

Ville Lumppio

Legends kilpa-auton alustageometria

Opinnäytetyö

Kevät 2014

Tekniikan yksikkö

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Ville Lumppio

Työn nimi: Legends kilpa-auton alustageometria

Ohjaaja: Ari Saunamäki

Vuosi: 2014

Sivumäärä: 73

Liitteiden lukumäärä: 9

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Legends-luokan kilpa-auton alustageometriaa sekä sen säätömahdollisuuksia. Työn on tarkoitus antaa harrastusta aloittavalle kuljettajalle hyödyllistä tietoa alustan rakenteesta ja ominaisuuksista, joiden avulla voidaan saavuttaa kilpa-autoilun kannalta paremmat ajo-ominaisuudet.

Tutkimuksen kohteena käytettiin Ford -37 Sedan-mallista autoa, joka on yksi lukuisista luokassa käytetyistä automalleista. Legends-luokka kehitettiin Yhdysvalloissa 1990-luvun alkupuolella edulliseksi ja tasaväkiseksi kilpa-autoluokaksi. Nykyään luokka on erittäin suosittu maailmanlaajuisesti. Luokan säännöt ovat erittäin tiukat, minkä vuoksi alustaan tehtävät muutokset ja säädöt ovat monilta osin varsin rajallisia. Säännöt ja autot ovat joka puolella maailmaa samanlaisia, jolloin saatuja tuloksia voidaan hyödyntää pienin varauksin myös muualla päin maailmaa ajettaessa.

Tutkiminen suoritettiin alustan suunnitteluun tarkoitettulla WinGeo3-ohjelmalla, jolla voidaan tarkastella ja analysoida geometriaa monipuolisesti. Työn tuloksena alustan geometriasta ja ominaisuuksista saatiin kattavasti tietoa sekä löydettiin auton ajokäyttäytymisen kannalta tärkeitä sääntöjen puitteissa tehtäviä muutoksia. Työn suhteellisen laajaa teoriaosuutta voidaan hyödyntää yleisesti kaikkien autojen kohdalla. Työstä saatuja tuloksia ei päästy työn tekemisen aikana testaamaan käytännössä, mutta tämäkin toteutetaan tulevaisuudessa.

Avainsanat: jousitus, kilpa-auto, alusta

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical and Production Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Ville Lumpio

Title of thesis: Legends cars suspension geometry

Supervisor: Ari Saunamäki

Year: 2014

Number of pages: 73

Number of appendices: 9

This thesis deals with the Legends racing car suspension geometry and its adjustment possibilities. The aim of this thesis is to give useful information about the chassis and its properties to those drivers who are starting this hobby to reach a better manoeuvrability.

The subject of the research was a used Ford -37 Sedan which is just one of the numerous car models that are used in the class. The Legends class was developed in the United States in the early 1990's as a low-priced and even racing car class. Nowadays the class is very popular worldwide. The rules of the class are extremely tight and it makes the changes and adjustments quite limited in many respects that you can make to the chassis. The rules and cars are similar worldwide in which case the obtained results can be utilised with small reservations when driving in other countries.

The preliminary examining was performed with the WinGeo3 programme which is meant for planning the suspension geometry. The chassis with its features can be examined and analysed with the programme. A lot of information about the suspension geometry and properties was obtained as a result of the thesis. The relatively wide theory part of the thesis can be generally utilised by all the cars. It was not possible to test the obtained results in practice during working with the thesis but this will be carried out in the future.

Keywords: suspension, race car, chassis

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
1 JOHDANTO.....	8
2 LEGENDS-LUOKAN KILPA-AUTO.....	9
3 LEGENDSIN ALUSTARAKENTEET.....	12
3.1 Takapää.....	12
3.2 Etupää.....	14
4 PYÖRÄN ASENTOKULMAT.....	16
4.1 Camber.....	16
4.2 Caster.....	17
4.3 KPI.....	19
4.4 Aoraus ja haritus.....	20
5 AJODYNAMIIKKA JA JOUSITUSGEOMETRIA.....	22
5.1 Jousitettu ja jousittamaton massa.....	22
5.2 Painopiste.....	23
5.2.1 Painopisteen pituus- ja leveysuuntainen paikka.....	24
5.2.2 Painopisteen korkeussuuntainen paikka.....	26
5.3 Painonsiirto.....	26
5.3.1 Pitkittäinen painonsiirto.....	27
5.3.2 Poikittainen painonsiirto.....	28
5.3.3 Diagonaalinen painonsiirto.....	28
5.4 Kallistuskeskiö.....	29
5.5 Antigeometria.....	31
5.5.1 Anti-dive.....	33
5.5.2 Anti-squat.....	33
5.6 Akseli- ja raideväli.....	34
5.7 Renkaat.....	35
5.7.1 Kitkakerroin.....	36

5.7.2	Sortokulma.....	36
5.7.3	Luistosuhde.....	38
5.7.4	Pystysuuntainen kuorma.....	38
5.7.5	Camberin vaikutus renkaaseen.....	40
5.8	Jouset ja jousijäykkyys.....	41
5.9	Iskunvaimentimet	43
6	OHJAUSGEOMETRIA JA -OMINAISUUDET	45
6.1	Ackermann-ohjaus	45
6.2	Bump steer.....	47
6.3	Roll steer.....	47
7	GEOMETRIAN TUTKIMINEN	49
7.1	WinGeo3-ohjelma	49
7.2	Etupään geometria.....	50
7.3	Takapään geometria	62
7.4	Etu- ja takakallistuskeskiöt	68
8	POHDINTA	70
	LÄHTEET	72
	LIITTEET.....	73

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Positiivinen camber-kulma (Reimpell, Stoll & Betzler 2001, 177).....	17
Kuvio 2. Caster-kulma ja jättämä (Newbold & Bonnicksen 2002, 185).....	18
Kuvio 3. KPI-kulma ja kääntövierinsäde (Mauno 2002, 19).	19
Kuvio 4. Aurasikulma (Mauno 2002, 23).....	20
Kuvio 5. Painopiste ja sen pitkittäissuuntainen akseli (Smith 1978, 29).....	23
Kuvio 6. Ajoneuvon kallistusakseli (Mauno 2002, 33).....	29
Kuvio 7. Kallistuskeskiö ja hetkellinen keskipiste (Smith 1978, 30).....	31
Kuvio 8. Anti-squat ja anti-dive ominaisuudet toteutettu yhdensuuntaisilla tukivarsilla (Smith 1978, 35).....	32
Kuvio 9. 100 % anti-squat ja anti-dive ominaisuudet (Smith 1978, 35).	33
Kuvio 10. Kumin ja tienpinnan välinen kosketus eri kuormilla (Tuononen & Koisaari 2010, 8).....	35
Kuvio 11. Kumin hystereesin aiheuttama pitkittäisvoima karkealla tienpinnalla (Tuononen & Koisaari 2010, 7).	36
Kuvio 12. Esimerkki luistosuhteen vaikutuksesta renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 17).....	38
Kuvio 13. Pystysuuntaisen kuorman vaikutus renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 17).....	39
Kuvio 14. Renkaan tuottaman tukivoiman muutos pystysuuntaisen kuorman vaikutuksesta (Smith 1978, 18).....	39
Kuvio 15. Camber-kulman vaikutus renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 18)...	41
Kuvio 16. Ackermann-ohjauksen periaate (Mauno 2002, 79).	45
Kuvio 17. 100 % Ackermann-ominaisuus (Rowley 2011, 7/20).	46
Kuvio 18. Camber-kulman muuttuminen ajokorkeuden muuttuessa.....	50
Kuvio 19. Camber-kulman muuttuminen korin kallistuessa.....	51
Kuvio 20. Ulkokaarten renkaan camber-kulman muuttuminen korin kallistuessa ja 1/2" holkin ollessa kiinnitettynä.	52
Kuvio 21. Kuormitetun renkaan caster-kulma korin kallistuessa.	54
Kuvio 22. Sisäkaarten renkaan caster-kulma korin kallistuessa.....	54
Kuvio 23. Caster-kulman muuttuminen ajokorkeuden muuttuessa.	55
Kuvio 24. Yhden renkaan sivuttainen siirtymä sisäänjouston vaikutuksesta.....	56

Kuvio 25. Kuormitetun renkaan sivuttainen siirtymä korin kallistuessa.	57
Kuvio 26. Ominaisohjaus tasajoustolla.	58
Kuvio 27. Ominaisohjaus korin kallistuessa.	58
Kuvio 28. Ominaisohjaus joustossa.	59
Kuvio 29. Renkaiden ohjauskulmat ohjauspyörän kääntämisen funktiona.....	60
Kuvio 30. Kallistuskeskiön korkeus korin kallistuessa.	62
Kuvio 31. Taka-akselin ominaisohjaus joustossa.....	63
Kuvio 32. Taka-akselin ominaisohjaus korin kallistuessa.....	63
Kuvio 33. Eri holkkien vaikutukset taka-akselin ominaisohjaukseen korin kallistuessa.	64
Kuvio 34. Ajokorkeuden vaikutus takapään kallistuskeskiön korkeuteen.....	66
Kuvio 35. Takapään kallistuskeskiön korkeus korin kallistuessa.....	67
Kuvio 36. Ajokorkeuden vaikutus anti-squat-ominaisuuden suuruuteen.	68
Kuvio 37. Etu- ja takapään momenttivarsien erot korin kallistuessa.	69
Kuvio 38. Kallistuskeskiön leveyssuuntainen liike korin kallistuessa.....	69

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Legends-luokan kilpa-auton alustan geometriaa sekä luokan sääntöjen puitteissa alustan säätöihin tehtävien muutosten vaikutuksia. Tutkiminen suoritetaan alustan suunnitteluun ja tutkimiseen tarkoitettulla WinGeo3-ohjelmalla. Tutkimuksesta saatavia tuloksia tullaan hyödyntämään testaamisen ja kilpailujen yhteydessä haettaessa autolle parempia ajo-ominaisuuksia.

Opinnäytetyön aihe syntyi ja tuli ajankohtaiseksi, kun eräs tuttava kiinnostui kyseisestä lajista ja hankki luokan kilpa-auton. Lajin parissa aloitteleva henkilö antaa alustan säätämisen tiedoissa ja taidoissa paljon tasoitusta jo useamman vuoden luokkaa ajaneille vastustajille. Tavallisesti aloittelijan täytyy käyttää paljon aikaa ja rahaa auton testaamiseen, jotta auto tulee tutuksi ja mieleiset alustansäädöt löytyvät. Tämän työn avulla onkin tarkoitus saada hyödyllistä tietoa alustan geometriasta, jotka helpottavat auton säätämistä sekä auttavat ymmärtämään sääntöjen vaikutuksia auton ajo-ominaisuuksiin. Tutkimuksesta saatavat tulokset antavat aloittelevalle kuljettajalle paremmat mahdollisuudet päästä helpommin ja nopeammin mukaan lajiin sisälle. Työn tulokset eivät tietenkään korvaa perinteistä auton testaamista, mutta ne antavat tukea ja paremmat valmiudet sopivien sääntöjen etsimiseen.

Työssä käsitellään myös ajodynamiikan ja jousitusgeometrian teoriaa yleisellä tasolla. Alustan eri tuentatyyppisiä ja niiden ominaisuuksia käydään läpi, mutta vain niiltä osin, joita Legendseissä on käytetty. Tietolähteinä käytetään auton alustaan keskittyvää kirjallisuutta, joissa käsitellään aihetta yleisesti, mutta myös kilpa-autoilun kannalta.

2 LEGENDS-LUOKAN KILPA-AUTO

Legends on putkirunkoinen auto, jonka kori on lasikuitua. Moottoreina käytetään Yamahan joko 1200 cm³ tai 1300 cm³ moottoripyörän moottoria, jotka tuottavat noin 130 hevosvoimaa. Vaihteisto on 5-nopeuksinen jaksottainen vaihteisto, niin ikään moottoripyörästä. (Legends Cars Finland 2011.) Vaikka Legendsejä on koirimalliltaan useita erilaisia, ne ovat tekniikaltaan kuitenkin identtisiä. Tämän ansiosta kilpailut ovat erittäin tasaväkisiä ja kymmenen nopeinta kuljettajaa voi olla lopputuloksissa vain muutaman sekunnin sisällä toisistaan. Opinnäytetyön tutkimuksen kohteena käytetty auto on malliltaan Ford -37 Sedan.

Legends kilpa-autot kehitettiin Yhdysvalloissa vuonna 1992. Tavoitteena oli luoda tekniikaltaan niin yksinkertainen ja edullinen kilpa-auto, että kaikilla ihmisillä olisi mahdollisuus hankkia sellainen. Autojen ulkomuoto suunniteltiin jäljittelemään tarkasti 1930- ja 1940-luvun NASCAR-autoja, mutta 5/8-mittakaavassa alkuperäisiin autoihin verrattuna. Autot ovat Ford, Chevrolet ja Dodge-merkkisiä, joita saa sekä coupe että sedan mallisina. Kaiken kaikkiaan eri Legends-malleja on valmistettu kymmentä erilaista. Legendsit ovat olleet erittäin suosittuja alusta alkaen ja nykyään niillä ajetaan kilpaa ympäri maailmaa, kilpailijoiden määrän kasvaessa koko ajan. (U.S. Legend Cars 2012.)

Yhdysvalloissa Legendsien kattojärjestönä toimii INEX. Se perustettiin vuonna 1995 markkinoimaan ja järjestämään Legends-kilpailuja. Samalla INEX vastaa luokan säännöistä, jotka ovat pohjana myös muualla maailmassa ajettaville Legends-luokille. Yhdysvalloissa kilpaillaan neljässä eri luokassa, Pro, Semi-Pro, Masters ja Young Lions. Pro-luokka on tarkoitettu kokeneille ja hyvin menestyneille kuljettajille, kun taas aloittelevat kuljettajat kilpailevat Semi-Pro-luokassa. Masters-luokassa ajavien kuljettajien täytyy olla iältään vähintään 40-vuotiaita. Vuonna 2009 mukaan tuli Young Lions -luokka, joka tarkoitettu nuorille, iältään 12–16-vuotiaille kuljettajille. Samoissa luokissa ajetaan myös INEX-maailmanmestaruudesta (INEX World Road Course Series). Jokainen kuljettaja voi ajaa INEX-pisteistä oman kotimaansa sarjassa, jolloin sieltä saadut pisteet ovat samalla INEX-pisteitä. Maailmanmestaruuden voittamiseksi on kuitenkin osal-

listuttava Yhdysvalloissa järjestettävään Legendsien maailman finaaliin (Road Course World Finals Championship Race). (U.S. Legend Cars 2012.)

Suomessa Legendseillä on ajettu kilpaa vuodesta 1999 lähtien, jolloin Legends Trophy kulki silloisen rata-autoilun SM-sarjan mukana. Tämän jälkeen Legendsien suosio on noussut vuosi vuodelta suuremmaksi ja kilpailuissa on usein lähes neljäkymmentä kuljettajaa. Legends Trophy onkin noussut Suomen suurimmaksi rata-autosarjaksi. Trophyn osakilpailut ajetaan nykyään rata-ajon SM-sarja FINRacen yhteydessä. Legends Trophy-luokan sisällä kilpaillaan lisäksi vielä jo edellä mainituissa Pro-, Semi-Pro- ja Masters-luokissa. Legends-autojen monikäyttöisyyttä lisää se, että talvisin niillä voidaan kilpailla jääradalla sekä kesäisin Trophyn lisäksi asvaltilla ajettavissa rallisprinteissä. Suomessa Legendsien kansallisena katojärjestönä toimii Legends Cars Finland ry, joka on toiminnaltaan vastaavanlainen kuin INEX. (Hot Cars 2011; Legends Cars Finland 2011.)

Legends Trophyn säännöt perustuvat U.S. Legend Cars/INEX sääntöihin. Säännöt määräävät tarkasti, mitä muutoksia autoihin on sallittua tehdä. Alustan rakenteellisia muutoksia ei juurikaan sallita, vaan sallitut muutokset rajoittuvat lähinnä pyörien asentokulmien ja ohjausgeometrian säätämiseen. Säännöt eivät myöskään salli minkäänlaisten omavalmisteosien käyttöä. Kaikkien autossa olevien osien tulee olla INEX-hyväksytyjä. Tällä varmistetaan, että kaikki autot ovat tekniikaltaan identtisiä. Suomessa sääntöihin on tehty joitain kansallisia lisäyksiä, jotka eivät välttämättä ole hyväksytyjä ulkomailla kilpailtaessa. Nämä lisäykset on tehty lähinnä turvallisuusasioihin sekä talvikilpailuja varten. (Legends Trophy sääntökirja 2013.)

Legends Trophy sääntökirja 2013 määrittää alustaa ja runkoa koskevat tärkeimmät säännöt seuraavasti:

a. **TUKIVARSIEN KIINNITYSPISTEET:** Kiinnityspisteiden muuttaminen tai siirtäminen on kielletty. Maksimissaan $\frac{3}{4}$ " välilevyt ovat sallittuja niissä paikoissa, joissa U.S. Legend Cars on välilevyjä käyttänyt (ainoastaan $\frac{1}{2}$ " pulteissa).

b. **YLÄTUKIVARRET:** Ylätukivarret tulee säilyttää mitoiltaan (pituus 4.25"), metallivahvuudeltaan sekä sijainniltaan alkuperäisinä eikä niitä saa vahvistaa millään tavoin. Mittojen toleranssi on +/- $\frac{1}{8}$ " (0.125").

c. **ALATUKIVARRET:** Alatukivarret tulee säilyttää mitoiltaan (12.5" x 16.25"), metallivahvuudeltaan sekä sijainniltaan alkuperäisinä eikä niitä saa muuttaa millään tavoin. Mittojen toleranssi on +/- 1/8" (0.125").

d. **TUKIVARRET JA PANHARD-TANKO:** Tukivarret sekä panhard-tanko on oltava vakioita, U.S. Legend Cars:in toimittamia (tukivarret - joko 6.5", 11.0" tai 12.0" pituudeltaan / panhard-tanko - 23.5" pituudeltaan). Kaikissa mitoissa on +/- 1/8" (0.125") toleranssi. Teräksiset tukivarret tai panhard-tanko ovat kiellettyjä. Kaikki 11" ja 12" tangot saa vaihtaa keskenään, akselivälit ym. mitat pysyttävä kuitenkin sääntökirjan mukaisesti.

e. **RAIDETANGOT:** Raidetangot on oltava vakioita, U.S. Legend Cars:in toimittamia pituudeltaan 11.0" tai 12.0" (+/- 1/8" (0.125") toleranssi) ja tulee säilyttää sijainniltaan alkuperäisinä eikä niitä saa vahvistaa. Vahvemmat raidetangonpäät ovat sallittuja.

f. **MAAVARA:** Minimi maavara on 89mm (3 1/2") mitattuna runkopalkista (ei hitsaussaumasta) maahan ilman kuljettajaa. (Legends Trophy sääntökirja 2013.)

Välilevyillä voidaan muuttaa hieman tukivarsien asentoa, jolla saadaan vaikutettua renkaiden asentokulmiin. Välilevyjä on saatavilla kolmea eri leveyttä 1/4", 1/2" ja 3/4". Vain yhtä välilevyä on sallittua käyttää kerrallaan (Legends Trophy sääntökirja 2013.).

3 LEGENDSIN ALUSTARAKENTEET

Tässä osiossa käsitellään ajoneuvojen alustarakenteita ja niiden ominaisuuksia niiltä osin, joita Legendsissä on käytössä. Rakenteiden käsittelyn yhteydessä esille tulevia pyörän asentokulmiin, ajodynamiikkaan ja jousitusgeometriaan liittyviä käsitteitä käsitellään työn myöhemmässä vaiheessa omina osa-alueina.

Legendsien etupään alustarakenne koostuu erillisjousituksesta, joka on toteutettu kahdella päällekkäisellä kolmiotukivarrella. Vetävä taka-akseli on jäykkä ja tuettu kolmella pitkittäisellä tukivarrella. Poikittaissuunnassa taka-akseli on tuettu Panhard-tangolla. Iskunvaimentimina käytetään sekä etu- että takapäässä samanlaisia Bilstein-merkkisiä kynäiskunvaimentimia, joihin on sallittua vaihtaa jäykkyydeltään erilaisia kierrejousia (Legends Trophy sääntökirja 2013.).

3.1 Takapää

Kilpa-autoilun kannalta jäykällä vetävällä taka-akselilla on sekä hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Hyvinä ominaisuuksina voidaan pitää halpaa ja yksikertaista rakennetta. Jäykällä akselilla ei myöskään tapahdu jouston ja kallistelun aikana muutoksia camber-kulmassa, joka on hyvä ominaisuus kilpa-autoilussa. Tämä tulee esille erityisesti kiihdytyksissä sekä kaarreajossa, jolloin renkaat pysyvät suorassa antaen hyvän pidon. Jäykän akselin huonoihin ominaisuuksiin kuuluu suuri tilantarve korkeussuunnassa joustoliikkeiden aikana sekä raskas rakenne, jonka vuoksi myös jousittamaton massa on suuri. Jäykän rakenteen vuoksi toiseen renkaaseen muodostuvat voimat siirtyvät myös toiselle renkaalle. Tämä yhdistettynä akselin suureen massaansa saa aikaan renkaiden pomppimista epätasaisella tienpinnalla. Kaarteissa tapahtuvan kallistelun vuoksi jäykkä akseli pyrkii kääntymään vinoon aiheuttaen itseohjautuvuutta. Itseohjautuvuuden määrään ja suuntaan voidaan kuitenkin vaikuttaa muuttamalla akselin tuentageometriaa. (Reimpell, Stoll & Betzler 2001, 22–27; Smith 1978, 155.)

Kolmilinkki. Kolmilinkkituennan rakenne koostuu kolmesta auton pituussuuntaisesta tangosta, joista kaksi on akselin alapuolella ja yksi yläpuolella. Pääasiassa tangot ottavat vastaan vain pituussuuntaisia voimia, mutta rakenne voidaan toteut-

taa myös siten, että alemmat linkit ottavat vastaan myös osan sivuttaisvoimista. Mitä suuremmissa kulmissa alemmat linkit ovat auton pituusakseliin nähden, sitä enemmän ne ottavat vastaan sivuttaisvoimia. Rakenne vaatii kuitenkin aina myös erillisen poikittaistuennan, jolla saadaan estettyä akselin liikkuminen sivusuunnassa. Rakenne sallii akselilla suuret pystysuuntaiset liikkeet, jonka vuoksi rakennetta käytetään usein Offroad-autoissa. (Rowley 2011, 8/2–6.)

Alempien linkkien tärkeimpiin tehtäviin kuuluu myös toimia kiihdytyksistä ja jarrutuksista aiheutuvien painonsiirtojen välittäjänä korin ja renkaiden välillä. Niiden asentojen kautta määrittyy jäykän akselin taipumus aiheuttaa joko ali- tai yliohjautumista. Sekä ylä- että alalinkkien pituus määrää puolestaan itseohjautuvuuden voimakkuuden. Mitä pidemmät linkit ovat, sitä vähemmän taipumusta itseohjautuvuuteen. (Rowley 2011, 8/2–3.)

Ylemmän linkin tärkeimpinä tehtävinä on estää akselin pyörähtäminen pituusakselin suunnassa sekä hallita taka-akselin kääntymistä ja kiertymistä, joita syntyy kun moottorin tuottama vääntömomentti välittyy taka-akselille. Ylemmän linkin leveys-suuntaisella paikalla on suuri merkitys takarenkaiden välisiin kuormituseroihin ja jousitetun massan kallistumiseen kiihdytyksen aikana. Erisuurilla takarenkaiden kuormituksilla renkailla välittyy eri määrä voimaa kiihdytyksen aikana. Tällä on akselia kääntävä vaikutus, joka aiheuttaa autolle epävakaan käytöksen kiihdytyksessä. Auto pyrkii kääntymään suuremman kuormituksen suuntaan. (Rowley 2011, 8/2–5.)

Panhard-tanko. Panhard-tangon avulla saadaan erittäin yksinkertainen ja kevyt rakenne taka-akselin tukemiseksi poikittaissuunnassa. Rakenne koostuu yhdestä tangosta, joka on kiinnitetty toisesta päästä akseliin ja toisesta auton runkoon. Rakenne ei kuitenkaan poista kokonaan akselin poikittaisliikettä. Akselin kallistuessa, akselinpuoleinen tangonpää liikkuu kaareissa, jonka säde on Panhard-tangon pituus. Mitä pienempi kaarteiden säde on, sitä enemmän akseli liikkuu poikittaissuunnassa. (Smith 1978, 155–156.)

Panhard-tangon rakenne mahdollistaa matalan kallistuskeskiön paikan. Korkeus määräytyy tangon korkeuden ja asennuskulman perusteella. Jotta kallistuskeskiön korkeus pysyisi mahdollisimman muuttumattomana kallistelun aikana, tanko tulee

asentaa mahdollisimman vaakasuoraan. Panhard-tangon epäsymmetrinen asennus auton pituusakseliin nähden aiheuttaa ikäviä kallistuskeskiön korkeuden muutoksia. Muutosten harmillisuutta lisää se, että muutokset eivät ole samanlaisia erisuuntiin käännettäessä. Panhard-tangon kiinnityksellä voidaan vaikuttaa myös takapään painonsiirto-ominaisuuksiin. Mikäli tanko on kiinnitetty oikeasta päästä runkoon ja vasemmasta akseliin, kallistuskeskiö nousee oikealle käännettäessä, jolloin myös suurin osa painosta siirtyy vasemmalle renkaalle. Tilanne on päinvastainen, kun tanko asennetaan toisinpäin. (Smith 1978, 156.)

3.2 Etupää

Kahdella päällekkäisellä kolmiotukivarrella toteutettu etupään tuenta on erittäin yleinen kilpa-autoissa, koska se antaa suunnittelijoille rajattomat mahdollisuudet jousitusgeometrian toteuttamiseksi. Myös rakenteen keveys, suuret joustovarot sekä hyvä camber-kulmien hallinta ovat eduksi kilpa-autoilussa. (Smith 1978, 43.)

Samansuuntaiset ja -pituiset tukivarret. Tällaisella rakenteella ei tapahdu camber-kulman muutoksia pelkän sisään- tai ulosjouston aikana. Tilanne kuitenkin muuttuu korin kallistuessa, jolloin renkaiden camber-kulmat muuttuvat asteissa saman verran kuin kori kallistuu. Sisäkaarten puoleisen renkaan camberin muuttuessa negatiiviseen ja ulkokaarten puoleisen positiiviseen suuntaan. Ulomman renkaan pidon kannalta tämä on huono asia. Rakenteesta johtuen, jouston ja kallistelun aikana tapahtuu haitallisia muutoksia raideleveydessä. Tätä ominaisuutta voidaan hieman vähentää käyttämällä pidempiä tukivarsia. Samalla myös camber-kulman muutoksia saadaan hieman pienemmiksi. Tukivarsien samansuuntaisuudesta johtuen niiden jatkeiden hetkellinen keskipiste sijaitsee kaikissa tilanteissa äärettömyydessä. Tällöin maanpinnan kanssa samansuuntaisilla tukivarsilla kallistuskeskiö sijaitsee lähellä tienpintaa, jonka läheisyydessä se myös pysyy joustosta ja kallistelusta huolimatta. (Smith 1978, 47.)

Samansuuntaiset, eripituiset tukivarret. Ylemmän tukivarren ollessa alatukivartta lyhyempi, joustosta ja kallistelusta aiheutuvaa raidevälin muutosta ei juurikaan tapahdu. Eripituisuudesta johtuen, ylempi tukivarsi liikkuu pienemmällä kaarella, jolloin renkaat pyrkivät kääntymään negatiivisen camberin suuntaan. Tämän vuok-

si ulomman renkaan camber-arvo on vähemmän positiivinen korin kallistuessa. Samalla kuitenkin sisemmän renkaan camber muuttuu negatiivisempaan suuntaan. Mitä lyhyempi ylätukivarsi on suhteessa alatukivarteen, sitä suurempia camber-muutokset ovat. Tukivarret pysyvät kallistuksissa melkein samansuuntaisina pituuseroista huolimatta. Pelkän jouston aikana näin ei kuitenkaan tapahdu. Tämän vuoksi suurilla joustoliikkeillä camber-kulma kasvaa jyrkästi. Tällä rakenteella kallistuskeskiö pysyy edellisen tapaan lähellä maanpintaa. Jouston aikana myös kallistuskeskiön ja painopisteen etäisyys pysyy lähes vakiona, jolloin painonsiirto tapahtuu rauhallisesti ja tasaisesti. (Smith 1978, 47–54.)

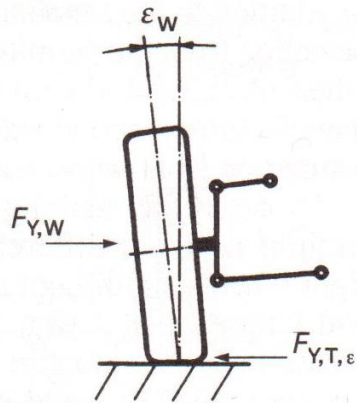
Erisuuntaiset ja -pituiset tukivarret. Tällä rakenteella saadaan hyvät camber-kulman muutokset korin kallistuessa. Etenkin ulomman renkaan kääntyminen positiivisen camberin puolelle saadaan estettyä. Rakenne sallii staattisessa tilanteessa kallistuskeskiön paikan määrittämisen haluttuun kohtaan. Camber-kulman muutosnopeuteen voidaan vaikuttaa ylätukivarren kulmalla. Mitä enemmän tukivarsi on kallellaan auton keskilinjaa kohti, sitä jyrkemmin camber-kulma muuttuu. (Smith 1978, 54.)

4 PYÖRÄN ASENTOKULMAT

Pyörän asentokulmilla voidaan vaikuttaa suuresti ajoneuvon ajo-ominaisuuksiin. Asentokulmien avulla ajoneuvon ohjaukseen käyttäytyminen, suuntavakaus ja pito-ominaisuudet saadaan halutuiksi. Vääränlaisilla asentokulmilla ajoneuvon käyttäytymisestä voi tulla levoton ja arvaamaton. Yhden asentokulman muuttaminen vaikuttaa yleensä myös muihin asentokulmiin. Asentokulmien muuttuminen on otettava huomioon myös ajoneuvon ajokorkeuden muuttuessa, joten kaikkiin alustan säätöihin tehtävien muutosten vaikutuksiin on syytä perehtyä.

4.1 Camber

Camber-kulmalla tarkoitetaan renkaan sivuttaiskallistumaa. Edestä tai takaa katsottuna camber-kulma muodostuu renkaan keskiviivan ja pystysuoran välille. Camber-kulma on negatiivinen, kun samalla akselilla olevien renkaiden yläreunat ovat lähempänä toisiaan kuin alareunat. Positiivisella camber-kulmalla tilanne on päinvastainen (kuvio 1). Camber-kulmalla on suuri merkitys sivuttaispitoon, jonka vuoksi erityisesti kilpa-autoilussa ollaan kiinnostuneita renkaan kulmasta tiehen nähden dynaamisessa tilanteessa. Parhaan sivuttaispidon saamiseksi staattinen camber joudutaan usein asettamaan huomattavan negatiiviseksi, koska kaarteissa ulomman renkaan camberilla on taipumus muuttua positiivisempaan suuntaan korin kallistumisesta johtuen. Korin kallistelua vähentämällä voidaan vaikuttaa staattisen camberin suuruuteen. Vähäisellä korin kallistelulla voidaan käyttää vähemmän negatiivisia staattisen camberin arvoja. Jousitusgeometrialla on myös suuri merkitys eri ajotilanteista johtuvien joustoliikkeiden aiheuttamiin cambermuutoksiin. (Mauno 2002, 6–11.)



Kuvio 1. Positiivinen camber-kulma (Reimpell, Stoll & Betzler 2001, 177).

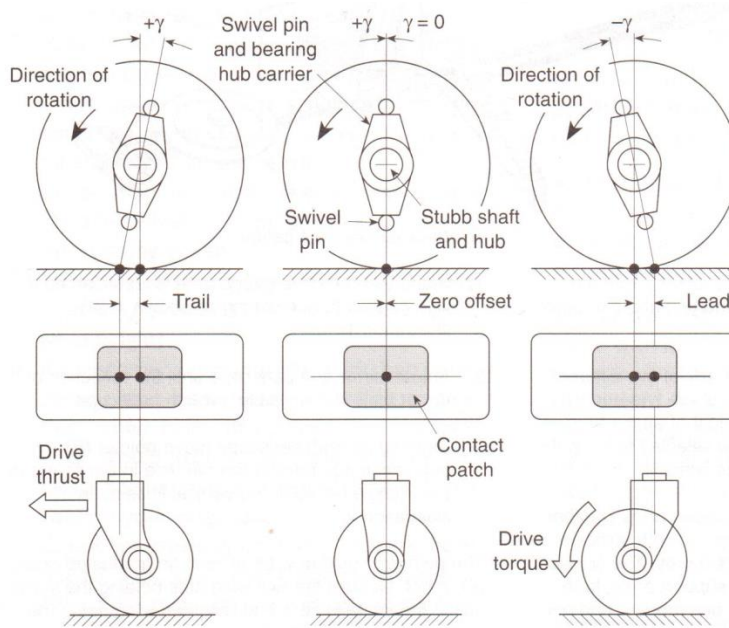
Tavallisissa henkilöautoissa camber-kulma on yleensä hyvin lähellä 0° , kun auto on hieman kuormattu. Tällä saadaan renkaat kulumaan tasaisesti. Negatiivisella camber-kulmalla rengas kuluu voimakkaammin sisäreunasta, positiivisella taas ulkoreunalta. Samalla akselilla olevien renkaiden erisuuriset camber-kulmat huonontavat ajo-ominaisuuksia. Erisuuruisilla cambereilla auto pyrkii kääntymään eli puoltamaan aina positiivisemmän camberin puolelle. (Mauno 2002, 7.)

4.2 Caster

Caster-kulmalla tarkoitetaan olkatapin etu- tai takakallistumaa, eli kulmaa, joka muodostuu sivusta katsottaessa olkatappilinjan tai kuvitteellisen kääntöakselin ja pystysuoran välille. Kahdella päällekkäisellä tukivarrella varustetussa tuennassa olkatappilinjalla tarkoitetaan ylä- ja alapallonivelten välille muodostuvaa suoraa. Positiivisessa caster-kulmassa olkatappilinja on kallistuneena pystysuorasta tasosta taaksepäin siten, että yläpallonivel on taaempana kuin alapallonivel. Negatiivisessa casterissa olkatappilinja on vastaavasti kallistettuna eteenpäin. Negatiivista caster-kulmaa käytetään hyvin harvoin. Tavallisesti autoissa käytettävät caster-kulmat ovat 1° – 5° , mutta joissakin tapauksissa voidaan käyttää jopa yli 10° :n casteria. Kilpa-autoissa caster-kulmat vaihtelevat suuresti käyttötarkoituksesta riippuen. Esimerkiksi radoilla, joissa on paljon kaarteita samaan suuntaan, voidaan käyttää erisuuruisia casteria eri puolilla autoa, koska auto pyrkii kääntymään itsestään pienemmän casterin suuntaan. (Mauno 2002, 14–17.)

Caster-kulmalla voidaan vaikuttaa suuresti ajoneuvon suuntavakauteen. Positiiviselle caster-kulmalle on ominaista, että pyörät asettuvat itsestään painopisteen suuntaan, jolloin ajoneuvo kulkee suoraan ajettaessa vakaasti ja ohjaus pyrkii palautumaan voimakkaasti keskiasentoon. Positiivisen casterin hyvinä puolina voidaan pitää myös parempaa ohjaustuntumaa, renkaiden vipotuksen vähentymistä sekä ulomman renkaan sortokulman pientymistä kaarreajossa. Positiivinen casterin käyttö kuitenkin lisää ohjaamiseen tarvittavaa voimaa sekä sivutuulen ja kaltevan tien aiheuttamia häiriövoimia. Näitä ominaisuuksia voidaan parantaa suuntavakautta huonontamatta, kun olkatappilinja siirretään kulkemaan renkaan keskipisteen takapuolelta. Negatiivisella casterilla saadaan kevyt ohjaus, jolloin suuntavakaus huononee etenkin suurilla nopeuksilla. (Mauno 2002, 16.)

Caster-jättämä tarkoittaa sivusta katsottuna renkaan kosketuspinnan keskikohdan ja kääntöakselin tien pinnassa olevien leikkauspisteiden välillä olevaa suoraa etäisyyttä (kuvio 2). Jättämä on positiivinen, jos kääntöakselin leikkauspiste maan pinnassa on renkaan kosketuspinnan etupuolella. (Mauno 2002, 14.)



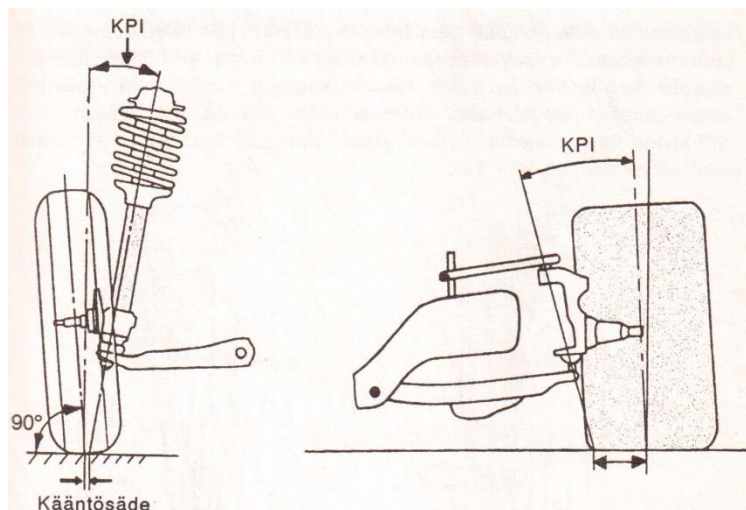
Kuvio 2. Caster-kulma ja jättämä (Newbold & Bonnick 2002, 185).

Caster-kulma vaikuttaa myös camber-kulmaan. Positiivisella caster-kulmalla käännettäessä ulkokaarten puoleisen renkaan camber muuttuu negatiivisempaan

suuntaan ja sisäkaarteen positiivisempaan. Caster-kulman avulla voidaan siis pienentää staattista camber-kulmaa. (Reimpell ym. 2001, 241.)

4.3 KPI

KPI tulee sanoista Kingpin inclination. KPI-kulmalla tarkoitetaan edestä tai takaa katsottuna kääntöakselin ja pystysuoran linjan välille muodostuvaa kulmaa. KPI siis kertoo, kuinka paljon kääntöakseli on kääntyneenä korin keskilinjaan päin (kuvio 3). KPI-kulma on aina positiivinen, eli kääntöakselin yläpää on aina lähempänä auton keskilinjaa. Tavallisesti KPI-kulmat ovat 3° – 13° . (Mauno 2002, 18.)



Kuvio 3. KPI-kulma ja kääntövierinsäde (Mauno 2002, 19).

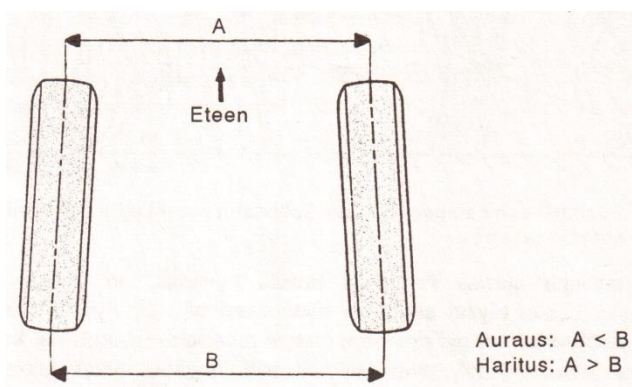
KPI-kulmaan liittyy olennaisesti myös kääntövierinsäde, jolle käytetään myös nimitystä set-off (kuvio 3). Kääntövierinsäteen suuruus määräytyy renkaan kosketuspinnan keskipisteen ja kääntöakselin tiekosketuspisteen välisenä etäisyytenä. Kääntövierinsäde toimii renkaan ja kääntöakselin välisenä momenttivartena, jolloin sen pituudella on suuri merkitys ohjaustuntumaan. Suuri kääntövierinsäde tehostaa tiestä ohjauspyörään muodostuvia iskuja sekä kasvattaa ohjausvoiman tarvetta. Kääntövierinsäde voi olla positiivinen tai negatiivinen. Kun kääntöakselin tieleikkauspiste on renkaan kosketuskeskiön sisäpuolella, puhutaan positiivisesta kääntövierinsäteestä. (Mauno 2002, 18–19.)

KPI-kulmalla on samankaltainen vaikutus ajoneuvon suuntavakauteen kuin casterrillakin, eli renkaat pyrkivät asettumaan itsestään suoraan. Koska KPI-kulma on

aina positiivinen, renkaiden kääntäminen saa aikaan etupään nousemisen ylöspäin. Korin massa vastustaa tätä liikettä, jolloin se pyrkii suoristamaan renkaat. Kilpa-autoissakaan KPI-kulmalla ei ole suurta merkitystä, vaan se määräytyy hattu- ja caster-kulmien perusteella. (Mauno 2002, 19–20.)

4.4 Auraus ja haritus

Aurauksella ja harituksella tarkoitetaan renkaiden pitkittäissunnassa olevaa kulmaeroa auton pituusakseliin nähden. Harituksella engl. Toe Out, renkaiden taka-reunat ovat ylhäältä päin katsottuna lähempänä toisiaan kuin etureunat. Tätä voidaan kutsua myös negatiiviseksi auraukskulmaksi. Aurauksella engl. Toe In, tilanne on päinvastainen (kuvio 4). Auraukskulmien pääasiallisena tehtävänä on kumota camber-kulmasta syntyvät sivuttaisvoimat sekä renkaiden vierintävastuksesta ja vetovoimasta aiheutuvat voimat. Positiivisella camberilla ja kääntövierinsäteellä olevat renkaat pyrkivät kääntymään haritukselle edellä mainittujen voimien seurauksesta. Tämän vuoksi renkaita on käännettävä enemmän auraukselle. Tämä auttaa kumoamaan voimat, mutta suuresta negatiivisesta tai positiivisesta camber-kulmasta johtuvaa renkaan reunan kulumista tällä ei kuitenkaan voida estää. Auraukskulman suuruus mitataan ja ilmoitetaan yleensä asteina tai millimetreinä. Mitatarkkuuden kannalta asteina suoritettu mittaus on huomattavasti tarkempi. (Mauno 2002, 20–23.)



Kuvio 4. Auraukskulma (Mauno 2002, 23).

Auraukskulmalla on merkitystä myös auton ajettavuuteen. Ajotilanteissa pyöräntuennan joustavuudella on suuri merkitys auraukskulmiin. Jäykkyyttä muuttamalla voidaan vaikuttaa tarvittavan auraukskulman suuruuteen. Auraukskulman säätämi-

nen enemmän harittavampaan suuntaan muuttaa autoa enemmän ylioheavaksi ja epävakaaksi. Suurempi auraus taas vakauttaa autoa suorilla, mutta kaarteissa auto käyttäytyy alioheavasti. Ajettavuuden kannalta parhaan aurauskulman löytää kuitenkin vain kokeilemalla. (Mauno 2002, 22–23.)

5 AJODYNAMIIKKA JA JOUSITUSGEOMETRIA

Ajodynamiikalla voidaan todentaa ajoneuvon käyttäytymistä erisuuntaisten voimien vaikutuksista. Ajodynamiikan tutkiminen jakautuu yleisesti kolmeen osaluueeseen, ajoneuvon pitkittäiseen, sivuttaiseen ja pystysuuntaiseen dynamiikkaan. Näiden avulla saadaan tutkittua kokonaisvaltaisesti ajoneuvon liikettä sekä voimia, jotka saavat liikkeen aikaiseksi. Pitkittäinen dynamiikka liittyy yleisesti ajoneuvon kiihdytyksiin ja jarrutuksiin, poikittainen dynamiikka puolestaan kaarreajoon ja ajoneuvon käsiteltävyyteen. Pystysuuntainen dynamiikka keskittyy lähinnä ajoneuvon painojakaumaan ja mukavuustekijöihin. (Tuononen & Koisaari 2010, 56.)

Kilpa-autoilussa alustan ominaisuudet ja toimivuus ovat avainasemassa auton kilpailukyvyn kannalta. Edes moottorin suuret tehot eivät voi korvata huonosti toimivaa alustaa. Vauhdin kasvaessa myös alustan ominaisuuksien merkitys kasvaa. Parempia alustan ominaisuuksia haettaessa keskitytään yleensä kolmeen pääasiaan. Nämä ovat renkaiden kokonaispidon parantaminen sekä ajoneuvon ohjautuvuuden ja suuntavakauden saaminen kuljettajan mieltymysten mukaisiksi. Muutosten ja säätöjen tekemiseksi tarvitaan yleistietämystä alustageometriasta ja muutosten vaikutuksista, koska usein yhden asian muuttaminen vaikuttaa moniin muihin ominaisuuksiin. Tämän vuoksi kaikkia alustan ominaisuuksia saadaan harvoin täysin halutuiksi, vaan niissä saatetaan joutua tekemään suuriakin myönnytyksiä. (Mauno 2002, 5.)

5.1 Jousitettu ja jousittamaton massa

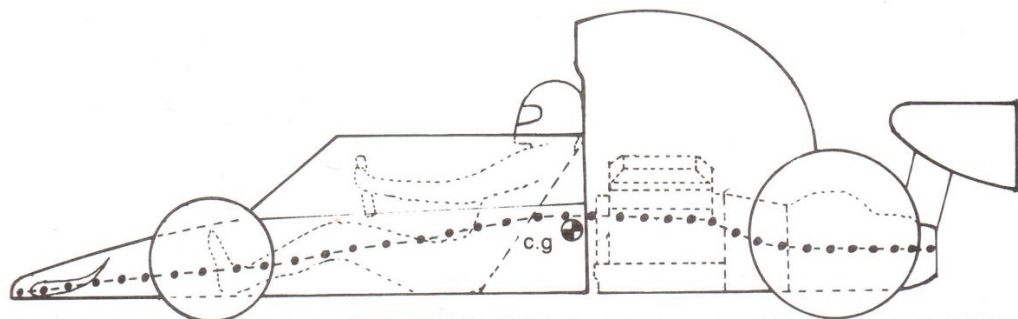
Ajoneuvon massa voidaan jakaa jousitettuun ja jousittamattomaan. Kaikki josten varassa liikkuvat osat, kuten kori, vaihteisto ja moottori kuuluvat jousitettuun massaan. Renkaat, vanteet, jarrut, pyörännavat, jäykät akselit kaikkine osineen kuuluvat jousittamattomaan massaan. Tämän lisäksi vetoakselit, jouset, iskunvaimentimet, tukivarret ja raidetangot ovat osaksi jousitettua ja jousittamatonta massaa. Renkaiden pidon kannalta jousitettujen ja jousittamattomien massojen ero tulisi olla mahdollisimman suuri. Toisin sanoen jousittamattoman massan tulisi olla

mahdollisimman pieni, koska silloin jousitettu massa kykenee painamaan tien epätasaisuuksissa rengasta tienpintaa vasten mahdollisimman tehokkaasti. (Mauno 2002, 30–31.)

5.2 Painopiste

Kaikilla kappaleilla on painopiste muodosta tai koosta riippumatta, niin myös autolla. Painopiste on se piste, josta tuettuna auto pysyy täysin tasapainossa. Painopisteen sijainti vaikuttaa suuresti auton käyttäytymiseen. Sijainnilla voidaan olennaisesti vaikuttaa korin kallisteluihin kiihdytyksissä, jarrutuksissa ja kaarteissa. Erityisesti kilpa-autoissa painopiste onkin pidettävä mahdollisimman alhaalla, koska se vähentää huomattavasti korin kallistelua. Yleisin ja helpoin tapa painopisteen alentamiseksi on auton madaltaminen. Madaltaminen jää usein ainoaksi keinoksi alentaa auton painopistettä, koska suuremmat rakenteelliset muutostyöt ovat kiellettyjä monissa kilpa-autoluokissa. Mikäli suurempia muutostöitä on mahdollista suorittaa, tulee esimerkiksi moottori, voimansiirto, istuimet, polttoainesäiliö sekä akku asentaa mahdollisimman matalalle. (Mauno 2002, 28–29.)

Jakamalla auto poikittaissunnassa pienempiin osiin jokaiselle osalle muodostuu oma painopisteensä. Näiden pisteiden kautta piirretty viiva muodostaa painopisteen pituussuuntaisen akselin (kuvio 5). Auton muodosta ja komponenttien sijoittelusta johtuen jaoteltujen osien massapisteet ovat eri korkeuksilla. Tästä johtuen akseli ei ole suora, vaan kulkee massapisteiden mukaan. (Smith 1978, 29.)



Kuvio 5. Painopiste ja sen pitkittäissuuntainen akseli (Smith 1978, 29).

Legends Trophyn säännöt määräävät ajoneuvon minimipainon ilman kuljettajaa sekä kuljettajan kanssa, jotka ovat 500 kg ja 590 kg. Myös ajoneuvon painoja-

kaumat on määrätty. Pituussuuntainen jakauma mitataan ilman kuljettajaa, eikä painojakauma edestä taakse saa olla enempää kuin 52 % taakse. Sivuttaissuuntainen jakauma mitataan puolestaan kuljettajan kanssa. Painojakauma oikealta vasemmalle ei saa olla enempää kuin 52 %. (Legends Trophy sääntökirja 2013.)

Tutkittavalle ajoneuvolle tehdyt punnitukset suoritettiin neljällä erillisellä vaa'alla, jolloin ajoneuvosta saatiin mitattua jokaiselle renkaalle kohdistuva massa erikseen. Kaikissa tätä työtä varten tehdyissä punnituksissa ajoneuvo oli täydessä kilpailukunnossa ilman kuljettajaa.

5.2.1 Painopisteen pituus- ja leveysuuntainen paikka

Pituus- ja leveysuuntaisen painopisteen laskemiseksi auto täytyy punnita tasaisella alustalla siten, että jokaisen renkaan alla on oma vaaka. Tällöin saadaan selville jokaiselle renkaalle ajoasennossa kohdistuva massa. Auton kokonaismassa saadaan laskettua kun etuakselille kohdistuva massa ja taka-akselille kohdistuva massa lasketaan yhteen (kaava 1). (Reimpell ym. 2001, 387–388.)

$$m_{ea} + m_{ta} = m_{kok} \quad (1)$$

$$271kg + 258kg = 529kg$$

jossa m_{kok} on auton kokonaismassa

m_{ea} on etuakselille kohdistuva massa

m_{ta} on taka-akselille kohdistuva massa

Pituussuuntainen painopisteen paikka etu- ja taka-akselilta saadaan laskettua jakamalla akselikohtainen massa auton kokonaismassalla ja kertomalla se akselivälillä. Esimerkiksi painopisteen etäisyys etuakselilta saadaan kaavalla 2.

$$\frac{m_{ta}}{m_{kok}} * l = l_e \quad (2)$$

$$\frac{258kg}{529kg} * 1854mm = 904mm$$

jossa l_e on painopisteen etäisyys etuakselilta

m_{ta} on taka-akselille kohdistuva massa

m_{kok} on auton kokonaismassa

l on auton akseliväli

Painopisteen leveyssuuntainen paikka auton oikealta puolelta saadaan laskettua kaavalla 3.

$$\frac{m_{vp}}{m_{kok}} * l_r = l_o \quad (3)$$

$$\frac{268kg}{529kg} * 1303mm = 660mm$$

jossa l_o on painopisteen paikka auton oikeanpuoleisista renkaista

m_{vp} on auton vasemman puoleisille renkaille kohdistuva massa

m_{kok} on auton kokonaismassa

l_r on auton raideleveys

5.2.2 Painopisteen korkeussuuntainen paikka

Painopisteen korkeussuuntaisen paikan laskemiseksi autoa on nostettava siten, että toinen auton akseleista on vaaolla ja toinen nostetaan mahdollisimman ylös. Nostosta aiheutuu painonsiirtoa tuetulle akselille, jonka avulla korkeussuuntainen paikka voidaan laskea. Mahdollisten punnitusvirheiden välttämiseksi, auto kannattaa punnita useita kertoja. Näin saavutetaan tarkempi lopputulos. Saatujen mittauksien perusteella painopisteen korkeussuuntainen paikka voidaan laskea kaavalla 4. (Reimpell ym. 2001, 388.)

$$\frac{l}{m_{\text{kok}}} * \frac{\Delta m}{\Delta h} * (l^2 - \Delta h^2)^{\frac{1}{2}} = h_v \quad (4)$$

$$\frac{1854\text{mm}}{529\text{kg}} * \frac{10\text{kg}}{200\text{mm}} * ((1854\text{mm})^2 - (200\text{mm})^2)^{\frac{1}{2}} = 323\text{mm}$$

jossa h_v on painopisteen korkeus maanpinnasta

l on auton akseliväli

m_{kok} on auton kokonaismassa

Δm on massan muutos tuetulla akselilla

Δh on nostokorkeus renkaan pitopinnasta

5.3 Painonsiirto

Kaikki kiihdytyksestä, jarrutuksesta ja kaarreajosta autoon aiheutuvat voimat kulkevat aina auton painopisteen kautta. Painopisteen korkeus muodostaa voiman momenttivarren, jonka vuoksi auton kori kallistelee eri suuntiin ajotilanteesta riippuen, eli paino siirtyy. Momenttivartta lyhentämällä eli painopistettä alentamalla saadaan vähennettyä korin kallistelua. Painonsiirron aikana auton kokonaismassa

ei muutu miksiäkään, vaan osa massasta siirtyy esimerkiksi etuakselilta taka-akselille. (Smith 1978, 32.)

5.3.1 Pitkittäinen painonsiirto

Pitkittäisessä painonsiirrossa painoa siirtyy joko etuakselille tai taka-akselille. Jarrutuksessa auton keula laskee ja perä nousee painonsiirron vaikutuksesta. Kiihdytyksessä keula vastaavasti nousee ja perä laskee. Takavetoisella autolla kiihdyttäessä painonsiirto on jopa positiivinen asia. Auton perä laskee ja taka-akselille siirtyy enemmän painoa, jolloin myös renkaiden pito paranee. Jarrutuksissa painonsiirrosta on pelkästään haittaa. Painon siirtyessä etuakselille keulan camber-kulma muuttuu negatiivisempaan suuntaan, jolloin rengas ei ole enää pystysuorassa tienhen nähden. Tämä heikentää eturenkaiden jarrutusaitoa. Jarrutuksen aikana auton taka-akselikuorma pienenee, joka myös osaltaan heikentää kokonaisjarrutusaitoa. Painonsiirron suuruuteen vaikuttaa auton kiihtyvyys, painopisteen korkeus, akseliväli sekä kiihtyvyys, kuten kaavasta 5 nähdään. (Smith 1978, 32.)

$$m_{pit} = \frac{m_{kok} * h_v * g}{l} \quad (5)$$

jossa m_{pit} on pitkittäissuuntainen painonsiirto

m_{kok} on auton kokonaismassa

h_v on painopisteen korkeus tienpinnasta

g on kiihtyvyys

l on auton akseliväli

5.3.2 Poikittainen painonsiirto

Poikittaisella painonsiirrolla tarkoitetaan kaarteissa tapahtuvaa painonsiirtoa sisemmiltä renkailta ulommille. Poikittainen painonsiirto on kaikella tapaa huono asia, koska se keventää sisäkaarten puoleisia renkaita, jolloin renkaiden kokonaispito heikkenee. Poikittaista painonsiirtoa voidaan vähentää laskemalla auton painopistettä, kasvattamalla auton raideväliä tai vähentämällä auton kokonaismassaa, kuten kaavasta 6 nähdään. Korin kallistelu vaikuttaa myös painonsiirtoon. Kallistelun haitoista ja hyödyistä on olemassa erilaisia näkemyksiä. (Smith 1978, 36.)

$$m_{poik} = \frac{m_{kok} * h_v * g}{l_r} \quad (6)$$

jossa m_{poik} on poikittaissuuntainen painonsiirto

m_{kok} on auton kokonaismassa

h_v on painopisteen korkeus tienpinnasta

g on auton poikittainen kiihtyvyys

l_r on auton raideväli

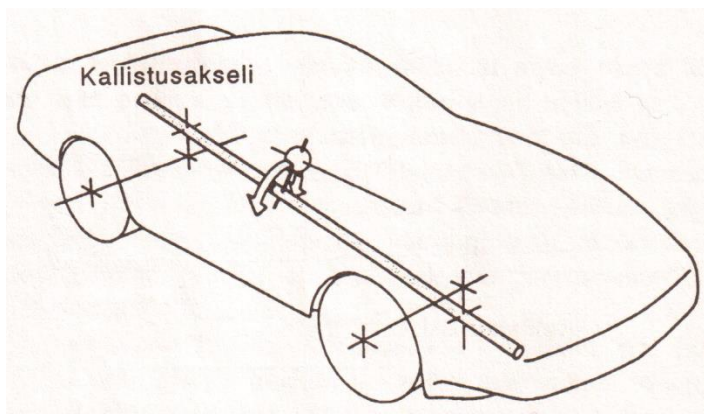
5.3.3 Diagonaalinen painonsiirto

Ajoneuvon rungon kiertojäykkyyden vuoksi ajoneuvoon muodostuu myös diagonaalista painonsiirtoa. Voimakkaimmin tämä on havaittavissa, kun kaarteeseen käännetään ja jarrutetaan samanaikaisesti. Tällöin sisemmältä takarenkaalta siirtyy painoa ulommalle eturenkaalle. Tämä ei ole suotavaa, koska se heikentää takapäätä kaarrepitoa. Myös etupään pito heikkenee, koska painonsiirto aiheuttaa aliohjautuvuutta lisäävän momentin painopisteen ympäri. Painonsiirrosta johtuen

ulompi eturengas voi ylikuormittua tai sen camber-kulma muuttua pitoa heikentävään kulmaan. Kaarteesta ulos kiihdyttäessä painonsiirto tapahtuu takaisin sisemmälle takarenkaalle parantaen vetopitoa. Tämä voi kuitenkin joissain tapauksissa aiheuttaa aliohjautuvuutta, koska ulomman eturenkaan kuormitus vähenee. Diagonaalisen painonsiirron suuruuteen vaikuttaa rungon kiertojäykkyys, jousien sijainti sekä akseli- ja raideväli. (Smith 1978, 40.)

5.4 Kallistuskeskiö

Kallistuskeskiö engl. Roll Center on jousitusgeometriasta määräytyvä painopiste, jonka ympäri auton jousitettu massa pyrkii kiertymään keskipakovoiman vaikutuksesta. Tämän pisteen kautta esimerkiksi renkaiden sivusuuntaiset tukivoimat välittyvät auton koriin. Auton etu- ja takajousitukselle voidaan määrittää omat kallistuskeskiöt. Niiden kautta kulkevaa kuvitteellista suoraa kutsutaan kallistusakseliksi, jonka ympäri koko auton kori kallistelee (kuvio 6). Korin kallistumisen suuruus riippuu painopisteen ja kallistusakselin välisestä korkeuserosta, eli toisin sanoen momenttivarren pituudesta. Mitä korkeammalla painopiste on kallistusakseliin verrattuna, sitä enemmän kori kallistelee. Jos kallistusakselin saisi kulkemaan painopisteen kautta, kori ei kallistelisi lainkaan. (Smith 1978, 29–30; Mauno 2002, 33–34.)



Kuvio 6. Ajoneuvon kallistusakseli (Mauno 2002, 33).

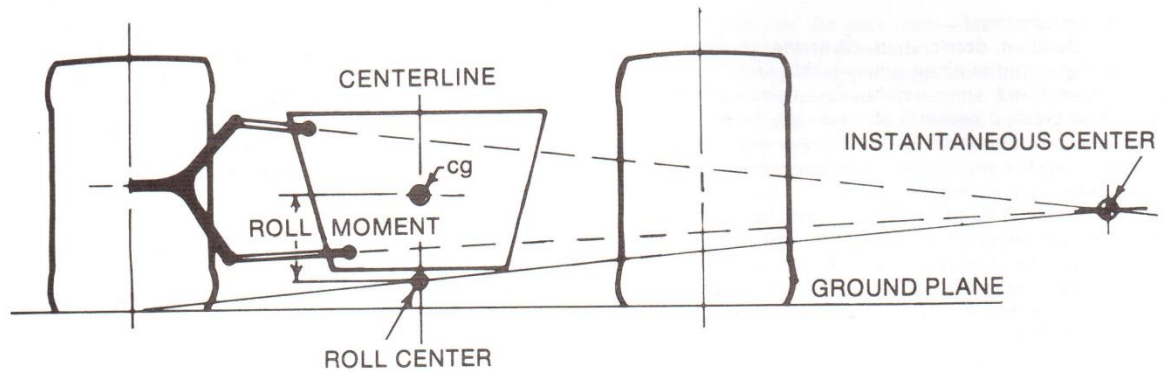
Etu- ja takapään kallistuskeskiöiden korkeudella on suuri vaikutus auton käyttäytymiseen erityisesti kaarteissa. Tilanteessa, jossa auton painopiste on likimain puolivälissä akseliväliä ja etupään kallistuskeskiö on alempana kuin takapään kallistuskeskiö, etupäähän aiheutuu suurempi kallistava momentti. Tämä momentti

pyrkii kallistamaan etupäätä enemmän kuin takapäätä. Auton etu- ja takapäällä ei voi kuitenkaan olla kovinkaan suurta kallistuseroa, koska korin kiertojäykkyys estää sen. Tästä johtuen auton takapää kallistuu todellisuudessa etupäätä enemmän. Näin ollen suurempi painonsiirto aiheutuu sisemmältä takarenkaalta ulomalle takarenkaalle. Tämä saa aikaan autolle ylioheavasti ominaisuuden. Sijoittamalla etupään kallistuskeskiö takapään kallistuskeskiötä korkeammalle saadaan auton käyttäytyminen vastaavasti alioheavaksi. (Mauno 2002, 34.)

Kallistuskeskiötä nostamalla saadaan lyhennettyä momenttivarren pituutta, jolloin myös kallistelu vähenee. Kallistuskeskiötä nostamalla saadaan kuitenkin aikaan haitallinen korja nostava ilmiö, jacking. Korja nostavaa ilmiötä tapahtuu aina kun kallistuskeskiö on maanpinnan yläpuolella. Nostava ilmiö tapahtuu kaarteessa, kun kallistuskeskiön korkeus maanpinnasta muodostaa pystysuuntaisen voimakomponentin, joka pyrkii pyörimään ulkokaarten puoleisen renkaan tukivoiman ympäri. Mitä korkeammalla maanpinnasta kallistuskeskiö on, sitä suurempi on korja nostava voima. Kallistuskeskiön ollessa maanpinnan alapuolella, voiman suunta on alaspäin, jolloin myös kori painuu alaspäin. Nostavan ilmiön huonoina puolina voidaan pitää korin nousemisesta aiheutuvaa painopisteen nousua sekä haitallisia camber-kulman muutoksia. Lisäksi auton sivuttaispito heikkenee, koska renkaan sivuttainen tukivoima pienenee korja nostavan voiman suuruuden verran. Pahimmassa tapauksessa sisäkaartenpuoleiset renkaat voivat jousituksen ulosjouston loppuessa nousta irti tienpinnasta, joka johtaa auton ennalta arvaamattomaan käytökseen. Yleisesti ja etenkin kilpa-autoissa, kallistuskeskiö pyritäänkin saamaan mahdollisimman lähelle maanpinnan tasoa. (Smith 1978, 38.)

Korin kallistelun ja jousitusgeometrian tutkimisen apuna voidaan siis käyttää edellä mainittua kallistuskeskiötä. Tästä voidaan käyttää myös nimeä geometrinen kallistuskeskiö. Kallistuskeskiön paikka riippuu pyöräntuennan tyypistä ja tuennan geometriasta. On myös tärkeä muistaa, että kallistuskeskiö ei sijaitse samassa pisteessä koko aikaa. Piste muuttuu paikkaansa jatkuvasti pysty- ja sivusuunnassa, jousituksen liikkeistä johtuen. Kuviossa 7 on esitetty kallistuskeskiön määrittäminen ylä- ja alapuolisella tukivarrella varustetulle erillistuennalle. Määrittäminen aloitetaan piirtämällä tukivarsien suuntaiset viivat, jolloin niiden leikkauspiste muodostaa hetkellisen keskipisteen (Instantaneous Center). Renkaan kosketuspinnan

keskikohdasta piirretään viiva hetkelliseen keskipisteeseen, jolloin varsinainen kallistuskeskiö muodostuu kohtaan, jossa viiva leikkaa auton keskilinjan. (Smith 1978, 30.)



Kuvio 7. Kallistuskeskiö ja hetkellinen keskipiste (Smith 1978, 30).

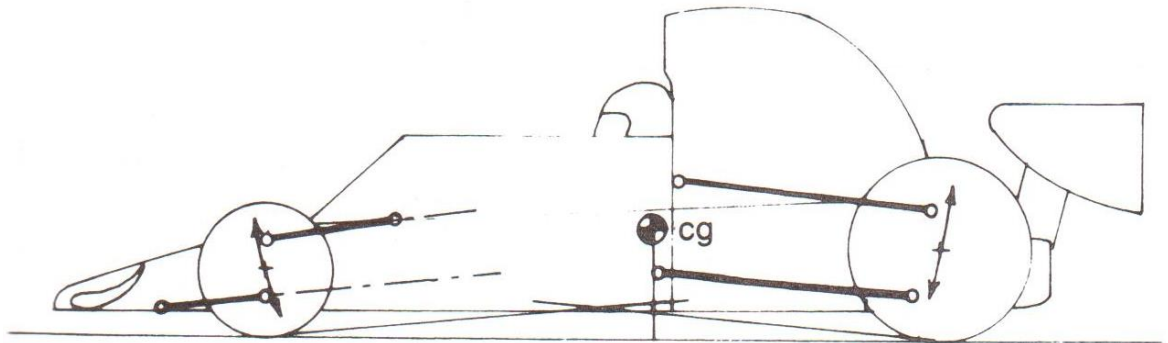
Panhard-tangolla varustetun jäykän taka-akselin kallistuskeskiön paikka määräytyy Panhard-tangon korkeuden mukaan. Kallistuskeskiö sijaitsee pisteessä, jossa Panhard-tanko leikkaa auton pituusakselin. Muuttamalla Panhard-tangon korkeutta tai kulmaa voidaan vaikuttaa kallistuskeskiön korkeuteen. (Reimpell ym. 2001, 174.)

5.5 Antigeometria

Antigeometrialla tarkoitetaan jarrutuksista ja kiihdytyksistä aiheutuvan auton nyökkäyksen ja niauksen säätelystä tukivarsigeometrian avulla. Nyökkäys ja niaus aiheutuvat pääasiassa samoista asioista kuin kaarteissa tapahtuva kallistelu. Eroa kallisteluun, nyökkäys ja niaus tapahtuvat vain poikittaissuuntaisen akselin ympäri. Myös tämä akseli muodostuu tuentageometrian määräämään tukivarsien jatkeiden leikkauspisteeseen. Näitä pisteitä voidaan kutsua myös nimillä nyökkäys- ja niauskeskiö. (Mauno 2002, 41; Smith 1978, 34.)

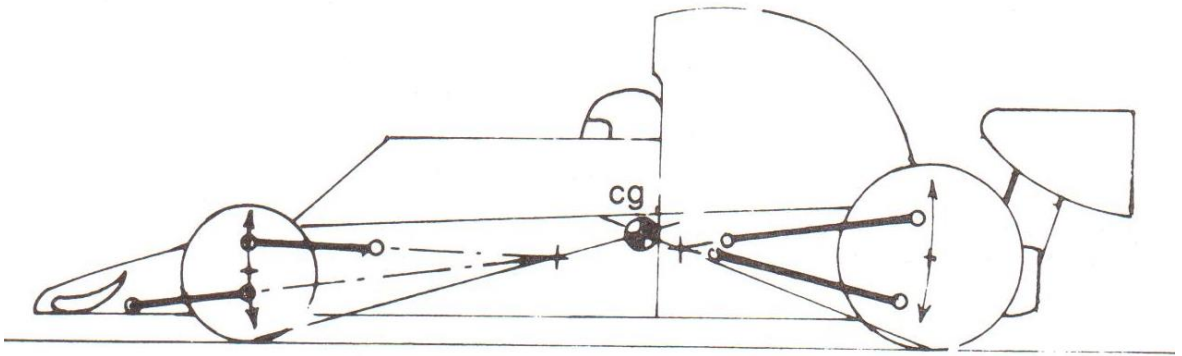
Antigeometria ominaisuus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa käyttää hyväkseen auton jousitetun massan inertiaa tukivarsien välityksellä. Tämä jousitetun massan inertia saa aikaan tukivarsien avulla koria nostavan ominaisuuden, joka vastustaa nyökkäystä ja niausta. Tätä tapaa voidaan kuitenkin käyttää vain autoihin, joissa jarrut ovat osana jousitettua massaa kuten esimerkiksi

formuloissa. Tässä tavassa tukivarret ovat yhdensuuntaiset ja kallellaan siten, että ne nousevat auton keskipisteen suuntaan mentäessä (kuvio 8). Tuennan antigeometrian suuruus määräytyy auton painopisteen pystysuoralla olevan pisteen korkeudesta. Piste muodostuu kohtaan, jossa renkaan kosketuspinnasta tukivarsien kanssa yhdensuuntaisesti piirretty suora leikkaa painopisteen pystysuoran. Mitä alempana painopisteestä tämä leikkauspiste on, sitä pienempi antigeometrian vaikutus on. Tässä tavassa 100 % antigeometria saavutetaan, mikäli renkaan kosketuspinnasta piirretty suora leikkautuu painopisteessä. Yleisesti antigeometrian suuruus ilmoitetaan suhdelukuna, eli kuinka korkealla maanpinnasta leikkauspiste on suhteessa painopisteeseen. Jos leikkauspiste on esimerkiksi maanpinnan ja painopisteen puolivälissä, suhde on 50 %. (Smith 1978, 34.)



Kuvio 8. Anti-squat ja anti-dive ominaisuudet toteutettu yhdensuuntaisilla tukivarsilla (Smith 1978, 35).

Toinen tapa käyttää hyväkseen jarrutuksissa ja kiihdytyksissä tukivarsiin muodostuvaa momenttia. Tämän tavan käyttö sopii autoihin, joissa jarrut eivät ole osana jousitettua massaa. Myös tässä tavassa tarkastellaan renkaan kosketuspinnasta piirretyn suoran leikkauspistettä painopisteen pystysuoralla. Suoran suunnan määrää tässä tavassa tukivarsien jatkeiden leikkauspiste. Suoran leikkauspisteen korkeus painopisteen pystysuoralla kertoo antigeometrian voimakkuuden. Antigeometria on 100 %, jos suora leikkautuu painopisteessä (kuvio 9). (Smith 1978, 34.)



Kuvio 9. 100 % anti-squat ja anti-dive ominaisuudet (Smith 1978, 35).

5.5.1 Anti-dive

Anti-dive-ominaisuudella tarkoitetaan jarrutustilanteessa painonsiirron seurauksena tapahtuvan keulan laskemisen eli nyökkäyksen estämistä. Anti-dive-ominaisuudessa on myös omat haittapuolensa. Ensin mainitun antigeometrian toteutustavan huonoina puolina voidaan pitää renkaan siirtymistä eteenpäin jouston aikana sekä jousituksen muuttumista jäykemmäksi ja tunnottomammaksi. Toisen tavan huonoja ominaisuuksia ovat caster-kulman muuttuminen positiivisempaan suuntaan, jonka vuoksi myös ohjaamiseen tarvittava voima kasvaa. Tavallisten henkilöautojen maksimi anti-dive arvona voidaan pitää 50 %:a. Kilpa-autojen kohdalla käytetyt arvot ovat huomattavastikin tätä pienempiä. Raskaissa etumootorisissa kilpa-autoissakin käytetään yleensä enintään 25 % anti-divea. (Smith 1978, 35; Gillespie 1992, 255.)

5.5.2 Anti-squat

Anti-squat-ominaisuus estää kiihdytyksestä aiheutuvaa perän laskemista eli niiaamista. Anti-squat-ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi pelkästään vetävillä taka-akseleilla. Tehokkaissa heiluriakselilla varustetuissa autoissa anti-squat onkin erittäin hyödyllinen, koska se vähentää vetävien pyörien camber-kulman muutoksia. Tällä saadaan aikaan enemmän vetopitoa kiihdytyksiin. Jäykällä taka-akseleilla tämä anti-squat-ominaisuus ei luonnollisestikaan ole tarpeellinen. Töyssyissä renkaan noustessa ylöspäin anti-squat-ominaisuus pyrkii kääntämään takarenkaita taaksepäin, jolloin jousitus ottaa tiestä muodostuvat iskut paremmin vastaan. Hei-

luriakseleilla edellä mainittu voi kuitenkin aiheuttaa ei-toivottuja aurasikulmien muutoksia. Yleisenä maksimiarvona tehokkaillekin kilpa-autoille voidaan pitää 20 % anti-squatia. (Smith 1978, 35–36.)

5.6 Akseli- ja raideväli

Akselivälillä tarkoitetaan etu- ja taka-akseleiden välistä etäisyyttä pyörännapojen keskikohdista mitattuna. Raideväli on samalla akselilla olevien renkaiden keskilinjoista mitattu etäisyys. Näillä mitoilla voidaan vaikuttaa suuresti ajo-ominaisuuksiin. Pitkällä akselivälillä ja kapealla raidevälillä saadaan hyvä vakaus suoraan ajettaessa sekä pienempi pituussuuntainen painonsiirto, mutta vastaavasti kaarteiden pito- ja ajo-ominaisuudet huononevat suuresti. Mutkaisilla ja suhteellisen hitailla radoilla oikeuksiinsa pääsevät autot, joissa on leveä raideväli ja lyhyt akseliväli, koska ne ovat ketteriä ja tuottavat paljon kaarrepitoa. Raidevälin olisikin hyvä olla niin suuri kuin mahdollista. (Reimpell ym. 2001, 150–151; Smith 1978, 56.)

Autoissa käytetään usein eri raideleveyyttä etu- ja taka-akseleilla. Tällä ratkaisulla voidaan vaikuttaa auton kääntyvyyteen mutkissa. Kilpa-autoissa olisi hyödyllistä käyttää etu-akselilla leveämpää raideväliä kuin taka-akselilla. Tällöin auto kääntyy mutkiin paremmin ja diagonaalinen painonsiirto on pienempi, jolloin myös auton aliohjautuvuus vähenee kaarteiden sisään- ja ulostulossa. Edellä mainittua ratkaisua käytetään etenkin radoilla, joissa on paljon hitaita kaarteita. (Smith 1978, 56.)

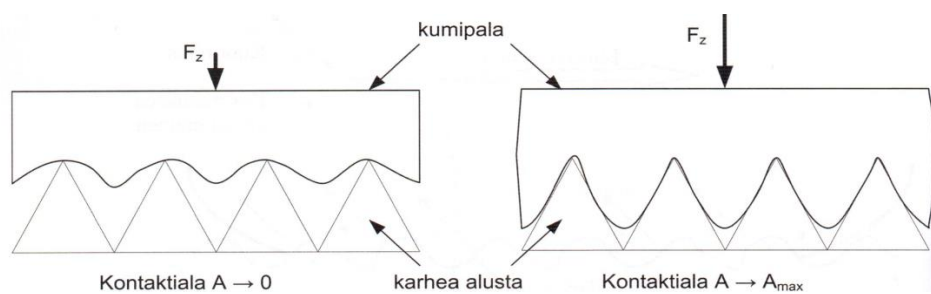
Legends Trophyn säännöt määräävät, että ”*Akselivälin on oltava 1854 mm, +/- 6,35 mm (73”, +/- ¼”). Auton leveys ei saa mistään kohdasta mitattuna ylittää 1524 mm (60”). Auton on mahduttava 60” leveän ja 48” korkean portin läpi.*” (Legends Trophy sääntökirja 2013.)

Legendsin akseliväli on siis melko lyhyt, mutta kokonaisleveys on akseliväliin suhteutettuna suuri, joten auton käytös kovissa nopeuksissa on hieman epävakaata. Carroll Smithin (1978, 56.) mukaan tämänkaltaisella autolla pidon ääri rajoilla ajaminen on hankalaa.

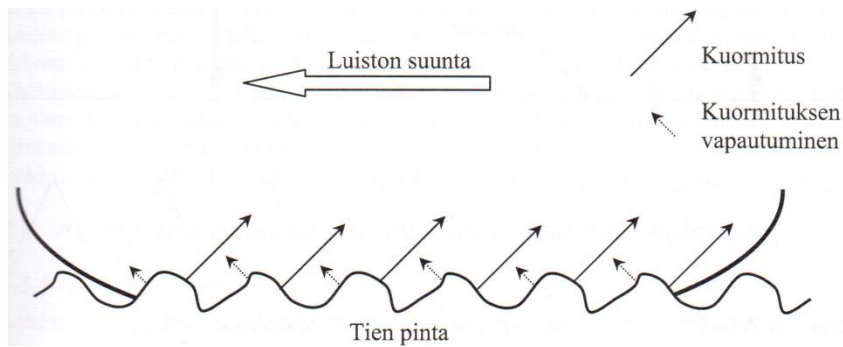
5.7 Renkaat

Renkaat ovat ratkaisevassa osassa pitkittäissuuntaisten, sivuttaissuuntaisten ja pystysuuntaisten voimien välittäjänä ajoneuvon ja tien välillä. Renkaiden ominaisuuksien tulisi pysyä niin muuttumattomina ja kuljettajalle ennalta arvattavina kuin mahdollista, koska niiden kautta kuljettaja saa kaiken tiedon ohjauksen liikkeistä. (Reimpell ym. 2001, 86; Smith 1978, 13.)

Renkaan ja tien välillä vaikuttaa kitka. Kitka koostuu pääasiassa adheesio- ja hystereesikitkasta. Näiden lisäksi kitka koostuu myös monista muista kitkamekanismeista, mutta niiden vaikutus kokonaiskitkaan ei ole merkittävä kuin joissakin erikoistapauksissa. Adheesio vaikuttaa molekyylitasolla kumin ja tien välillä. Adheesiokitkan suuruus riippuu renkaan ja tien välisestä kosketuspinta-alasta sekä kosketuksissa olevista materiaaleista. Tämän vuoksi adheesiokitka on tasaisella ja kuivalla pinnalla määräävämpi kitkatyyppi. Epätasaisella pinnallakin renkaan kosketuspinta-ala kasvaa tiettyyn rajaan asti kuormituksen kasvaessa, kumin tarrauttua kiinni tienpinnan karheuksiin (kuvio 10), jolloin myös adheesiokitka lisääntyy. Erilaiset epäpuhtaudet taas heikentävät adheesiota. Hystereesikitka on tienpinnan epätasaisuuksista johtuvaa renkaan muodonmuutoskitkaa (kuvio 11). Tästä johtuen hystereesikitkan merkitys tasaisella pinnalla on vähäinen, mutta merkitys kuitenkin korostuu märällä ja epäpuhtailla pinnoilla. (Tuononen & Koisaari 2010, 6–10.)



Kuvio 10. Kumin ja tienpinnan välinen kosketus eri kuormilla (Tuononen & Koisaari 2010, 8).



Kuvio 11. Kumin hystereesin aiheuttama pitkittäisvoima karkealla tienpinnalla (Tuononen & Koisaari 2010, 7).

5.7.1 Kitkakerroin

Renkaan pitokykyä kuvataan kitkakertoimella. Kitkakerroin on yksikötön suure, jolla ilmoitetaan kappaleen kykyä vastustaa liikettä toista kappaletta vasten. Renkaan kohdalla mielenkiintoisin asia on renkaan synnyttämän vaakasuoran voiman suhde rengasta alaspäin painavaan voimaan. Kilpahrenkailla kitkakerroin on yleisesti 1,2 - 1,3, mutta kumiseoksen pehmeystä riippuen voidaan saavuttaa jopa yli kahden kitkakertoimia. Käytännössä kitkakerroin voidaan havainnollistaa siten, että kitkakertoimen ollessa esimerkiksi 1,3 ja renkaan pystysuuntaisen voiman ollessa 2000 N, voi rengas parhaimmillaan muodostaa 2600 N tukivoiman. Tällöin renkaan ominaisuuksien puolesta voidaan ainakin teoriassa saavuttaa 1,3 G kiihtyvyys. (Mauno 2002, 135–136.)

Renkaan tuottamaan pitokykyyn vaikuttaa renkaaseen kohdistuva pystysuuntainen voima sekä renkaan tuottama maksimi kitkakerroin vallitsevissa sääolosuhteissa. Nämä molemmat tekijät kuitenkin muuttuvat jatkuvasti painonsiirrosta, ajonopeudesta, radan kunnosta, renkaan lämpötilasta sekä monista muista seikoista johtuen. Tämän vuoksi renkaan tuottamaa teoreettista maksimi tukivoimaa ja kiihtyvyyttä harvoin saavutetaan käytännössä. (Smith 1978, 13.)

5.7.2 Sortokulma

Englannin kielessä sortokulmalle käytetään nimitystä slip angle. Sortokulmalla tarkoitetaan renkaan kosketuspinnan kulkusuunnan ja renkaan keskilinjan kulku-

suunnan välistä kulmaa. Jotta ajoneuvon kulkusuuntaa saataisiin muutettua ajonopeudesta tai kaartein säteestä riippumatta, on jokaisessa renkaassa oltava hieman sortokulmaa. Ilmiönä sortokulma johtuu renkaan joustavuudesta kun sitä kierretään. Tien ja renkaan välissä olevasta elastisesta kitkasta johtuen, renkaan kosketuspinta vastustaa kääntömomenttia. Tämän vuoksi rengas ei käänny yhtä paljon kuin vanne. (Smith 1978, 14.)

Sortokulmalla on suuri merkitys kuljettajalle ohjaustuntuman kautta. Sen avulla kuljettaja saa tiedon renkaan ja tien välisistä tapahtumista. Sortokulman avulla kuljettaja pystyy havaitsemaan renkaan pitorajan lähentymisen. Ilman sortokulmaa tätä rajaa ei pystyisi havaitsemaan, jolloin pito loppuisi yhtäkkiä ja rengas irtoaisi luistoon. Luistoon irtoamista tulisi välttää, koska tietyllä renkaan sortokulmalla renkaan synnyttämä sivuttaisvoima on huomattavasti suurempi kuin luistossa olevan renkaan. Kun sekä etu- että takarenkaat toimivat ihanteellisella sortokulmalla, saavutetaan maksimaalinen sivuttaisvoima ja tämän myötä myös maksimaalinen kaarrenopeus. Suurimman sivuttaisvoiman aiheuttama sortokulma kuitenkin vaihtelee eri renkaiden välillä, joka tekee ihanteellisen kulman löytämisestä haastavaa. (Mauno 2002, 134.)

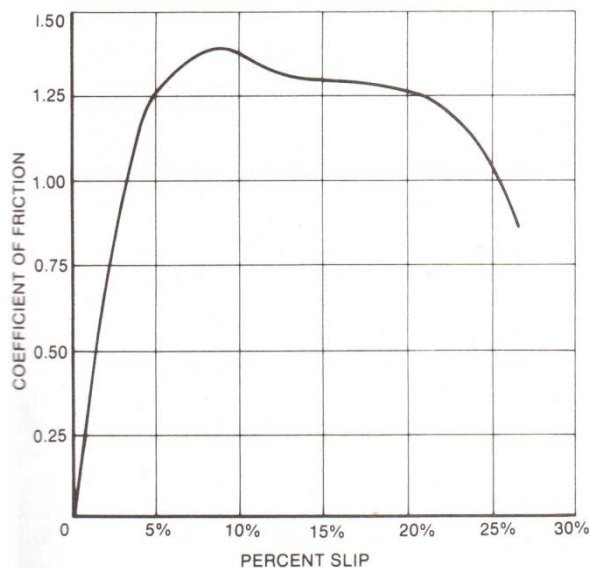
Kilparenkaat toimivat yleensä pienemmillä sortokulmilla kuin tavalliset renkaat. Kilparenkaat ovat leveitä, matalaprofiilisia ja jäykkärunkoisia. Nämä ominaisuudet vastustavat renkaan kiertymistä, jolloin sortokulmat pysyvät pienempinä. Pieni sortokulma tuottaa myös vähemmän lämpöä. Tämä on hyvä ominaisuus, koska tällöin renkaassa voidaan käyttää pehmeämpää kumiseosta. Pehmeämpi kumiseos tuottaa taas enemmän pitoa. (Smith 1978, 16.)

Sortokulma vaikuttaa kitkakertoimen suuruuteen. Sortokulman kasvaessa myös kitkakerroin kasvaa, kunnes kitka saavuttaa tietyssä pisteessä raja-arvonsa. Tämän raja-arvon jälkeen kitkakerroin alkaa laskea ja pito loppuu. Kilparenkaassa ihanteellinen tilanne olisi, että kitkakerroin saavuttaisi huippuarvonsa jo pienellä sortokulmalla, koska silloin saadaan maksimaalinen kaarrepito nopeasti aikaan. Tämän jälkeen kitkakertoimen tulisi pysyä lähes samana mahdollisimman laajalla sortokulma-alueella, jonka jälkeen se alkaisi hitaasti laskea. Tällöin maksimipito on käytössä laajalla alueella ja pito heikkenee ilman yllätyksiä. (Smith 1978, 15.)

5.7.3 Luistosuhde

Luistosuhteella on pituussuunnassa samanlainen vaikutus kitkakertoimeen kuin sortokulmalla vaakasuunnassa. Kiihdytyksen ja jarrutuksen aikana pieni määrä luistoa kasvattaa renkaan pitoa tiettyyn rajaan asti. Rengas ei kuitenkaan saa silminnähden luistaa, koska silloin raja on jo ylittynyt ja pito alkaa laskea huomattavasti. Jokaiselle renkaalle on määritelty oma tietty luistosuhde, jolla suurin kitkakerroin saavutetaan. Englanninkielessä luistosuhteelle käytetään nimitystä slip ratio tai percent slip. (Smith 1978, 17.)

Kuviossa 12 on esitetty tietyn renkaan kitkakertoimet eri luistosuhteilla, josta nähdään, että kyseisellä renkaalla maksimi kitkakerroin saavutetaan 8 % luistosuhteella.

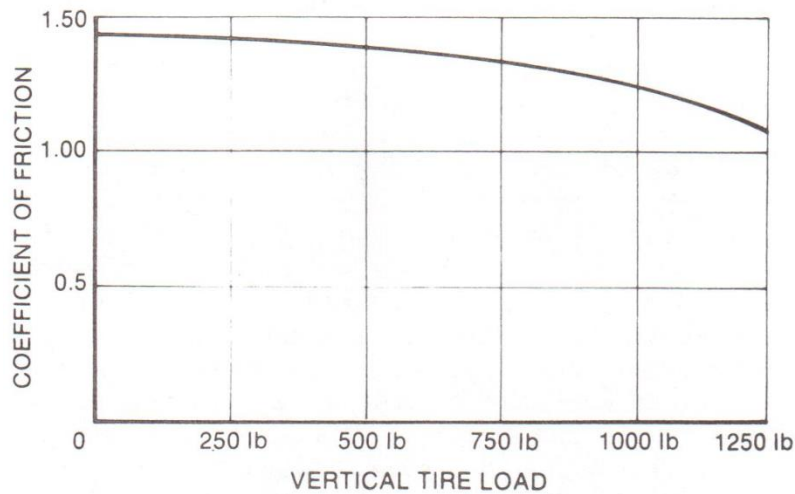


Kuvio 12. Esimerkki luistosuhteen vaikutuksesta renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 17).

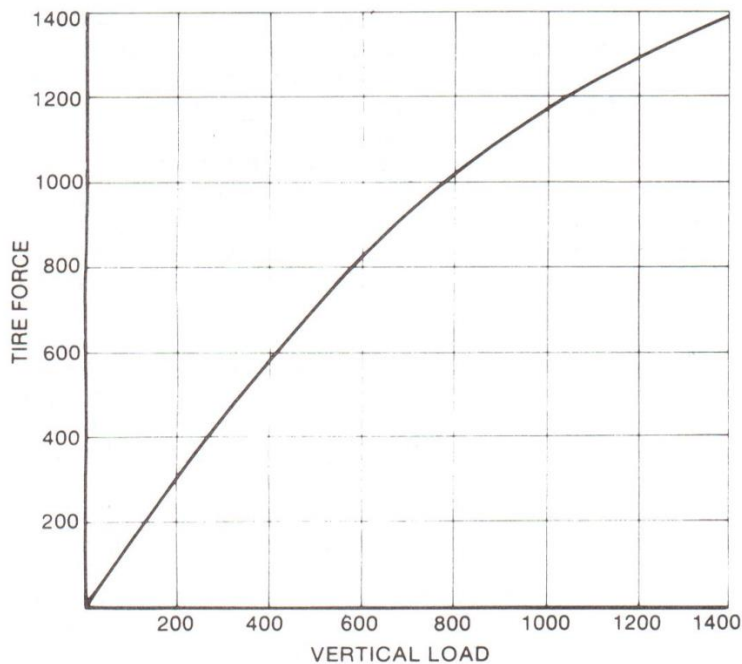
5.7.4 Pystysuuntainen kuorma

Pystysuuntaisella kuormalla tarkoitetaan yksittäiselle renkaalle kohdistuvaa kuormaa, joka on kohtisuorassa tienpintaan nähden. Pystysuuntaisen kuorman kasvaessa renkaan kitkakerroin laskee hieman (kuvio 13). Kitkakertoimen laskeminen on kuitenkin niin vähäistä, että todellisuudessa yksittäisen renkaan tukivoima kasvaa pystysuuntaisen kuorman lisääntyessä (kuvio 14). Pystysuuntainen kuorma

kuitenkin vaihtelee koko ajan yksittäisellä renkaalla, johtuen painonsiirrosta eri ajo-tilanteissa. (Smith 1978, 17–18.)



Kuvio 13. Pystysuuntaisen kuorman vaikutus renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 17).



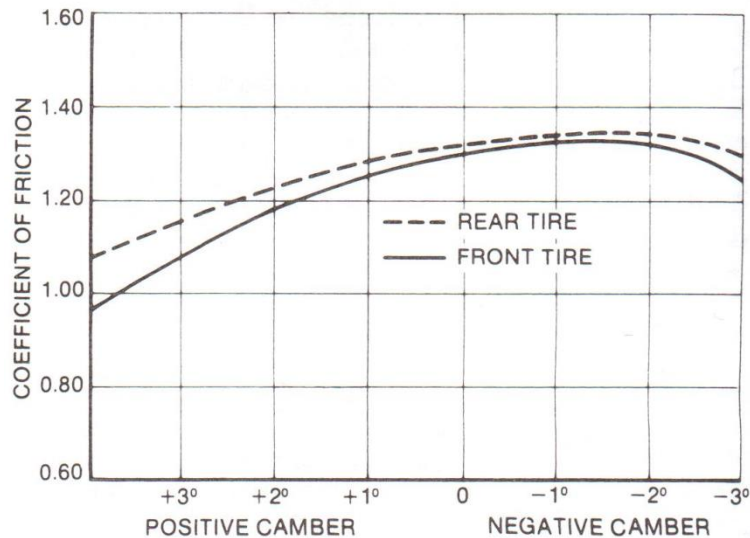
Kuvio 14. Renkaan tuottaman tukivoiman muutos pystysuuntaisen kuorman vaikutuksesta (Smith 1978, 18).

Kokonaispidon kannalta pystysuuntaisen kuorman lisääminen yksittäisellä renkaalla on kuitenkin huono asia. Kuten jo sivuttaisen painonsiirron yhteydessä tuli esille, ulkokaarten puoleisen renkaan kuormituksen lisääntyessä sisemmän renkaan kuormitus laskee. Tällöin renkaiden kokonaissivuttaispito todellisuudessa laskee.

Pidon lisäämiseksi, renkaiden on lisättävä sortokulmaa. Jos sortokulman lisääntyminen tapahtuu eturenkailla, auto pyrkii aliohjautumaan. Jos sortokulman kasvaminen tapahtuukin takarenkailla, auto yliohjautuu. (Gillespie 1992, 210–211.)

5.7.5 Camberin vaikutus renkaaseen

Camber-kulman muuttuessa suhteessa tien pintaan muuttuu myös renkaan kitkakerroin. Yleisesti ottaen maksimi kitkakerroin saavutetaan hieman negatiivisella camber-kulmalla. Tämä aiheutuu pyörivän renkaan kosketuspinnan reunakaaren suoristumisesta. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä camber thrust eli camber-sivuttaisvoima. Negatiivisella camber-kulmalla tämä voima vaikuttaa kaarteeseen keskipistettä kohti lisäten pitoa. Vastaavasti positiivisella camber-kulmalla voima osoittaa vastakkaiseen suuntaan, jolloin se heikentää pitoa. Camber-kulmien kohdalla on tärkeä huomata, että käytettäessä liian suurta kulmaa, renkaan kosketuspinta tiehen pienenee, koska renkaan toinen reuna nousee irti tien pinnasta. Tämä taas johtaa pidon heikkenemiseen. Nykyajan renkaiden runkorakenne on suunniteltu siten, että se joustaa hallitusti. Tämän vuoksi renkaan kosketuspinta pysyy lähes samana kauan aikaa, vaikka camber-kulmaa kasvatetaan. Kuviossa 15 on esitetty camber-kulman vaikutus tietyn renkaan kitkakertoimeen. (Smith 1978, 18.)



Kuvio 15. Camber-kulman vaikutus renkaan kitkakertoimeen (Smith 1978, 18).

5.8 Jouset ja jousijäykkyys

Jousien avulla saadaan ehkäistyä tienpinnan epätasaisuuksista aiheutuvaa renkaiden pyrkimystä irrota tienpinnasta. Jouset pitävät renkaan kosketuspinnan ja tienpinnan välisen kosketuksen mahdollisimman pysyvänä, jolloin renkaiden pito saadaan pidettyä mahdollisimman hyvänä eri ajotilanteissa. Jousilla on myös suuri merkitys korin kallisteluun niin pitkittäis- kuin poikittaissunnassakin. Jousien jäykkyyttä muuttamalla voidaankin muuttaa auton kallisteluominaisuuksia. Yleisin käytössä oleva jousityyppi on kierrejousi. Kierrejousen hyviin ominaisuuksiin kuuluu kevyt ja vähän tilaa vievä rakenne. Kierrejousi on myös helppo tehdä progressiiviseksi. Progressiivisen jousen jäykkyyserroin kasvaa, kun jouta puristetaan kaasaan. (Smith 1978, 64; Mauno 2002, 56.)

Jousien jäykkyys vaihtelee eri käyttötarkoitusten mukaan. Tavallisissa henkilöautoissa jousien jäykkyys määräytyy hyvin pitkälle ajoturvallisuuden ja ajomukavuuden mukaan. Tämän vuoksi henkilöautojen jouset eivät yleisesti ole kovinkaan jäykkiä. Kilpa-autoissa jousien jäykkyydet ovat huomattavasti suurempia, koska suurilla nopeuksilla liian pehmeä jousi ei kykene painamaan rengasta riittävän hyvin tienpintaa vasten. Renkaan irtoaminen tienpinnasta merkitsee pidon heikkenemistä. Jousen jäykkyyden kuvaamiseen käytetään jäykkyyserrointa. Jäykkyyserroimen yksikköinä käytetään yleisesti joko N/mm tai lbs/in. Jousen jäykkyydeksi

voidaan ilmoittaa esimerkiksi 300 N/mm. Tällöin tarvitaan 300 Newtonin voima, että josta saadaan puristettua kokoon yksi millimetri. Yksikkö lbs/in tarkoittaa paunaa/tuuma ja esimerkiksi 400 lbs/in on sama asia kuin 70 N/mm. (Mauno 2002, 56–60.)

Kun auton jousijäykkyyttä ollaan muuttamassa, on tärkeää huomata, että jäykkyys renkaan kohdalla (engl. wheel rate) ei ole sama kuin jousijäykkyys. Tämä johtuu pyöräntuennan vipusuhteesta. Vipusuhteesta johtuen renkaan kohdalle muodostuva jäykkyys on pienempi kuin jousen jäykkyys. Samasta syystä johtuen rengas liikkuu pystysuunnassa enemmän kuin jousi venyy tai puristuu kokoon. Poikittaisessa kaksoistuennassa, renkaan kohdalla oleva jäykkyys voidaan laskea kaavalla 7. (Mauno 2002, 60–61; Smith 1978, 66.)

$$P = \frac{J}{\left(\frac{A}{B}\right)^2} \quad (7)$$

jossa P on renkaan kohdalla oleva jäykkyys

J on jousen jäykkyys

A on alapallonivelen etäisyys alatukivarren sisemmästä kiinnityspisteestä

B on jousen keskipisteen etäisyys alatukivarren sisemmästä kiinnityspisteestä

A/B on pyöräntuennan vipusuhte

Legends-luokassa käytetyt jouset ovat tavallisia lineaarisia kierrejousia. Legendseissä voidaan käyttää jäykkyydeltään erilaisia jousia, mutta niiden pituus saa olla enintään 10 tuumaa. Säännöt myös määräävät, että yhtä iskunvaimenninta kohden on sallittua käyttää vain yhtä joustia. (Legends Trophy sääntökirja 2013.)

5.9 Iskunvaimentimet

Iskunvaimentimen tehtävänä on vaimentaa jousen liikettä korin heilahdellessa edestakaisin. Iskunvaimennin sitoo jousen liike-energian lämpöenergiaksi, joka lopulta haihtuu ilmaan. Iskunvaimentimien on vaimennettava jousen liikkeitä sekä sisään- että ulosjouston aikana, jotta korin ja jousituksen liikkeet saadaan halutunlaisiksi. Käyttötarkoituksesta riippuen sisään- ja ulosjouston vaimennuksen suhde vaihtelee suuresti. Henkilöautoissa käytetään yleensä ulosjoustossa suurempaa vaimennusta kuin sisäänjoustossa sen tuoman paremman ajomukavuuden vuoksi. Kilpa-autoissa taas käytetään usein samansuuruisia vaimennusta sekä sisään- että ulosjoustossa. (Mauno 2002, 69–70.)

Rakenteeltaan iskunvaimennin voi olla joko yksi- tai kaksiputkinen. Molempien rakennetyyppien toiminta perustuu iskunvaimentimen sisällä olevan nesteen virtausvastukseen. Nesteen virtausta vastustavat pienet virtausaukot, joiden läpi neste kulkee sisään- ja ulosjouston aikana. Yksiputkisessa vaimentimessa virtausaukkoja on pelkästään männässä, joiden kautta neste pääsee kulkemaan männän ala- tai yläpuolelle sisään- ja ulosjouston aikana. Kaksiputkisessa vaimentimessa on kaksi sisäkkäistä putkea, jotka ovat yhteydessä toisiinsa vaimentimen alaosaan olevan pohjaventtiilin välityksellä. Sisäänjouston aikana nestettä pääsee virtaamaan männän virtausaukkojen läpi männän yläpuolelle ja pohjaventtiilin kautta myös ulommalle putkelle, jonka sisällä on osaksi myös ilmaa. Ulosjouston aikana virtaussuunnat ovat päinvastaiset. Kilpa-autoilussa on käytössä molempien rakennetyyppien iskunvaimentimia. Pitkiä joustoliikkeitä tarvitsevilla lajeilla, kuten rallissa, yksiputkiset vaimentimet ovat yleisemmin käytössä. Ratapuolella on vastavasti monesti käytössä kaksiputkisia vaimentimia, joiden sisään- ja ulosjouston vaimennusta voidaan säätää erikseen. (Mauno 2002, 70–74.)

Kilpa-autopuolella iskunvaimentimien vaimennusvoima määräytyy kuljettajan mielipiteiden mukaan. Joitain yleisiä ohjeita sopivan vaimennusvoiman määrittämiseen voidaan kuitenkin antaa. Liian jäykällä sisäänjoustolla auton kori nousee töyssyissä voimakkaasti ylöspäin, jolloin myös renkaat irtoavat helposti tienpinnoista. Liian pehmeällä sisäänjoustolla jousitus vastaavasti pohjaa helposti. Ulosjoustotilanteessa liian suuri jäykkyys aiheuttaa sen, että jousi ei jaksa työntää rengasta takaisin tienpintaa vasten riittävän nopeasti, jolloin rengas ei ole kosketuksessa

tiempinnan kanssa. Liian pieni vaimennus ulosjoustossa aiheuttaa renkaan pomp-pimista ja auton vaeltelua. Kun sopivia iskunvaimentimien säätöjä etsitään testeis-sä, kannattaa testaaminen aloittaa siten, että sekä sisään- että ulosjouston vai-mennukset ovat pienimmillään. Jäykkyyksiä kasvatetaan asteittain kunnes paran-nusta ajotuntumaan ei enää tapahdu tai muutosta edelliseen säätöön verrattuna ei huomaa. (Mauno 2002, 74–76.)

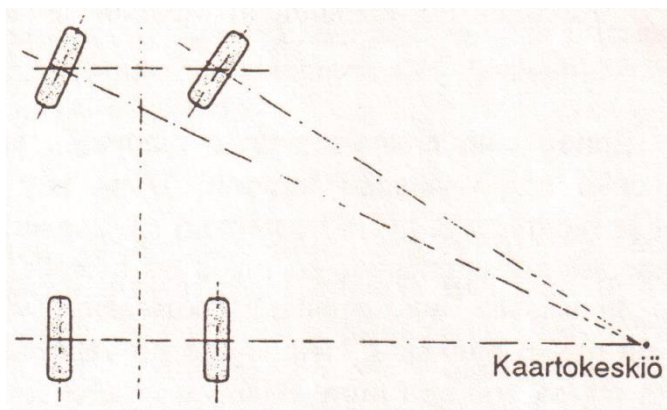
Legendsien kohdalla iskunvaimentimien ominaisuuksiin ei voida suuresti vaikuttaa, koska luokassa on sallittua käyttää vain tiettyjä INEX-hyväksytyjä Bilstein-merkkisiä iskunvaimentimia, joiden jäykkyyttä ei voi säätää. Säännöt myös kieltä-vät nesteiden vaihtamisen iskunvaimentimiin. Ainoat sallitut toimenpiteet iskun-vaimentimille on, että ne voidaan asentaa ylösalaisin ja takaiskunvaimentimien yläpäähän kiinnitys voi olla rungon ulko- tai sisäpuolella. (Legends Trophy sääntökir-ja 2013.)

6 OHJAUSGEOMETRIA JA -OMINAISUUDET

Kuljettaja voi hallita ajoneuvon liikkeitä pelkästään ohjausjärjestelmän avulla. Tämän vuoksi ohjausjärjestelmän tulisi vastata kuljettajan ohjausliikkeisiin täsmällisesti ja johdonmukaisesti. Kuljettajan tekemät ohjausliikkeet eivät kuitenkaan välity renkaille asti sellaisenaan, vaan ne muuttuvat jousitus- ja ohjausgeometrian vaikutuksesta. Geometrioista johtuen ajoneuvolla on taipumus ohjautua myös jouston tai kallistelun vaikutuksesta, ilman että kuljettaja tekee ohjausliikettä. Ohjausjärjestelmän ominaisuuksiin voidaan kuitenkin vaikuttaa hyvällä geometrioiden suunnittelulla. (Gillespie 1992, 275; Smith 1978, 60–61.)

6.1 Ackermann-ohjaus

Ackermann-ohjauksen ideana on, että kaarteessa sisempi eturengas kääntyy enemmän kuin ulompi eturengas. Tällöin renkaat voivat kulkea omia kääntösäteitään ilman, että ne sortavat tai luistavat. Täydellinen Ackermann-ohjaus on toteutunut silloin, kun jokaisen renkaan kaartokeskiö on samassa pisteessä. Tällöin renkaista piirretyt kohtisuorat leikkaavat toisensa samassa pisteessä (kuvio 16). (Mauno 2002, 78.)

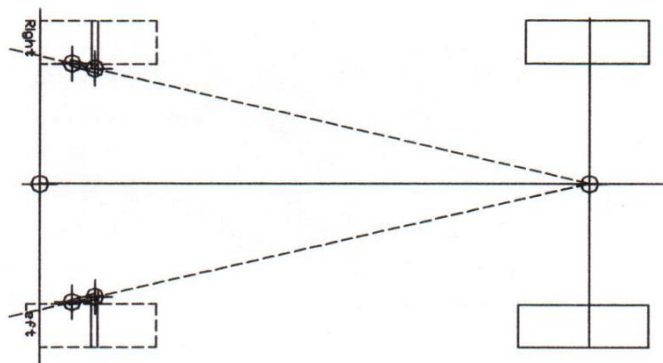


Kuvio 16. Ackermann-ohjauksen periaate (Mauno 2002, 79).

Ackermann-ohjausta käytetään yleisesti henkilöautoissa, koska pienillä nopeuksilla renkaissa ei tapahdu sortoa, jolloin renkaat kuluvat tasaisesti ja auton kääntyvyys on jyrkissä käänöksissä hyvä. Suurilla nopeuksilla renkaiden kaartokeskiöt eivät kohtaa enää samassa pisteessä renkasiin muodostuvien sortokulmien vuok-

si. Lisäksi kaarteissa tapahtuva painonsiirto muodostaa ulommalle eturenkaalle sisempää rengasta suuremman sortokulman. Jos ohjauksessa käytetään Ackermann-ominaisuutta tällaisessa tilanteessa, sisempi eturengas kääntyy ulompaa enemmän, jolloin myös sen sortokulma suurenee. Sisemmän renkaan sortokulman kasvaessa liiaksi se alkaa vastustaa auton liikettä. Sisemmän renkaan sortokulman pienentämiseksi Ackermann-ominaisuutta on vähennettävä. Tämän vuoksi kilpa-autojen molemmat eturenkaat säädetään usein kääntymään yhtä paljon. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää jopa anti-Ackermann-ohjausta, eli ulompi eturengas kääntyy sisärenkasta enemmän. (Mauno 2002, 78–79.)

Ackermann-ominaisuuden suuruutta voidaan kuvata olkavarsista piirrettyjen jatkeiden perusteella. Ohjauksessa on 100 % Ackermann-ominaisuus, mikäli olkavarsien jatkeet leikkaavat toisensa taka-akselin keskipisteessä (kuvio 17). Ominaisuuden suuruutta voidaan muuttaa esimerkiksi siirtämällä hammastangon paikkaa auton pituussuunnassa. Muutos voidaan toteuttaa myös muuttamalla raidetangon kiinnityspisteen paikkaa pituussuunnassa olkavarressa. Tämä tapa on mahdollinen myös Legendseissä. (Rowley 2011, 7/20–21.)



Kuvio 17. 100 % Ackermann-ominaisuus (Rowley 2011, 7/20).

Ackermann-ominaisuuden suuruudelle on hankalaa määrittää tiettyä oikeaa arvoa, koska siihen vaikuttavia tekijöitä on useita. Tämän vuoksi käytetyt arvot ovat aina kompromisseja, jotka määräytyvät muun muassa akselivälin, raidevälin, renkaan ominaisuuksien sekä kaarteiden säteen perusteella. On myös muistettava, että tietylle kaarteiden säteelle asetettu Ackermann-arvo ei ole oikea arvo millekään muulle säteelle, vaikkakin kaarteiden säteen suurentuessa Ackermann-ominaisuuden merkitys vähenee. (Rowley 2011, 7/19–20.)

6.2 Bump steer

Bump steer eli sisäänjousto-ohjaus tarkoittaa renkailla tapahtuvaa aorauskulman muutosta joustoliikkeiden aikana, ilman että rattia käännetään. Etuakselilla tämä aiheutuu ohjauksen ja pyöräntuennan geometrioiden eroista. Taka-akselilla tämä aiheutuu pelkästään pyöräntuennan geometriasta. Sisäänjousto-ohjaus ei ole aina toivottu ominaisuus, mutta oikein käytettynä sillä voidaan parantaa auton ominaisuuksia. Aorauskulmamutoksen suunnasta riippuen, auton käytöstä voidaan muuttaa joko ali- tai yliohjaavaan suuntaan. Kummankaan akselin kohdalla aorauskulman muutos ei mielellään saisi tapahtua harittavaan suuntaan. Etupäässä voimakkaasti haritukselle muuttuva aorauskulma aiheuttaa yliohjautuvuutta kaarteissa sekä levottoman käytöksen jarrutuksissa. Kulman muuttuminen auraavampaan suuntaan on suotuisampaa, koska silloin ei synny edellä mainittuja ongelmia, vaan ohjaus pysyy vakaana eri ajotilanteissa. Takapäässä aorauskulman muuttuminen haritukselle lisää kiihdytyksestä aiheutuvaa yliohjautumista. Yleisesti bump steer ominaisuus tulisi kuitenkin pitää niin vähäisenä kuin mahdollista. (Mauno 2002, 80–82; Smith 1978, 62–63.)

Etupäässä bump steer ominaisuus saadaan minimoitua kun joustoliikkeen aikana raidetangonpään piirtämä kaari on mahdollisimman yhdensuuntainen renkaan keskikohdan piirtämän kaaren kanssa. Ominaisuuden määrän säätäminen voidaan toteuttaa liikuttamalla hammastankoa tai raidetangon ulompaa niveltä pituussuunnassa. Erillistuennalla varustetun taka-akselin sisäänjousto-ohjaukseen voidaan vaikuttaa tukivarsien geometrialla. On myös hyvä muistaa, että muun muassa caster-kulmalla on merkitystä ominaisohjaukseen. Jäykällä taka-akselilla joustoliikkeiden aikana tapahtuvista aorauskulman muutoksista ei tarvitse huolehtia. (Rowley 2011, 7/9; Smith 1978, 62.)

6.3 Roll steer

Roll steer tarkoittaa korin kallistelun aikana tapahtuvaa auton itseohjautuvuutta. Tätä voidaan kutsua myös kallistusohjaukseksi. Kallistusohjauksen muodostavia syitä ovat camber-kulman muutoksesta syntyvät sortokulman muutokset, aorauskulmamutokset, korin massahitaus sekä jousitusgeometria. Kallistusohjauksella

ei olisi vaikutusta, jos koko kaarre voitaisiin ajaa läpi staattisessa tilanteessa, jossa painonsiirto on tapahtunut ja renkaiden sortokulmat pysyvät muuttumattomina. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista tiessä olevien epätasaisuuksien sekä autossa jatkuvasti muuttuvan kiihtyvyyden ja hidastuvuuden vuoksi, jolloin edellä mainitut asiat muuttuvat koko ajan. Näiden muutosten hyvällä hallinnalla auton käsiteltävyys saadaan paremmaksi ja johdonmukaisemmaksi. Kallistusohjauksen määrää voidaan vähentää alentamalla auton painopistettä, massaa ja korin massahitautta sekä muuttamalla jousitusgeometriaa ja vähentämällä bump steer ominaisuutta. (Smith 1978, 63.)

Jäykän taka-akselin alempien tuentalinkkien kiinnityspisteiden korkeuksilla on suuri merkitys akselin itseohjautuvuusominaisuuksiin. Kun etukiinnityspiste on takakiinnityspistettä korkeammalla ja autolla käännetään vasemmalle, kori kallistuu oikealle. Tällöin oikeanpuoleinen rengas siirtyy taaksepäin, aiheuttaen akselin kääntymisen oikealle. Oikean takarenkaan aorauskulma muuttuu haritukselle, joka aiheuttaa voimakkaan yliohtautumisen. Jos etukiinnityspiste lasketaan takakiinnityspistettä alemmaksi, tilanne muuttuu päinvastaiseksi aiheuttaen aliohtautumista. Kun kiinnityspisteet ovat samalla korkeudella, itseohjautuvuutta ei tapahdu. (Rowley 2011, 8/20–21.)

7 GEOMETRIAN TUTKIMINEN

Alustageometrian tutkiminen suoritettiin alustageometrian suunnitteluun tarkoitettulla ohjelmalla. Ohjelman käyttämiseksi tutkittavan ajoneuvon alustan osat täytyy ensin mitoittaa tarkasti. Ohjelma tarvitsee esimerkiksi tukivarsien sekä ohjauksen osien kiinnityspisteiden mitoittamisen x-, y- ja z-suunnassa valittuun nollapisteeseen nähden. Koska ohjelma laskee tulokset syötettyjen mittojen perusteella, saatujen tulosten tarkkuus ja todenmukaisuus on suoraan yhteydessä suoritettujen mittausten tarkkuuteen. Tämän vuoksi ajoneuvoon suoritettavat mittaukset on tehtävä huolellisesti. Tämän työn kohdalla mittaukset suoritettiin täysin kilpailukunnossa olevalle ajoneuvolle, joka mitattiin vain toiselta puolelta ja saadut mitat kopioidiin myös toiselle puolelle.

7.1 WinGeo3-ohjelma

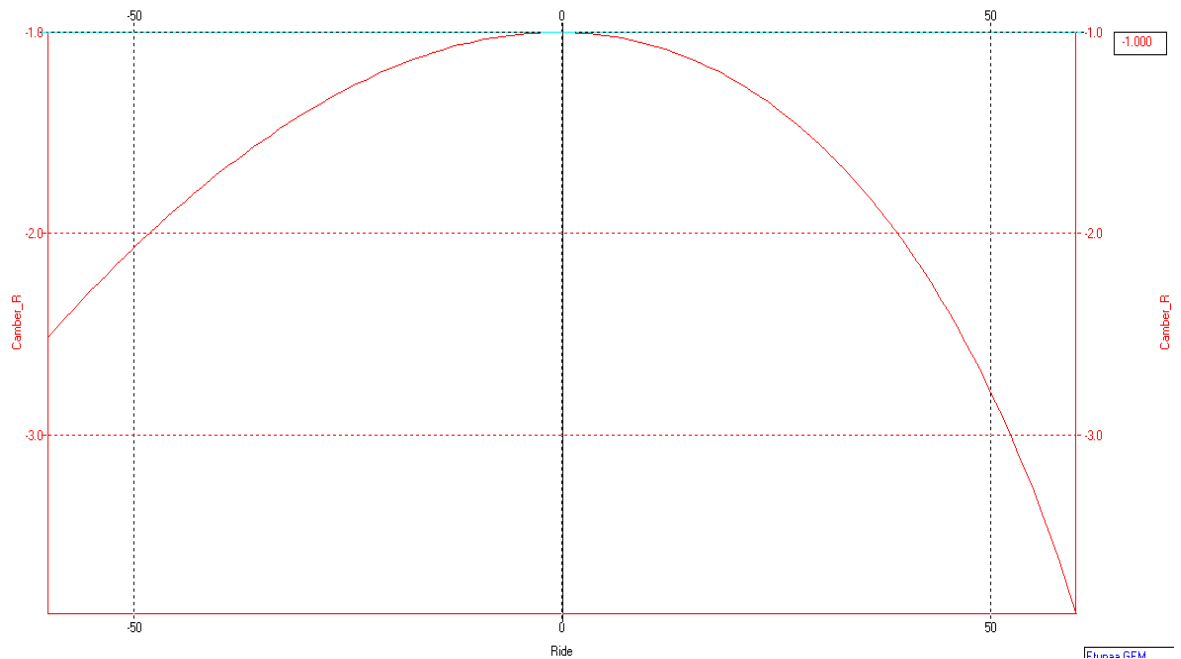
WinGeo3 on kolmiulotteinen autojen alustan tutkimiseen ja suunnittelemiseen tarkoitettu tietokoneohjelma. Sen on kehittänyt Yhdysvaltalainen matemaatikko Bill Mitchell. Ohjelman ensimmäisen version tekeminen alkoi jo vuonna 1983. Ohjelma valmistui vuonna 1985, jolloin se myös tuli myös myyntiin. Ohjelmaa on kehitetty jatkuvasti vuosien varrella ja sitä on julkaistu eri nimillä. Nykyinen Windows-pohjainen WinGeo3-niminen ohjelma julkaistiin vuonna 1999. Tämän jälkeen ohjelmaa on paranneltu ja päivitetty säännöllisesti käyttäjiltä tulleiden palautteiden ja tarpeiden perusteella. (Mitchell 2010, i.2.)

Ohjelma sisältää valmiita pohjia useimmista olemassa olevista jousituksen eri tuentatyypeistä, joihin voidaan mallintaa oma tutkimuksen kohde. Ohjelmalla voidaan tutkia sekä erillistuennalla varustettujen akseleiden että jäykkien akseleiden ominaisuuksia ja käyttäytymistä. Ohjelmalla on mahdollista simuloida erilaisia ajo-tilanteita esimerkiksi kallistamalla auton koria, kääntämällä ohjauspyörää tai liikuttamalla jousitusta ylös- tai alaspäin. Näin saadaan tehtyä kokonaisvaltaisempia analyysejä tuennan geometriasta ja auton käyttäytymisestä. Ohjelma on erittäin hyödyllinen apuväline alustan suunnitteluun ja tutkimiseen, mutta se vaatii paljon

tietoa myös suunnittelijalta, koska ohjelma ei kerro suoraan, millainen on hyvä alusta tai miten sitä pitäisi muuttaa.

7.2 Etupään geometria

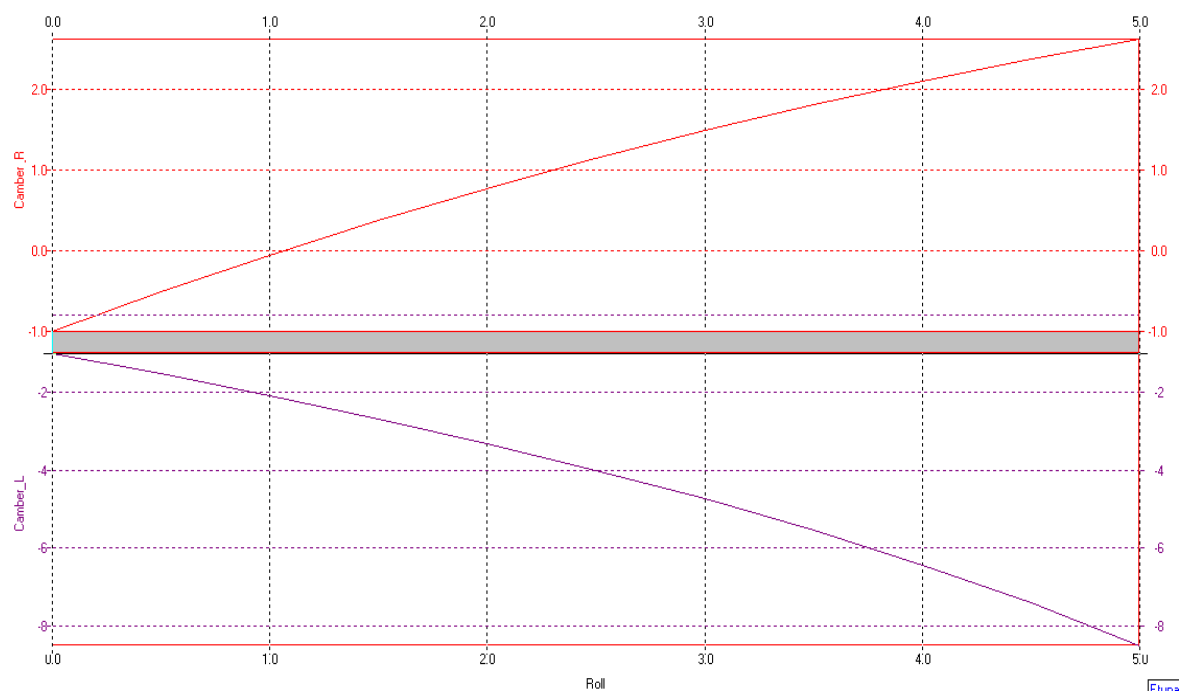
Camber. Kuvio 18 on nähtävissä camber-kulmassa tapahtuva muutos jouston aikana niillä säädöillä, joissa auto oli mittaushetkellä. Tässä tilanteessa staattiseksi camber-kulmaksi on asetettu -1° . Kuvio 18 osoittaa, että maavaran laskiessa 50 mm negatiivinen camber lisääntyy noin $1,1^\circ$. Muutos ei ole kovinkaan suurta, mutta huomiotavaa on, että vastaavasti maavaran kasvaessa muutosta tapahtuu huomattavasti enemmän samaan suuntaan.



Kuvio 18. Camber-kulman muuttuminen ajokorkeuden muuttuessa.

Kilpa-autoilun kannalta mielenkiintoisempaa on kuitenkin tutkia camberin muuttumista kaarteissa eli korin kallistuessa. Edellä mainituilla säädöillä ulkokaarten puoleisen renkaan camber-kulma kääntyy positiiviselle jo hieman yli 1 asteen korin kallistumisella (kuvio 19). Tämä ei ole hyvä tilanne renkaan maksimaalisen pidon kannalta, koska renkaan pitopinta ei ole kokonaan käytössä enää tätä suuremmalla kallistumisella. Sisäkaarten renkaan voimakas negatiivisen camberin lisääntyminen aiheuttaa saman tilanteen. Tämä ei kuitenkaan ole yhtä merkityksellinen asia, koska kaarteissa sisärenkaalla ei ole niin paljon kuormitusta painonsiirrosta

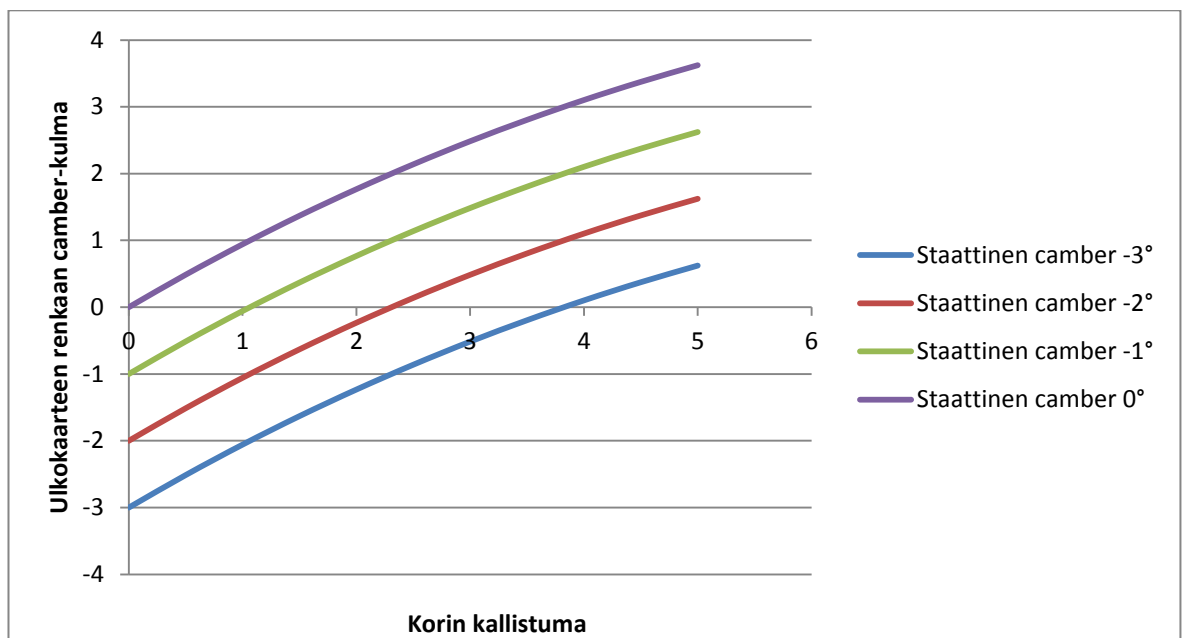
johtuen. Positiivinen asia on, että molemmilla renkailla tapahtuvat muutokset ovat tasaisia. Tilanne olisi huonompi, jos muutosnopeus jyrkkenisi jossain kohdassa äkisti, jolloin tulitaisiin tilanteeseen, jossa renkaiden pito heikkenee äkillisesti. Tämä taas johtaisi auton ennalta arvaamattomaan käytökseen. Myös ohjauspyörän kääntämisen vaikutusta camberiin tutkittiin. Kun kallistelun lisäksi ohjauspyörää käännetään 20 astetta, tällä ei ole vaikutusta camber-muutokseen, vaan tässäkin tapauksessa tulokset ovat edellä kuvatun kaltaista. Liitteestä 1 on nähtävissä kuormitetun renkaan camberin muutos korin kallistuessa, kun lisäksi ohjauspyörää käännetään 20 astetta ja jousitus on painunut kasaan 20 millimetriä.



Kuvio 19. Camber-kulman muuttuminen korin kallistuessa.

Camber-kulman muutokseen on mahdollista vaikuttaa käyttämällä säännöissä sallittuja väliholkkeja tukivarsien kiinnityspisteissä. Esimerkiksi tukivarsien takimmaisista kiinnityspisteistä ovat rungossa siten, että holkkien vaihto muuttaa tukivarren kiinnityspistettä pituus- ja leveyssuunnassa. Tämä muuttaa caster-kulmaa, jolloin myös camber-kulmassa tapahtuu muutosta. Holkit muuttavat kiinnityspisteen paikkaa kuitenkin niin vähän, että pelkästään niiden vaihtamisella ei kuitenkaan ole juuri minkäänlaista vaikutusta camberin muutosnopeuteen. Joustossa tapahtuvaan camber-muutokseen yksittäisen holkin vaihdolla on vaikutusta alle 0,1 astetta 50 mm sisään- ja ulosjoustossa, joten muutos on hyvin marginaalinen (liite 2). Caster-kulman suurentamisella saadaan yleisesti kasvatettua camber-muutosta. Casteria

lisäämällä kallistelusta aiheutuvia camber-muutoksia positiiviseen suuntaan voidaan siis hidastaa, mutta pelkkien holkkien vaihdolla se on hyvin vähäistä. Kuvios-
ta 20 nähdään ulkokaarten renkaan camber-kulman kehittyminen korin kallistu-
essa $\frac{1}{2}$ "-holkin ollessa kiinnitettyinä. Liitteessä 3 on esitetty muiden holkkien vai-
kutukset kallistelussa tapahtuvaan camber-muutokseen. Tästä nähdään, että holkki-
en vaihdolla ei ole juuri mitään vaikutusta. Jos ylätukivarsien takimmaista kiinni-
tyspistettä muutettaisiin korkeussuunnassa, muutosta tapahtuisi hieman enem-
män. Tässäkin tapauksessa korkeutta jouduttaisiin muuttamaan useita kymmeniä
millimetrejä ennen kuin huomattavaa muutosta tapahtuisi. Säännöt eivät kuiten-
kaan salli tällaista muutosta.

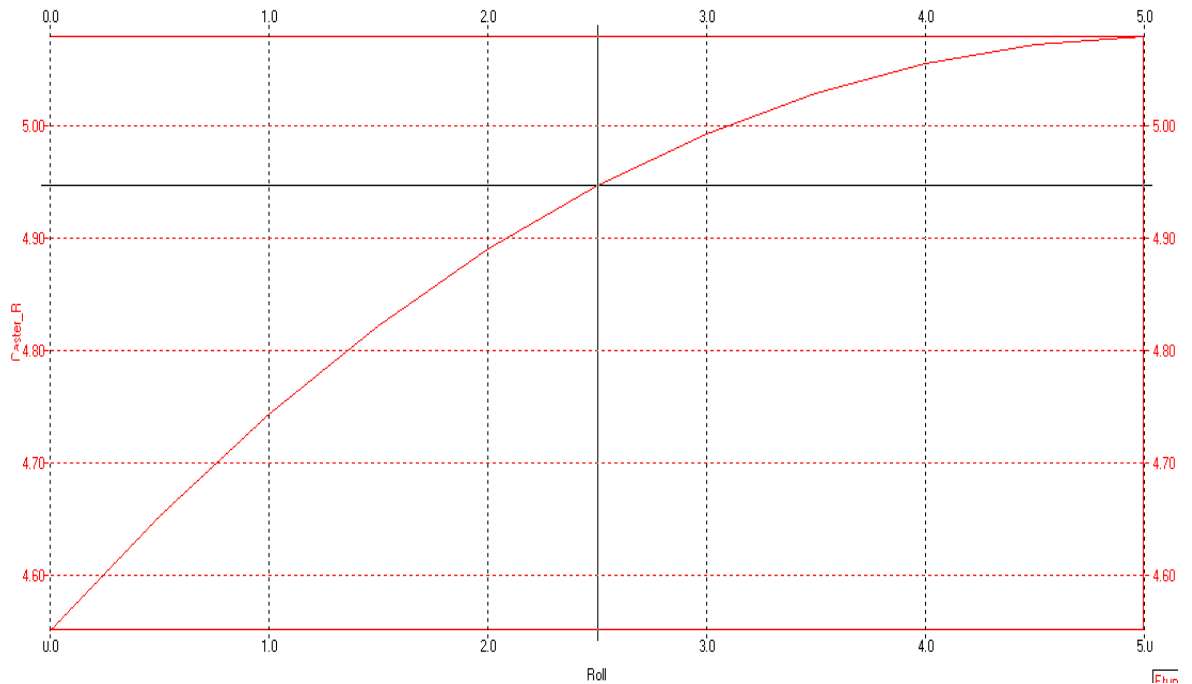


Kuvio 20. Ulkokaarten renkaan camber-kulman muuttuminen korin kallistuessa ja $\frac{1}{2}$ " holkin ollessa kiinnitettyinä.

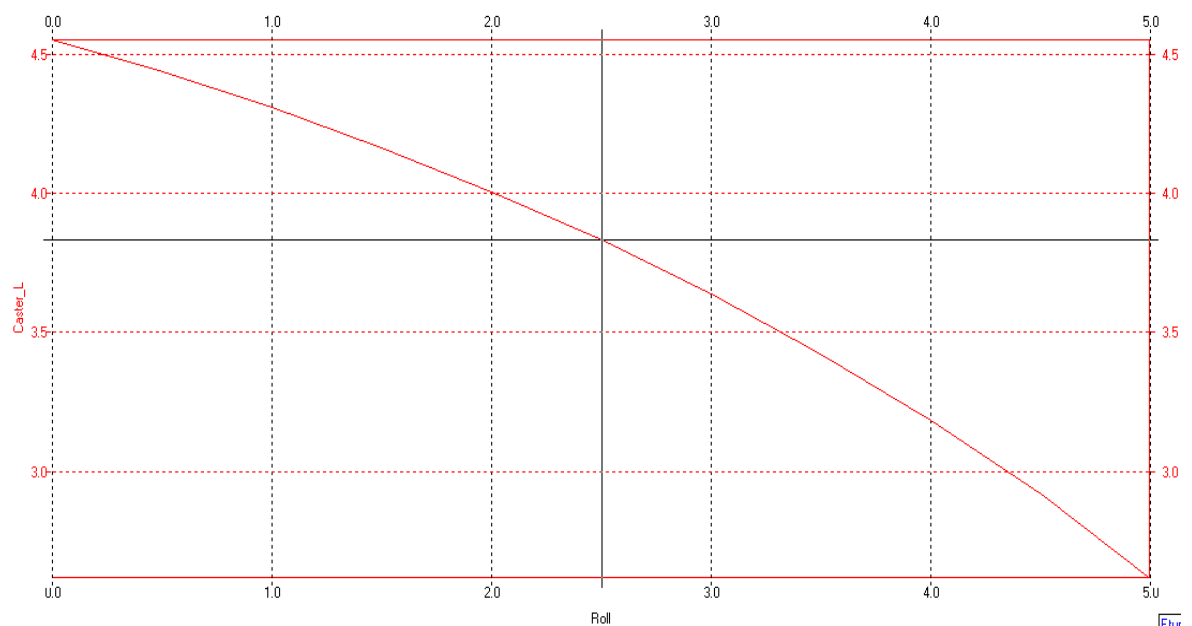
Toinen mahdollisuus muuttaa camber-käyttäytymistä on liikuttaa ylä- ja alapal-
lonivelten paikkaa, jolloin tukivarsien pituus muuttuu. Tässäkin vaihtoehdossa
muutokset ovat minimaalisia. Tuomalla alapalloniveltä 130 mm ulospäin auton
keskilinjalta saadaan vain noin $0,1^\circ$ negatiivisen camberin lisäys 50 millimetrin si-
säänjoustolla (liite 5). Maavaran noustessa muutos on huomattavasti suurempaa.
Edellä mainitulla asetelmalla, negatiivinen camber vähenee 50 mm maavaran nos-
tolla noin 1° verran alkuperäisiin säätöihin verrattuna. Vähäisellä korin kiertymisel-
lä tällä säädöllä ei ole niinkään merkitystä. Vasta suuremmalla korin kiertymisellä
saadaan hieman muutosta aikaan (liite 5). Jo 20 mm lyhyemmällä ylätukivarrella

puolestaan saavutetaan vastaavanlaiset tulokset, joten sen pituuden muuttaminen on merkityksellisempi tekijä.

Caster. Tutkittavassa ajoneuvossa caster-kulma on tällä hetkellä positiivisella noin $4,6^\circ$. Tämä on mielestäni ihan hyvä arvo ja se on hyvin linjassa yleisesti autoissa käytettyjen 1° – 5° :n välillä. Tällä casterin määrällä saadaan autolle hyvin suuntavakautta ja ajotuntumaa suorille. Suuntavakaus on Legendseille erittäin tärkeä seikka, niiden lyhyen akselivälin ja nopean ohjauksen vuoksi. Casterin lisäämisellä saataisiin ulkokaarten puoleisen renkaan camber-kulman muuttuminen parempaan suuntaan, jolloin voitaisiin käyttää myös pienempiä staattisen camberin arvoja. Tässä on kuitenkin vaarana, että ohjaus muuttuu liian raskaaksi. Legendsien kohdalla on huomioitava staattisen casterin muuttamisen vaikutukset auton akseliväliin, koska säännöt määräävät tarkasti sallitun akselivälin toleransseineen. Kuviossa 21 on esitetty kaarteessa kuormitettuna olevan renkaan caster-muutos eri korin kallistumisilla. Muutos on erittäin vähäistä. Korin kallistuessa 5 astetta caster lisääntyy vain noin $0,5^\circ$ staattiseen arvoon nähden. Muutos tapahtuu myös melko tasaisesti. Tämä on hyvä asia, koska silloin myös camberissa tapahtuvat muutokset ovat tasaisia. Kuormittamattomalla renkaalla muutokset ovat huomattavasti suurempia (kuvio 22). Jo kahden asteen korin kierrolla caster vähentyy staattisesta arvosta noin $0,6^\circ$.



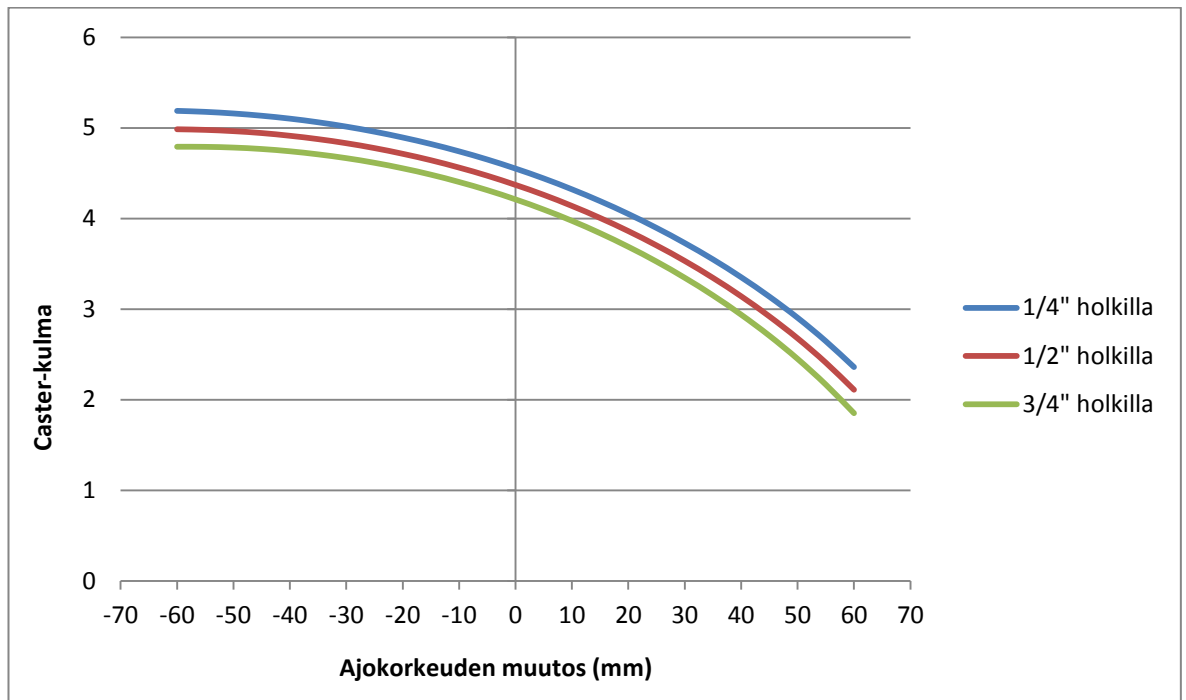
Kuvio 21. Kuormitetun renkaan caster-kulma korin kallistuessa.



Kuvio 22. Sisäkaartein renkaan caster-kulma korin kallistuessa.

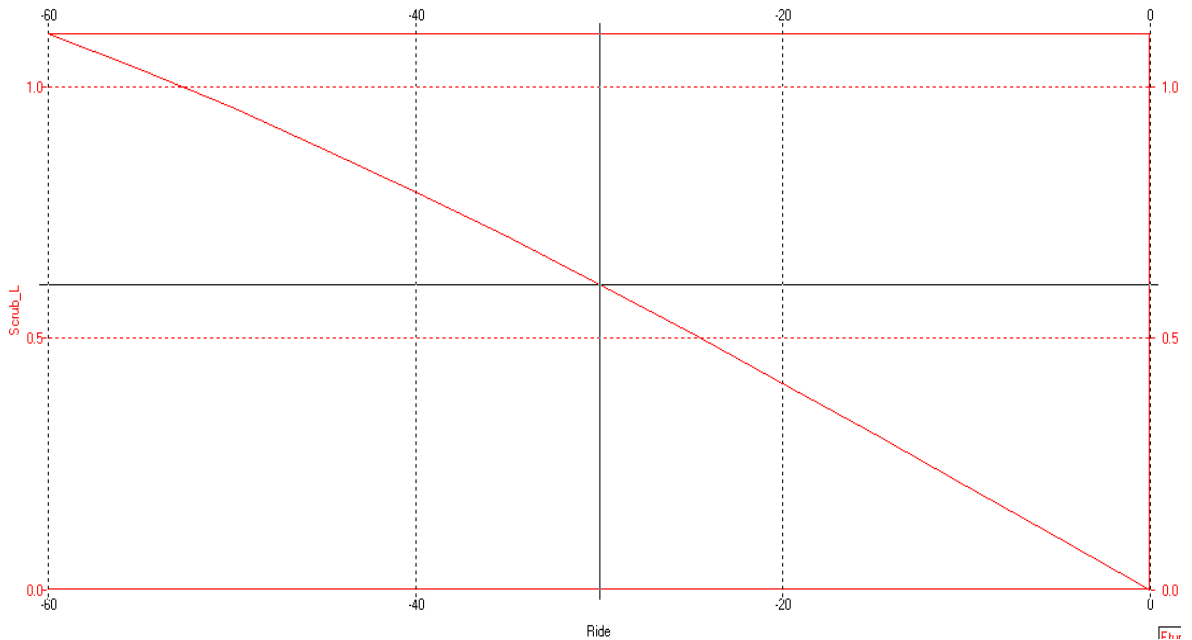
Casteria on mahdollista muuttaa jo aiemmin esille tulleilla väliholkeilla. Holkkien vaikutukset staattisen casterin arvoihin ovat kuitenkin verrattain pieniä (liite 1). Eri holkkien vaikutukset korin kallisteluun tapahtuviin caster-muutoksiin ovat hyvin vastaavanlaisia (liite 6). Tokihan jo näinkin pienet muutokset voivat vaikuttaa hie- man ajokäytökseen, mutta sen voi todeta vain testaamisella. Myös ajokorkeuden

muuttaminen vaikuttaa staattiseen caster-kulmaan. Nämä vaikutukset nähdään kuviosta 23.



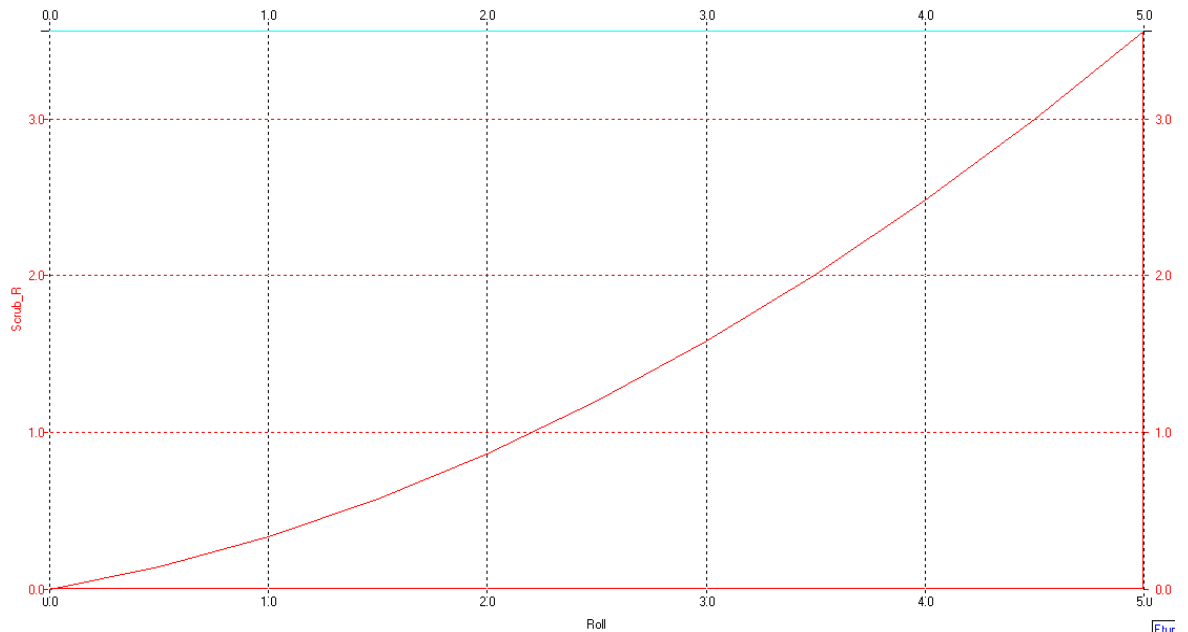
Kuvio 23. Caster-kulman muuttuminen ajokorkeuden muuttuessa.

Raideväli. Tasajoustopon vaikutus raidevälin muutokseen on lähes mitätöntä. Tämä on kilpa-autolle erittäin hyvä ominaisuus, koska suurella raidevälin muutoksella renkaan pito-ominaisuudet kärsivät huomattavasti. Raidevälissä tapahtuvilla muutoksilla on merkitystä myös renkaan nopeaan kulumiseen. Toisaalta Legendsien kilpailut ovat suhteellisen lyhyitä, joten raidevälin muutoksesta aiheutuvaan renkaiden kulumiseen ei tarvitse kiinnittää suurtakaan huomiota, etenkin näin marginaalisella muutoksella. 60 mm sisäänjoustolla yksittäinen rengas liikkuu vain 1,1 mm ulospäin auton keskilinjasta, eli raidevälissä tapahtuu pientä kasvua (kuvio 24). Tästä nähdään myös, että muutoskäyrä on melkein lineaarinen, jolloin muutos tapahtuu tasaisesti.



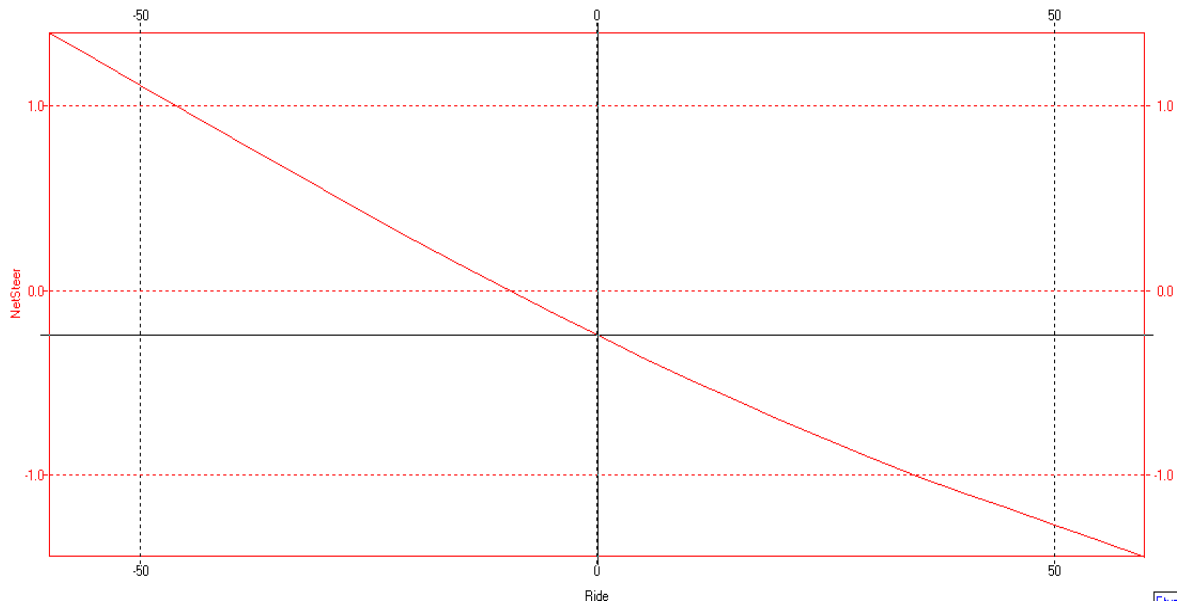
Kuvio 24. Yhden renkaan sivuttainen siirtymä sisäänjouston vaikutuksesta.

Korin kallistuminen liikuttaa renkaita sivusuunnassa aavistuksen enemmän kuin tasajousto, vaikka liikkuminen ei ole tässäkään tapauksessa suurta. Korin kallistuksessa 4 astetta ulkokaarten rengas liikkuu 2,5 mm auton keskilinjasta poispäin (kuvio 25). Mikäli ohjauspyörää käännetään lisäksi 20 astetta, lisäystä edelliseen arvoon tapahtuu vain 0,2 millimetriä. Tukivarsien pidentämisellä saadaan pienennettyä raidevälin muutosta. Esimerkiksi ylätukivarren pidentäminen 20 millimetrillä vähentäisi selvästi 60 mm sisäänjoustolla tapahtuvaa muutosta yhdellä renkaalla. Nyt rengas liikkuisi ainoastaan 0,6 millimetriä ulospäin. Kolmen asteen kallistelulla kuormitetun renkaan liike vähenisi puolestaan 0,2 mm. Tukivarsien pidentämisen yhteydessä on otettava kuitenkin huomioon säännöissä oleva auton maksimi leveys. Toinen, säännöissä kielletty tapa vaikuttaa raidevälin muutokseen olisi esimerkiksi ylätukivarren kiinnityspisteiden korkeuden muuttaminen. Ylätukivarren tarkimman kiinnityspisteen nostaminen 40 mm:llä vähentää 4 asteen kallistuksella kuormitetun renkaan liikettä 0,5 mm. Korkeuden muutoksen suuruuteen verrattuna saatu hyöty on siis melko pieni. Tasajoustopuolella tämä muutos puolittaisi renkaan liikkeen alkuperäiseen verrattuna. Nyt rengas liikkuisi keskilinjasta ulospäin ainoastaan 0,5 mm.

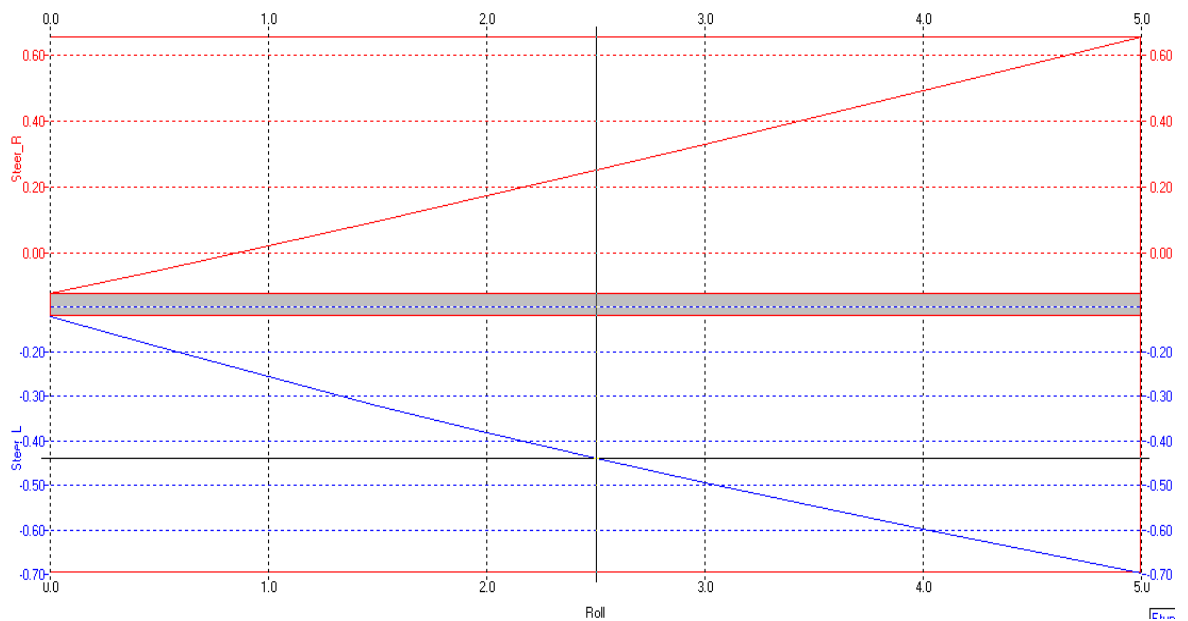


Kuvio 25. Kuormitetun renkaan sivuttainen siirtymä korin kallistuessa.

Ominaisohjaus ja Ackermann. Tämänhetkisillä säädöillä joustossa tapahtuva aurasikulman muutos on suurta. Mittaushetkellä auton kokonaisaurauskulma oli $-0,244^\circ$, joka tarkoittaa Legendseissä käytössä olevalla rengaskoolla 1,4 mm haritusta. Kuitenkin jo 30 millimetrin sisäänjoustolla aurasikulma muuttuu 3,1 mm auraukselle (kuvio 26). Ulosjoustolla muutoksen suunta on päinvastainen. 30 millimetrin ulosjoustolla kokonaisharitus on jo 5,2 mm. Muutos on niin nopeaa molempiin suuntiin, että jo pienelläkin ajokorkeuden muutoksella on suuri vaikutus aurasikulman staattisiin arvoihin. Vaikka muutokset ovat suuria, hyvä asia on kuitenkin se, että sisäänjoustolla muutos tapahtuu aurauksen suuntaan. Tällöin jarrutustilanteessa auton käyttäytyminen pysyy rauhallisempana ja vakaampana kuin jos muutos olisi haritukselle. Kallistelun osalta aurasikulmissa tapahtuvat muutokset ovat yhtä suuria kuin joustossakin. Kaarteessa kuormitettuna olevan renkaan liike on voimakkaasti auraavaan suuntaan kun vastaavasti kuormittamattomalla renkaalla suunta on harittavampaan suuntaan (kuvio 27). Muutosnopeudet ovat molemmilla renkailla lähes samansuuruisia siten, että 5 asteen korin kierrolla kokonaisaurauskulma on $-0,039^\circ$ eli 0,2 millimetriä harituksella.



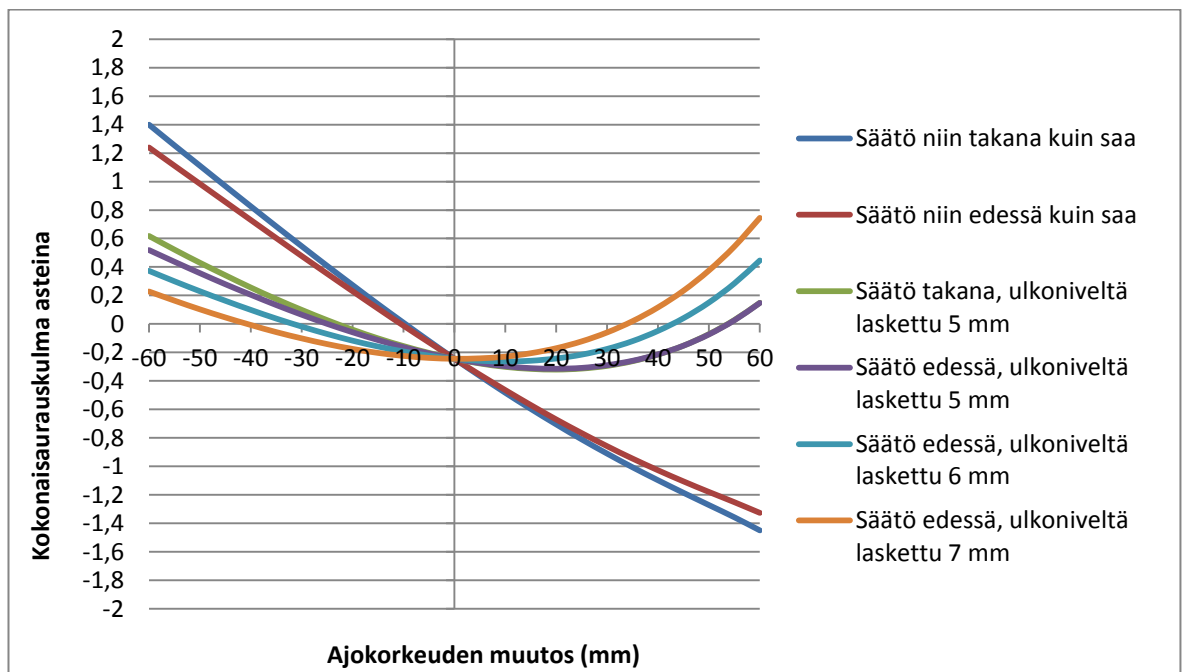
Kuvio 26. Ominaisohjaus tasajoustolla.



Kuvio 27. Ominaisohjaus korin kallistuessa.

Legendseissä ominaisohjausta on mahdollista säätää kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on liikuttaa raidetangon ulompaa niveltä pituussuunnassa. Säästövara ei tosin ole kovin suuri, vain 9 mm. Tästä johtuen säädön vaikutukseen ei ole erityisen suuri. Säädöstä syntyvät muutokset joustossa ovat nähtävissä kuviosta 28 ja korin kallistuessa liitteestä 7. Toinen tapa on raidetankojen ulkonivelten paikkojen muuttaminen korkeussuunnassa. Tämä muuttaa oleellisesti sekä jouston että kallistelu ominaisohjauskuvaajia. Nivelten laskemisella saadaan huomattavasti hidastettua ominaisohjauksen nopeutta. Ulkonivelen laskeminen 7 millimetrillä tämän-

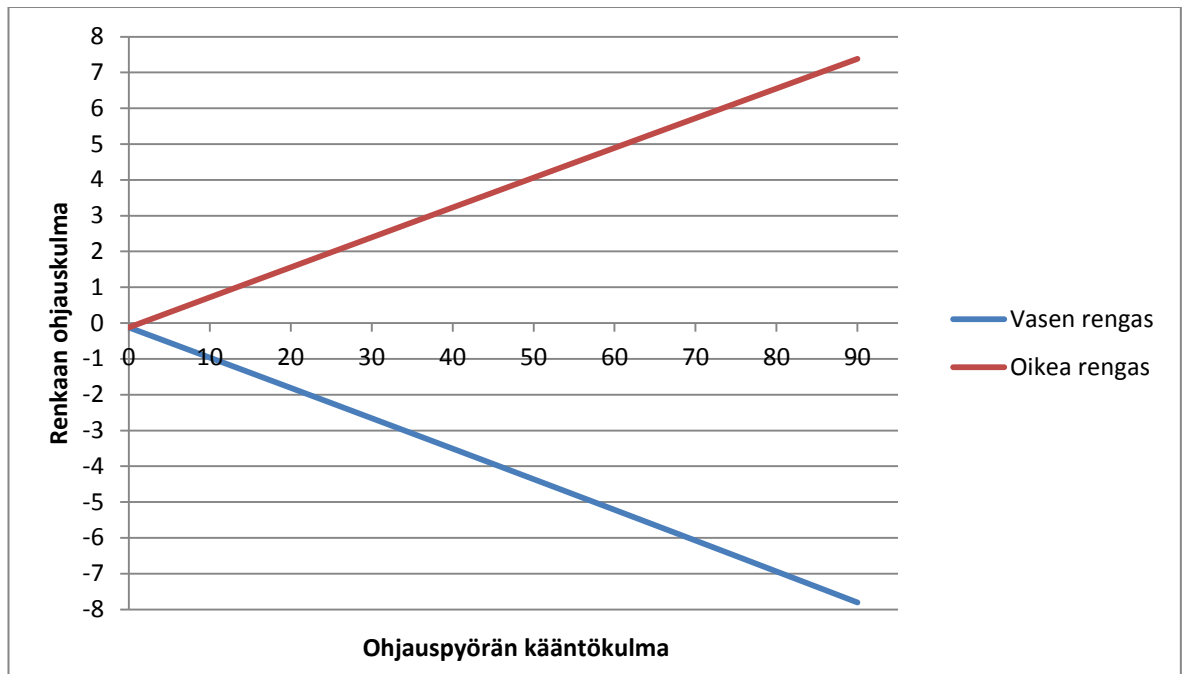
hetkisestä asennosta muuttaisi joustossa tapahtuvan ominaisohjauksikäyrän huomattavasti rauhallisemmaksi. Toisaalta tällä säädöllä aurasukulma pyysyy harituksella vielä 40 millimetrin sisäänjoustolla, jolloin tämänhetkiselä staattisen aurasukulman arvolla jarrutustilanne saattaa aiheuttaa pientä levottomuutta ohjauksessa. Paras säätöarvo tulisi selvittää käytännön testeillä kuljettajalle mieleiseksi. Kuvion 28 käyrien perusteella 5–7 millimetrin ulomman nivelen laskemisella päästään lähelle halutunlaista arvoa. Liitteessä 6 on esitetty ominaisohjauksikäyrä kun staattinen aurasukulma on 0° ja ulkoniveltä on laskettu 7 mm. Ulkonivelen laskemisen vaikutus tasajoustossa on nähtävissä myös kuviosta 28. Vastaavanlaisiin tuloksiin päästäisiin myös hammastangon nostamisella, mutta säännöt eivät mahdollista tätä ratkaisua.



Kuvio 28. Ominaisohjaus joustossa.

Raidetankojen pituussuuntaisessa siirtämisessä on huomioitava sen vaikutus Ackermann-ohjaukseen. Raidetankojen siirtäminen eteenpäin vähentää Ackermann-ominaisuutta, jolloin ohjaus menee enemmän rinnakkaisohjauksen suuntaan. Kilpa-autoissa on myös yleisenä pyrkimyksenä käyttää rinnakkaisohjausta, jonka vuoksi tässäkin tapauksessa raidetankojen siirtäminen eteenpäin on ehdottomasti suotuisampi vaihtoehto, kun otetaan vielä huomioon muutoksen tuoma ominaisohjauksen vähentyminen. Täysin rinnakkaisohjaukseen ei näillä muutoksilla kuitenkaan päästä. Raidetankojen ollessa takimmaisessa säätökohdassa, Ackermann-

ominaisuutta on 47,7 % ja eteenpäin siirtäminenkin vähentää tätä arvoa vain 4 %. Kuvio 29 on nähtävissä renkaiden kääntyminen, kun ohjauspyörää käännetään ja raidetangot ovat takimmaisessa säätökohdassa. Kuvion 29 tilanne on auton mitaushetkellä olleilla säädöillä.



Kuvio 29. Renkaiden ohjaukulmat ohjauspyörän kääntämisen funktiona.

Anti-dive. Etutuennan anti-dive-ominaisuus on 18,3 %. Tätä voidaan pitää Legendsin kaltaiselle kevyelle kilpa-autolle ehkä hieman suurehkona arvona, koska raskaille etumoottorisille kilpa-autoillekin suositellut arvot ovat 20–25 %:n välillä. On myös otettava huomioon, että arvossa tapahtuu pientä nousua, kun ohjelmalla simuloidaan jarrutustilannetta, jossa kori kallistuu eteenpäin ja jousitus painuu hieman kasaan. Sääntöjen puitteissa ainoaksi anti-dive-ominaisuuden säätömahdollisuudeksi jää ajokorkeuden muuttaminen, jolloin korkeuden laskemisella saadaan hieman pienennettyä arvoa. Muulla tavoin ei sääntöjen puitteissa ole mahdollisuutta kyseisiin arvoihin vaikuttaa, koska suurempien muutosten saamiseksi joudutaan siirtämään tukivarsien kiinnityspisteitä korkeussuunnassa.

Kallistuskeskiö. Etupään kallistuskeskiön korkeus tämänhetkisillä säädöillä on 11,6 millimetriä maanpinnan yläpuolella. Tämä on erittäin matala ja hyvin lähellä tavoiteltua maanpinnan tasoa, eli sitä ei ole tarpeellista muuttaa. Ajokorkeuden laskemisella saataisiin tarvittaessa laskettua kallistuskeskiötä, mutta erittäin vä-

hän, 40 mm ajokorkeuden laskeminen muuttaa kallistuskeskiötä vain 2 mm alaspäin. Merkille pantavaa on se, että ajokorkeuden nostamisella on sama vaikutus. Kallistuskeskiön korkeus laskee jopa hieman enemmän. Hieman suurempi lasku selittyy tuennan rakenteesta, jossa ylä- ja alatukivarret ovat lähes samansuuntaiset ja eripituiset. Tällöin ajokorkeuden noustessa tukivarsien asento muuttuu lähemmäksi samansuuntaisuutta. Kallistuskeskiön korkeuden laskeminen ajokorkeuden noustessa aiheuttaa sen, että painopisteen ja kallistuskeskiön välinen etäisyys eli momenttivarsi kasvaa kun ajokorkeutta nostetaan. Tämä siis lisää etupään kallistelua, joka ei ole painonsiirron kannalta suotavaa. Ajokorkeuden nosto ei ole suotavaa myöskään siksi, että painopisteen paikka nousee samalla. Ajokorkeuden laskeminen olisi puolestaan kannattavampi ratkaisu. Vaikka kallistuskeskiön korkeus laskeekin tämän vaikutuksesta maltillisesti, momenttivartta saataisiin samalla hieman lyhyemmäksi. Kallistuskeskiön korkeuden säätömahdollisuudet ovat Legendseissä erittäin vähäiset. Ainoa säätömahdollisuus on ajokorkeuden muutos. Mikäli kallistuskeskiön paikkaa haluttaisiin nostaa, ainoa vaihtoehto olisi tukivarsien kiinnityspisteiden muuttaminen korkeussuunnassa, joka ei ole kuitenkaan sääntöjen puitteissa sallittua.

Korin kallistelussa kallistuskeskiön paikka muuttuu korkeussuunnassa enemmän. Kallistuskeskiö on maanpinnan tasolla noin 1,9 asteen korin kallistumisella (kuvio 30). Kallistuskeskiön mennessä maanpinnan alapuolelle keula pyrkii painumaan alaspäin. Korin kallistelun kohdalla tärkeä tekijä on jo edellä mainittu momenttivarsi. Momenttivarren liikkeistä voidaan päätellä auton käyttäytymistä ja painonsiirtoa kaarteiden aikana. Liitteessä 9 on esitetty momenttivarren pituus korin kallistuksessa. Tästä nähdään, että käyrä on tasainen, jolloin painonsiirron voidaan olettaa olevan tasaista. Tällöin myös auton käyttäytyminen on loogista ja ennalta arvattavaa.

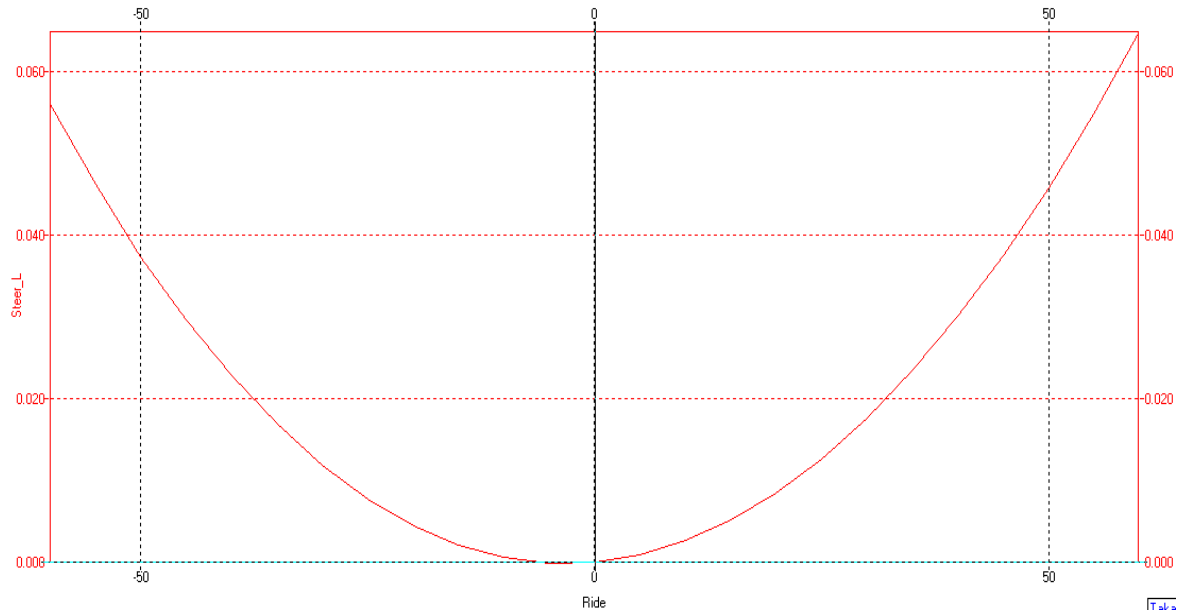


Kuvio 30. Kallistuskeskiön korkeus korin kallistuessa.

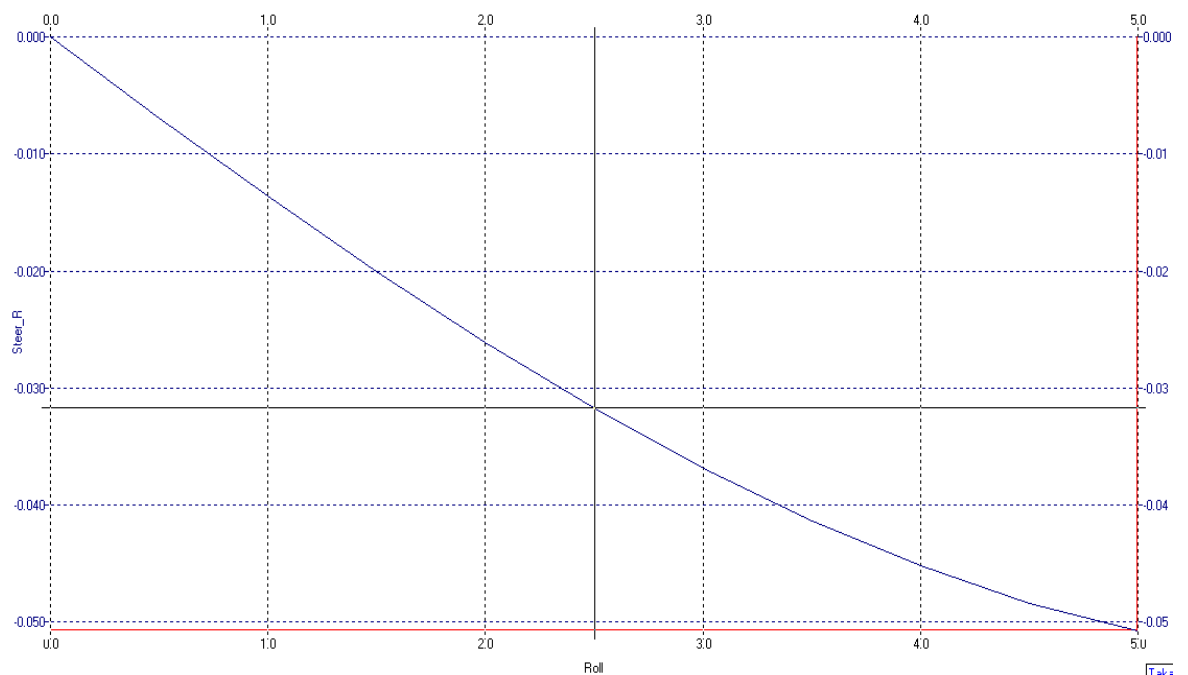
7.3 Takapään geometria

Ominaisohjaus. Taka-akselilla tapahtuu lievää ominaisohjausta jo pelkässä sisään- ja ulosjoustossa. Akselin kääntyminen tapahtuu molemmissa jouston suunnissa takaapäin katsottuna oikealle. Tämä johtuu siitä, että alempien linkkien akselin ja korin kiinnityspisteet eivät ole samassa linjassa pituussuunnassa. Linkkien korinpuoleiset kiinnityspisteet ovat akselin pisteitä ulompana auton keskilinjalta. Kääntymissuunnan määrä se, että Panhard-tangon kiinnitys akseliin on vasemmalla puolella, jolloin se kääntää akselia joustossa oikealle. Kääntyminen on kuitenkin erittäin vähäistä mittaushetkellä olleilla akselin säädöillä, 60 mm sisäänjoustolla akseli kääntyy vain $0,056^\circ$ (kuvio 31). Näin vähäisellä kääntymisellä ei ole rata-autoissa suurtakaan merkitystä, koska radat ovat pinnaltaan tasaisia, jolloin ajon aikana tapahtuvat joustot eivät ole kovin suuria. Pelkässä kallistelussa muutos on suuruudeltaan samaa luokkaa, jopa hieman pienempää. Kallistelussa akseli kääntyy kaarteesta pois päin (kuvio 32), jolloin ulkokaarten rengas liikkuu harittavaan suuntaan antaen autolle ylioheavain ominaisuuden. Ominaisuus on tosin hyvin lievä, koska auton tämänhetkiselä ajokorkeudella alempien linkkien etummais- ja takimmais- kiinnityspisteet ovat lähes samalla korkeudella. Mikäli korinpuoleisia kiinnityspisteitä voitaisiin laskea, käytös muuttuisi aliohjaavaksi. Jo 7 millimetrin laskeminen kääntäisi kallistelukuvaajan päinvastaiseksi. 5 asteen korin kal-

listumalla akseli kääntyisi $0,047^\circ$ kaartein suuntaan. Legendsien kohdalla ainoa sallittu tapa kiinnityspisteiden korkeuden muuttamiseksi on ajokorkeuden muuttaminen.



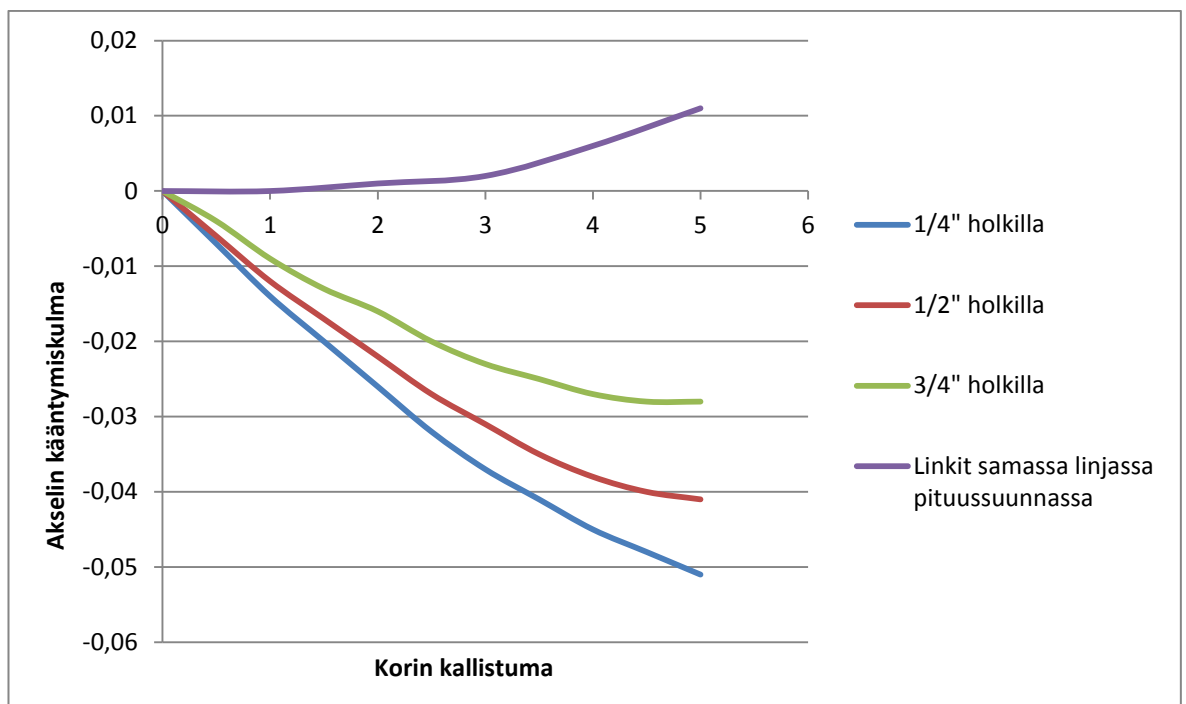
Kuvio 31. Taka-akselin ominaisohjaus joustossa.



Kuvio 32. Taka-akselin ominaisohjaus korin kallistuessa.

Legendseissä voi siirtää alalinkkien kiinnityspistettä sivusuunnassa jo aiemmin esille tulleiden väliholkkien avulla. Kiinnitys on tehty siten, että leveämmällä holkillä kiinnityspiste siirtyy auton keskilinjaa kohti, jolloin myös linkin asennuskulma auton

pituusakseliin nähden pienenee. Linkkien asentaminen suurempaan vähentää joustossa ja pelkässä kallistelussa syntyvää akselin kääntymistä. Kuvio 33 nähdään, että akselin liike pysyy samansuuntaisena kaikilla holkeilla, mutta kaapeimman ja leveimmän holkin välillä akselin liike puolittuu 5 asteen korin kierrolla. Joustossa tapahtuvat muutokset on nähtävissä liitteestä 8. Jos alalinkkien kiinnityspisteet saataisiin holkeilla samaan linjaan pituussuunnassa, akselin liikkuminen loppuisi lähes kokonaan. Joustossa ei tapahtuisi lainkaan akselin kääntymistä. Kallistelussa kääntyminen muuttuisi hieman aliohjaavaan suuntaan (kuvio 33).

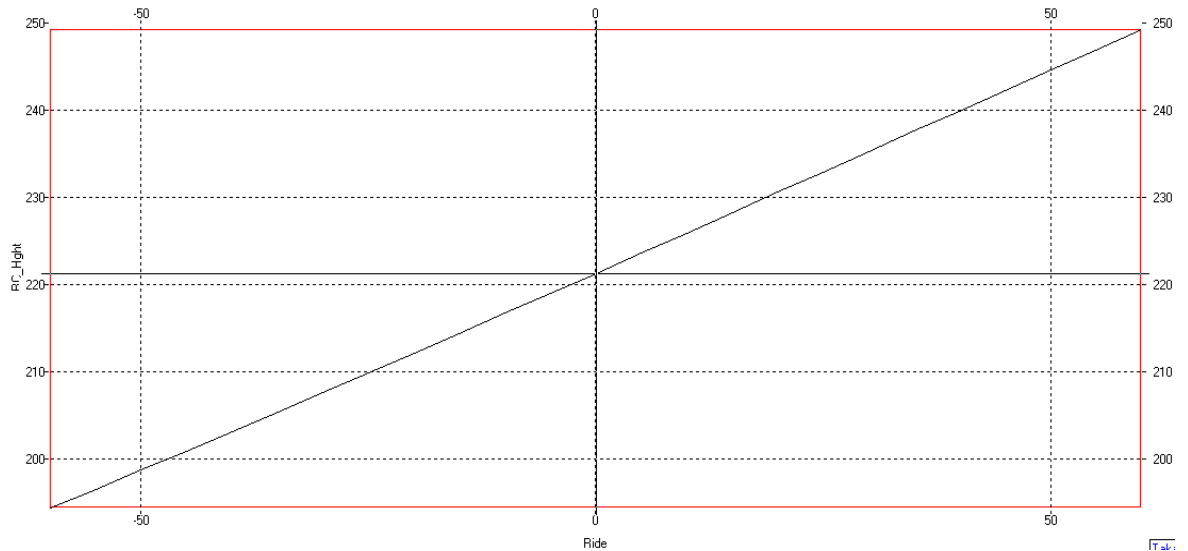


Kuvio 33. Eri holkkien vaikutukset taka-akselin ominaisohjaukseen korin kallistuksessa.

Kun korin kallistelu ja jousto yhdistetään, ominaisohjauksen tilanne muuttuu huomattavasti. Liitteestä 8 on nähtävissä ominaisohjauksen suuruus eri ajokorkeuksilla kun koria on kallistettu 5° . Tästä nähdään, että akselin liike suurenee huomattavasti pelkkään kallisteluun nähden. Nyt kallistelu ja sisäänjousto kääntävät akselia voimakkaammin kaarteeseen suuntaisesti saaden aikaan aliohjaavan ominaisuuden. Tämä saattaa olla pelkästään hyvä asia, koska Legendsien lyhyt akseliväli ja tehokas moottori aiheuttavat itsessään yliohtautuvuutta, joten tämä tasapainottaa ajokäytöstä esimerkiksi kaarteiden ulostuloissa. Ulosjoustossa tilanne on päinvastainen. Esimerkiksi jarrutusten aikana tapahtuva ulosjousto staattisesta ajokorkeu-

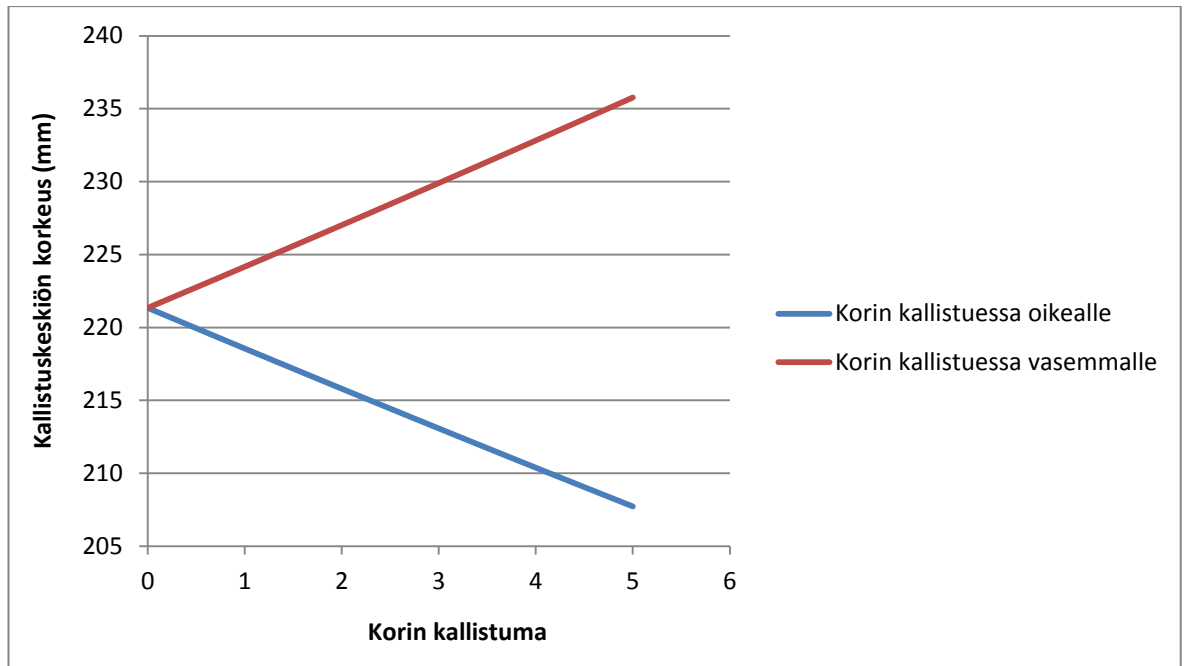
desta saa aikaan akselin kääntymisen ylioheavaan suuntaan. Tämä tosin helpottaa jyrkkään kaarteeseen kääntymistä muuten aliohjautuvuutta aiheuttavalla akselilla. Liitteestä 8 nähdään myös, miten alalinkkien korinpuoleisten kiinnityspisteiden siirtäminen holkeilla leveyssuunnassa vaikuttaa akselin ohjautuvuuteen. Erot ovat varsin pieniä, mutta pisteiden siirtäminen ulommaksi vähentää hieman akselin liikettä sisäänjouston ja kallistelun aikana, koska tällöin linkit ottavat enemmän vastaan kaarreajosta aiheutuvia sivuttaisia voimia.

Kallistuskeskiö. Auton takapään kallistuskeskiön korkeus on mittaushetkellä olleella ajokorkeudella 221 millimetriä maanpinnan yläpuolella. Kilpa-autolle tämä on suhteellisen korkea, koska pyrkimyksenä on saada kallistuskeskiö mahdollisimman lähelle maanpinnan tasoa. Korkeahkon kallistuskeskiön hyvänä puolena voidaan pitää kallistelun vähenemistä, koska kallistuskeskiön ja painopisteen välinen momenttivarsi on lyhyt. Ajon kannalta suurempi haitta kuitenkin syntyy korkean kallistuskeskiön aiheuttamasta koria nostavasta voimasta, joka pyrkii nostamaan sisäkaarten takarenkaan ilmaan, heikentäen takapään sivuttaispitoa. Kallistuskeskiön staattista korkeutta voidaan tässä tapauksessa muuttaa vain ajokorkeuden muutoksella. Toinen vaihtoehto olisi liikuttaa Panhard-tankoa korkeussuunnassa, mutta Legendseissä ei ole säätömahdollisuutta tähän. Kuviossa 34 on esitetty ajokorkeuden vaikutus kallistuskeskiön korkeuteen. Korkeuden muutokset ovat molempiin suuntiin hyvin samansuuruisia. Ajokorkeuden laskeminen 60 millimetrillä alentaa kallistuskeskiön korkeutta 27 mm. Ajokorkeuden nostaminen saman verran aiheuttaa 28 millimetrin korotuksen kallistuskeskiöön.



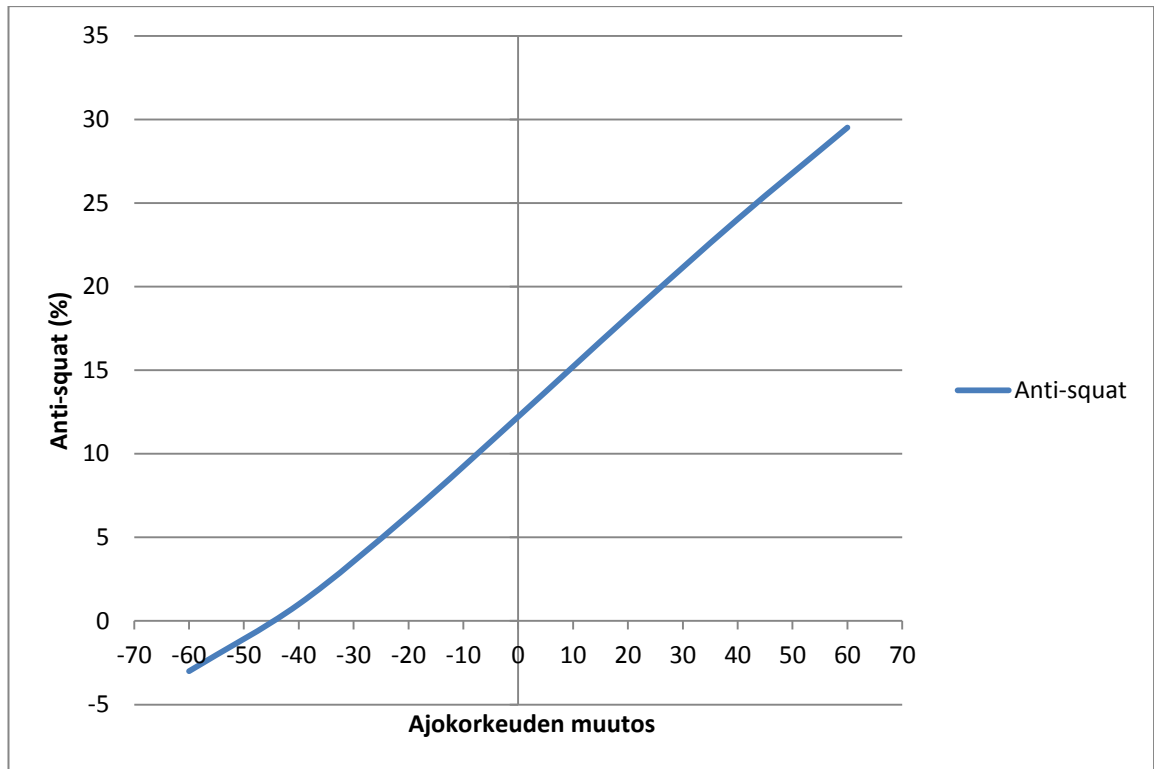
Kuvio 34. Ajokorkeuden vaikutus takapään kallistuskeskiön korkeuteen.

Korin kallistelun yhteydessä on huomioitavaa, että kallistuskeskiön korkeuden muutos ei ole samansuuntaista eri suuntiin käännettäessä (kuvio 35). Legendsissä Panhard-tangon kiinnitys koriin on auton oikealla puolella, jonka vuoksi kallistuskeskiön korkeus kasvaa oikealle käännettäessä. Melkein kaikkia Suomen moottoriratoja ajetaan myötapäivään, jolloin suurin osa kaarteista kääntyy juuri oikealle. Tämän kannalta Panhardin kiinnitys tulisi olla juuri toisinpäin. Kallistuskeskiön liikkeet ovat muuten ihan hyviä, koska korkeuden muutokset ovat melko pieniä. Pienet muutokset johtuvat Panhard-tangon lähes vaakasuorasta asennosta. Momenttivarren pituudessa kallistelun aikana tapahtuvat muutokset on esitetty liitteessä 9.



Kuvio 35. Takapään kallistuskeskiön korkeus korin kallistuessa.

Anti-squat. Auton anti-squat on tällä ajokorkeudella 12,2 %, joka on varmasti ihan sopiva arvo. Arvon nostamiseen ei ainakaan ole mitään tarvetta, koska jäykällä taka-akselilla ei tapahdu pyöränkulmamuuutoksia, joita pitäisi suurella anti-squat-ominaisuudella estää. Legendisien kohdalla arvon nostamista ei myöskään tue se, että ainoa keino tähän on ajokorkeuden nostaminen, jolloin myös kallistuskeskiön ja painopisteen korkeudet nousevat. Näin ollen ominaisuuden kasvattamisesta aiheutuvat haitat ovat suuremmat kuin hyödyt. Suuremmalla arvolla tosin voisi saada hieman enemmän kiihdytyspitoa, mutta samalla kaarreajo-ominaisuudet saattavat heikentyä. Kuvio 36 on nähtävissä ajokorkeuden vaikutus anti-squatin suuruuteen. Ominaisuus poistuu kokonaan noin 45 millimetrin sisäänjouston jälkeen.

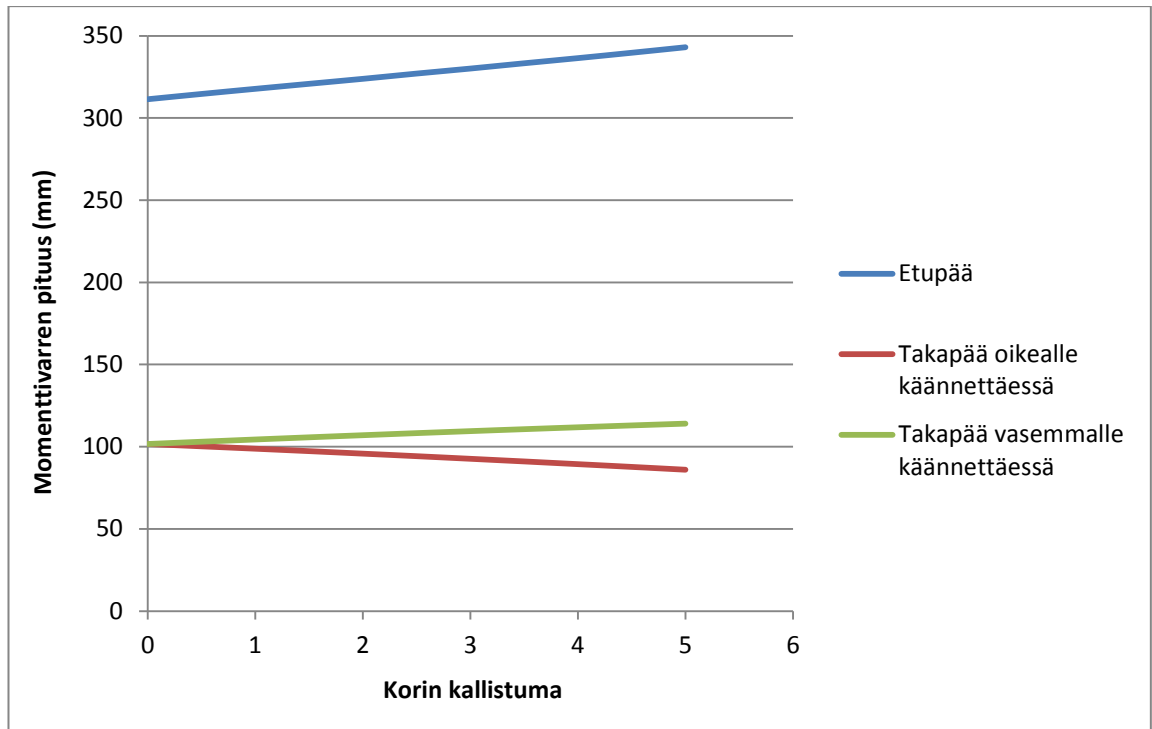


Kuvio 36. Ajokorkeuden vaikutus anti-squat-ominaisuuden suuruuteen.

7.4 Etu- ja takakallistuskeskiöt

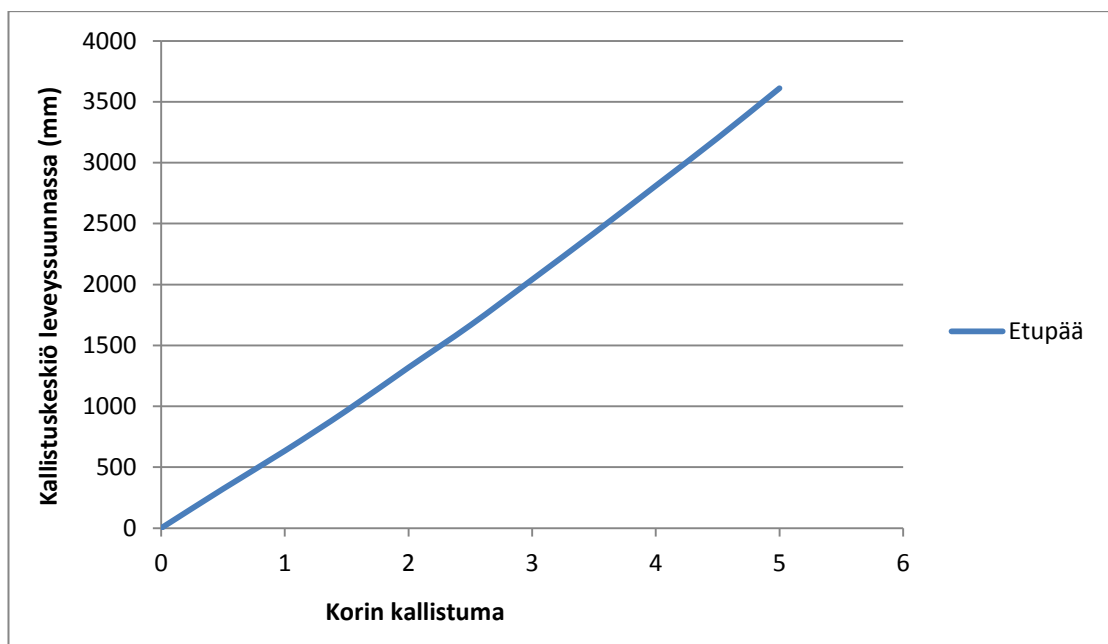
Kallistuskeskiöiden korkeusero on etu- ja takapään välillä suuri takapään ollessa huomattavasti korkeammalla. Tällöin ajoneuvon kallistusakseli on etupään suuntaan laskeva, joka saa aikaan huomattavan yliohjaavan ominaisuuden. Legendsien kohdalla tämä saattaa tehdä kaarrejaosta hankalaa, koska akseliväli on lyhyt, jolloin auton liikkeet ovat äkkinäisiä. Ongelmalliseksi asian tekee se, että kallistuskeskiöiden korkeutta ei voi säätää erikseen ja muutenkin ainoa säätömahdollisuus on ajokorkeuden muutos.

Koska kallistuskeskiöiden korkeuksissa on suuri ero, myös momenttivarsien pituuksissa on suuri ero. Kuvion 37 perusteella korin kallistuessa etupään painonsiirto on huomattavasti suurempaa, mutta samalla myös hitaampaa kuin takapään. Oikealle käännettäessä takapään momenttivarren kuvaaja on erisuuntainen etupään kanssa, jolloin takapäässä tapahtuva painonsiirto pienenee. Voidaan siis olettaa, että auto on loogisempi ajettava vasemmalle käännettäessä, koska silloin kallistuskeskiöiden liike on lähes samansuuntaista.



Kuvio 37. Etu- ja takapään momenttivarrien erot korin kallistuessa.

Kallistelun aikana takapään kallistuskeskiö ei liiku auton leveyssuunnassa lainkaan. Etuakselilla kallistuskeskiö liikkuu puolestaan huomattavan paljon (kuvio 38) tuentatavasta johtuen, eli ylä- ja alatukivarret ovat lähes samansuuntaiset. Tämänkin perusteella etu- ja taka-akselin painonsiirto-ominaisuudet eroavat toisistaan huomattavasti.



Kuvio 38. Kallistuskeskiön leveyssuuntainen liike korin kallistuessa.

8 POHDINTA

Legends-auton alustageometria on tutkimisen kannalta erittäin mielenkiintoinen kohde. Legends on kilpa-autoluokkana yksi Suomen suosituimmista, joka on tiukkojen sääntöjen ansiosta hyvin tasaväkinen. Säännöt eivät salli tekniikkaan minikäänlaisia virityksiä. Tämä takaa sen, että autot ovat tekniikaltaan lähes identtisiä, jolloin alustan säätöjen merkitys korostuu entisestään. Kovin suuria muutoksia alustageometriaan ei kuitenkaan ole mahdollista saavuttaa, koska säännöt kieltävät kaikki rakenteelliset muutokset. Tämän työn kohdalla tutkittiinkin alustan tehtyjen muutosten vaikutuksia vain niiltä osin kuin säännöt sallivat, vaikka joissain kohdissa on vertailun vuoksi esitetty myös muutostapoja, jotka ovat säännöissä kielletty. Tämän työn pääasiallisena tarkoituksena olikin selvittää alustan säätömahdollisuuksia sekä muutosten vaikutuksia pyörän asentokulmiin, joita voidaan hyödyntää testaamisen yhteydessä, haettaessa parempaa ajettavuutta.

Etupäässä huomio kiinnittyi kallistelussa tapahtuvaan suhteellisen nopeaan camber-kulman muuttumiseen. Kuvion 19 esimerkissä ollut -1 asteen staattinen camber muuttui positiiviselle jo 1,1 asteen korin kiertymisellä. Tämän perusteella autossa tulisi käyttää huomattavasti negatiivisempaa staattista camber-arvoa. Tätä seikkaa tukee myös se, että Legendsien renkaat kuluvat voimakkaasti ulkosyrjältä, josta niitä myös tahallisesti kulutetaan eli niin sanotusti raspataan. Juuri oikean camber-arvon löytäminen vaatisi tietoa käytettävien renkaiden ominaisuuksista. Työssä oli tarkoitus tutkia enemmän juuri pyöränkulmia renkaiden ominaisuuksien kannalta, mutta kyselyistä huolimatta tarvittavia rengastietoja ei onnistuttu saamaan. WinGeo3-ohjelmasta saatujen tulosten perusteella staattisen camber-kulman asettaminen noin -3 asteeseen voisi olla lähellä oikeaa arvoa.

Toinen suurempi huomion arvoinen asia on etupäässä tapahtuva erittäin voimakas ominaisohjaus tasajouston aikana. Ratkaisuna tämän pienentämiseksi löydettiin raidetangon ulkonivelen laskeminen alaspäin. Jo vähäiselläkin nivelen laskemisella saadaan selviä muutoksia kuvaajaan, mutta käyrä saadaan lähelle haluttua kun niveltä lasketaan 5–7 millimetriä alaspäin. Tällä muutoksella auton käyttäytyminen jarrutusten aikana muuttuu huomattavasti rauhallisemmaksi. Lisäksi pientä parannusta saadaan kun ulkoniveltä liikutetaan pituussuunnassa eteenpäin. Samalla

tämä muuttaa ohjauksen kilpa-autoille parempaan suuntaan eli lähemmäksi rinnakkaisohjausta. Tämä on siis myös ehdottomasti kannattava muutos.

Takapäässä on jäykän akselin vuoksi vähemmän geometriamuutoksia ja siten tutkittavaa kuin etupäässä. Myös muutos- ja säätömahdollisuudet ovat rajallisemmat. Tutkimuksessa kävi ilmi, että ajokorkeuden muuttaminen on takapäässä suurin tekijä haettaessa muutoksia ajokäyttäytymiseen. Ajokorkeus vaikuttaa sekä kallistuskeskiön korkeuteen että taka-akselin ominaisohjaukseen. Ajokorkeuden laskeminen muuttaa alalinkkien asentoa siten, että akseli pyrkii kääntymään enemmän kaarteeseen suuntaan lisäten auton taipumusta aliohjautuvuuteen. Tämän todettiin olevan Legendsien kohdalla mahdollisesti parempi suunta auton hallittavuutta ajatellen. Myös sääntöjen sallimien holkkien vaihtamisen vaikutuksia akselin sivuttaisen liikkeen rajoittamiseksi tutkittiin. Vaikutukset osoittautuivat kuitenkin varsin vähäisiksi.

Auton alustan ominaisuuksien ja geometrian tutkiminen on aihealueena varsin laaja ja haastava, mutta myös erittäin mielenkiintoinen. Tämänkaltaista tutkimusta on lähes mahdotonta suorittaa kotikonstein ilman tietokoneohjelman apua. Ohjelmasta saatujen tulosten analysointi ja hyödyntäminen vaati kuitenkin paljon alan tietoutta ja kokemusta. Pelkkä ohjelman käyttö ei siis takaa hyviä tuloksia. Tämän työn kohdalla saatuja tuloksia ei päästy vielä työn tekemisen aikana kokeilemaan käytännössä, mutta tulevaisuudessa asia korjaantuu. Ohjelmasta saatuihin tuloksiin täytyy suhtautua kuitenkin pienellä varauksella, koska tulokset perustuvat täysin autosta otettujen mittojen tarkkuuteen. Autolla on ajettu kilpaa jo useita vuosia, joten rungossa on saattanut tapahtua muutoksia, jotka vaikuttavat mittoihin. Tämän vuoksi tuloksia ei välttämättä voida täysin hyödyntää muihin Legends-autoihin.

LÄHTEET

- Gillespie, T. 1992. Fundamentals of vehicle dynamics. United States of America: SAE International.
- Hot Cars. 2011. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.2.2014]. Saatavana: <http://legends.hotcars.net/>.
- Legends Cars Finland. 2011. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.2.2014]. Saatavana: <http://legendscars.fi/wordpress/>.
- Legends Trophy sääntökirja 2013. Ei päiväystä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.1.2014]. Saatavana: http://legendscars.fi/wordpress/?page_id=63.
- Mauno, E. 2002. Virittäjän käsikirja 2, Alusta. 2. painos. Helsinki: Alfamer Oy.
- Mitchell, C. 2010. WinGeo3: Suspension Geometry program. Mooresville: Vm. C. Mitchell Software.
- Newbold, D. & Bonnick, A. 2002. A Practical Approach to Motor Vehicle Engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- 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.
- Smith, C. 1978. Tune to win: The art and science of race car development and tuning. California: Carroll Smith Consulting Incorporated
- Tuononen, A. & Koisaari, T. 2010. Ajoneuvojen dynamiikka. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- U.S. Legend Cars. 2012. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.2.2014]. Saatavana: <http://www.uslegendcars.com/>.

LIITTEET

Liite 1. Väliholkkien vaikutus staattisiin etupään pyörän asentokulmiin, camber-kulman muutos kun kori kallistuu ja ohjauspyörää käännetään sekä jousitus painuu kasaan

Liite 2. Väliholkkien vaikutus camberin muuttumiseen joustossa

Liite 3. Väliholkkien vaikutus ulkokaarten renkaan camberiin korin kallistuessa

Liite 4. Väliholkkien vaikutus sisäkaarten renkaan camberiin korin kallistuessa

Liite 5. Tukivarsien pituuden vaikutus camber-kulmiin

Liite 6. Eri holkkien vaikutus caster-kulmaan korin kallistuessa, ominaisohjauskäyrä muutosten jälkeen

Liite 7. Ominaisohjaus eri säädöillä korin kallistuessa

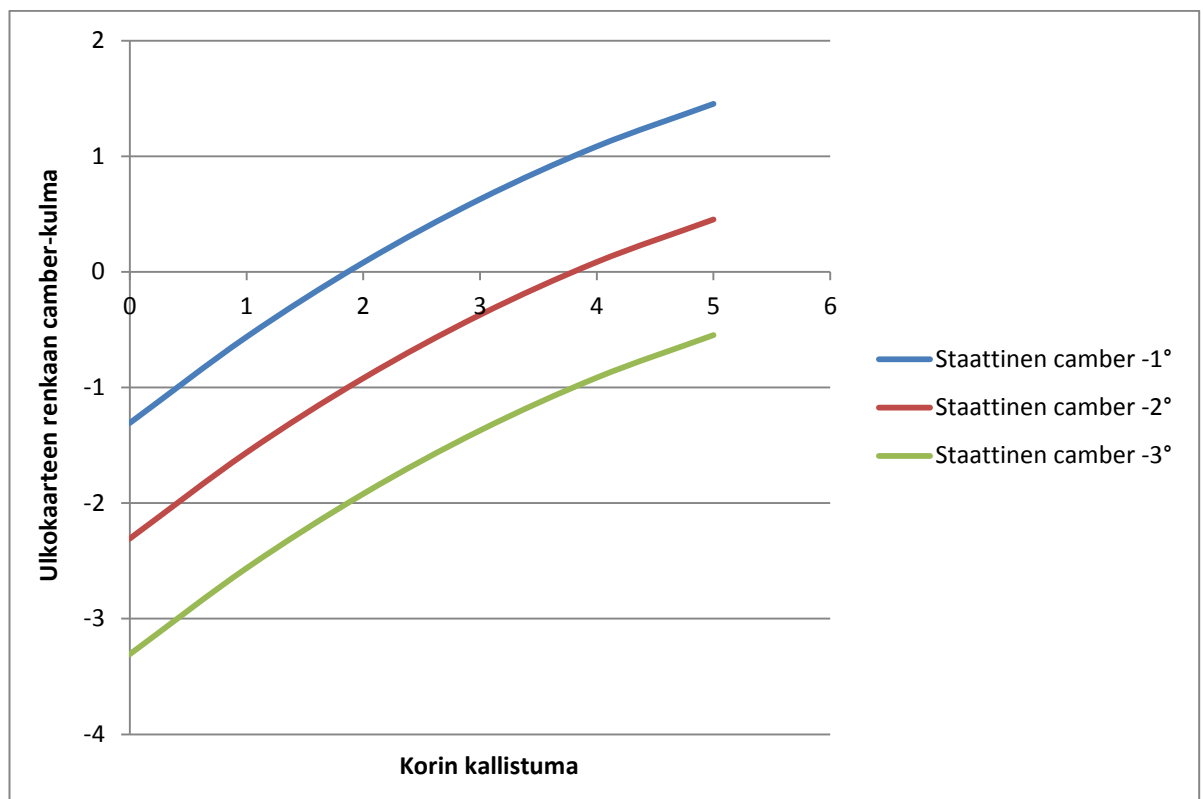
Liite 8. Taka-akselin ominaisohjaus tasajoustossa ja kun koria on kallistettu lisäksi 5°

Liite 9. Etupään ja takapään kallistuskeskiöiden momenttivarsien pituudet korin kallistuessa

LIITE 1 Väliholkkien vaikutus staattisiin etupään pyörän asentokulmiin, camber-kulman muutos kun kori kallistuu ja ohjauspyörää käännetään sekä jousitus painuu kasaan

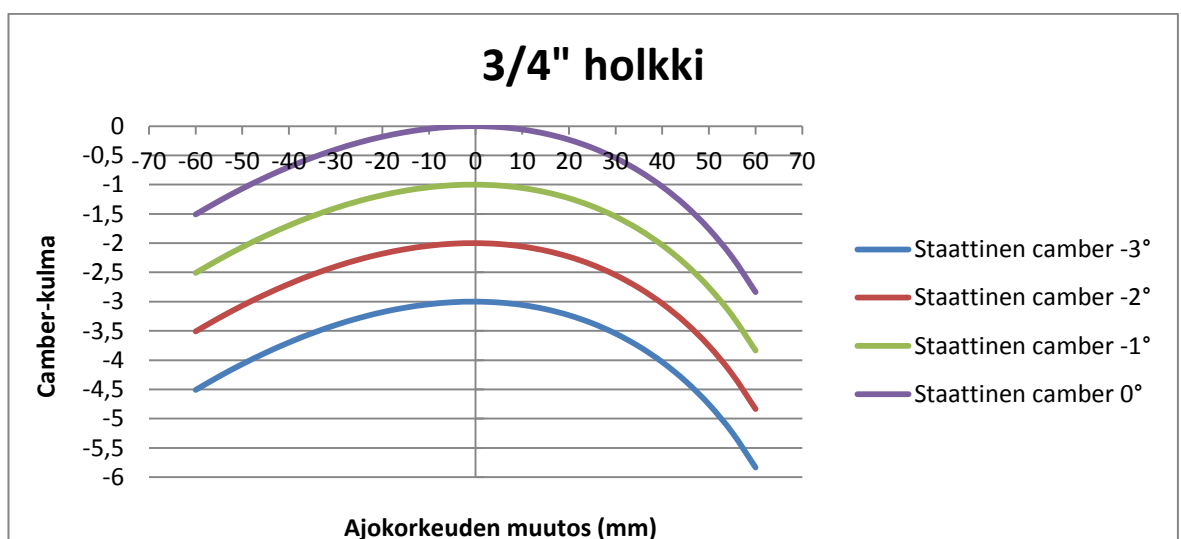
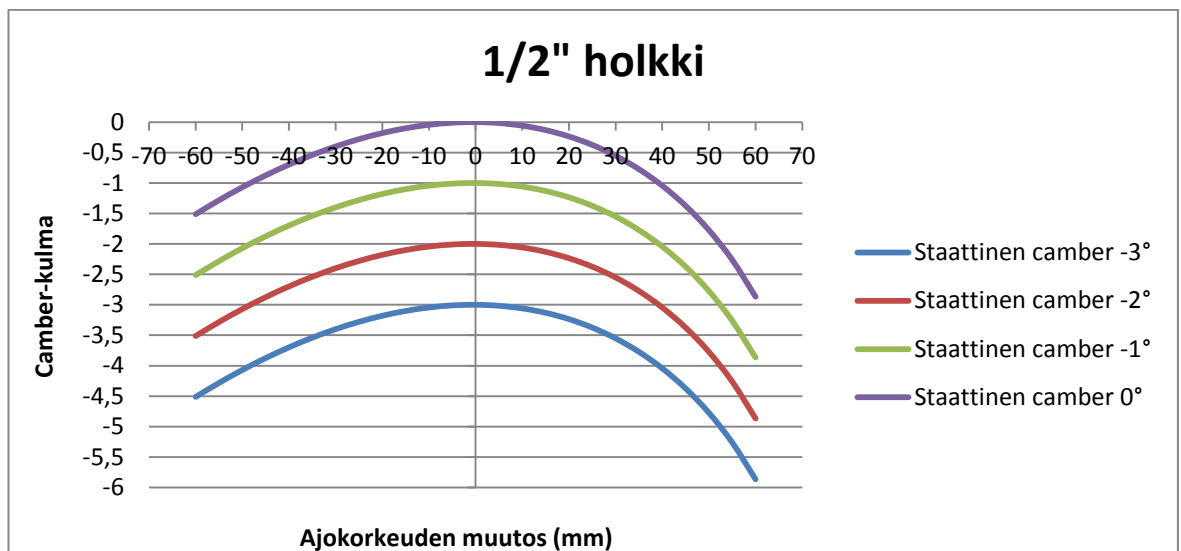
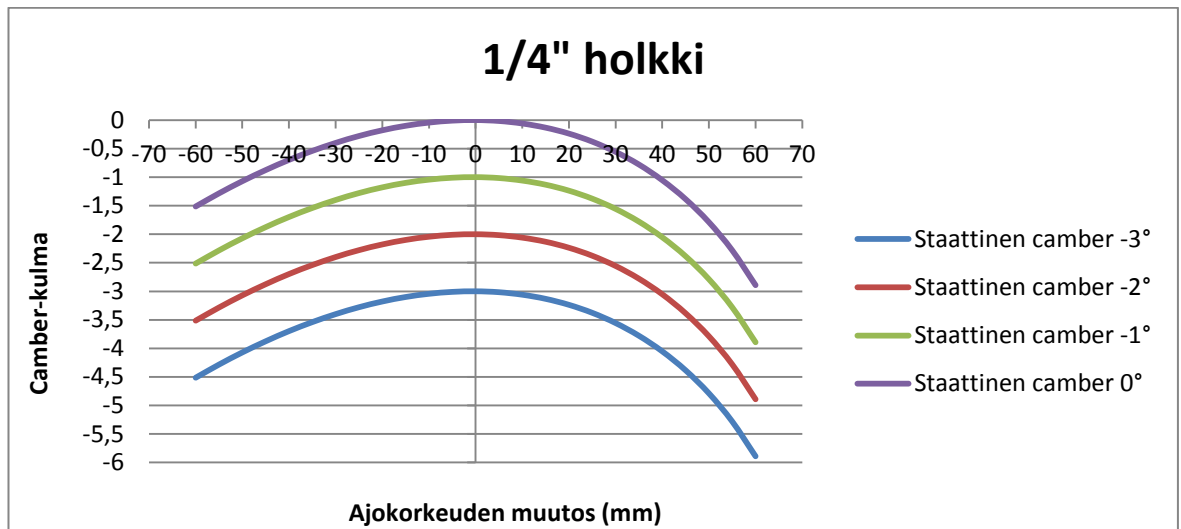
Holkki	Camber	Caster	Aurauskulma
1/4"	-3°	4,551°	-0,244°, 1,4mm
1/2"	-2,976°	4,371°	-0,213°, 1,2mm
3/4"	-2,955°	4,211°	-0,186°, 1,1mm

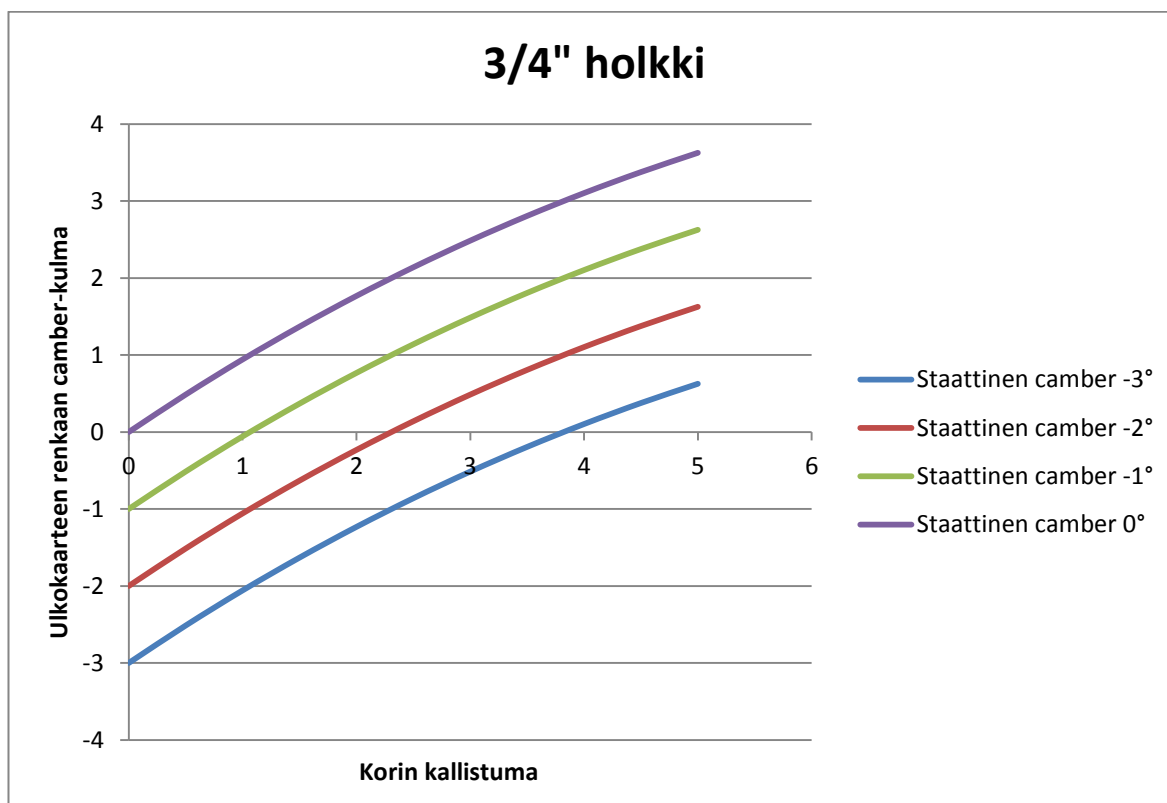
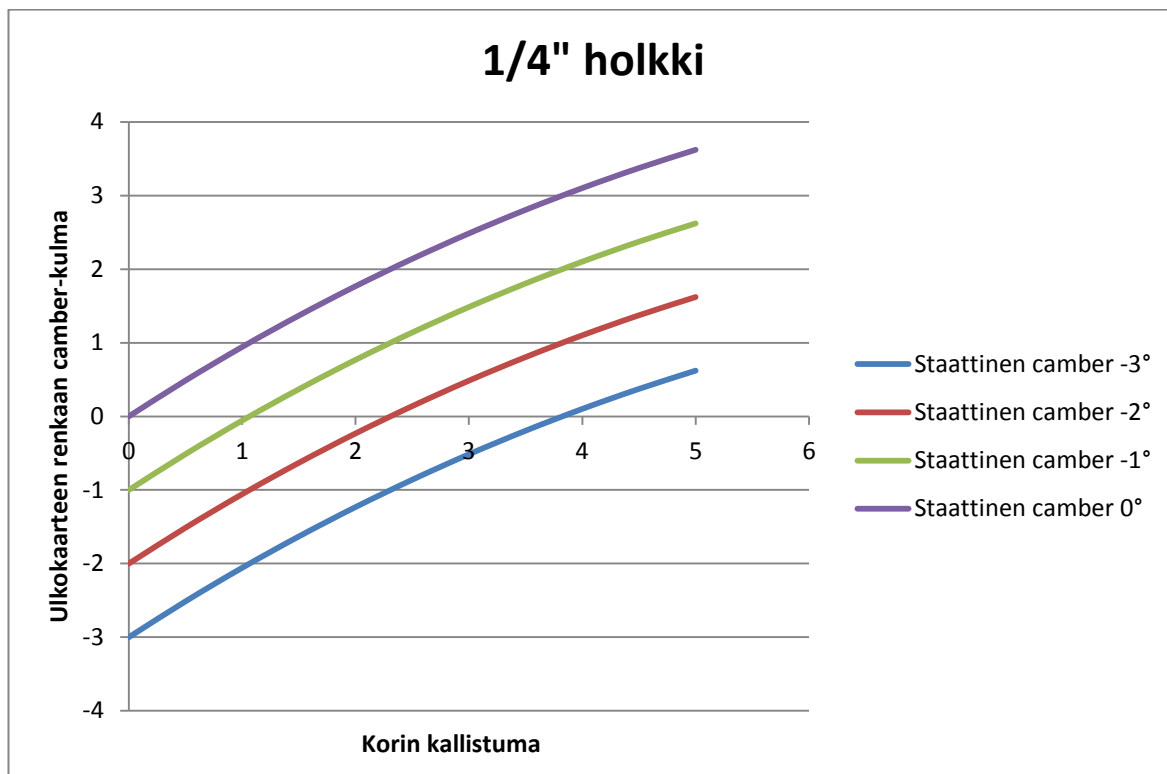
Pyörien asentokulmat eri väliholkeilla.



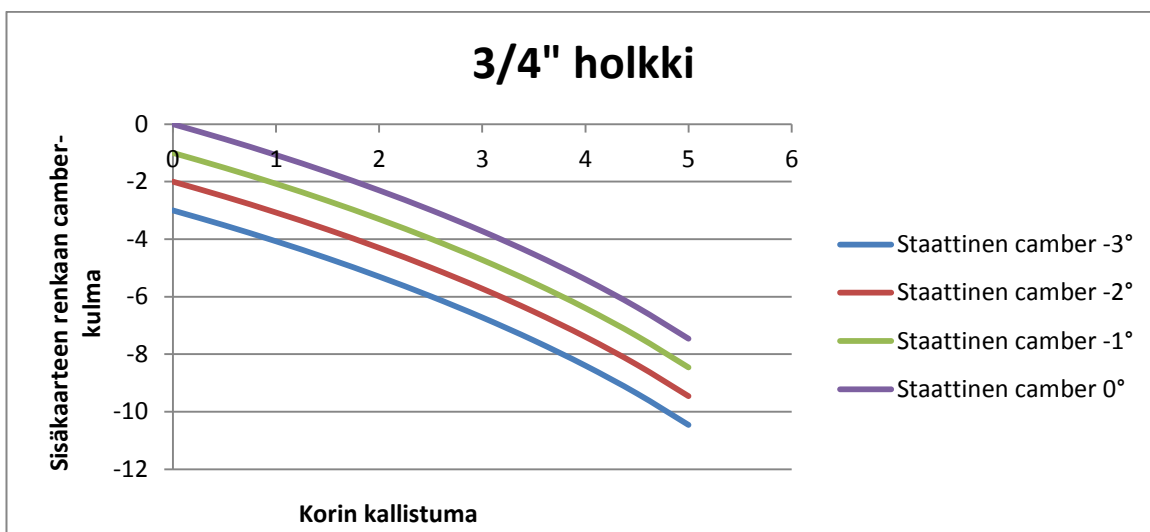
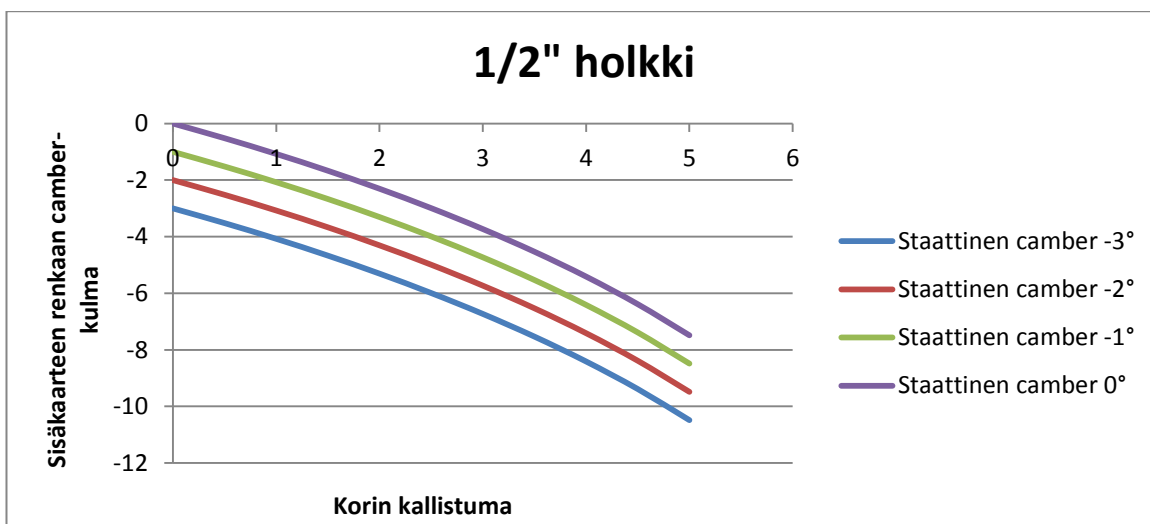
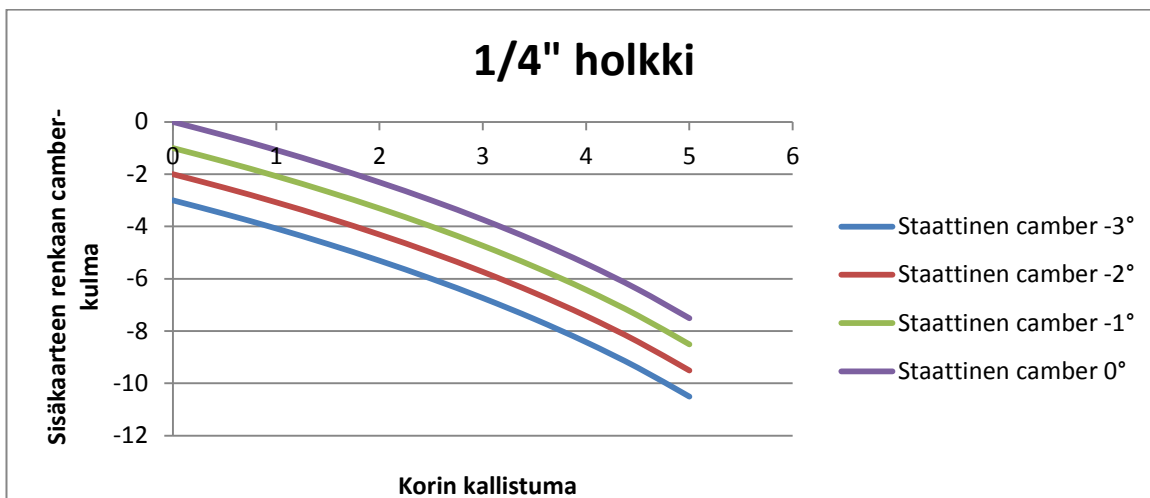
Ohjauspyörää käännetään 20° ja jousituksen sisäänjoustoa on 20 mm.

LIITE 2 Väliholkkien vaikutus camberin muuttumiseen joustossa

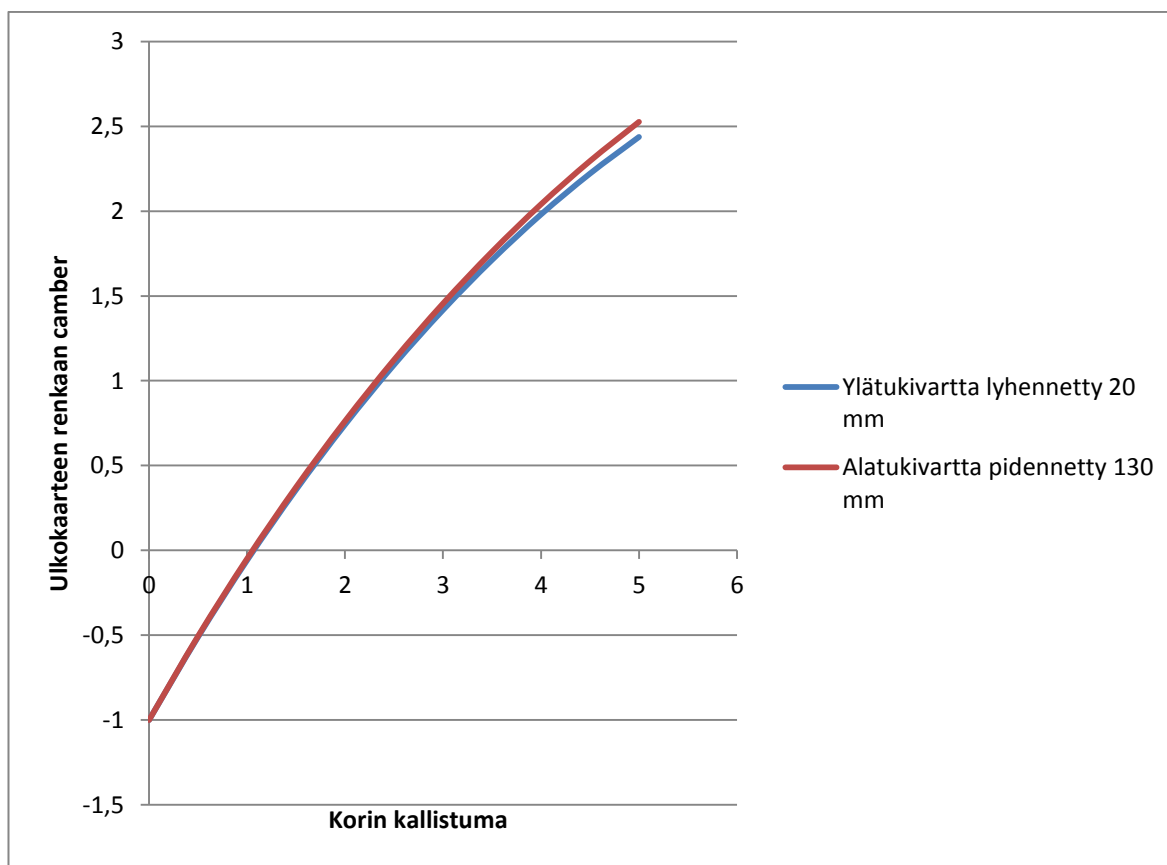
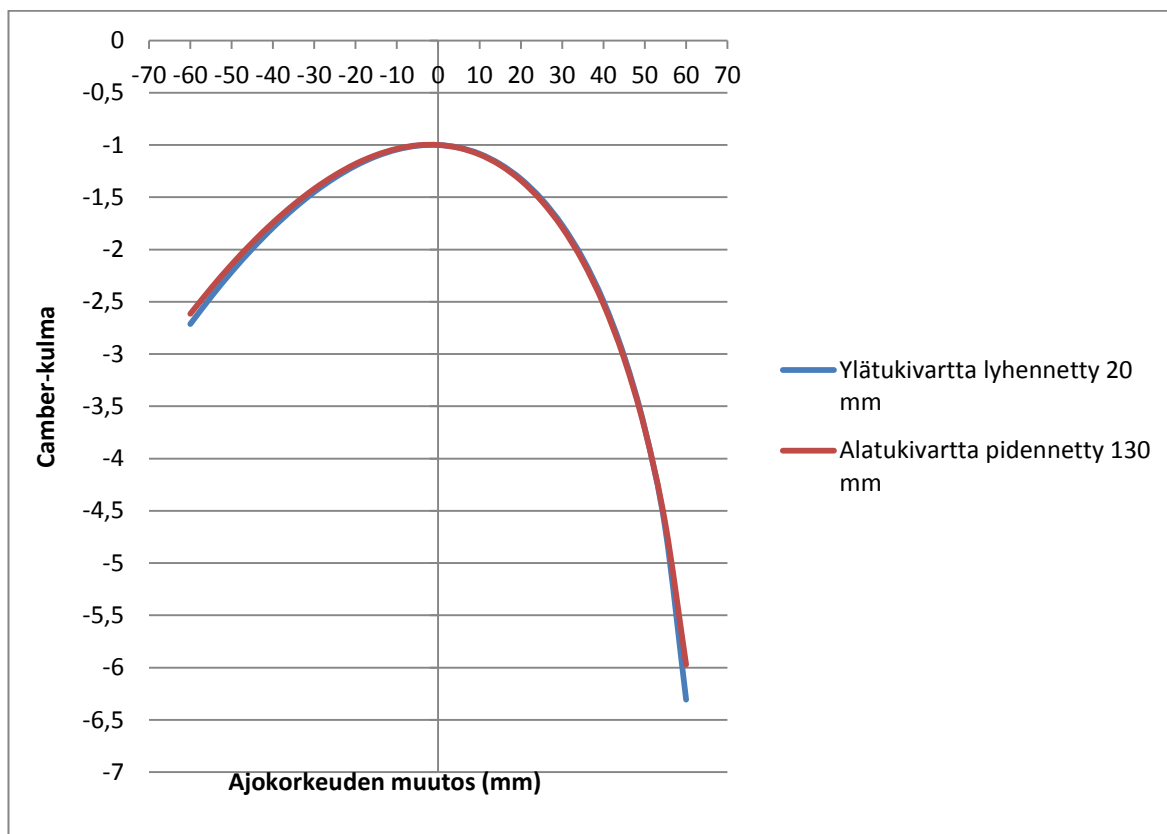


LIITE 3 Väliholkkien vaikutus ulkokaarteen renkaan camberiin korin kallistuksessa

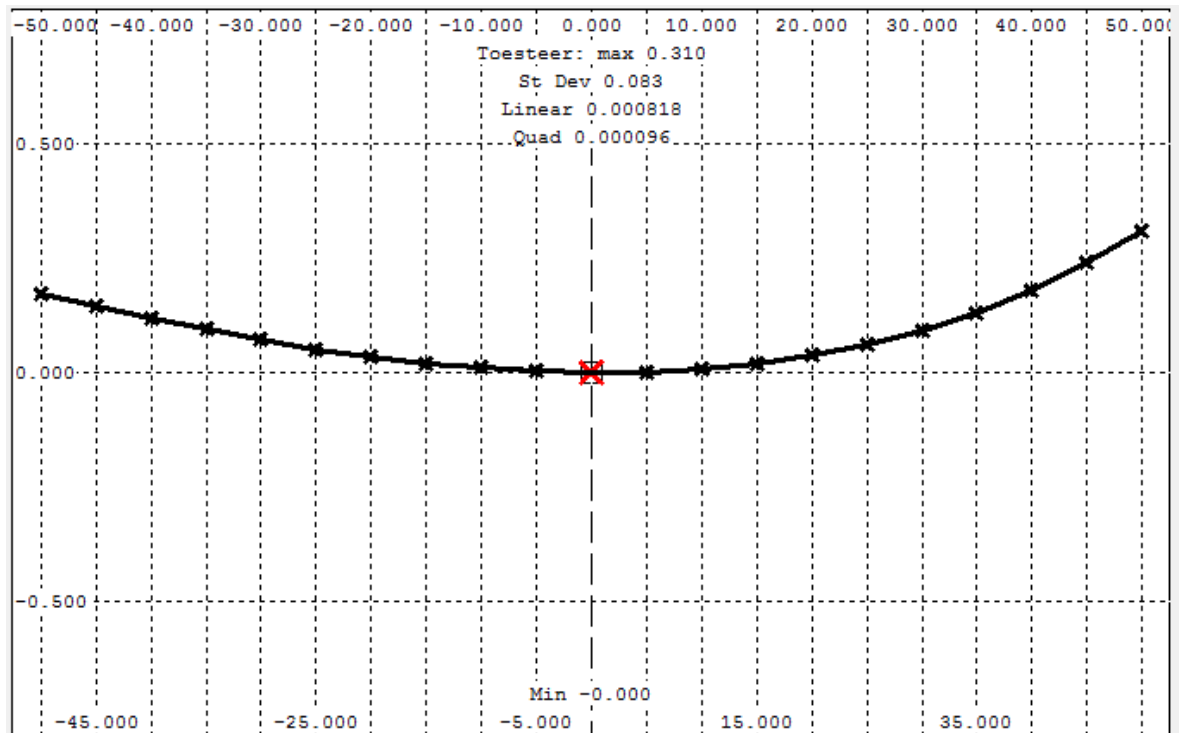
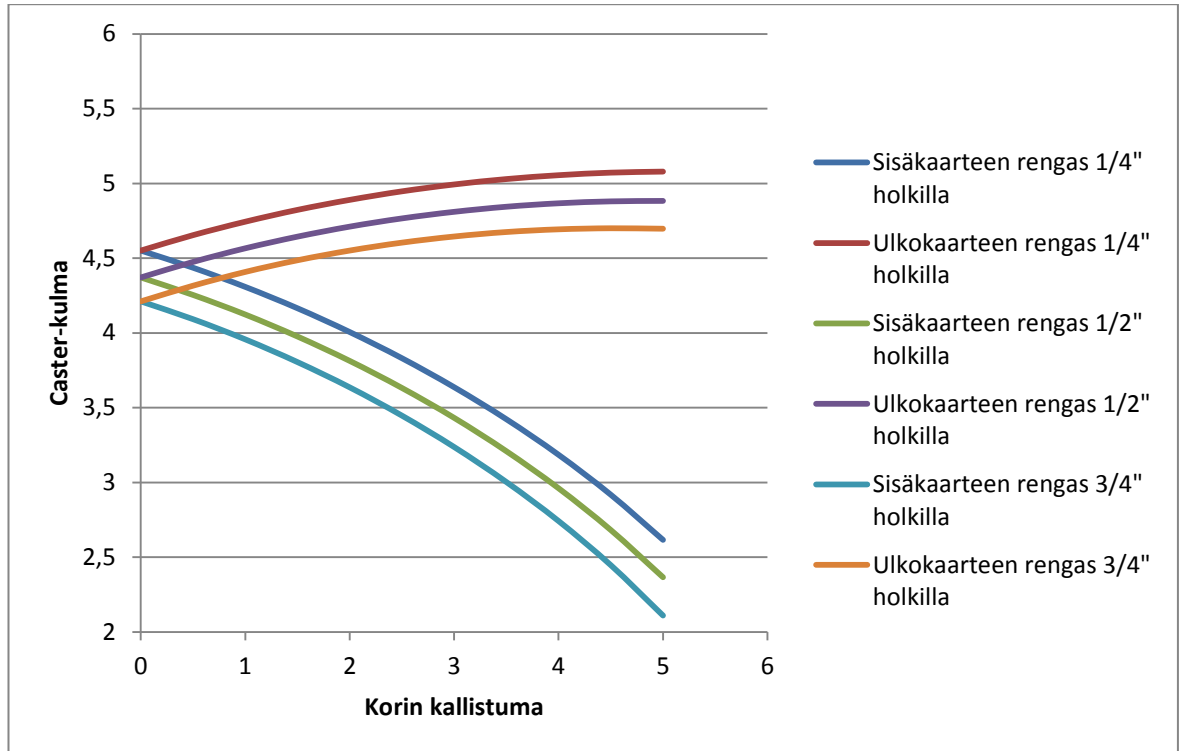
LIITE 4 Väliholkkien vaikutus sisäkaarteen renkaan camberiin korin kallistuksessa



LIITE 5 Tukivarsien pituuden vaikutus camber-kulmiin

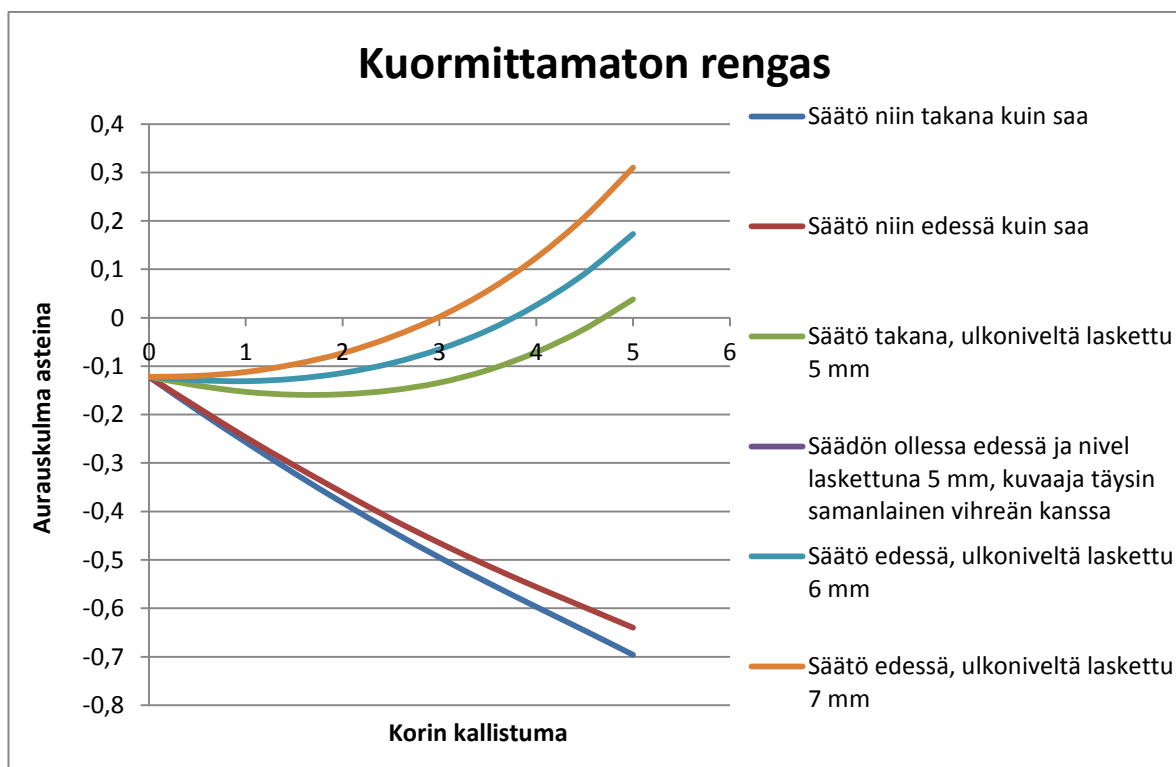
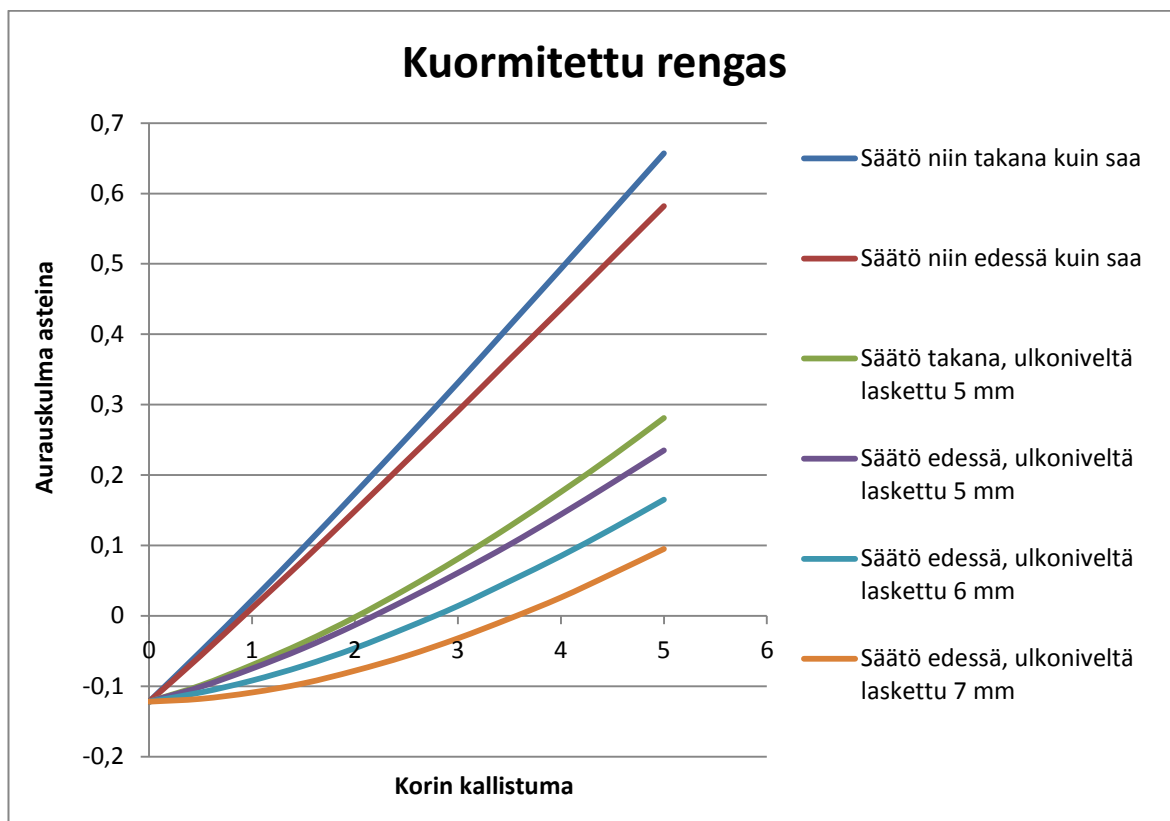


LIITE 6 Eri holkkien vaikutus caster-kulmaan korin kallistuessa, ominaisjouskäyrä muutosten jälkeen

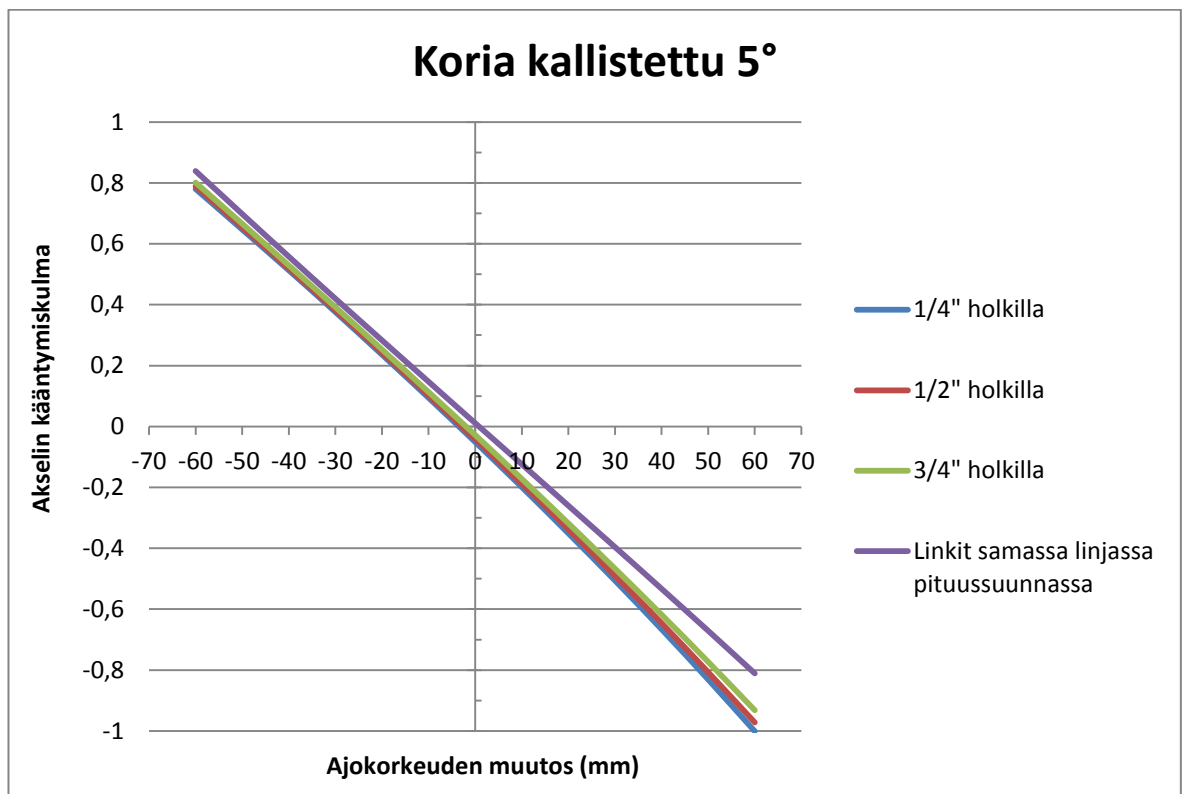
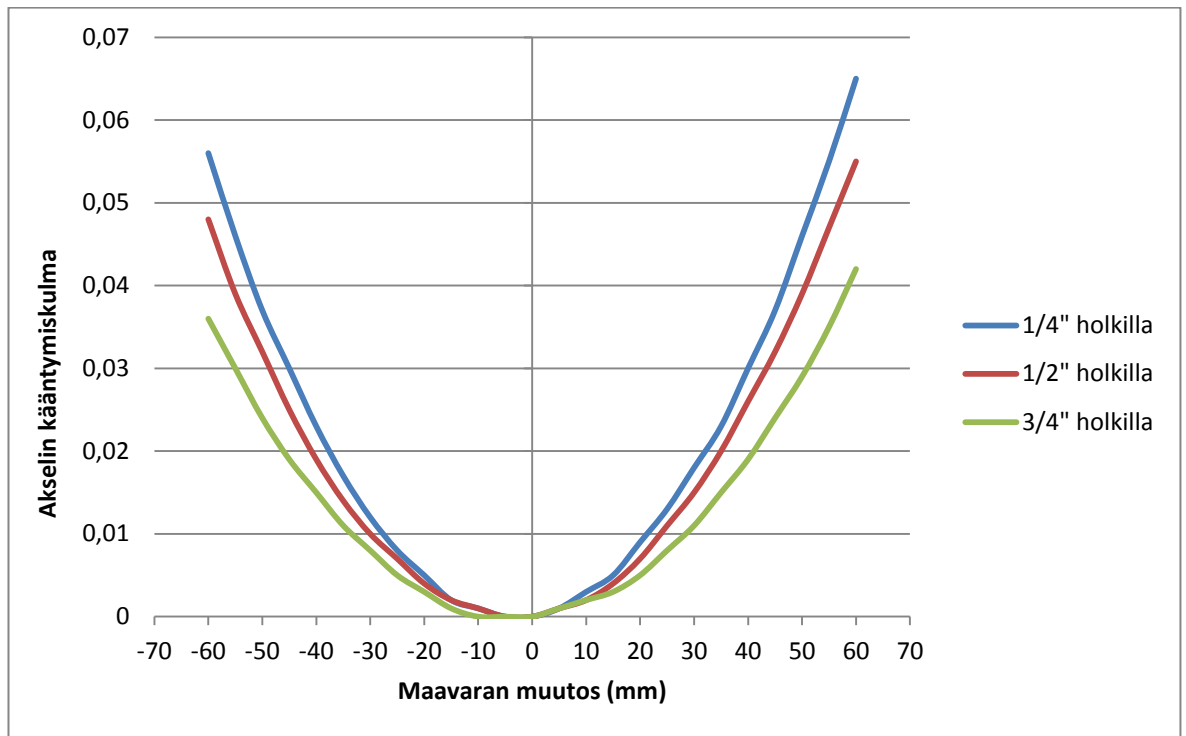


Raidetangon ulkoniveltä laskettu 7mm alaspäin, staattinen aorauskulma 0°

LIITE 7 Ominaisohjaus eri säädöillä korin kallistuessa



LIITE 8 Taka-akselin ominaisohjaus tasajoustossa ja kun korja on kallistettu lisäksi 5°



LIITE 9 Etupään ja takapään kallistuskeskiöiden momenttivarrien pituudet korin kallistuessa

