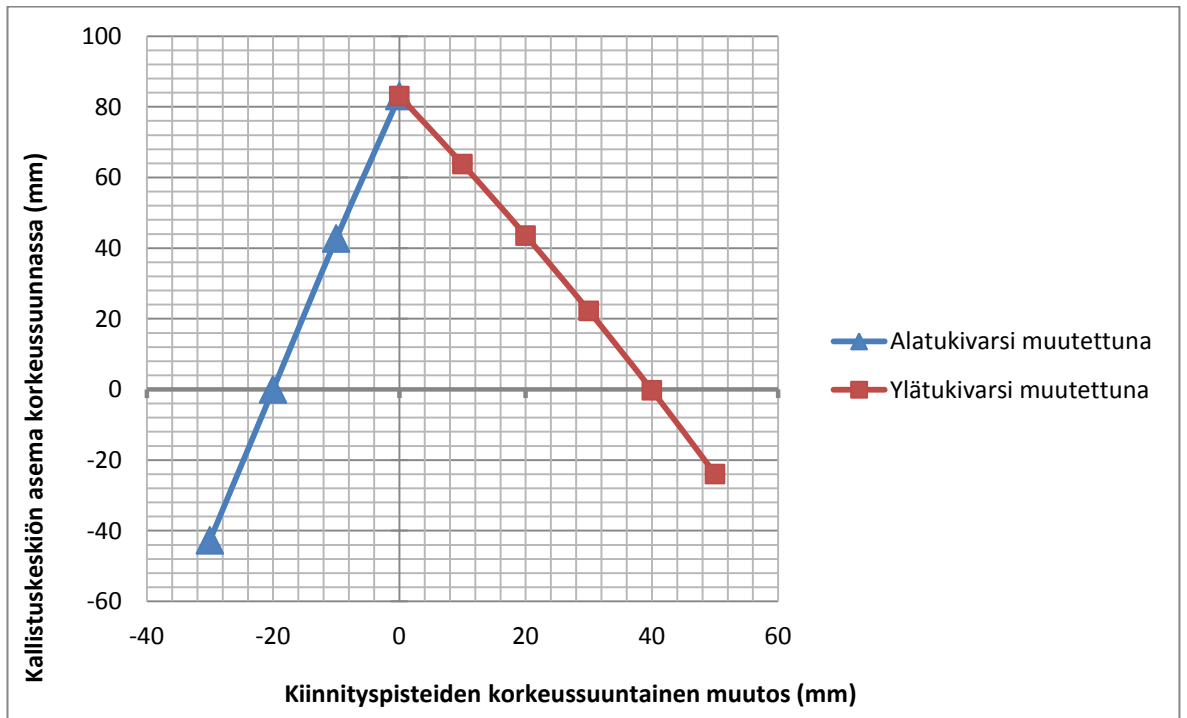
Kuvio 34. Ajokorkeuden muutoksen vaikutus kallistuskeskiöön.

Käännetyt kiinnikkeet siis vaikuttavat suuresti kallistuskeskiöön 100 millin ajokorkeudella. Kuvioista 34 nähdään, että jos halutaan esimerkiksi hieman maanpinnan yläpuolelle sijoittuva kallistuskeskiö, käännettyillä kiinnikkeillä joudutaan ajokorkeus valitsemaan 60 millimetriä korkeammalle. Tämä siis jos ei haluta muuttaa camber-kulma muutosta joustossa, jolloin ylätukivarren korkeuden muutos ei tulisi kyseeseen.

Kuviossa 35 on esillä kiinnikkeiden muoto ja niiden sijainti. Kiinnikkeet ovat siis kiinni runkorakenteessa ja tukivarsi on kiinni kiinnikkeissä. Kiinnikkeiden alle on mahdollista sijoittaa korotuspaloja, jolloin kiinnikkeen lateraalinen sijainti muuttuu. Tällöin suurin muuttuva suure on camber-kulma.

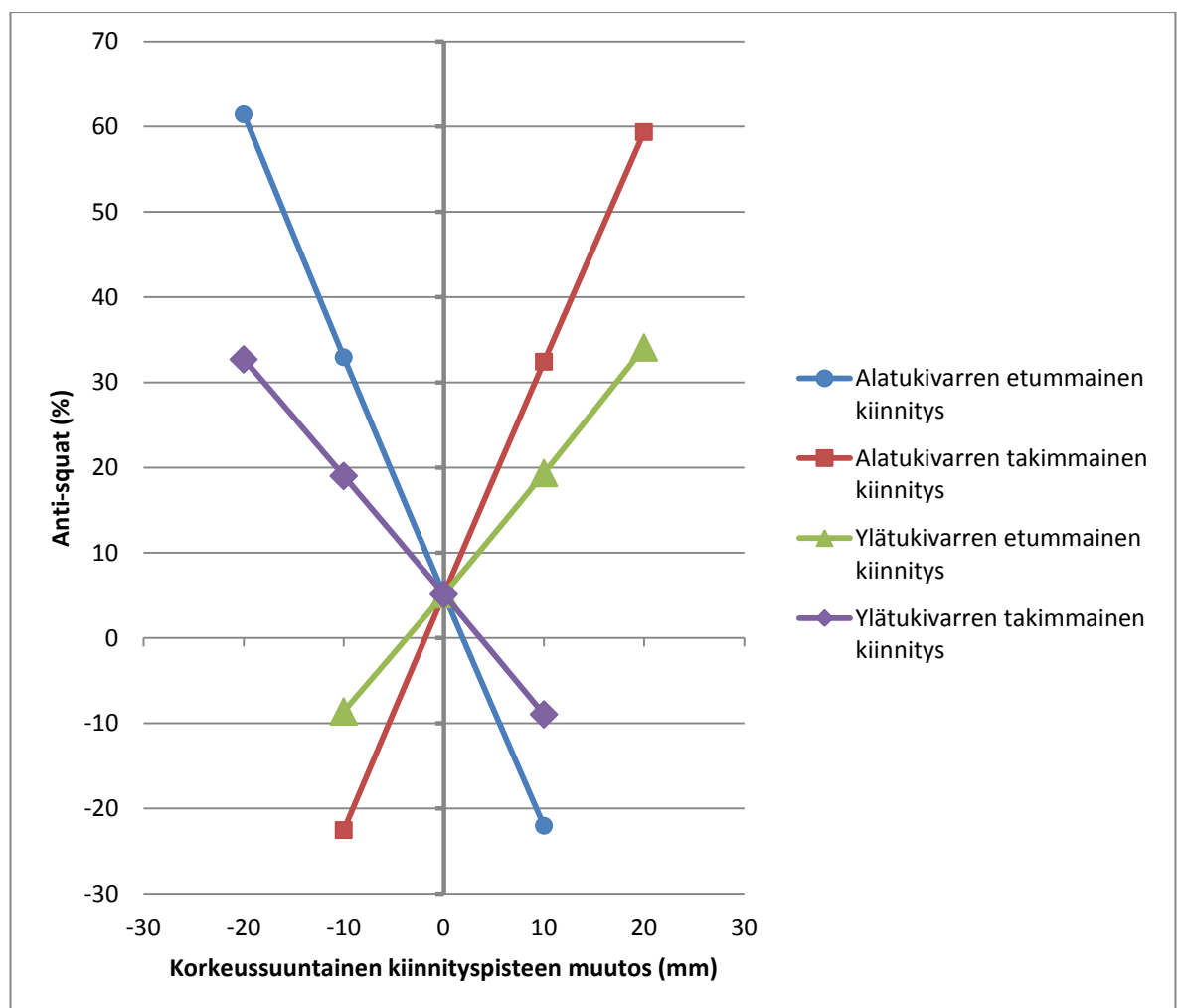


Kuvio 35. Taka-alatukivarren kiinnikkeiden asennot (ylempi käännetty kiinnikkeet).



Kuvio 36. Takajousituksen tukivarsien kiinnityspisteiden vaikutus kallistuskeskiöön.

**Anti-squat.** Anti-squat ominaisuutta takajousituksessa on noin 5 %:in verran. Anti-squat olisi hyvä taka-akselilla, jos halutaan rajoittaa joustoa esimerkiksi suurien camber-kulma muutosten vuoksi. Anti geometrian suuruutta voidaan muuttaa samoin kuin edessä, tukivarsien keskinäistä kulmaa muuttamalla. Kuviossa 37 näkee eri kiinnityspisteiden korkeuden vaikutuksen anti-squat ominaisuuteen. Taulukko 5:stä näkee myös vaikutuksen kallistuskeskiöön. Tästä voidaan nähdä että kaikkein edullisin muutos kallistuskeskiötä ajatellen on alatukivarren etummaisesta kiinnikkeen laskeminen, jolloin kallistuskeskiön korkeus pienenee ja anti-squat kasvaa.



Kuvio 37. Anti-squat ominaisuus tukivarsien kiinnityspisteiden muutoksessa.

Taulukko 5. Tukivarsien kiinnityspisteiden muutosten vaikutus.

| Alatukivarren etummainen kiinnitys |                |                          |
|------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Muutos                             | Anti-squat (%) | Kallistuskeskiön korkeus |
| -20                                | 61,458         | 30,919                   |
| -10                                | 32,952         | 57,3                     |
| 0                                  | 5,132          | 83,048                   |
| 10                                 | -22,027        | 108,184                  |

| Alatukivarren takimmainen kiinnitys |                |                          |
|-------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Muutos                              | Anti-squat (%) | Kallistuskeskiön korkeus |
| -10                                 | -22,536        | 68,824                   |
| 0                                   | 5,132          | 83,048                   |
| 10                                  | 32,432         | 97,083                   |
| 20                                  | 59,371         | 110,933                  |

| Ylätukivarren etummainen kiinnitys |                |                          |
|------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Muutos                             | Anti-squat (%) | Kallistuskeskiön korkeus |
| -10                                | -8,613         | 96,147                   |
| 0                                  | 5,132          | 83,048                   |
| 10                                 | 19,361         | 69,488                   |
| 20                                 | 34,099         | 55,442                   |

| Ylätukivarren takimmainen kiinnitys |                |                          |
|-------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Muutos                              | Anti-squat (%) | Kallistuskeskiön korkeus |
| -20                                 | 32,7           | 93,814                   |
| -10                                 | 19,014         | 88,469                   |
| 0                                   | 5,132          | 83,048                   |
| 10                                  | -8,95          | 77,549                   |

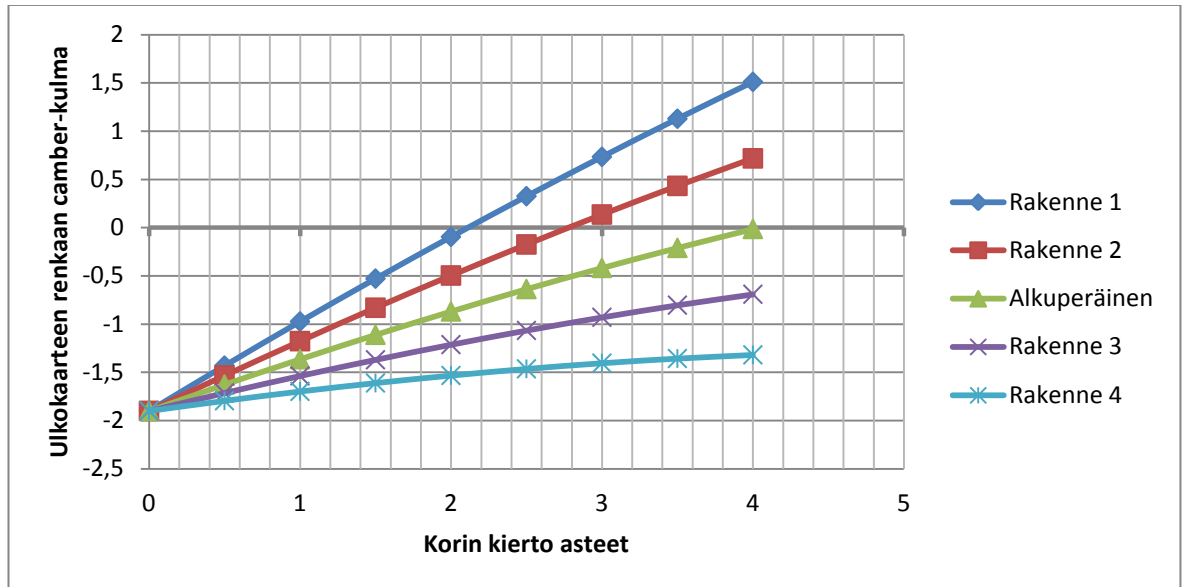
**Camber.** Takajousituksen camber-kulman muutos on hieman jyrkempi kuin etujousituksessa. Staattisella -1,9 asteen negatiivisella camber-kulmalla, tasajoustossa, 50 millimetrin joustossa on camber jo -3,7 asteessa. Vastaavasti kiertoliikkeessä camber lähenee nollaa ulkokaarten renkaalla vasta 4 asteen kierrossa. Vastaavasti tällöin sisäkaarten renkaalla on camber noin -4 astetta.

Käännettyillä alatukivarren kiinnikkeillä camber-kulma muuttuu roimasti. Kun aikaisemmin kiertoliikkeessä 0-camber saavutettiin ulkokaarten renkaalla noin 4 asteessa, nyt se saavutetaan jo hieman yli 2 asteessa. Myös tasajoustossa on huomattavia eroja, 50 millimetrin sisäänjoustossa camber kulma on noin -2,6 astetta. Nämä erot on nähtävissä, kun vertailee liitteitä 7 ja 8 keskenään.



Taulukko 6. Alatukivarren kiinnityspisteiden korkeusmuutos.

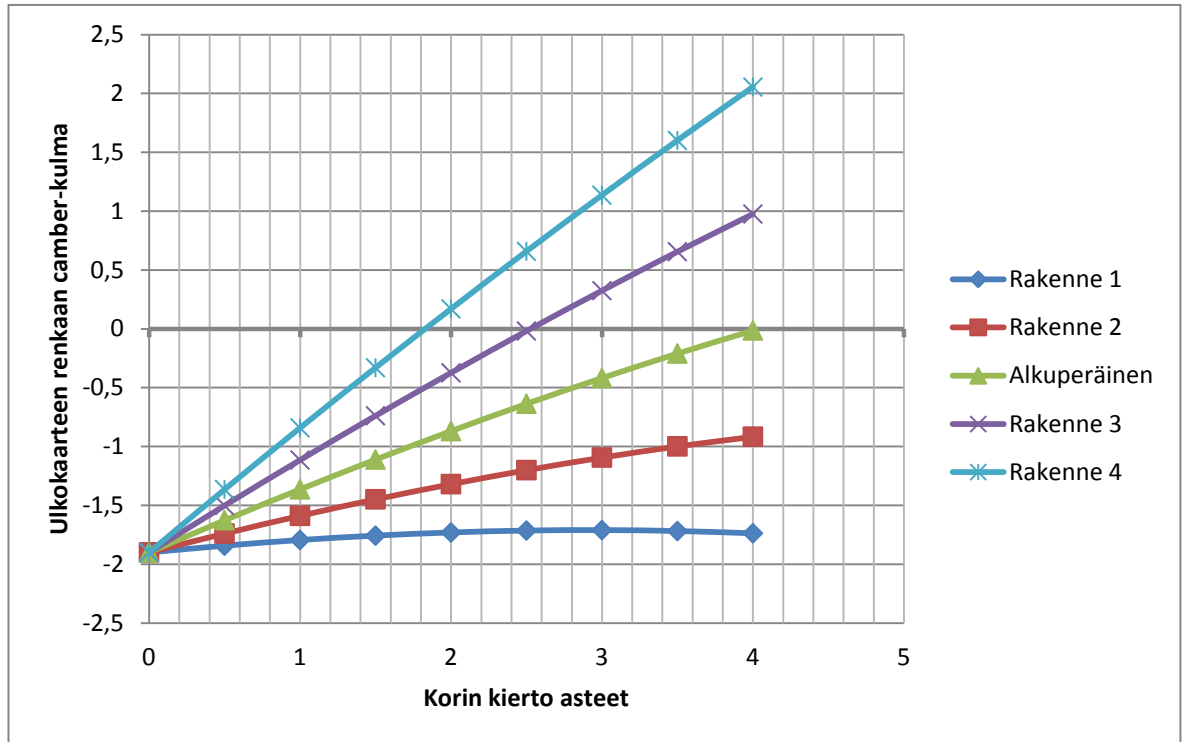
| Alatukivarren kiinnityspisteet |        |
|--------------------------------|--------|
| Rakenne                        | Muutos |
| Rakenne 1                      | -40    |
| Rakenne 2                      | -20    |
| Alkuperäinen                   | 0      |
| Rakenne 3                      | 20     |
| Rakenne 4                      | 40     |



Kuvio 38. Alatukivarren kiinnityspisteiden vaikutus camber-kulmaan.

Taulukossa 6 on nähtävillä muutokset alatukivarren kiinnityspisteisiin, joita on tutkittu kuviossa 38. Kuviossa 39 on nähtävissä ylätukivarteen tehtyjen muutosten vaikutus, rakenteiden muutosten ollessa yhtäläiset taulukko viiden kanssa.

Camber-kulman muutos kohde ajoneuvossa olevalla geometrialla on itsessään jo aika hyvä, joskin kulman suuruus rajatulla kiertokulmalla pitäisi selvittää renkaan ominaisuuksista. Tärkeintä kuitenkin on, ettei ennalta määrätyllä kiertokulmalla camber pääse menemään positiiviselle kulmalle. Tämä aiheuttaisi takapainoisessa autossa luultavammin hallitsemattomia sivuluisuja. Nopeuskilpailuissa tarkoituksena olisi kehittää mahdollisimman paljon pitoa ja rallin ollessa kyseessä, tulisi auton kehittää myös mahdollisimman paljon sivuttaispitoa.



Kuva 39. Ylätukivarren kiinnityspisteiden vaikutus camber-kulmaan.

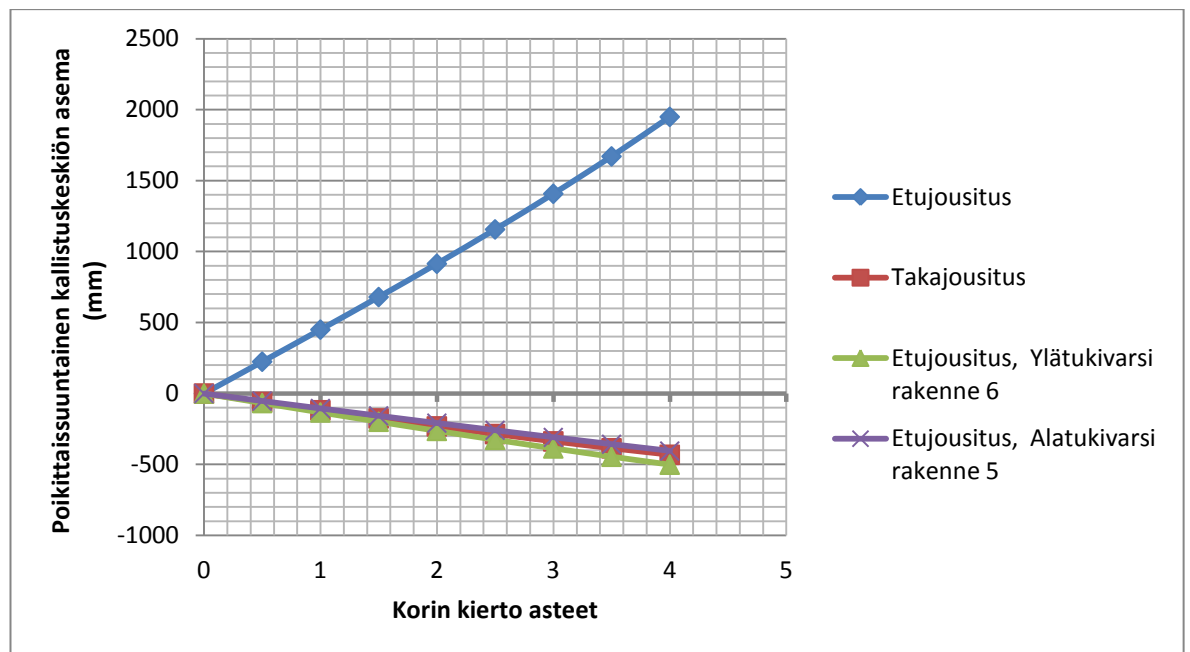
Renkaiden sivuttaisliike on sisäänjoustossa hyvin pientä, 50 millimetrin joustossa raideväli suurenee noin 4,8 millimetriä. Toisin on ulosjoustossa, sillä 50 millimetrin kohdalla raideväli on pienentynyt jopa 17 millimetriä. Ulosjoustossa tämänkaltaisen sivuttaisliike ei ole yhtä huonoksi kuin sisäänjoustossa. Liitteestä 10 selviää takarenkaiden sivuttaisliike jousto- ja kiertoliikkeessä.

**Ominaisohjaus.** Takarenkaiden ohjauskulmat liikkuvat joustossa miltei samankaltaisesti kuin eturenkaidenkin. 50 millimetrin sisäänjoustossa takarengaat menevät auraukselle noin 0,1 astetta, joka tarkoittaa renkaan pinnassa 0,5 millimetrin suunnan muutosta. 50 millimetrin ulosjoustolla auraukulma on muuttunut noin 0,01 astetta. Takapainoisella autolla tämänkaltaiset muutokset saattavat aiheuttaa aliohjautumista, joskin harvemmin näin pienessä mittakaavassa. Jos muuttaa esimerkiksi ulosjouston ohjauskulman muutossuuntaa, täytyy muutos tehdä maltillisesti. Ulosjoustossa tapahtuvalla harituksella saadaan ajoneuvo kääntymään hieman paremmin mutkan sisääntulossa, mutta liiallisella muutoksella voidaan ajoneuvon perä saada muun muassa vaeltelemaan runsaasti jarrutustilanteissa. Liitteestä 9 selviää ohjauskulman muutos niin jousto kuin kiertotilanteessakin.

Muutoksia ei tässä tapauksessa takajousituksen ominaisohjaukselle tarvitsisi tehdä. Muutokset joilla taka-akselin ohjausta kannattaa muuttaa, ovat staattisen ohjauskulman muutokset. Jos muutoksia ominaisohjaukseen haluaisi tehdä, olisi silloin joustosuuntaa muutettava kiertämällä takanapaa.

### 9.3 Yhteiset tekijät

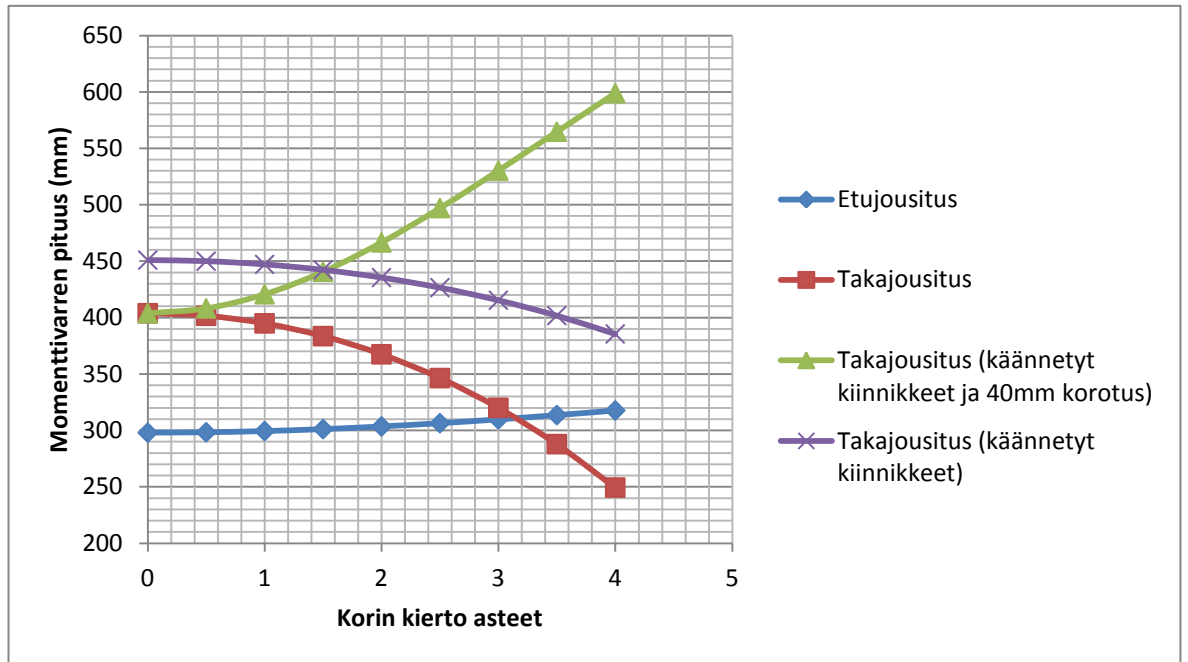
Kallistuskeskiöiden liike on yksi tarkkailtava tekijä. Jos kallistuskeskiöt liikkuvat molemmilla akseleilla samaan suuntaan ja yhtä suurella arvolla kiertoliikkeessä, voidaan ajatella painonsiirtojen olevan molemmilla akseleilla yhtä nopeaa ja suurta.



Kuvio 40. Kallistuskeskiöiden poikittainen asema.

Kuviossa 40 huomataan kallistuskeskiöiden alkuperäisen liikkeen olevan varsin erilaista. Kuviossa negatiivisella siirtymällä kuvataan kallistuskeskiön liikkumista kiertymisen suuntaan ja positiivisella liikkumista päinvastaiseen suuntaan. Kuvioon 40 on myös otettu mukaan tukivarsien muutettujen rakenteiden vaihtoehtoisia kokoonpanoja, joista huomaa muutokset sivuttaisliikkeessä. Etujousituksen kallistuskeskiön sivuttaissuuntainen suhteellisen suuri liike selittyy miltei samansuuntaisilla tukivarsilla. Kuviossa 41 nähdään etu- ja takajousituksen momenttivarsien muu-

tokset kiertoliikkeessä. Se kertoo missä suhteessa painonsiirto tapahtuu jousitusessa. Esimerkiksi kuviossa 41 nähdään takajousituksen jousen kautta tapahtuvan painonsiirron vähenevän kiertoliikkeessä, kun taas etujousituksessa liike on hyvin johdonmukaista.



Kuvio 41. Etu- ja takajousituksen momenttivarret.

## 10 POHDINTA

Ferrari 308 GTB on alustaltaan hyvin urheilullinen jo alun perin. Siinä käytetään päällekkäisiä kolmiotukivarsia, jotka antavat muihin tuenta tyyppeihin verrattuna huomasti paremmat pyöränkulmien muutosten hallinta ominaisuudet. Pyöräntuen geometrian tutkiminen ja parantelu tehdään kilpa-autoilussa yleisesti ratakohtaisesti. Tämän jälkeen kilpa-auto vielä säädetään kuljettajakohtaisesti. Ralliautoilussa joudutaan useasti tyytymään pieniin kompromisseihin, erikoistaipaleet ovat hyvin harvoin samanlaisia. Jousitusgeometrian tarkastelu alkaa rengasdataa tutkimalla. Renkaan ominaisuuksista selviää paineen ja kuormituksen mukaan edullisimmat camber-kulmat. Tämän perusteella yleisesti lähdetään suunnittelemaan kulmamuutoksia ja niiden suuruuksia. Tässä työssä esiteltiin mahdollisuuksia rakennemuutoksiin ja minkälaisia muutoksia niillä saadaan geometriaan aikaiseksi.

Useita eri mahdollisuuksia tukivarsien kiinnityksissä ja niiden vaikutuksista pyöränkulmiin tutkittiin. Geometrian suurimpina huomioina oli etu- ja takakallistuskeskiön korkeussuuntainen asema ja camber-muutokset kiertoliikkeessä. Arvot olivat kohtuullisia jo alun perin. Huomion arvoisena asiana pidin iskunvaimentimien pituutta. Ne ovat suhteellisen pitkät ja sallivat vain hyvin vähäistä sisäänjoustoa. Parannusehdotuksina on iskunvaimentimien uudelleen suunnittelu ja sen jälkeen ajoneuvon maksimikiertokulman määrittäminen. Uuden kiertokulman määrittämisen perusteella voi camber-kulman muutos nopeuden sisäänjoustossa määrittää.

Staattisista pyöränkulmista edessä muutoksia kaipaisi camber-kulma. Jos camber-kulman staattinen arvo on  $-0,5$  astetta rajoittuu korin kiertokulma  $0,5$  asteeseen. Tällöin ulkokaartenpuolen renkaan camber-kulma siirtyy positiiviselle puolelle, joka on epäedullista sivuttaispidon kannalta kaarreajossa. Jos staattisen camber-kulman määrittäisi  $-1,5$  asteeseen vastaava kiertokulma olisi  $1,5$  astetta. Tämä tarkoittaisi ulkokaarten puoleisen jousen  $12$  mm sisään painumaa ilman pituus-suuntaista painonsiirtoa. Tukivarsien asentojen muutoksilla kulman muutosnopeuden pystyi vaikuttamaan. Koska etuakseli ei ole vetävä voisi olettaa staattisen camber-kulman vaikutuksen neutraalissa tilanteessa suorituskykyyn vähäisemmäksi, kun taas korin kierrossa tärkeämmäksi.

Takana ulkokaarteen renkaan camber-kulman lähentyessä nolaa on korin kiertokulma 4 astetta. Tällöin jousen sisäänpainuma on noin 50 millimetriä ilman pituus-suuntaista painonsiirtoa. Tämä vaikuttaa hyvin loogiselta ajoneuvon ollessa hie- man takapainoinen. Huomion herättää kuitenkin tässä tapauksessa sisäänjoustos- sa tapahtuva camber-kulman muutos. Jo 50 mm sisäänjoustossa camber-kulma on muuttunut miltei kaksinkertaisesti negatiiviselle alkutilanteeseen verraten. Tä- mä ei voi olla edullista esimerkiksi vetopidon kannalta. Vaihtoehdoksi tulisi cam- ber-kulman muutosnopeuden rajoittaminen ja täten kiertokulman rajoittaminen tiet- tyyn arvoon tai anti-squat ominaisuuden käyttö, jolloin painonsiirrosta osa tapahtuu tukivarsien kautta.

Työ oli erittäin mielenkiintoinen ja haastava. Jousitusgeometrian toiminnan tutki- minen teoriassa on vaikeaa ja antaa vain viitteitä ajoneuvon käyttäytymisestä käy- tännön eri tilanteissa. Työn kannalta oli erittäin tärkeää voida käyttää tietokone- pohjaista jousitusgeometrian mallinnus- ja suunnitteluohjelmaa. Työtä olisi voinut parantaa ottamalla mukaan käytännön testausta ja tarkastelemalla useiden eri renkaiden ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta alustan toimintaan. Tämä olisi vaatinut lisää aikaa työn tekemiseen ja työn laajennusta ajodynamiikan puolella. Jousitusgeometriaa tutkiessa huomaa, miten pienistä muutoksista esimerkiksi tu- kivarsien asennoissa, seuraa suuria seuraamuksia ajoneuvon ajo-ominaisuuksien kohdalla. Se olisi ollut mukavaa todeta myös käytännössä ajoneuvon ajokäytöksen muutoksena. Kirjallisuutta aiheesta löytyy runsaasti, mutta suomenkielisiä opuksia valitettavan vähän. Suuri osa jousitusgeometriaa käsittelevistä englanninkielisistä kirjoista on joko Yhdysvalloista tai Iso-Britanniasta. Aihepiiri on erittäin laaja ja vaa- tii todellista syventymistä asian ymmärtämistä varten. Tämän vuoksi pidän työtäni onnistuneena ja suhteellisen kattavana ajatellen aikataulua mikä työn tekemiseksi oli varattu.

Lopuksi tahdon kiittää työn ohjaajaa Ari Saunamäkeä, teknisen tuen antajia Sami Niemistöä ja Juha Myllykangasta sekä muusta tuesta Anniina Korhosta ja Juho Liuskaa. Kiitos myös työn tilaajalle Kari Mäkelälle mahdollisuudesta työskennellä näin hienon kilpa-auton parissa.

## LÄHTEET

- Autourheilun sääntökirja 2012. 13.12.2011. [Verkkajulkaisu]. AKK Motorsport. [Viitattu 29.3.2012]. Saatavilla: <http://www.autourheilu.fi/saannot/>.
- Appendix K. 2011. [Verkkajulkaisu]. Federation Internationale de l'Automobile. [Viitattu 29.3.2012]. Saatavilla: <http://www.fia.com/sport/regulations/histracing.html>.
- Beckam, B. 1991. The Physics of Racing. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.3.2012]. Saatavana: <http://phors.locost7.info/contents.htm>.
- Dixon, J. 2009. Suspension geometry and computation. Great Britain: Anthony Rowe Ltd.
- Ferrari 308 and 328. 2012. [Verkkosivu]. How stuff works. [Viitattu 23.3.2012]. Saatavana: <http://auto.howstuffworks.com/ferrari-308.htm>.
- Ferrari History. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. Ferrari Faqs. [Viitattu 28.2.2012]. Saatavana: <http://www.ferrarifaqs.com/ferrari-history>.
- Gillespie, T. 1992. Fundamentals of vehicle dynamics. United States of America: SAE International.
- Laine, O. 1985. Autotekniikka 1. osa Ajo-ominaisuudet. Autoalankeskus Oy.
- MAT. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. Mäkelä Auto-tuning Oy. [Viitattu 17.3.2012]. Saatavana: [http://www.mat.fi/n\\_index.php?nav=company](http://www.mat.fi/n_index.php?nav=company).
- Mauno, E. 2002. Virittäjän käsikirja 2: Alusta. 2. painos. Helsinki: Alfamer Oy
- Milliken, W. & Milliken, D. 1995. Race car vehicle dynamics. 5. painos. SAE Publications Group.
- Mutsaer, L. 2009. [Valokuva]. The Blueprints. [Viitattu 16.3.2012]. Saatavana: [http://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/ferrari/27588/view/ferrari\\_308gtb/](http://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/ferrari/27588/view/ferrari_308gtb/).
- Puhn, F. 1976. How to Make Your Car Handle. Arizona: H.P.Books.
- Reimpell, J., Stoll, H. & Betzler, J.W. 2001. Engineering principles: The Automotive Chassis. 2. painos. Elsevier.

- Rowley, W. 2011. An introduction to race car engineering: The basics of vehicle dynamics. 3. painos. Rowley Race Dynamics. (Käyttöoikeus kuviin).
- Smith, C. 1985. Engineer to win: Understanding race car dynamics. Minneapolis: MBI Publishing Company.
- Smith, C. 1978. Tune to win: The art and science of race car development and tuning. California: Aero publishers, Inc.
- Tuononen, A. & Koisaari, T. 2010. Ajoneuvojen dynamiikka. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.



## LIITTEET

Liite 1. Etujousituksen kallistuskeskiön asema normaali tilanteessa sekä korotussa tilanteessa korin kierto asteen mukaan.

Liite 2. Etujousituksen camber-kulman muutos joustossa ja kiertoliikkeessä.

Liite 3. Etujousituksen kallistuskeskiön momenttivarsi ja kallistuskeskiön sijainti.

Liite 4. Etujousituksen ominaisohjaus kierto- ja joustoliikkeessä.

Liite 5. Etujousituksen ominaisohjaus kierto- ja joustoliikkeessä, ilman Ackermann ohjausta.

Liite 6. Takajousituksen kallistuskeskiön korkeus, poikittaissuuntainen asema sekä painopisteen välinen momenttivarsi kiertoliikkeessä, normaali ja käännettyt kiinnikkeet.

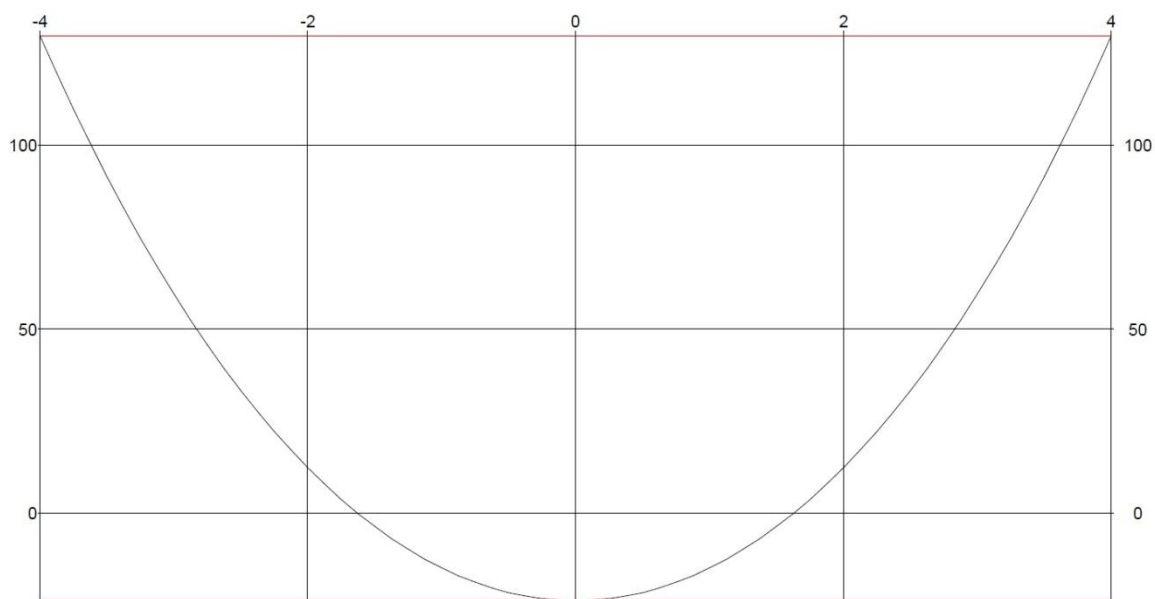
Liite 7. Takajousituksen camber-kulma muutos tasajoustossa ja kiertoliikkeessä.

Liite 8. Takajousituksen camber-kulma muutos tasajoustossa ja kiertoliikkeessä, käännettyt kiinnikkeet.

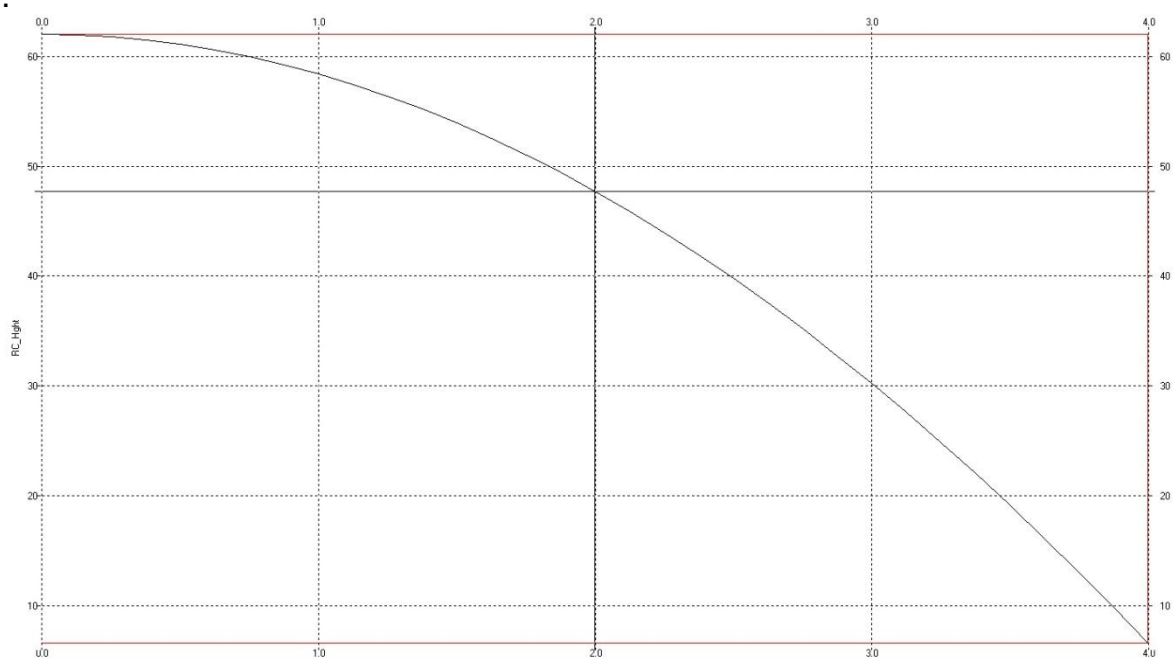
Liite 9. Takajousituksen ominaisohjaus jousto- ja kiertoliikkeessä.

Liite 10. Takarenkaiden sivuttaisliike jousto- ja kiertoliikkeessä.

## LIITE 1. Etujousituksen kallistuskeskiön asema normaali tilanteessa sekä korotetussa tilanteessa korin kierto asteen mukaan

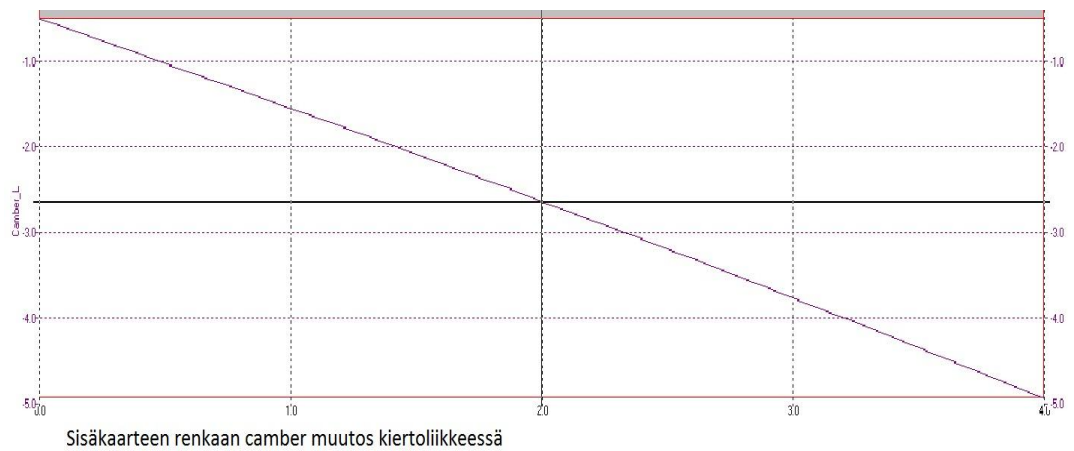
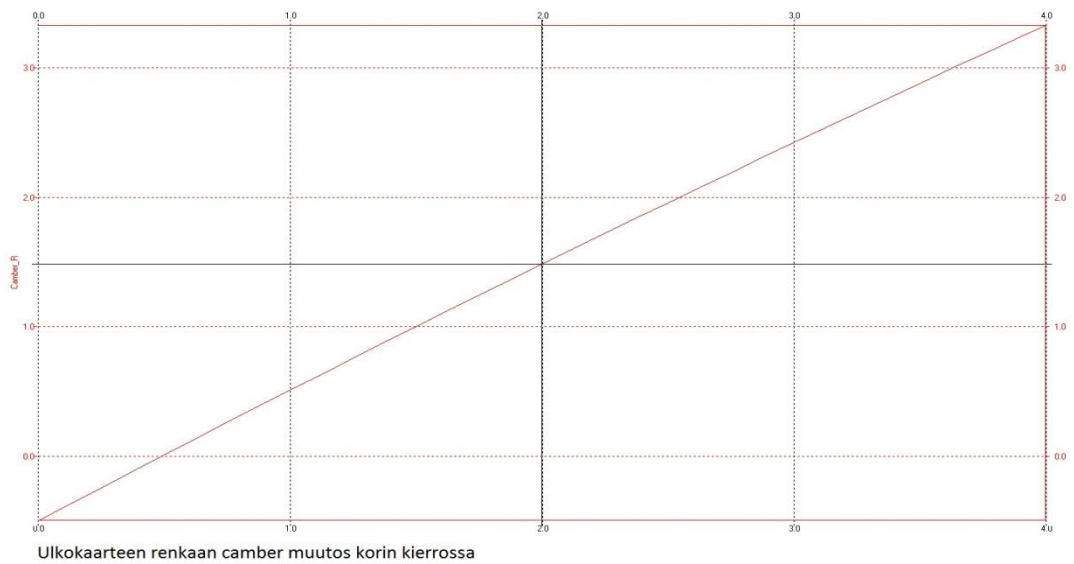
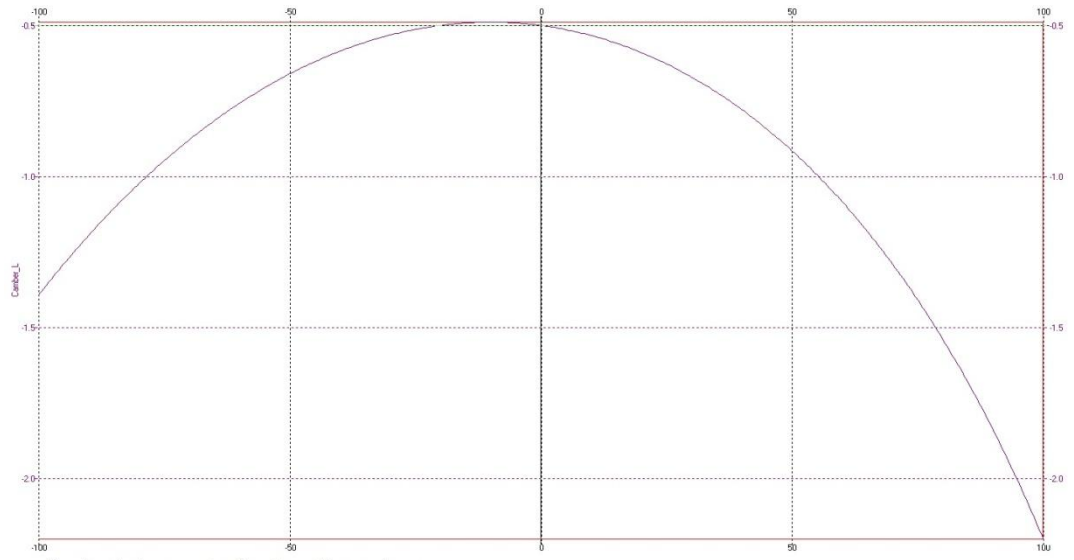


Kallistuskeskiön asema kallistuskulman mukaan normaalilla ajokorkeudella

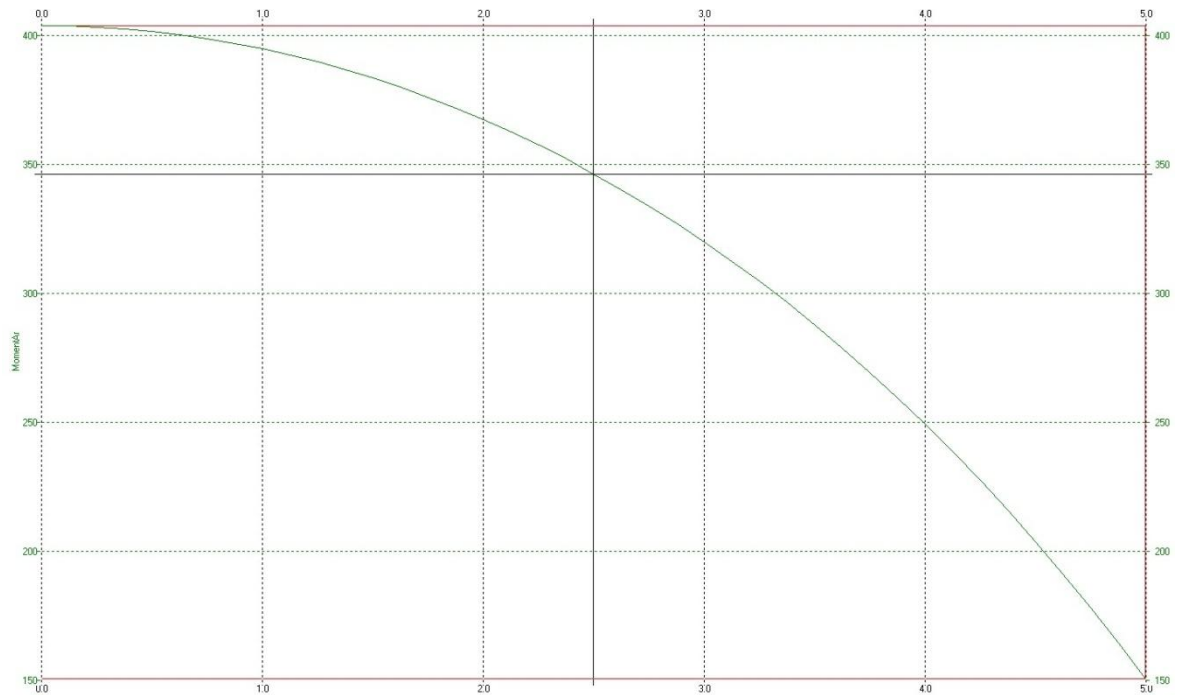


Kallistuskeskiön asema 40 millimetriä korotetussa ajokorkeudessa, kiertoasteiden mukaan

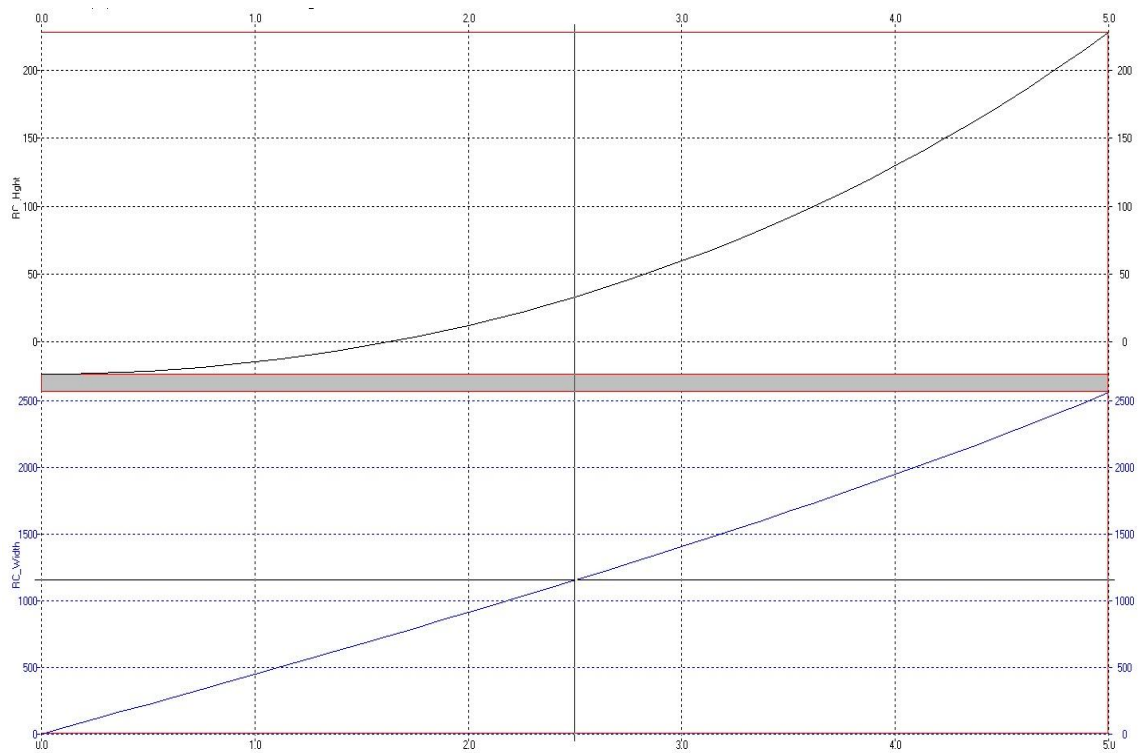
## LIITE 2. Etujousituksen camber-kulman muutos joustossa ja kiertoliikkeessä



### LIITE 3. Etujousituksen kallistuskeskiön momenttivarsi ja kallistuskeskiön sijainti

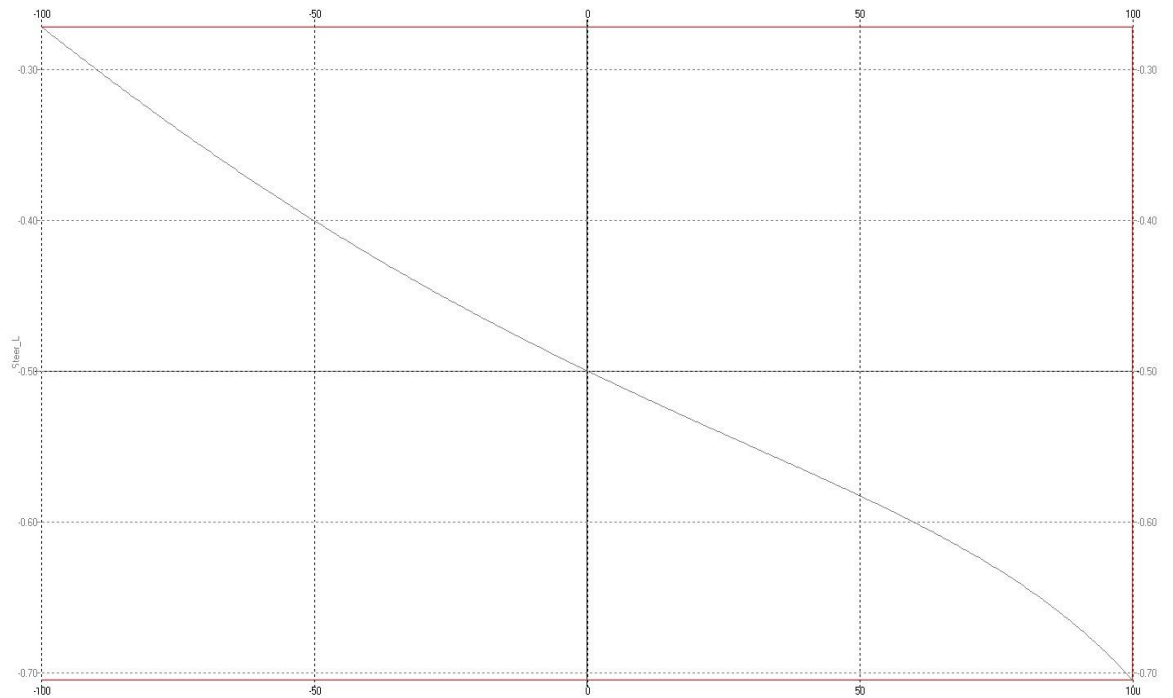


Painopisteen ja kallistuskeskiön välinen momenttivarsi, kierto liikkeen funktiona

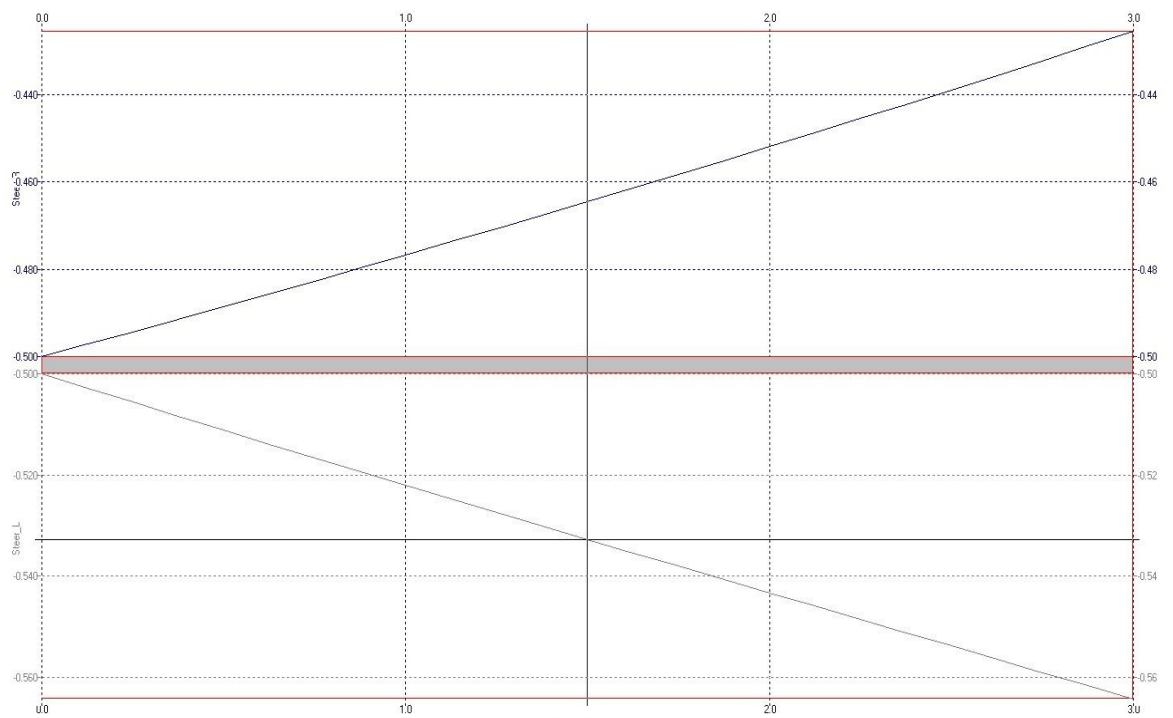


Kallistuskeskiön korkeus (ylempi) ja poikittaissuuntainen sijainti kierto liikkeen funktiona

#### LIITE 4. Etujousituksen ominaisohjaus kierto- ja joustoliikkeessä.



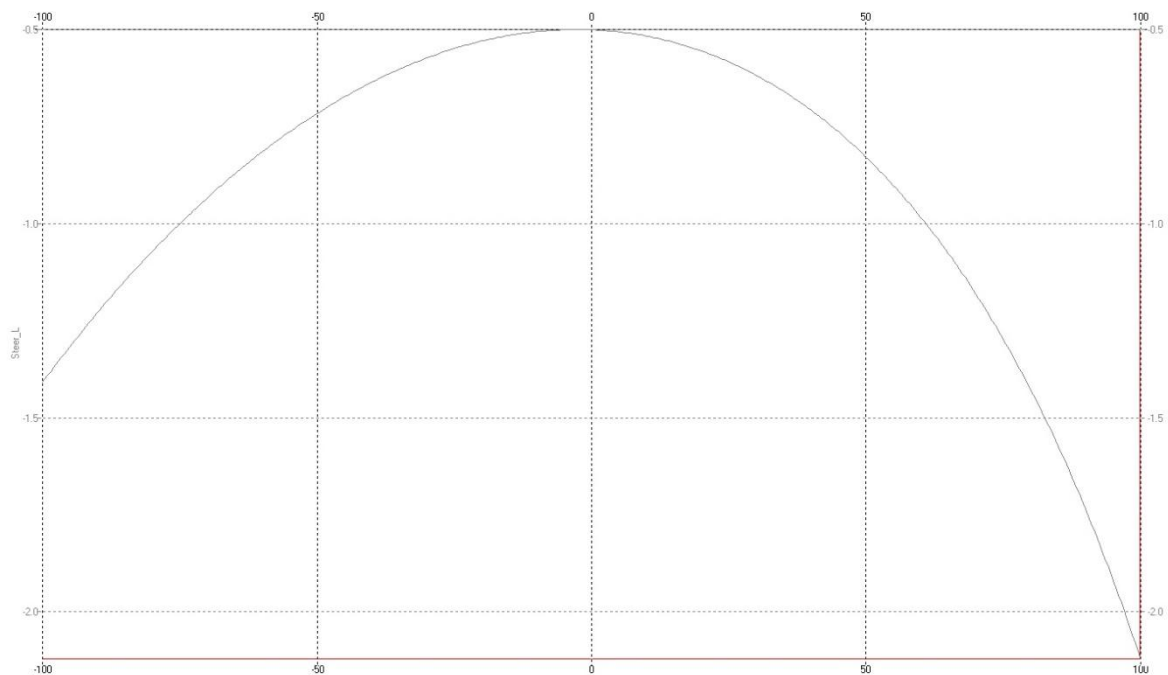
Joustossa tapahtuva ohjauksen muutos



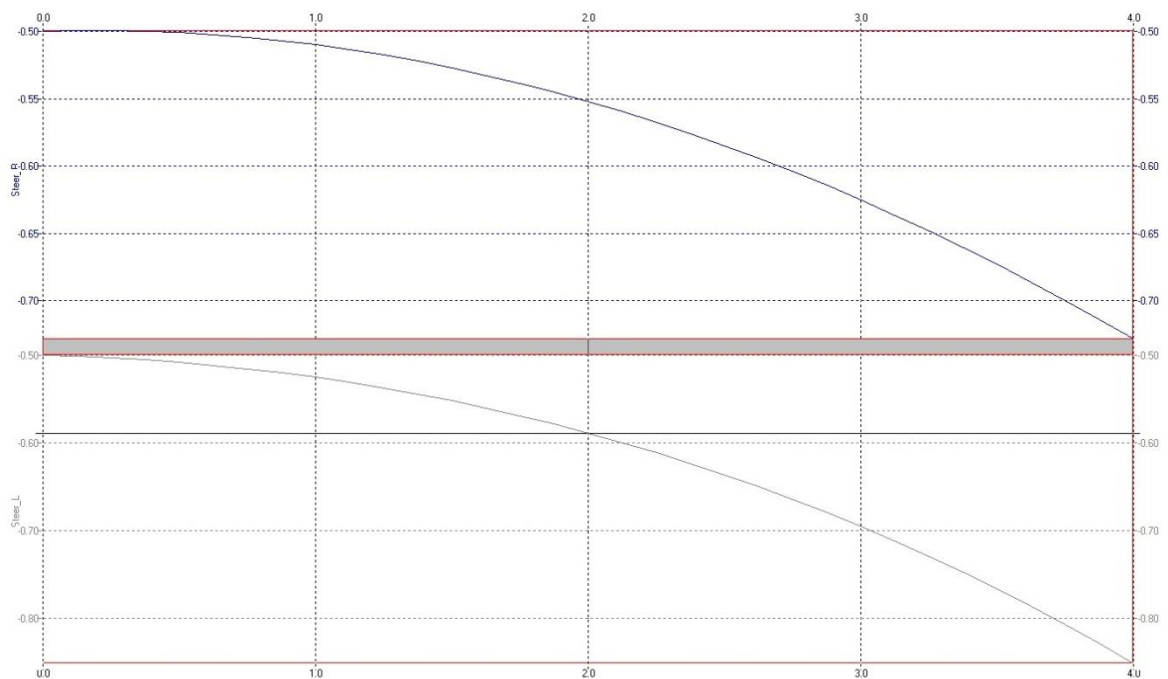
Ominaisohjaus korin kiertoliikkeessä, kiertosuunta myötäpäivään

(Ylempi = oikea rengas)

## LIITE 5. Etujousituksen ominaisohjaus kierto- ja joustoliikkeessä, ilman Ackermann ohjausta



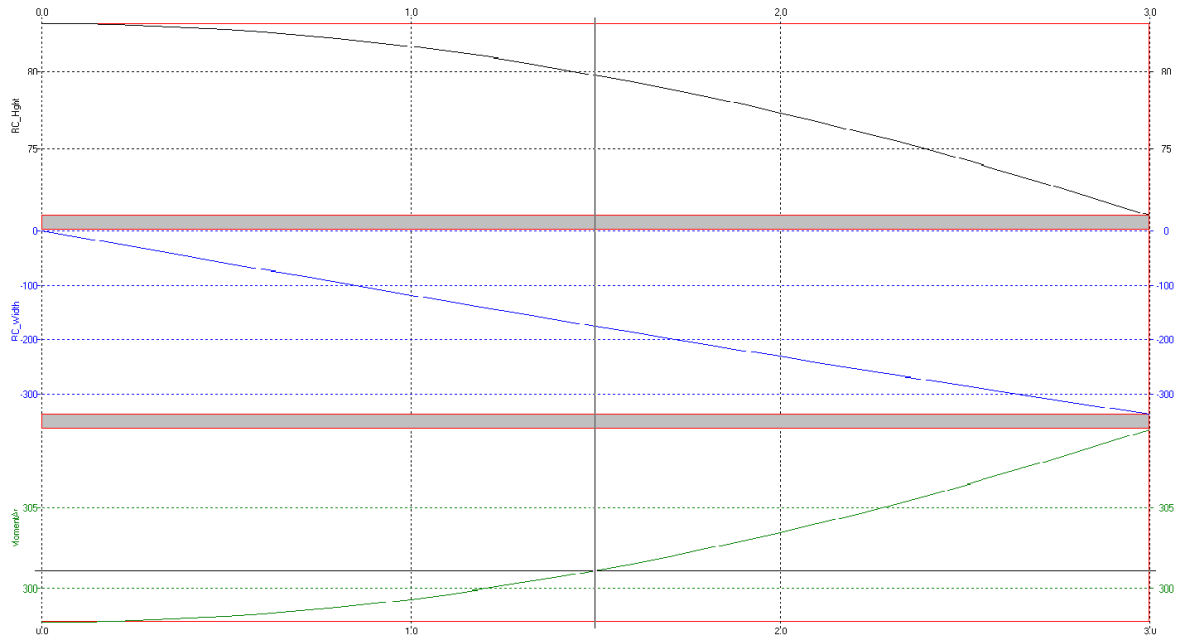
Ohjauskulman muutos joustotilanteessa, ilman Ackermann ohjausta



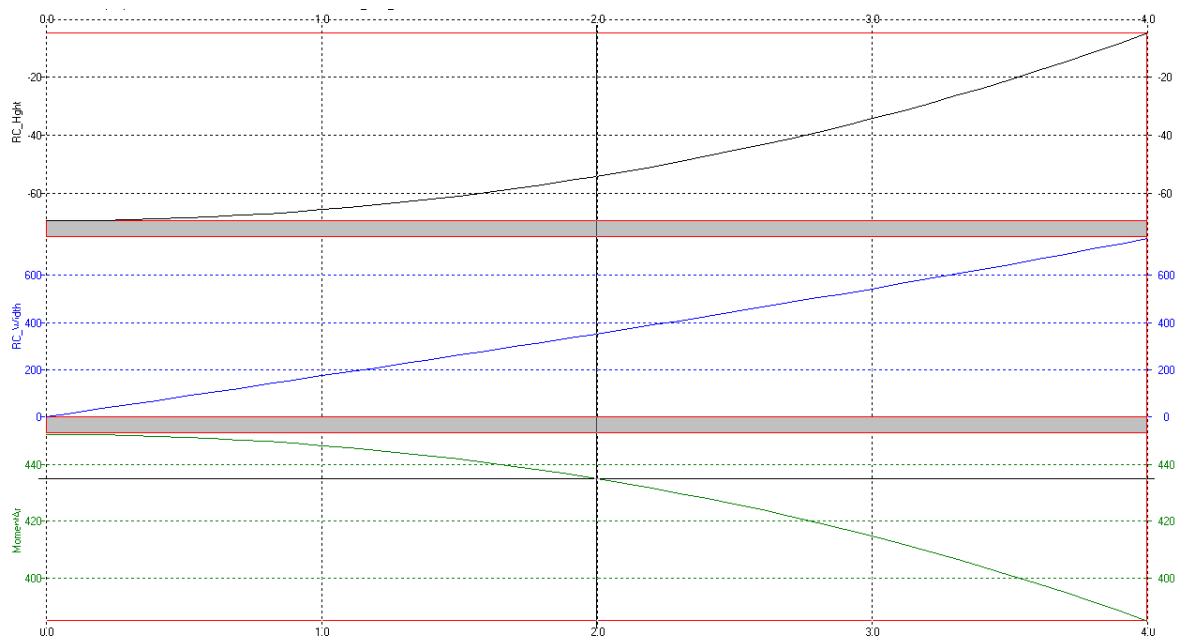
Ohjauskulman muutos kiertotilanteessa, ilman Ackermann ohjausta, myötäpäivään

(ylempi = oikea rengas)

**LIITE 6. Takajousituksen kallistuskeskiön korkeus, poikittaissuuntainen asema sekä painopisteen välinen momenttivarsi kiertoliikkeessä, normaali ja käännetty kiinnikkeet**

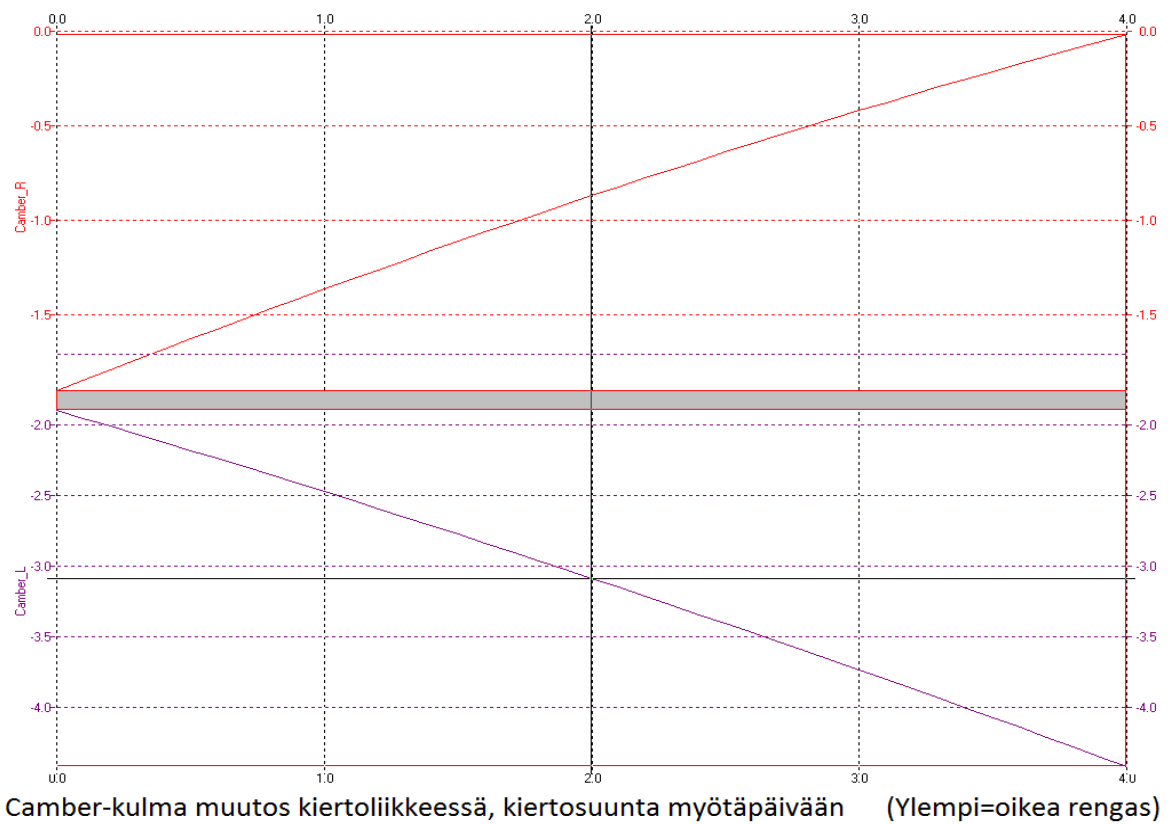
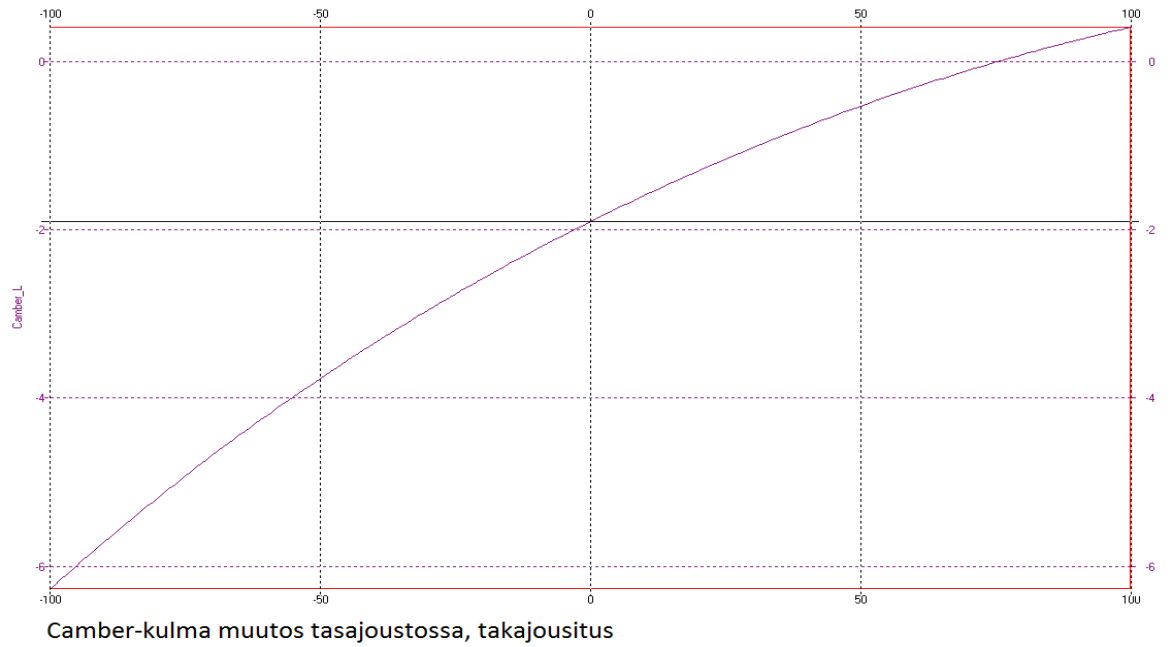


Kallistuskeskiön korkeus, poikittaissuuntainen asema sekä painopisteen välinen momenttivarsi kiertoliikkeessä.



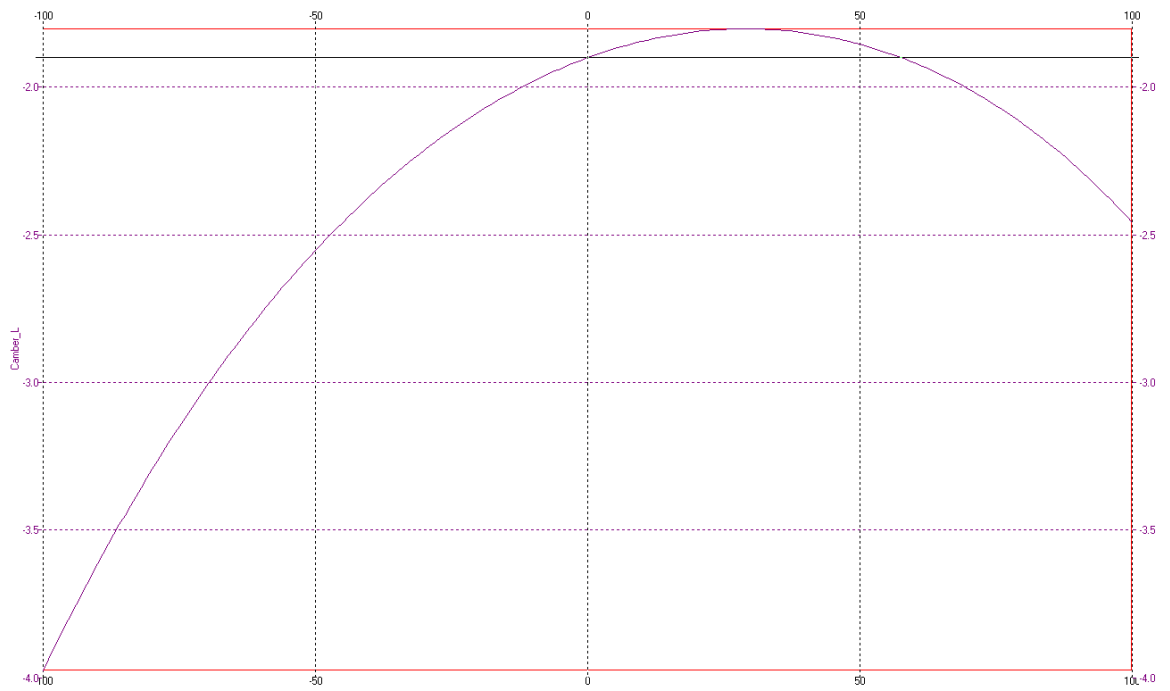
Kallistuskeskiön korkeus, poikittaissuuntainen asema ja momenttivarsi, käännettyillä kiinnikkeillä

## LIITE 7. Takajousituksen camber-kulma muutos tasajoustossa ja kiertoliik- keessä

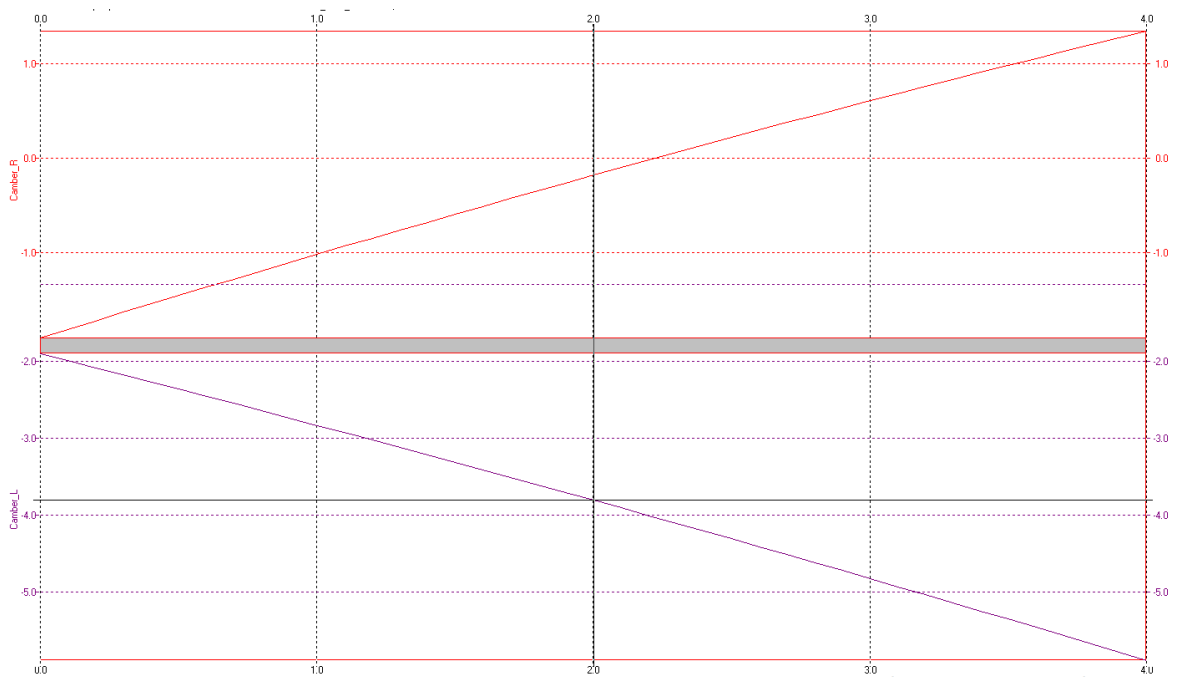




## LIITE 8. Takajousituksen camber-kulma muutos tasajoustossa ja kiertoliik- keessä, käännetyt kiinnikkeet

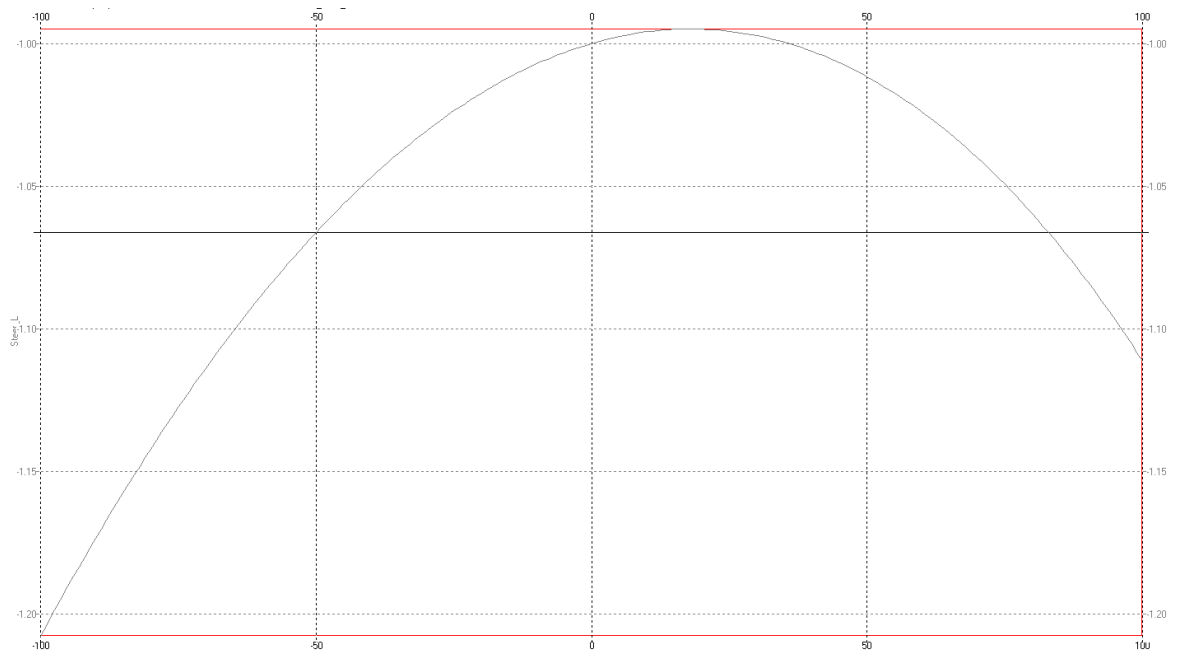


Takarenkaan camber-kulma muutos tasajoustossa, käännetyt kiinnikkeet

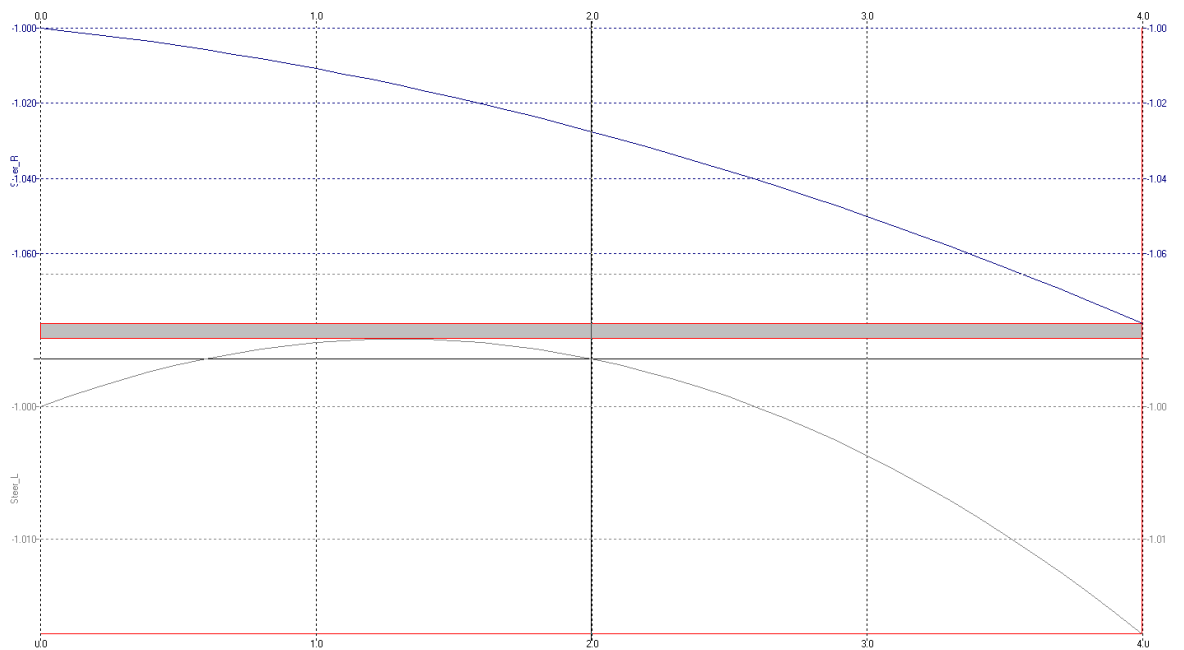


Camber-kulma muutos kiertoliikkeessä, kiertosuunta myötäpäivään, käännetyt kiinnikkeet (Ylempi=oikea rengas)

## Liite 9. Takajousituksen ominaisohjaus jousto- ja kierto- liikkeessä.



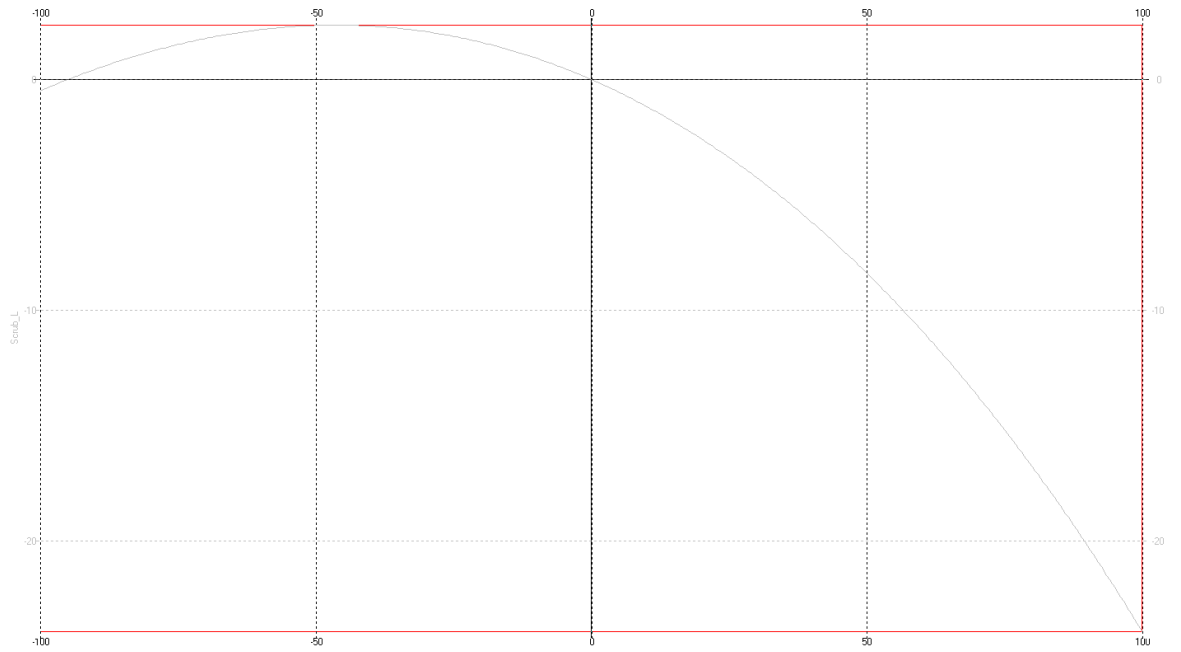
Takajousituksen ominaisohjaus tasajoustossa



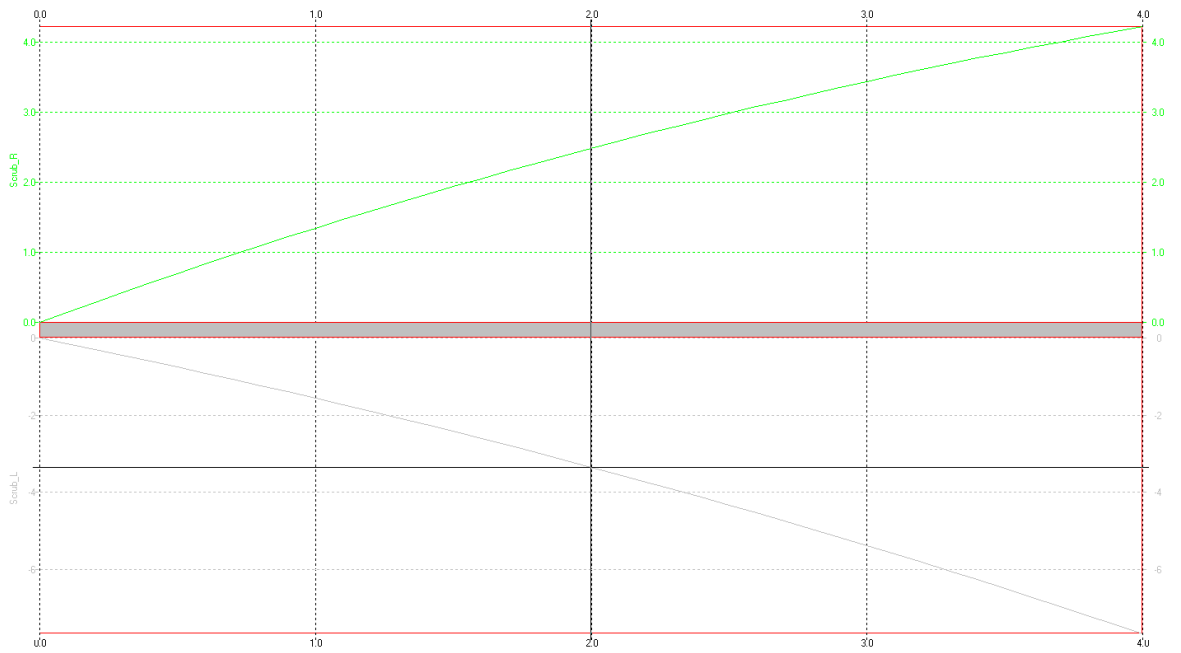
Takajousituksen ominaisohjaus kiertotilanteessa, kierto suunta myötäpäivään

(Ylempi=oikea rengas)

## Liite 10. Takarenkaiden sivuttaisliike jousto- ja kiertoliikkeessä.



Takarenkaiden sivuttaisliike tasajoustopöytä



Takarenkaiden sivuttaisliike kiertoliikkeessä, kiertosuunta myötäpäivään

(Ylempi=oikea rengas)