

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotekehitys

2016

Anssi Hokka

# ROADSPORT A-LUOKAN KILPA-AUTON ERILLISJOUSITETUN TAKA- AKSELISTON SUUNNITTELU

– Lada 1500S



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja Tuotantotekniikka | Tuotekehitys

2016 | Sivumäärä: 47

Ohjaaja Vesterinen Kalevi

Anssi Hokka

# ROADSPORT A-LUOKAN KILPA-AUTON ERILLISJOUSITETUN TAKA-AKSELISTON SUUNNITTELU

Työn tarkoituksena on suunnitella roadsport A-luokan kilpa-autoon erillisjousitettu taka-akselisto alkuperäisen akseliston tilalle. Auto, johon kyseinen akselisto suunnitellaan, on merkiltään Lada ja malliltaan 1500s. Työssä tutkittiin parametrejä, jotka vaikuttavat ajo-ominaisuuksiin rata-autoilussa. Työssä pyritään tuomaan esille keskeisimpiä aiheita renkaiden, akseliston ja rungon toiminnasta. Opinnäytetyön aikana on perehdytty aiheesta kirjoitettuun kirjallisuuteen, jonka perusteella on päätetty, millainen akseliston tulisi olla. Vanha akselisto on myös mallinnettu, jotta sen ominaisuudet on saatu selville. Tässä opinnäytetyössä on myös testattu vetokokeella nivellaakereita sekä tukivarsien kaikki muut komponentit.

Tärkeimpinä akseliston toimintaan vaikuttavina tekijöinä voidaan pitää pyörien optimaalista asentoa ajoradan pintaan nähden. Rengas on siis tärkein yksittäinen tekijä koko auton toiminnan kannalta. Erillisjousitettua akselistoa jäykkään akseliin vertailemalla päästiin johtopäätökseen, että erillisjousitettu akseli toimii paremmin epätasaisilla ajoradoilla kuin jäykkä akseli. Se myös mahdollistaa pyörien asentoparametrien suunnittelun korin eri kallistuskulmille ja eri joustotilanteille.

Tämän opinnäytetyön pohjalta valmistettiin erillisjousitetusta taka-akselistosta prototyyppi, joka on vielä kokoonpanovaiheessa.

ASIASANAT:

Autourheilu, Mallintaminen

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Product development

2016 | Total number of pages: 47

Instructor Vesterinen Kalevi

Anssi Hokka

# INDEPENDENT REAR SUSPENSION DESIGN FOR ROADSPORT GROUP A RACE CAR

The aim of this thesis was to design a road sport group A race car with independent rear suspension to replace the original axle. The parameters that affect the handling characteristics of the circuit race were examined. The goal was to introduce the main topics related to tires, axles and chassis. Information for this thesis was found from literature and based on this information, the decision of the type of axle was made. The old axle assembly was also modeled so that its properties could be known. In this thesis spherical bearings as well as the fully assembled control arms were examined by conducting a tensile strength test.

The most important factors affecting the operation of the suspension can be considered to be the optimal position of the wheels relative to the road surface. The tire is therefore the single most important factor for the entire operation of the car. The comparison of independent axles with a beam axle lead to the conclusion that an independent axle works better on rough road than a beam axle. It is also possible to design the car camber gain different tilt angles and the different flexibility situations with an independent axle.

On the basis of this study, a prototype of an independent suspension rear axle, which is still in the assembly stage, was prepared.

## KEYWORDS:

Auto racing, Modeling

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 ROADSPORT A-LUOKKA</b>	<b>9</b>
2.1 Historia	9
2.2 ManseMotors	9
2.3 Kilpa-ajoneuvo	9
2.4 Taka-akselistoa ja sen komponentteja koskevat säännöt	9
<b>3 RENGAS</b>	<b>11</b>
3.1 Renkaan ominaisuudet	11
3.2 Kosketuspinta	11
3.3 Pyörän sivukallistuman aiheuttama sivuvoima (engl. Camber thrust)	12
3.4 Renkaan pito suhteessa siihen kohdistettuun kuormaan	13
3.5 Circle of traction -konsepti	14
<b>4 PYÖRÄN ASENTOPARAMETRIT</b>	<b>15</b>
4.1 Camber	15
4.2 Camber-kulman muutos ajokorkeuden muuttuessa	16
4.3 Olkatapin takakallistuma	17
4.4 Aorauskulma	18
4.5 KPI	18
4.6 Olkapoikkeama	19
<b>5 ALUSTA</b>	<b>20</b>
5.1 Alustan tehtävät	20
5.2 Ali- ja ylioijautuvuus	20
5.3 Kallistuskeskiö	21
5.4 Korin kallistusvoima	22
5.5 Korin kallistusvoiman jakautuminen	23
5.6 Korin kallistuskulma	23
5.7 Painopiste	24
5.8 Painonsiirto	24
5.9 Nyökkäys ja niaus	25

5.10 Alustan korkeus ja jäykkyys	26
5.11 Alustan helat	27
5.12 Korin kiertojäykkyyden vaikutus	27
5.13 Jäykän taka-akselin ominaisuudet	28
5.14 Erillisjousitetun taka-akselin ominaisuudet	29
<b>6 SUUNNITTELUTYÖ</b>	<b>31</b>
6.1 Pääpiirteiden määrittäminen	31
6.2 Halutut ominaisuudet	31
6.3 Alkuperäisten osien mallintaminen	32
6.4 Suunnitellun rakenteen esittely	33
6.5 Valmiskomponenttien valinta	35
6.6 Pyöränkulmat	36
6.7 Tasauspyörästäön apurunko	36
6.8 Tasauspyörästäön kotelo	37
6.9 Vetoakseli	37
6.9.1 Vetonivelen kulmanmuutos	38
6.9.2 Nivelpisteiden välisen etäisyyden muutos	38
6.10 Materiaalivalinta eri osille	38
6.11 Nivellaakereiden vetolujuuden mittaaminen	39
6.12 Apurungon kiinnitys koriin	42
6.13 Tukivarsien kiinnityspisteiden asettelu	43
6.14 Pyörännapa	43
6.15 Pyörännavan kiinnityspisteet tukivarsille	44
<b>7 POHDINTA</b>	<b>45</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>46</b>

## KUVAT

Kuvaaja 1. Esimerkki sivukallistuman ja sivuvoiman suhteesta	12
Kuva 2. Pyöränkuorman vaikutus kitkakertoimeen	13
Kuva 3. Pyörän sivukallistuma	15
Kuva 4. Olkatapin takakallistuma	17
Kuva 5. Olkatapin sivukallistuma	18
Kuva 6. Olkapoikkeama	19
Kuva 7. Yli- ja aliohjautuvuus	20
Kuva 8. Kallistuskeskiön määrittäminen	21
Kuva 9. Momenttikeskkipiste	22
Kuva 10. Niiausta vastustava geometria jäykässä taka-akselissa	25
Kuva 11. Alkuperäinen taka-akselisto	32
Kuva 12. Alkuperäisen taka-akselin tukivarsigeometria	33
Kuva 13. Katkennut tukivarsi vetokokeen päätyttyä	35
Kuva 14. Lyhennetty taka-akseli	37
Kuva 15. Vetoakseli	38
Kuva 16. Teollisuus nivellaakerin vetokoe	39
Kuva 17. Motorsport nivellaakerin vetokoe	40
Kuva 18. Tukivarsiputken vetokoe	41
Kuva 19. Apurungon levyrakenne	42
Kuva 20. Taka-akseli edestä	43
Kuva 21. Tukivarsien kiinnitys napaan	44

## TAULUKOT

Taulukko 1	33
------------	----

## KÄYTETYT LYHENTEET

Lyhenne	Lyhenteen selitys
KPI	Kingpin inclination
SAI	Steering axis inclination

# 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on suunnitella roadsport A-luokan kilpa-autoon erillisjousitettu taka-akselisto alkuperäisen akseliston tilalle. Auto, johon kyseinen akselisto suunnitellaan, on merkiltään Lada ja malliltaan 1500s. Kyseisessä autossa on käytössä vielä alkuperäinen jäykkä taka-akseli. Työssä myös vertaillaan alkuperäistä akselia erillisjousitettuun.

Työssä käytetään SolidWorks 3D -mallinnusohjelmaa osien mallintamiseen ja pyörien asentoparametrien säätämiseen.

Kilpa-auton alustan suunnittelusta on saatavilla runsaasti kirjallisuutta, jota myös tässä työssä hyödynnetään. Tässä työssä pyritään esittelemään aiheita, joihin on syytä perehtyä suunniteltaessa kilpa-ajoon soveltuvaa akselistoa. Tämän työn pohjalta valmistetaan akselista prototyyppi, jota testataan käytännössä. Alunperin työssä oli tarkoitus hyödyntää myös rengas-dataa, josta olisi selvinnyt tarkalleen, missä asentokulmissa käytettävä rengas toimisi parhaiten. Syystä tai toisesta rengasvalmistajat eivät heidän testituloksia antaneet käyttöön tätä opinnäytetyötä varten lukuisista yrityksistä huolimatta.



## 2 ROADSPORT A-LUOKKA

### 2.1 Historia

Vuonna 1990 perustettiin yhdistys, jonka tehtävänä on vaalia historiallisten kilpa-autojen harrastusta ja järjestää niille asfalttiratakilpailuja. Kyseinen yhdistys on nimeltään Historic Race Finland ry. Yhdistys on toimintansa alkuvuosina järjestänyt erilaisia kerhokilpailuja, jonka jälkeen on ryhtynyt järjestämään kansallisia kalenterikilpailuja. Nykyään HRF järjestää vuosittain neljä, eri moottiradoilla ajettavaa rata-autosarjan kilpailutapahtumaa. Päätapatumana toimii Historic Grand Race, joka onkin viime vuosina kerännyt lähes 150 kilpailijaa. HRF on yksi Suomen suurimmista autourheiluseuroista jäsenmäärällä mitattuna, joka on noin 350. (Historic Race 2016)

### 2.2 ManseMotors

ManseMotors on aloittanut toimintansa myymällä ja tuomalla maahan varaosia erityisesti Lada-merkkisiin autoihin. Nykyään toiminta on myös laajentunut uusien autojen maahantuontiin. Yritys työllistää 2–3 henkilöä.

### 2.3 Kilpa-ajoneuvo

Kilpa-ajoneuvona on Lada 1500s. Autossa käytetty moottori pohjautuu sarjatuotantomalliin ja kehittää noin 400 hevosvoiman tehon turboahdettuna. Polttoaineena käytetään RE85-etanolia. Auton alusta on pääpiirteittäin vielä vakion kaltainen tukivarsien ja akselistorakenteiden osalta.

### 2.4 Taka-akselistoa ja sen komponentteja koskevat säännöt

Vetopyörästä ja taka-akselisto ovat vapaat. Tasauspyörästä lukko on sallittu, mutta 100 %:n lukitus on kielletty.

Lisätuennat on sallittu. Jousien materiaali, määrä, tyyppi ja mitat ovat vapaat. Iskunvaimentajat ovat vapaat, mutta niiden lukumäärää ei saa muuttaa. Kiinnityspisteitä saa muuttaa. Kallistuksenvakaajat ovat vapaat. Tukivarret ja kumihelat saa vaihtaa tai muuttaa, mutta eturipustuksen perusrakenteen on säilyttävä alkuperäisenä (esim. kolmiotukivarsirakenteen muuttaminen joustintueksi ja päinvastoin on kielletty). (Historic Race 2016)

## 3 RENGAS

### 3.1 Renkaan ominaisuudet

Renkaalla on suurin vaikutus auton käyttäymiseen koko auton komponenteista. On tärkeää ymmärtää renkaan käyttäytyminen eri ajotilanteissa toimivan kilpa-auton rakentamiseksi. Renkaan pito määräytyy pääasiassa sitä maata vasten painavan pyöränkuorman mukaan. Pyöränkuormien jakautumista renkaiden välillä voidaan taas säätää alustageometrian avulla, ja näin päästään käsiksi itse säätämiseen sekä voidaan arvioida muutosten vaikutusta auton ajettavuuteen. Renkaan kitka eli pitovoima taas määrittää, kuinka kovaa autolla voidaan ajaa mutkaan, kiihdyttää tai jarruttaa. (Adams 1992, 1.)

### 3.2 Kosketuspinta

Rengas tarjoaa parhaan pidon sen kosketuspinnan ollessa kohtisuoraan tienpintaa vasten, jolloin myös saavutettava kosketuspinta on suurimmillaan. Kosketuspinnan ollessa suurimmillaan ajoradan pintaan nähden, antaa rengas parhaan pidon millä tahansa pystykuormalla.

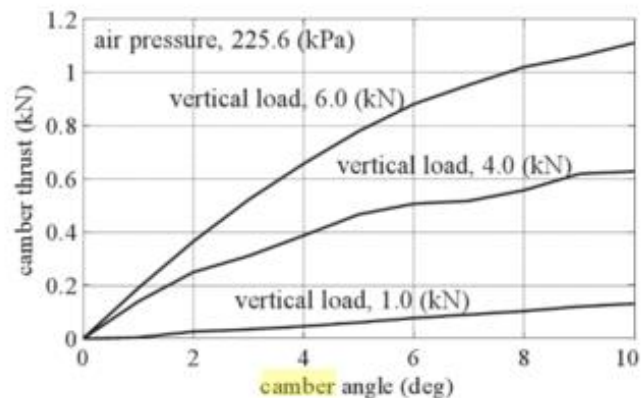
(Adams 1992, 3.)

### 3.3 Pyörän sivukallistuman aiheuttama sivuvoima (engl. Camber thrust)

Kuvaajasta 1. nähdään, että camber-kulman avulla saadaan lisää sivuttaisliikettä vastustavaa voimaa camber-kulman ja rengasta alaspäin painavan voiman lisääntyessä, toisin kuin aikaisemmin kerrottiin, että suoraan ajettaessa paras pito saavutetaan camber-kulman ollessa nolla ajoradan pintaan nähden.

Kuvaaja 1. Esimerkki sivukallistuman ja sivuvoiman suhteesta

Pneumatic trail to side-slip angle.

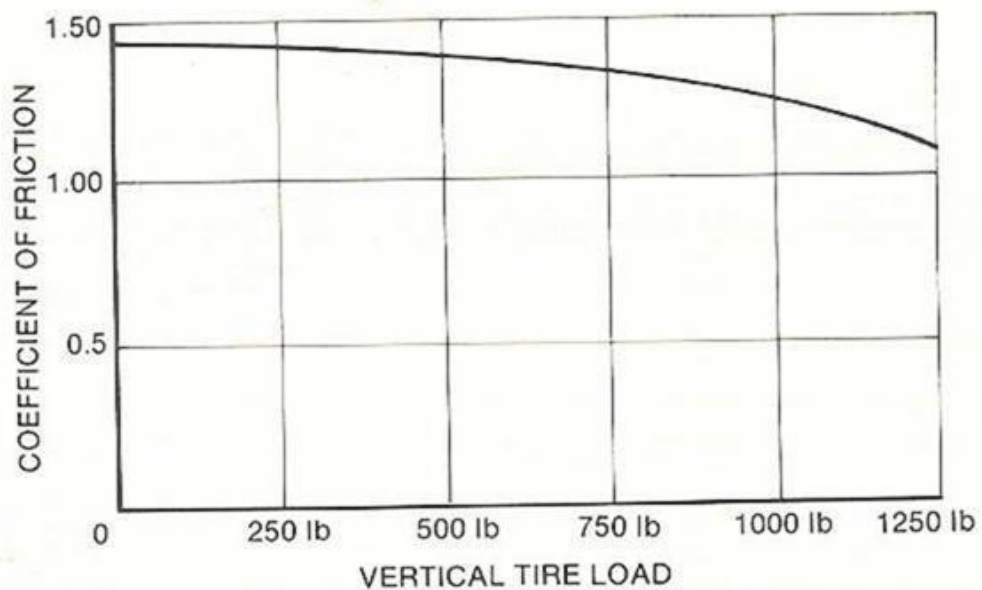


(Google Books 2016)

Oikea camber-kulma löytyy seuraamalla renkaan lämpötiloja ja kaarrenopeuksia eli lisäämällä negatiivista camber-kulmaa niin kauan kuin se auttaa kaarrenopeuksissa. Tällöin on myös löytynyt optimaalinen sivukallistuman aiheuttama sivuvoima. Nykyiset F1-sarjan autot käyttävät etuakselilla noin 5 asteen negatiivista camber-kulmaa muun muassa tämän ominaisuuden takia.

### 3.4 Renkaan pito suhteessa siihen kohdistettuun kuormaan

Kuvasta 6. voidaan nähdä, että renkaan kitkakerroin laskee siihen kohdistetun pyöränkuorman kasvaessa.



*Figure (4): Coefficient of friction vs vertical tire load.*

Kuva 2. Pyöränkuorman vaikutus kitkakertoimeen

(Rennlist 2016)

Tästä voidaan päätellä, että mitä vähemmän autossa siirtyy kaarteessa painoa ulommille renkaille, sen parempana kokonaispito säilyy. Monesti näkee, että kilpa-autoissa sisäkaarten puoleinen rengas nousee kokonaan irti tiestä. Tällöin renkaalta on hävinnyt luonnollisesti kaikki pito ja saavutettava sivuttaiskiihtyvyyden pienentynyt. Jos edellä mainitussa tilanteessa sisäkaarten puoleinen pyörä olisi edes hieman kiinni tiessä, olisi saavutettava

pito mutkassa parempi. Painonsiirtoa kaarteessa voidaan vähentää muun muassa matalemmalle sijoitetulla painopisteellä.

### 3.5 Circle of traction -konsepti

Renkaalla on vain tietty rajattu määrä kitkaa eli pitoa käytettävissä. Renkaan pidon määrä on riippuvainen muun muassa pyöränkuormasta, radan kunnosta ja säätilan vaikutuksesta. Tätä pitoa voidaan käyttää kaarreajoon, kiihdytykseen tai jarrutukseen, mutta kun esimerkiksi ajetaan mutkassa pidon äärirajoilla saa kaasun lisääminen pidontarpeen ylittämään käytettävissä olevan kokonaismäärän, jolloin rengas alkaa pyörimään tyhjää. Kokonaispidon määrä on siis jaettava eri ajotilanteista johtuvien dynaamisten voimien kesken.

Äärimmäinen esimerkki tästä tilanteesta saadaan, kun autolla lähdetään paikaltaan ja moottorissa on tehoa sen verran, että vetävät pyörät alkavat pyöriä tyhjää. Tällöin kaikki käytettävissä oleva pito käytetään kiihdyttämiseen ja takavetoisessa autossa perä alkaa liukua sivulle, koska pito ei riitä estämään enää sivuttaissuuntaista liukumista, kun kaikki saatavilla oleva pito on käytössä menosuuntaan kiihdyttämiseen.

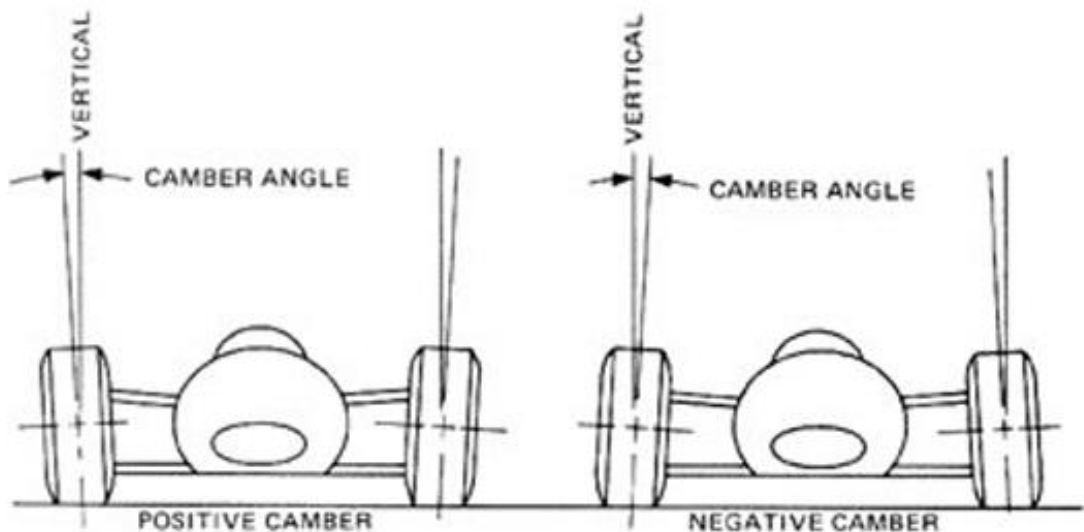
(Adams 1992, 3-4.)

## 4 PYÖRÄN ASESTOPARAMETRIT

### 4.1 Camber

Camber-kulma eli pyörän sivukallistuma. Yksi tärkeimmistä renkaan kaarrepitoon vaikuttava tekijä on camber-kulma. Camber-kulmalla tarkoitetaan pyörän sivukallistumaa. Se on siis kulma, joka muodostuu pyörän keskiviivan ja pystysuoran välille suoraan edestä tai takaa katsottuna. Camber-kulma on negatiivinen pyörän ollessa kallistunut auton keskilinjaa kohden eli tilanteessa, jossa pyörien yläreunat ovat lähempänä toisiaan kuin alareunat. Puhuttaessa camber-kulman muutoksesta eri jousituksen asennoissa, tarkoitetaan yleensä muutosta auton koriin nähden. Muutokset ajoradan pintaan nähden ovat kuitenkin usein päinvastaisia johtuen korin kallistumasta.

”Kaarrepidon kannalta tärkeää on nimenomaan pyörän kulma tiehen nähden, ei auton koriin nähden.” (Mauno 1991, 6-7.)



Kuva 3. Pyörän sivukallistuma

(Demon Tweeks 2016)

Oikea camber-kulma riippuu käytettävästä renkaasta ja tavoiteltavista ominaisuuksista. Suoraan ajettaessa paras pito saavutetaan yleensä renkaan ollessa pystysuorassa maata kohti. Tilanne muuttuu, kun ajetaan mutkassa, jolloin muunmuassa pyörän sivukallistuman aiheuttama sivuvoima lisää pitoa suuremmilla negatiivisilla camber-kulmilla ajettaessa. Tämä pystytään päättämään tutkimalla rengas-dataa, jota on esitelty muun muassa Milliken&Milliken kirjassa. Jos ulkokaarten puoleinen camber-kulma menee kaarteessa positiivisen puolelle, heikkenee pito merkittävästi sillä renkaalla.

”Positiivisella camber-kulmalla pyörä pyrkii vierimään autosta eroon kartiovierintäperiaatteella. Auto kuitenkin pakottaa renkaan kulkemaan suoraan, jolloin renkaaseen syntyy jo suoraan ajettaessa kallistumasta johtuva sortokulma ja sivuttaisvoima” Renkaan sisä ja ulkokehä pyörivät siis eri kehän pituudella. ”Pyöräparin camber-sivuvoimat ovat vastakkaissuuntaisia ja kumoavat toistensa vaikutukset jos ne ovat yhtä suuret keskenään.” (Laine 1979 , 161)

#### 4.2 Camber-kulman muutos ajokorkeuden muuttuessa

Camber-kulman muutos on toivottavaa kaarteessa, jotta renkaan ja ajo-alustan välinen kosketuspinta saadaan pysymään mahdollisimman suurena. Kun kori kallistuu ulkokaarten puolelle, halutaan camber-kulman muuttuvan enemmän negatiivisen puolelle.

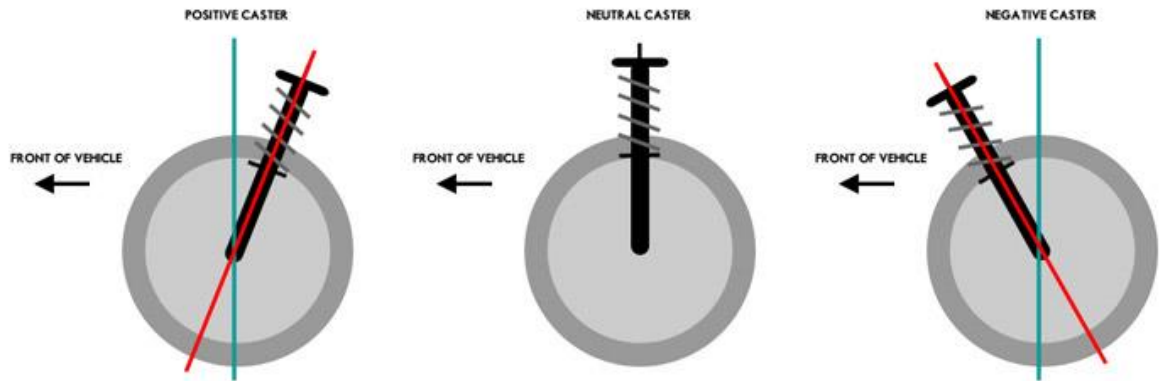
Jarrutus- ja kiihdytystilanteessa tapahtuvassa ajokorkeuden muutoksessa camber-kulman muutokset eivät ole toivottuja, koska ne vähentävät renkaan tiekosketusta.

Normaali jousitusgeometrialla on siis löydettävä toimiva kompromissi eri ajotilanteita varten. (Performance trends 2016)



### 4.3 Olkatapin takakallistuma

Olkatapin takakallistumalla (engl. caster) tarkoitetaan kulmaa sivuprojektiosta kuvattuna kääntöakselin ja pystysuoran välillä.



Kuva 4. Olkatapin takakallistuma

(Viking speed shop 2016)

Positiivisella caster-kulmalla varustettu auto on suuntavakaa ja pyrkii oikaisemaan pyörät itsestään käännöksen jälkeen. Tarvittava ohjausvoima saattaa kuitenkin muodostua niin isoksi, että ohjaustehostin muuttuu pakolliseksi. Ohjaustuntuma on hyvä positiivisella caster-kulmalla.

Negatiivisella caster-kulmalla varustettu auto on kevyt ohjata, mutta suuntavakaus on huonompi kuin positiivisella kulmalla. (Mauno 1991, 14-18)

Pneumaattinen jättämä muodostuu renkaan kimmo-ominaisuuksien vuoksi pyörän keskilinjan taakse. Tämä aiheuttaa sen, että ohjaus palautuu vaikka caster-kulma olisi nolla tai hieman negatiivinen. Suuremmilla käänkökulmilla pneumaattinen jättämä luonnollisesti pienenee, koska renkaan kosketuspinta siirtyy lähemmäs akselin keskilinjaa. (Olavi Laine, s.114, auto-tekniikka osa 1 ajo-ominaisuudet)

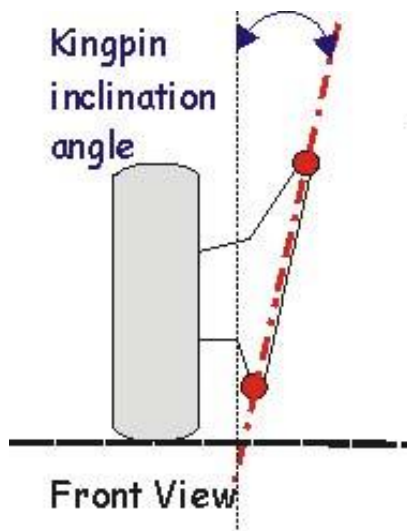
#### 4.4 Aurauskulma

Aurauskulmat muuttuvat camber-voimien, vierintävastuksen ja vetovoiman johdosta. Aurauskulmia käytetään komponentteja vääntävien voimien hallintaan.

”Auton ajettavuuden kannalta paras aurauskulma on löydettävissä vain kokeilemalla” (Mauno 1991, 22)

#### 4.5 KPI

KPI eli ”kingpin inclination” tarkoittaa olkatappilinjan sivukallistumaa pystysuoran suhteen. Käytetään myös nimitystä ”SAI” eli steering axis inclination. Tämä sivukallistuma vaikuttaa renkaasta ohjaukseen vaikuttavien voimien suuruuden vaihteluun.



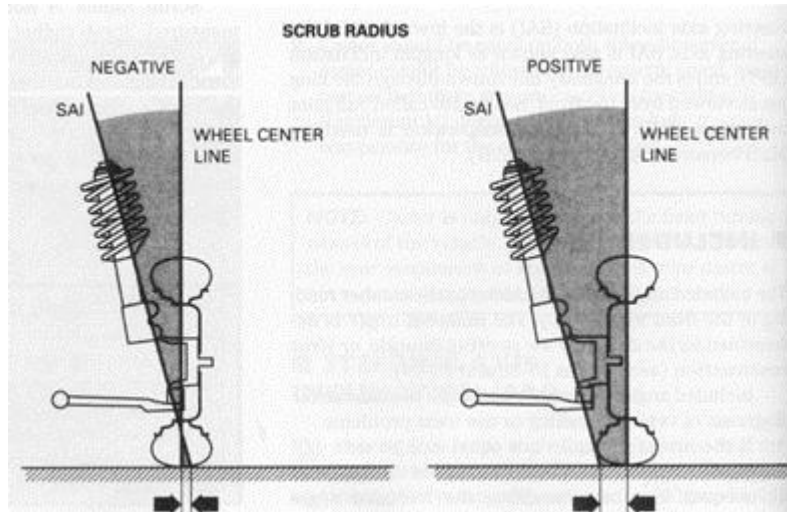
Kuva 5. Olkatappilin sivukallistuma

(Motorized couch 2016)

Kilpa-autossa KPI-kulmalle ei normaalisti annetta suurta painoarvoa vaan hyväksytään kulma, johon geometrian määrittämisessä päädytään. (Mauno 1991, 18-19.)

#### 4.6 Olkapoikkeama

”Scrub radius” tai ”Kingpin offset” tarkoittaa suomeksi olkapoikkeamaa eli pyörän kääntöakselin ja pyörän keskilinjan kohtauspisteiden etäisyyttä toisistaan maanpinnan tasossa.



(Clubprotege 2016)

Kuva 6. Olkapoikkeama

Tällä etäisyydellä on melko suuri vaikutus auton ohjaustuntumaan. Negatiivinen olkapoikkeama parantaa suuntavakautta jarrutuksessa, kun esimerkiksi toinen pyörä akselilta on hiekalla ja toinen asfaltilla.

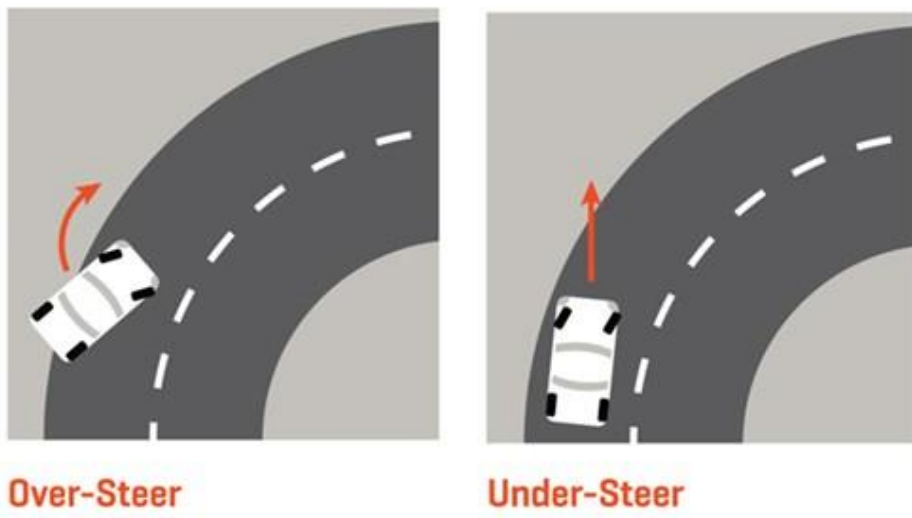
## 5 ALUSTA

### 5.1 Alustan tehtävät

Auton alusta toimii renkaiden ja muun korirakenteen yhdistävänä osana. Siihen kuuluu muun muassa tukivarret, iskunvaimentimet, jouset ja helat. Auton alustan rakenteella pystytään vaikuttamaan ja muuttamaan ajo-ominaisuuksia, kuten kaarrekäyttäytymistä ja painonsiirtoa renkaiden välillä. Alustan tärkein tehtävä on pitää renkaat optimaalisessa asennossa ajoradan pintaan nähden, sekä kiinni siinä.

### 5.2 Ali- ja ylioijautuvuus

Aliohjaus tarkoittaa ajotilannetta, jossa kaarteessa auton etupyörät luistavat sivullepäin. Vastaavasti ylioijaus tarkoittaa, että kaarteessa etupyörät pitävät mutta takapyörät luistavat niin, että auton perä luistaa sivullepäin.



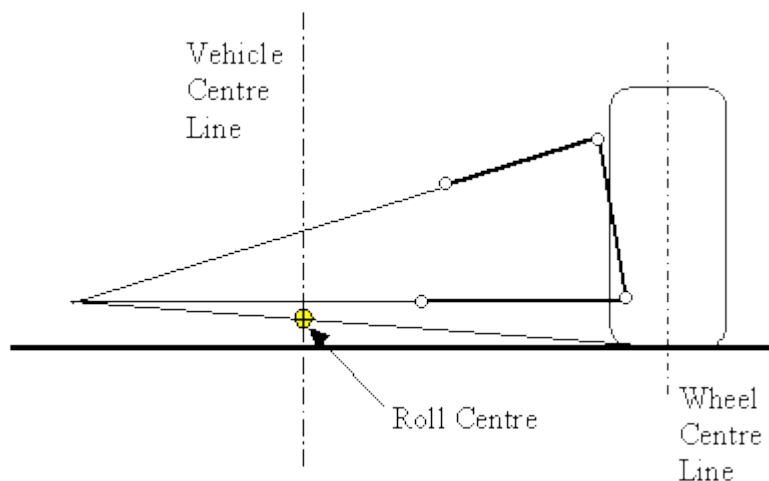
Kuva 7. Yli- ja alioijautuvuus

(Maxxis UK 2016)

Yleensä tavalliset henkilöautot on suunniteltu hieman aliohjautuviksi turvallisuuden takia.

### 5.3 Kallistuskeskiö

Pyöräntuennalla on aina kallistuskeskiö, jonka paikka määräytyy tukivarsi-geometrian perusteella. Kuvassa 8. on esitetty kallistuskeskiön paikan määrittäminen. Tämän keskiön ympäri auton jousitettu massa pyrkii kallistumaan. Kun vedetään viiva etu- ja takakallistuskeskiöiden välille, saadaan koko auton kallistusakseli. Mitä ylempänä painopiste on kallistuskeskiöön nähden, sitä suurempi on kaarteessa koria kallistava momentti. (Billzilla 2016)



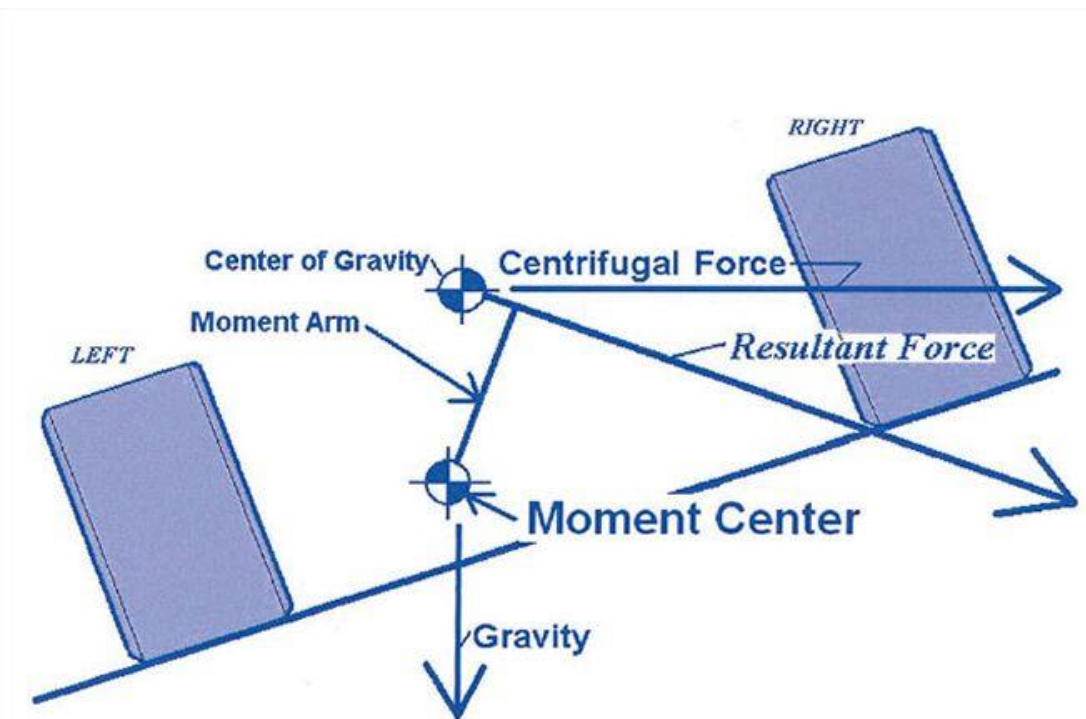
Kuva 8. Kallistuskeskiön määrittäminen

Kallistuskeskiön paikalla on suuri merkitys auton käytökseen. Jos oletetaan, että auton painopiste sijaitsee lähellä akselivälin keskilinjaa ja etupään kallistuskeskiö alempana kuin takapään kallistuskeskiö, niin kori pyrkii etupään osalta kallistumaan enemmän kuin takapää. Korin kiertojäykkyyden ollessa

hyvä asettuu kallistuma keskiarvoon, jolloin takapäässä siirtyy painoa enemmän ulkokaarteeseen puoleiselle renkaalle kuin etupäässä. Tässä tilanteessa auto käyttäytyy ylioheavasti. Vastaavasti kun takapään kallistuskeskiö on matalammalla kuin etupään, muuttuu auton käytös alioheavaksi. Yleensä kaikilla autoilla takapään kallistuskeskiö on korkeammalla kuin etupäässä.

#### 5.4 Korin kallistusvoima

Korin kallistusvoiman aiheuttaa korin painopisteeseen vaikuttavat voimat eli painovoima ja keskeiskiihtyvyyden aiheuttama voima. Korin kallistuma on siis riippuvainen painopisteen ja kallistusakselin välisestä etäisyydestä. Jos ne sijaitsevat samassa pisteessä, kori ei kallistu lainkaan, ja kun pisteiden etäisyys toisistaan kasvaa, myös kori kallistuu enemmän.



Kuva 9. Momenttikeskipiste

Painovoima painaa aina autoa suoraan maanpintaa kohden ja keskeiskiihtyvyyden sivulle päin eli todellisuudessa korin kallistuman määrää näiden resultanttivoima ja kuvitteellinen momenttivarsi. (Bolles 2010, 17) (Hotrod 2016)

### 5.5 Korin kallistusvoiman jakautuminen

Yleensä kori yrittää kallistua enemmän auton etupäästä, kun ajatellaan tilannetta jossa moottori on edessä. Tällöin myös kallistusjäykkyys on normaalisti jäykempi edessä kuin takana. Autossa, jossa molemmat akselit ovat erillisjousitettuja, jousien jäykkyysero itsessään aiheuttaa jo sen, että jäykemmällä jousilla varustettu akseli siirtää enemmän painoa ulkokaarteeseen puolelle, kun taas pienemmän jousijäykkyyden omaava akseli haluaisi kallistaa koria enemmän eikä ottaa kallistusvoimaa vastaan niin pian kuin jousiltaan jäykempi akseli. Tätä eroa voidaan tasoittaa säätämällä takana olevaa kallistuksen vakaajaa jäykemmäksi, jolloin tavoitteena on saada ulkokaarteeseen puoleisille renkaille mahdollisimman samansuuruinen kuormitus, jolloin myös auto olisi tasapainoisempi ajettava. Jos takana ei käytetä edellä mainitussa tilanteessa vakaajaa, auto on aliohjaava. (Adams 1992, 16)

### 5.6 Korin kallistuskulma

Korin kallistuskulma vaikuttaa camber-kulmiin, mikä on syytä ottaa huomioon kallistusjäykkyyttä suunniteltaessa. Yleensä kilpa-autoissa korin kallistuskulma on suunniteltu pysymään alle 1,5 asteen.

Kuten aiemmin todettiin pyörän kosketuspinta tiehen nähden on suurimmillaan, kun rengas on kohtisuoraan maanpintaa vasten. Toisin sanoen, jos kori kallistuu yhden asteen ulkokaarteeseen puolelle menee ulkokaarteeseen camberkulma 1 asteen verran positiivisen puolelle ja sisäkaarteeseen puoleinen rengas 1 asteen

negatiiviseen suuntaan suhteessa maanpintaan. Suoraviivaisesti ajateltuna optimaalisella alustageometrialla kaarteessa yhden asteen korikallistuman aiheuttama sisään ja ulosjousto tulisi myös muuttaa camber-kulmaa korikallistumasta aiheutuvan muutoksen kumotakseen yhden asteen verran vastakkaiseen suuntaan jolloin pito pysyisi tasaisena.

Kilpa-auton käytöksen kannalta on äärimmäisen tärkeää, että molemmat akselit on säädetty toimimaan yhdessä ja että ne pyrkivät kallistamaan koria yhtäläisesti kaarteissa. (Bolles 2010, 3)

### 5.7 Painopiste

Painopiste sijaitsee pisteessä, josta auton voisi nostaa ilman, että se vaikuttaa auton tasapainotilaan. Autoa voisi myös pyörittää tämän pisteen ympärillä, jolloin se jäisi aina siihen asentoon mihin se jätetään pyörittämisen jälkeen.

### 5.8 Painonsiirto

Painonjakauma määrittää kuinka paljon painoa on yhdellä renkaalla, kun auto on tasaisella pinnalla ja paikallaan. Tilanne muuttuu, kun määritetään dynaamisia kulmapainoja eri ajotilanteissa. Esimerkiksi kaarteessa painoa siirtyy ulkokaarten puoleisille renkaille sisäpuolelta ja kiihdytyksessä etupyöriltä takapyörille.

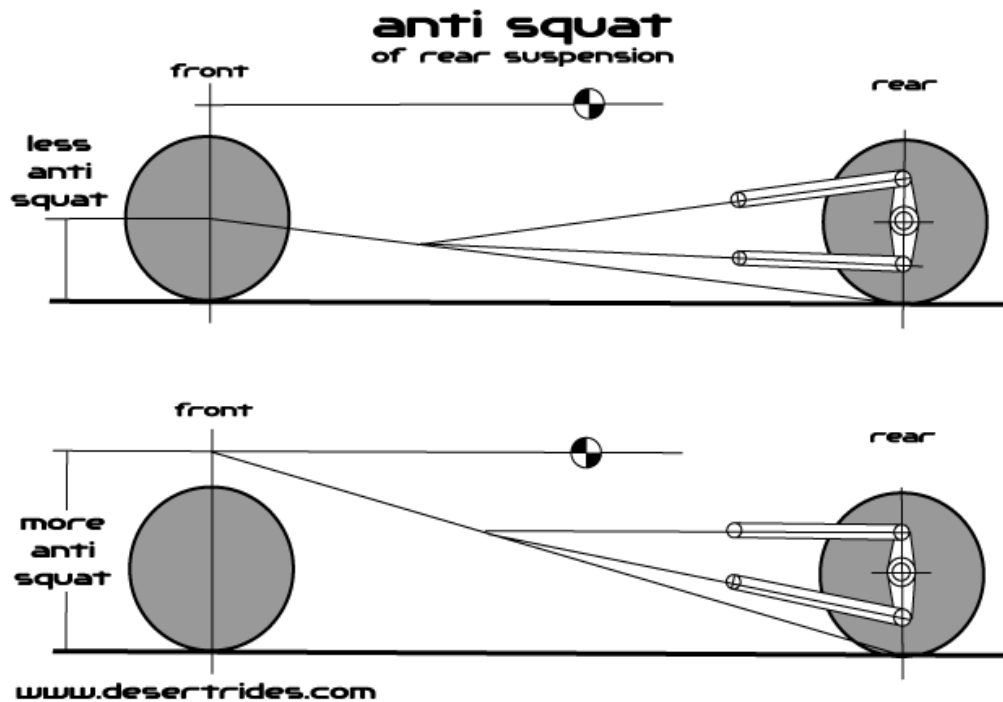
Oleellista painonsiirron vaikutuksesta on tietää, että mitä enemmän painoa siirtyy sen vähemmän kyseisellä akselilla on pitoa, koska renkaan kitkakerroin pienenee kuormituksen lisääntyessä. Kun tämä yhteys painonsiirron ja kitkan välillä ymmärretään voidaan painonsiirtoa säätää niin, että ulkokaarten renkailla pito on mahdollisimman hyvä. Jos käytössä on rengasdataa voidaan myös akselien välinen pito säätää keskenään tasapainoon.

(Adams 1992, 6-12)



## 5.9 Nyökkäys ja niaus

Niausta estetään siihen soveltuvalla geometrialla, joka on esitetty kuvassa 10. Niausta estävästä geometriasta käytetään englanniksi nimitystä "anti-squat". (Pro Touring 2016)



Kuva 10. Niausta vastustava geometria jäykässä taka-akselissa

Sen avulla voidaan lisätä takarenkaiden pitoa kiihdytystilanteissa lisäämättä auton painoa staattisesti. Kyseinen dynaaminen voima perustuu fysiikan lakiin, jossa jokaisella voimalla on samansuuruinen vastavoima. Kuten kuvasta voidaan päätellä "anti-squat"-voima on riippuvainen tukivarsien piirretyin leikkauspisteen paikan sijainnista suhteessa jousitetun massan painopisteeseen nähden. Jos tukivarsien leikkauspiste sijaitsee painopisteen korkeudella sanotaan niausta vastustavan voiman olevan 100%, kuten kuvassa 10. on esitetty. Tämä prosenttiasteikko lähtee liikkeelle maanpinnan tasolta. Kiihdytysautoissa voi esimerkiksi lähtökiihdytyksessä nähdä korin nousevan

tiehen nähden, eli tukivarsien leikkauspiste sijaitsee jousitetun massan painopisteen yläpuolella. Kuvassa numero 10. on esitelty tilanne, kun käytössä on jäykkä taka-akseli.

Normaalissa rata-autossa ominaisuudesta on hyötyä myös mutkasta ulostullessa, jolloin kaasua avaamalla saadaan lisää pitoa vetäville pyörille. Tällöin kaasu voidaan avata aiemmin kaarteessa, kun käytetään tätä geometriaa hyväksi.

Erillisjousitetussa taka-akselistossa "anti-squat" rajoittuu noin 25% tukivarsien leikkauspisteen ja painopisteen välisestä etäisyydestä, kun taas jäykällä taka-akselilla se voi olla yli 100%.

Jarrutustilanteessa "anti-squat" geometria toimii päinvastoin, eli se laskee jousitettua massaa maanpintaan nähden ja heikentää renkaiden pitoa. Yleensä etupäässä käytetäänkin "anti-dive" geometriaa, joka toimii päinvastoin kuin "anti-squat".

## 5.10 Alustan korkeus ja jäykkyys

Alustan jäykkyys on silloin sopiva, kun iskunvaimentimet käyttävät lähes koko liikematkansa radalla ajettaessa. Jos alusta ei pohjaa edes radan suurimmissa töyssyissä, ajetaan liian korkealla alustalla. Rata-ajossa onkin siis tarpeen käyttää progressiivistä pohjaanlyöntivaimenninta iskunvaimentimissa. Nykyaikainen pohjaanlyöntivaimennin on hydraulitoiminen. Jos alusta on liian kova, eivät renkaat pysty kunnolla seuraamaan tienpintaa joka hidastaa luonnollisesti kierrosaikaa. (Smith 1984, 218)

Ajokorkeutta säädettäessä on huomioitava mahdollista maaefektiä käytettäessä, ettei pohjan ilmavirtaus pääse sakkaamaan aiheuttaen pidon äkkinäistä heikentymistä. Pohjan tunnelit tulisikin suunnitella niin, ettei pohjan ottaessa kiinni maahan ilman virtaus estyisi kokonaan.

### 5.11 Alustan helat

Parhaastakaan geometriasta ei ole hyötyä, jos pyöräntuenta ei ole riittävän jäykkä ja akseliston osat eivät pysy ajon aikana niillä paikoilla mihin ne on suunniteltu. Alustan osat joutuvat tyypillisesti noin 5-25kN rasitukselle, joten ne taipuvat ja venyvät. Normaaleissa tuotantoautoissa alustan helat antavat ensimmäisenä periksi ja päästävät pyöräntuennan komponentit liikkumaan pois optimaalisilta paikoiltaan.

Kilpa-autoissa käytetään tyypillisesti metallista valmistettuja nivellaakereita normaalien kumista tai teknisestä muovista valmistettujen helojen, eli puslien tilalla. Formula-luokan autoissa on käytössä näitäkin tarkempia taipuvia titaanisia liuskoja, jotka korvaavat liukupinnoilla varustetut puslat.

(Adams 1992, 19-24)

### 5.12 Korin kiertojäykkyyden vaikutus

Korin kiertojäykkyydellä on suuri vaikutus ajo-ominaisuuksiin. Jos kori on riittävän jäykkä, se pystyy välittämään painonsiirtoa akseleiden välillä. Korin riittävä kiertojäykkyys tarkoittaa useimmiten, että se on jäykempi kuin akseleiden oma kaartojäykkyys yhteensä (engl. roll stiffness).

Kilpa-autoissa voidaan säätää ali- ja yliohjautuvuutta kallistuksenvakaajilla ja eri jäykkyyksisillä jousilla, mikäli korin vääntöjäykkyys riittää välittämään painonsiirtoa akseleiden välillä.

Kallistusjäykkyyttä tarvitaan myös vastustamaan eri komponenttien inertiaa kaarreaajossa. Moottori on yleensä painavin komponentti koko autossa joten siihen myös vaikuttaa suurin inertia-voima, eli tästä johtuen moottorin kiinnityskorvakkeet välittävät suuren yksittäisen voiman auton koriin. Jousien ja iskunvaimentimien kiinnityspisteet joutuvat toki käsittelemään koko jousitetun massan aiheuttamat voimat. (Aird 2008, 32-33)

### 5.13 Jäykän taka-akselin ominaisuudet

Jäykässä taka-akselissa molemmat renkaat on liitetty nimensä mukaisesti saman akseliputken molempiin päihin. Akseli siis liikkuu yhdessä renkaiden kanssa ja kumman tahansa renkaan liikkeen vaikutuksesta molemmat liikkuvat.

Jäykän taka-akselin etuihin kuuluvat sen alhaiset valmistuskustannukset ja suhteellisen helppo asennus auton koriin. Jäykkä taka-akseli on ollut niin kauan käytössä, että siitä löytää runsaasti tietoa miten se tulisi suunnitella. Hyvin suunniteltu jäykkä akseli toimiikin yhtä hyvin kuin huonosti suunniteltu erillisjousitettu akseli, jopa epätasaisella ajoalustalla.

Jäykän akselin huonoihin ominaisuuksiin lukeutuvat sen suuri jousittamaton massa ja sen suhde kilpa-auton jousitettuun massaan nähden. Tämä vaikuttaa alustan ominaistaajuuteen. Epätasaisella ajoalustalla suuri jousittamaton massa heikentää pitoa, koska renkaat ovat kauemmin töyssyn jälkeen ilmassa ja heikommin tiessä kiinni. Se myös vaatii paljon vaimennuskykyä iskunvaimentimilta.

Kaarreajossa jäykällä taka-akselilla on myös taipumus ohjata auton perää johonkin suuntaan tukivarsien geometriasta johtuen. Tämän ominaisohjauksen tulisi ohjata autoa aliohjaavampaan suuntaan, koska muuten korin kallistuskulma pienentäisi auton kaartosädettä ja näin ollen kääntösäde pienentyisi koko kaarteeseen ajan ja autoa olisi vaikea hallita. Taka-akselin tuennan tulee myös olla riittävän järeä, että akseli ei pääse liikkumaan sivusuunnassa, koska myös sillä on merkittävä vaikutus auton kaarreominaisuuksiin. Taka-akselin pyörien asennon merkitystä voi havainnoida ajamalla normaalia autoa taaksepäin, kun rattia käännetään on pyörien asennon muutoksen vaikutus huomattava.

Jäykkä taka-akseli toimii parhaiten autoissa joiden vetopidolla on suurin merkitys, esimerkiksi kiihdytysautoissa. Siinä voidaan anti-geometrioilla saavuttaa huomattavasti parempi vetopito kuin erillisjousitetulla akselilla. Sama ominaisuus toimii käänteisesti jarrutustilanteessa eli pyörät alkavat pomppimaan jolloin jarrutusteho on heikkoa. Käytännön minimi arvona voidaan lähdeteoksen mukaan pitää sivusta katsottuna tukivarsien vaakasuuntaista 105cm pituutta estämään jarrutuspidon menetystä.

Ladassa on alkuperäisenä jäykässä akselissa 4-tanko tuenta eli siinä on neljä tukivartta määrittämässä geometriaa auton pituusakselin suunnassa ja poikittaissuunnassa yksi panhard-tanko tukemassa sivuttain taka-akselia. 4-tanko tuenta toimii parhaiten kun sovellukselta ei vaadita juurikaan anti-squat ominaisuutta ja tukivarret ovat mahdollisimman pitkiä. Tällä tuennalla on vaikea saada taka-akselia ohjaamaan aliohjautuvasti ja samalla käyttää anti-squat ominaisuutta, koska tukivarsien tulisi pysyä samansuuntaisina keskenään korin kallistuessa. Edellä mainittua geometriaa ei saavuteta neljän tukivarren ratkaisulla, yhdessä hyvin toimivien ominaisuuksien kanssa. Kyseisellä akselistolla on siis vaikeaa saada rata-ajossa hyvin toimivaa alustaa aikaiseksi. Lähdeteoksessa suositellaankin käyttämään muita vaihtoehtoja taka-akselin tuennassa kilpa-autossa.

(Adams 1992, 60-72)

#### 5.14 Erillisjousitetun taka-akselin ominaisuudet

Erillisjousitetussa akselistoratkaisussa pyörät eivät ole mekaanisesti vaikutuksissa toisiinsa pois lukien kallistuksenvaimentimien kautta. Tämä tarkoittaa, että tasauspyörästö on kiinnitetty suoraan auton korirakenteeseen eikä se näin ollen kuulu enää auton jousittamattomaan massaan. Tasauspyörästöstä pyöriin lähtee vetoakselit, joiden massa lasketaan puolitetuna jousittamattomaan massaan.

Erillisjousituksen etuina mainittakoon epätasaisella ajoalustalla tasaisempi tiekosketus renkaiden ja tienpinnan välillä. Jousittamaton massa on myös pienempi verrattuna jäykkään taka-akseliin, jolloin iskunvaimentimien toiminta on tarkempaa. Kun pyörät pysyvät pidemmän ajan tiessä kiinni ajon aikana, on myös pitoa tarjolla enemmän tätä ajanjaksoa kohden. Tästä voidaan päätellä, että autoa tiellä pitävät voimat ovat suuremmat erillisjousitetussa kuin jäykässä taka-akselissa.

Suurin haittatekijä erillisjousitetussa taka-akselistossa on sen monimutkainen rakenne, joka lisää valmistuskustannuksia. Koska se on monimutkaisempi, se on samalla myös hankalampi suunnitella toimivaksi. Tuotantoautoissa joudutaan yleensä käyttämään kustannussyistä kumisia puslia, jotka tekevät erillisjousitetun akselin geometriasta epätarkan ja näin ollen se myös menettää osan potentiaalisesta auton hallittavuudesta.

Anti-geometrioiden käyttö on myös rajoitettua mekaanisista ominaisuuksista johtuen erillisjousitetussa akselissa. Camber-käyrästä jouston aikana puolestaan voidaan tehdä halutunlainen sopivalla tukivarsigeometrialla.

Rakennettaessa erillisjousitettua akselistoa, on suunniteltava riittävän jäykät komponentit, jotka eivät muuta muotoaan kuormituksen alla. Camber-käyrän ja kallistuskeskiön on pysyttävä jouston aikana mahdollisimman hyvin paikallaan tiehen nähden. Korin on oltava tarpeeksi vääntöjäykkä, jotta tukivarsigeometrian tarkat liikkeet eivät mene epätarkoiksi korin vääntelyn takia.

Takapään geometrialla voidaan suunnitella auto hieman aliohjaavaksi, joka saadaan aikaiseksi sisäänjouston aikana tapahtuvasta aureau-kulman kasvusta. Korin kallistuskulma pidetään pienenä kallistuksenvakaajilla, jolloin kallistuskeskiö voidaan suunnitella matalalle.

(Adams 1992, 73-78)

## 6 SUUNNITTELUTYÖ

### 6.1 Pääpiirteiden määrittäminen

Taka-akselisto toteutetaan erillisellä tasauspyörästöllä, johon on muokattu sivuille vetoakselin lähdöt ja laakeripesät. Akselirakenne on tarkoitettu pitämään yksinkertaisena valmistaa ja huoltaa. Alkuperäisosa käytetään rakenteessa niin paljon kuin mahdollista niiden hyvän saatavuuden takia. Materiaalivalinnat tehdään hinnan, paino/lujuus suhteen ja saatavuuden ehdoilla.

Tukivarsina käytetään suorasta putkesta sopivaan mittaan lyhennettyä ja kierreholkeilla varustettua komponenttia. Näin ollen tukivarsien pituuden muuttaminen ei vaadi uusia jigejä valmistusvaiheessa eri testikompinaatioissa. Taka-akselisto suunnitellaan SolidWorks 3D-ohjelmistolla, joten ohjelmasta saadaan mm. dxf -tiedosto suoraan laserleikkauskoneen käytettäväksi. Myös särmättävät osat sekä niiden reiät voidaan leikata suoraan laserleikkauksella. Nivelpisteissä käytetään nivellaakereita, jotta osat voivat liikkua esteettömästi kaikkiin liikesuuntiin.

### 6.2 Halutut ominaisuudet

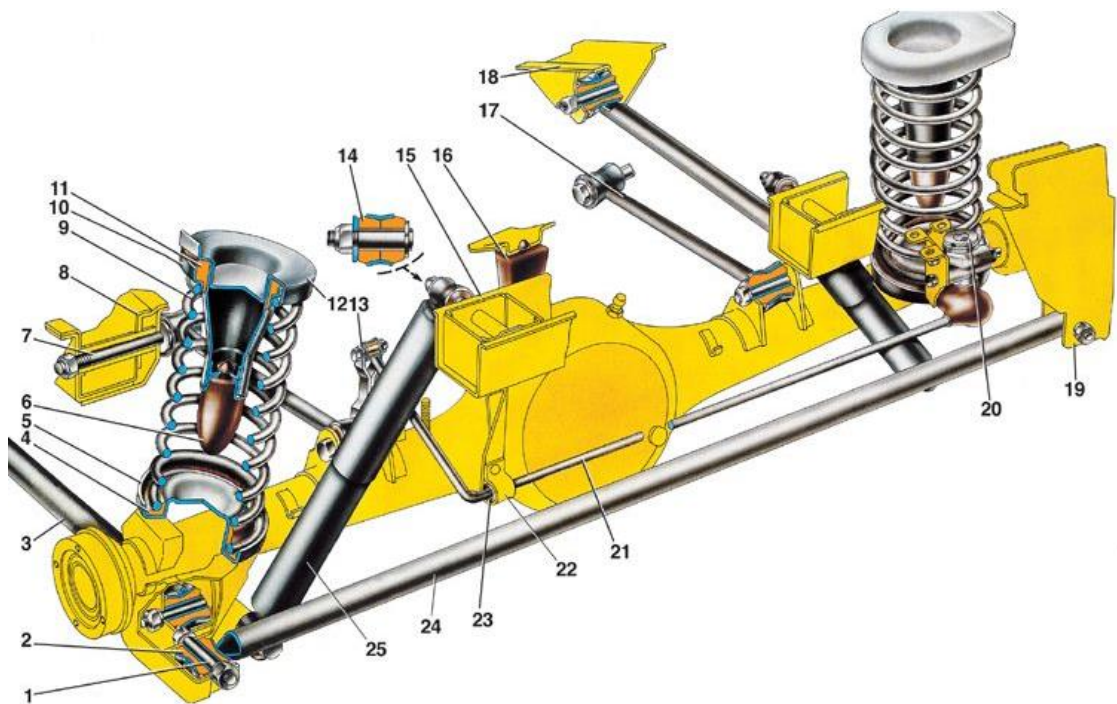
Taka-akseliston osien on toimittava niille suunniteltujen geometrioiden mukaan. Nivelpisteiden välykset on pyrittävä minimoimaan, joten on käytettävä välyksettömiä komponentteja.

Geometria on suunniteltu lähdeaineiston tietojen pohjalta. Pyöräntuenta suunnitellaan vastustamaan niausta. Pyörien aurauskulmien muutokset on saatava pysymään pieninä jouston aikana, että pyörä ei alkaisi pomppimaan kiihdytystilanteissa kitkanmuutosten vaikutuksesta. Jousittamaton massa pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jotta iskunvaimennus toimisi parhaalla mahdollisella tavalla. Takapään tulisi myös toimia yhdenmukaisesti etupään kanssa.

### 6.3 Alkuperäisten osien mallintaminen

Varsinainen työ alkaa mallintamalla alkuperäiset osat 3D -kuviksi. Myös auton rungon kiinnityspisteet on mitoitettava ja mallinnettava 3D -ohjelmaan.

Auton alkuperäisen taka-akselin raideleveys on 1321mm. Camber-kulma on lähellä nollaa, johtuen suorasta akseliputkesta minkä päissä renkaat sijaitsevat. Kuvassa 11. on esitetty alkuperäinen taka-akselisto. Tätä akseliputkea voidaan taivuttaa ja saada aikaan hieman auraus- ja camber-kulmaa. Taivuttaminen on mahdollista suorittaa, koska vetoakselin boorien toleranssit sallivat ja mahdollistavat hieman poikkeavan linjauksen.

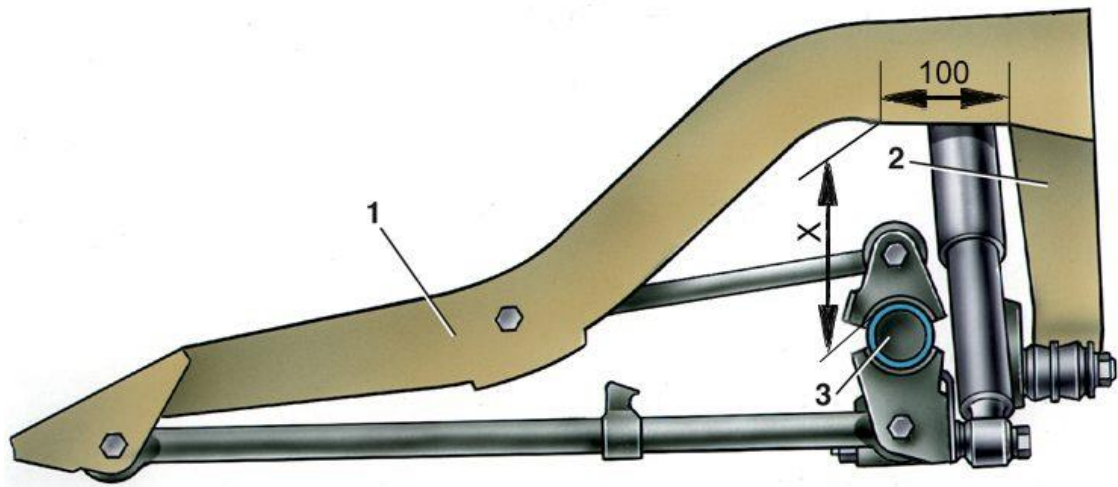


Kuva 11. Alkuperäinen taka-akselisto

Ylemmät tukivarret ovat 300mm pitkät ja alemmat tukivarret puolestaan 615mm. Poikittaistangon pituus on 1057mm. Pienin maavara on 170mm. Alkuperäiset



vanteet ovat kooltaan 5J-13". Pyörät ovat kooltaan 175/70R13.



Kuva 12. Alkuperäisen taka-akselin tukivarsigeometria

(Autoprospect 2016)

Kuvassa 12. voidaan nähdä millaiset ovat tukivarsien asennot staattisessa tilassa, alkuperäisessä taka-akselissa. Poikittaistanko on vaakatasossa hieman alle akselilinjan.

#### 6.4 Suunnitellun rakenteen esittely

Taulukko 1

Joustintukigeometrian asentoparametrit			
Jousen asento	Auraus	Camber	Raideleveys
-60 mm	-0,75°	-1,8°	1664,79 mm
-40 mm	-0,62°	-1,67°	1668,46 mm
-20 mm	-0,47°	-1,48°	1671,07 mm
0 mm	-0,29°	-1,21°	1672,55 mm
+20 mm	-0,08°	-0,89°	1672,85 mm
+40 mm	0,17°	-0,56°	1671,92 mm

Pyörän toteutuneet asentoparametrit

Taulukossa 1. on esitetty pyörän asennot korin suhteen. Taka-akselissa on sisäänjoustoa 60mm ja ulosjoustoa 40mm. Kaarrejaossa jousituksen on suunniteltu joustavan alle 20mm, jotta korin kallistuskulma pysyisi alle 1,5 asteen. Kallistuskeskiön korkeus takapäässä on noin 31mm maanpinnan yläpuolella, kun auto on staattisessa tilassa. Kallistuskeskiön paikkaa pystytään muuttamaan liikuttamalla joustintuen yläkiinnityspistettä. Kallistuskeskiö on suunniteltu liikkumaan taka-akselilla samalla tavalla, kuin etuakselilla.

Jousituksen jäykkyyttä voidaan muuttaa vaihtamalla jousia. Pyörä liikkuu lähes identtisesti jousen liikkeen mukaan. Kallistusjäykkyys on myös säädettävä veitsivakaajan ansiosta, jonka veitsiä kääntämällä muuttuu myös kallistusjäykkyys. Korin ja kallistuksenvakaajien vääntöjäykkyys pitäisi saada noin 5500 Nm/° tasolle, jotta kallistuksenvakaajat pystyisivät pitämään kallistuksen hallinnassa ja pyörät kiinni ajoradan pinnassa. Tämä vääntöjäykkyys vastaa vuoden 1954 MB W196 kilpa-auton korin vääntöjäykkyyttä. Kyseisessä kilpa-autossa runko oli rakennettu kolmiomalliin asetelluista putkista.

Käytännön testit osoittavat viimeistään, että miten suunnitellut asentoparametrit toimivat rata-ajossa todellisuudessa. Taka-akseliin on suunniteltu säätömahdollisuudet, joilla saadaan isoja muutoksia aikaiseksi geometriaan tarvittaessa.

Alustan suunnittelussa on haettu hyvää kaarrepitoa, sekä hyvää mutkan ulostulonopeutta. Taka-akseliin on laitettu jonkin verran ominaisohjausta, jonka pitäisi taittaa auton perä hyvin kaarteeseen. Myös niausta vastustava voima pitäisi pystyä valjastamaan suuremmaksi pyöränkuormaksi kiihdytystilanteessa. Tämän pitäisi erityisesti vaikuttaa kaarteesta ulos tultaessa, jolloin kaasun voisi avata melko aikaisin kaarteessa.

## 6.5 Valmiskomponenttien valinta

Nivellaakereista testattiin motorsport-käyttöön tarkoitettua välyksetöntä mallia ja teollisuuskäyttöön tarkoitettua, niin ikään välyksetöntä nivellaakeria. Kuvassa 13. on katkennut tukivarsi vetokokeen päätyttyä. Valinta tehtiin näiden kokeiden perusteella. Motorsport-sarjan nivellaakeri on noin kolme kertaa kalliimpi, kuin teollisuus mallin nivellaakeri.



Kuva 13. Katkennut tukivarsi vetokokeen päätyttyä

Lopullisessa taka-akselistossa käytetään teollisuuskäyttöön tarkoitettua nivellaakeria, sen ylivoimaisen lujuus/hinta suhteen takia verrattuna motorsport nivellaakeriin.

## 6.6 Pyöränkulmat

Taka-akseliston pyöränkulmat pyritään pitämään lähes suorassa ajoradan pintaan nähden, hyvän vetopidon saavuttamiseksi. Tukivarsista tehdään mahdollisimman pitkiä pyöränkulmien muutosten hillitsemiseksi. Staattisella pyöränkulmalla säädetään tasapaino vetopidon ja kaarrepidon välillä. Korin kallistuskulma pidetään pienenä kaarreajossa, joten pyöränkulmilta ei vaadita kovin suurta korjausliikettä ajoradan pintaan nähden kaarteiden aikana.

## 6.7 Tasauspyörästäön apurunko

Tasauspyörästäön apurungolta vaaditaan suurta vääntöjäykkyyttä tukivarsien siihen kohdistaman voiman hallitsemiseen. Apurunkoon myös kiinnitetään muut taka-akselin komponentit. Apurunko tehdään levyrakenteeksi, jota vahvistetaan tarvittaessa teräspankilla. Apurunkoon tehdään myös korkeuden säätö jolloin maavaraa voidaan säätää ilman, että tukivarsigeometria muuttuu. Rakenne pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena valmistettavuuden ja hinnan takia. Kuvassa 19. on esitetty apurungon luonnos.

## 6.8 Tasauspyörästäön kotelo

Tasauspyörästäön kotelo on rakennettu alkuperäisestä jäykästä taka-akselista lyhentämällä sitä. Tukilaakereille on koneistettu laakeripesät päätylaippoihin.



Kuva 14. Lyhennetty taka-akseli

Lyhennetty taka-akseli on esitetty kuvassa 14.

Tukilaakereina käytetään alkuperäisiä Ladan etuvetomallin vetoakselin laakereita. Näitä ei ole lähdetty enää mitoittamaan, koska ne toimivat samassa tehtävässä kuin alunperinkin. Tukilaakeripesät ovat hitsattu kiinni tasauspyörästäön kuoriin.

## 6.9 Vetoakseli

Veto-akselit ovat toteutettu yhdistelemällä eri mallisarjoista löytyviä osia. Valmis vetoakseli on esitetty kuvassa 15. Vetoakselin pituus määrittää yhdessä

tasauspyörästä kotelon kanssa raidelevyden pienillä säätövaroilla.



Kuva 15. Vetoakseli

Vetoakselin pituudessa on tyydytty siihen mittaan mihin se on asettunut alkuperäisiä osia yhdistelemällä.

#### 6.9.1 Vetonivelen kulmanmuutos

Nivelet pyritään pitämään mahdollisimman pienillä nurroskulmilla tehohäviöiden minimoimiseksi.

#### 6.9.2 Nivelpisteiden välisen etäisyyden muutos

Kokonaisraideleveys saa muuttua yli neljä senttimetriä vetoakseleiden liikevaran puolesta, joten tämä ei tuota ongelmia. Asia selviää 3D –mallista simuloimalla vetoakselin liikettä jousituksen liikkeiden mukana. Raideleveys on pyritty kuitenkin pitämään mahdollisimman tasamittaisena jousituksen eri joustotilanteiden välillä. Toteutunut raidelevyden muutos selviää katsomalla taulukkoa 1.

#### 6.10 Materiaalivalinta eri osille

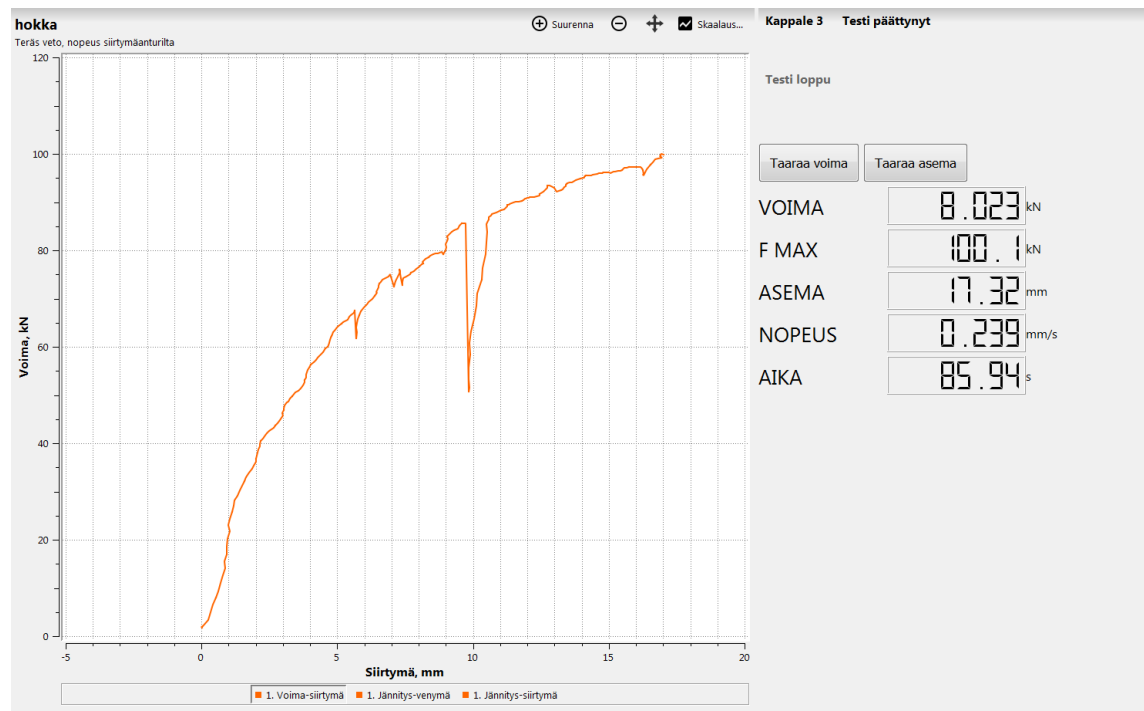
Lähdeaineistossa on annettu esimerkkejä kilpa-autoon kohdistuvista rasituksista, joista saadaan apua eri osien lujustarkastelua varten. Yleisesti ottaen osien voidaan olettaa altistuvan maksimissaan 4-6g kiihtyvyyksille kilpa-ajon aikana. Tukivarsissa käytetään form600 -suurlujuusterästä. Muut metallista

valmistetut osat tehdään S355 -teräksestä. Rakenneosissa suositetaan levyosia, jotta rakanteesta saadaan kevyt sekä mittatarkka laserleikkauksen ansiosta. Tukivarsissa käytetään putkea, eikä neliöpalkkia koska samalla metripainolla ja seinämävahvuudella sen nurjahdusvoima on noin 17-18% suurempi. (Aird 2008, 82)

### 6.11 Nivellaakereiden vetolujuuden mittaaminen

Nivellaakerit ovat valmistettu chromimolybdeeni-seoksesta. Nivellaakerit testataan vetokoneessa yhdessä tukivarsien kanssa, jotta voidaan varmistua komponenttien riittävästä lujuudesta.

Aineenkoetuslaitteisto on malliltaan Materrest FMT-ST/D. Laitteistolla voidaan joko vetää tai puristaa 250kN staattisella- tai 220kN dynaamisella voimalla.



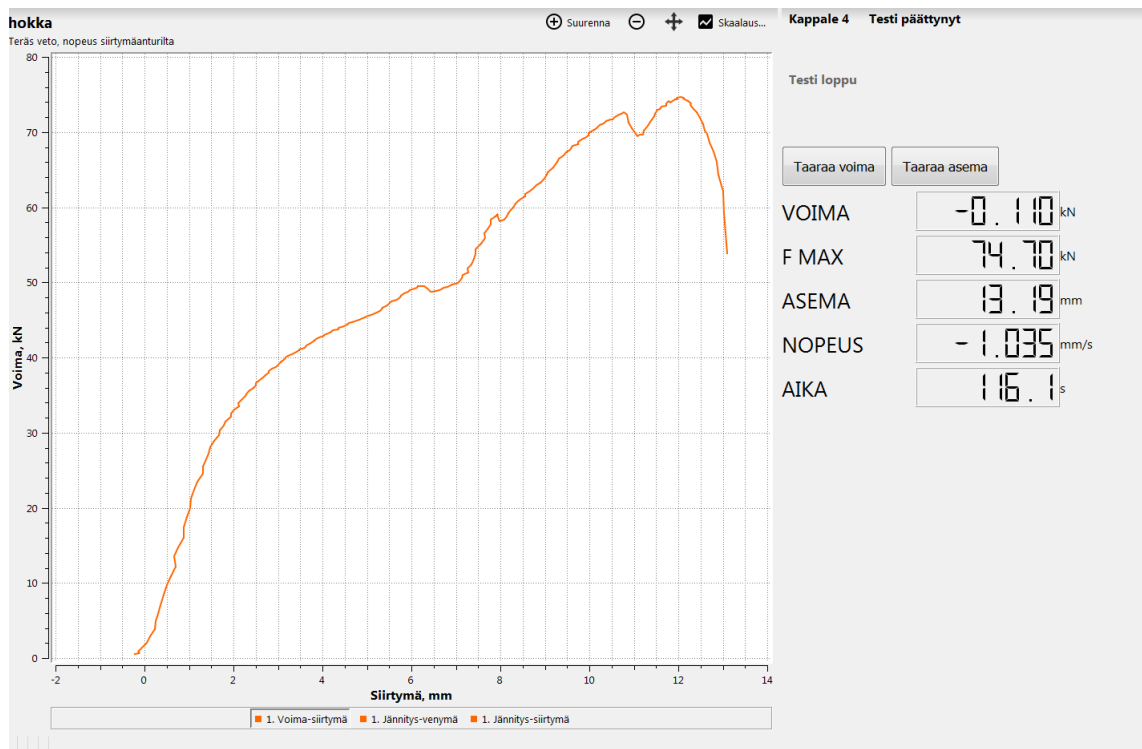
Kuva 16. Teollisuus nivellaakerin vetokoe

Kuvassa 16. on testattu nivellaakeria, joka on teollisuuskäyttöön tarkoitettu ja kooltaan M14x1,5. Tästä nivellaakerista ei ollut ennalta tiedossa tarkkoja lujuusarvoja.



Testi osoitti, että nivellaakeri kestää vetoa 100,1kN, jota voidaan pitää riittävänä tai jopa ylimitoitettuna kyseiseen käyttötarkoitukseen.

Kuvaajassa näkyvää venymistä ei voida ottaa huomioon tuloksia arvioitaessa, koska johtuen kiinnityksestä vetokoneeseen, kiinnityspultti aiheutti venymän eikä nivellaakeri itsessään.



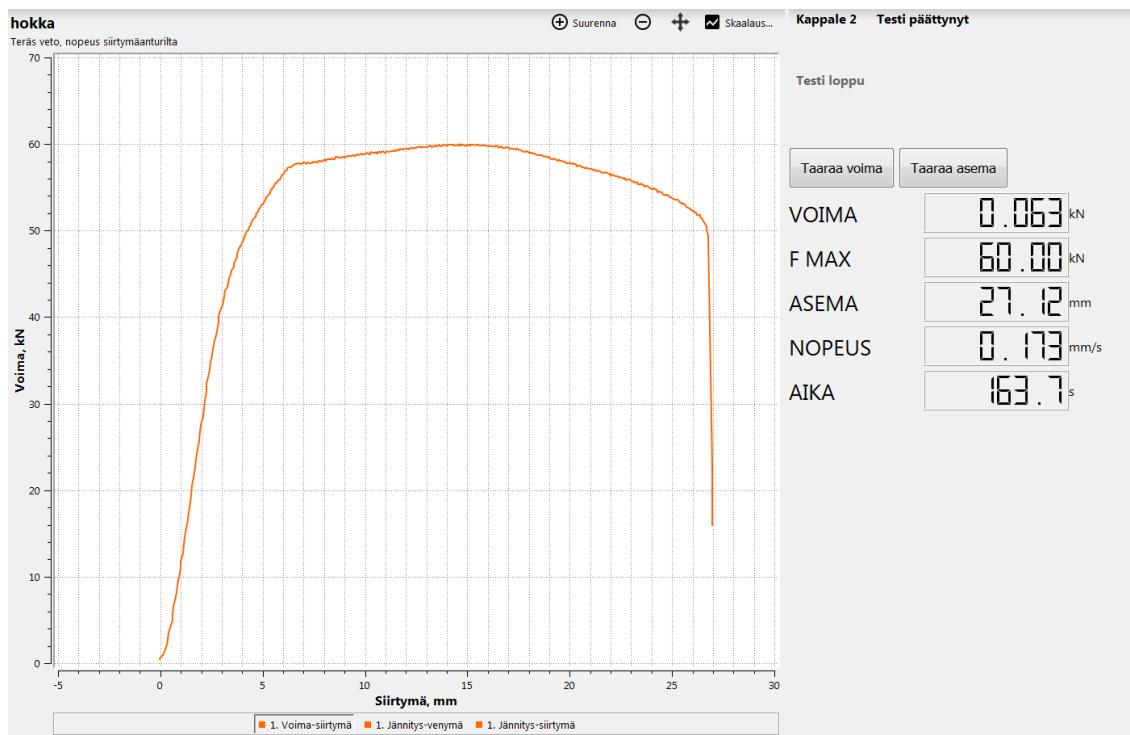
Kuva 17. Motorsport nivellaakerin vetokoe

Kuvassa 17. on testattu autourheilukäyttöön tarkoitettua nivellaakeria kooltaan M14x1,5. Nivellaakeri on malliltaan Rodobal RM 14 MTE x 1.5.

Testi osoitti nivellaakerin kestävän 74,70kN vetoa. Tälle komponentille valmistaja lupaa staattista vedonkestoa 5690daN eli 56,9kN, eli valmistaja käyttää varmuuslukua 1,2 – 1,5. Valmistaja lupaa komponentin kestävän kyseisen voiman ilman minkäänlaista muodonmuutosta.

Tässäkään testissä ei voida antaa painoarvoa venymän määrälle johtuen kiinnitystavasta.





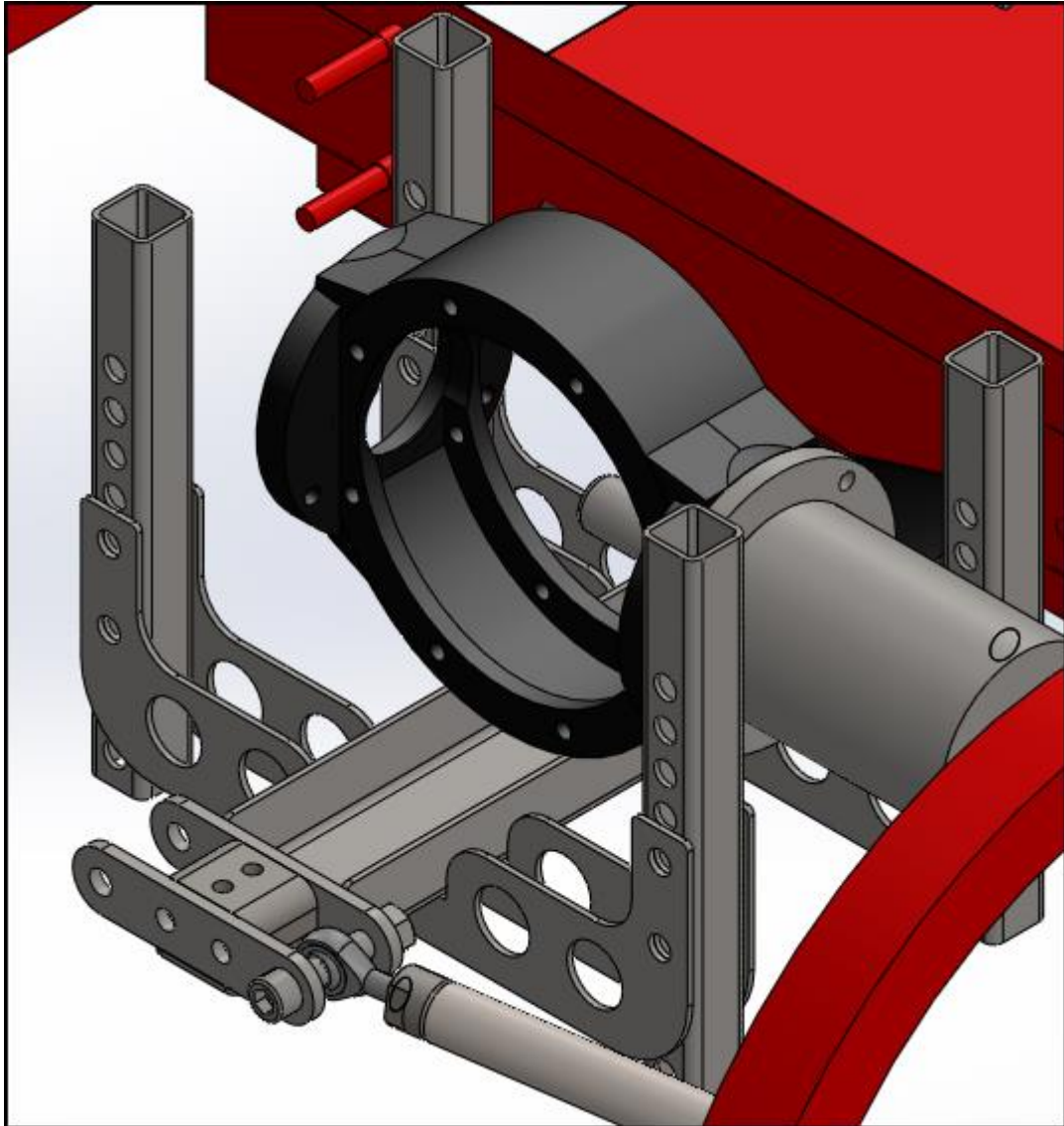
Kuva 18. Tukivarsiputken vetokoe

Kuvassa 18. on vedetty kokonaista tukivartta, joka koostuu kahdesta teollisuuskäyttöön tarkoitettusta nivellaakerista, sekä 25x2mm putkesta ja putken päissä olevista kierreholkeista.

Kuten kuvaajasta voidaan päätellä, kokonainen tukivarsi ei hajonnut nivellaakereista vaan itse tukivarsiputkesta. Putki kestää siis 60kN voiman ennen katkeamista. Tukivarsiputken vetokokeen perusteella laskettu murtolujuus on siis 417,712 MPa, joka on riittävä tähän tarkoitukseen muttei vastaa materiaalille luvattuja arvoja. Toimitettu putki on väärää metalliseosta mittaustulosten, sekä toimittajan kanssa käydyn keskustelun perusteella. Putki oli siis tavallista teräksestä valmistettua ohutseinäputkea, eikä tilattua kaksifaasiteräksestä valmistettua Form600 –suurlujuusteräksestä valmistetulle putkelle on luvattu minimissään 600 MPa murtolujuus.

## 6.12 Apurungon kiinnitys koriin

Apurunko kiinnitetään koriin vähintään neljästä pisteestä. Kiinnitys tapahtuu säätöjalkojen kautta, jotta koko taka-akseli liikkuu korkeus suunnassa näiden säätöjalkojen pituutta muuttamalla.

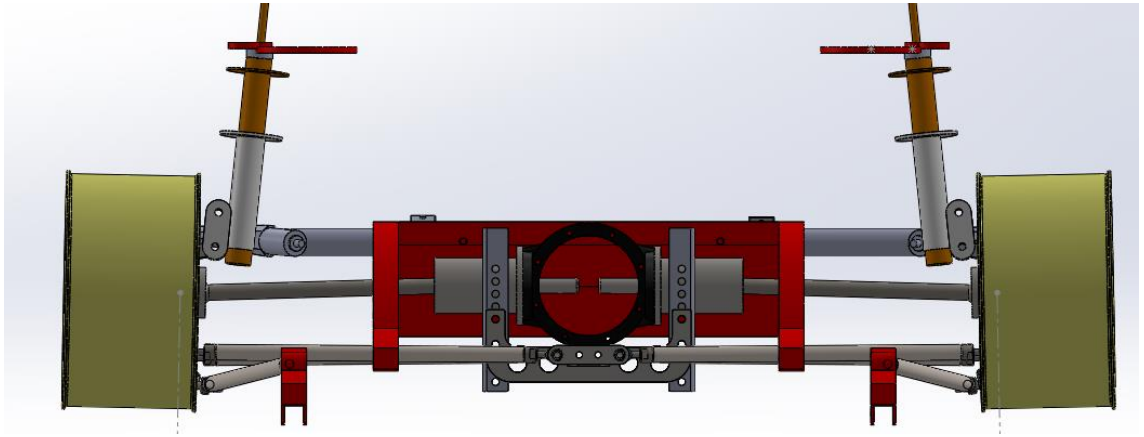


Kuva 19. Apurungon levyrakenne

Kuvassa 19. on esitetty tasauspyörästön kiinnityksen peruseriaate.

### 6.13 Tukivarsien kiinnityspisteiden asettelu

Tukivarsien kiinnityspisteiden paikat on valittu tutkimalla kallistukeskiön korkeutta ja sopivaa camber-kulman muutosta.



Kuva 20. Taka-akseli edestä

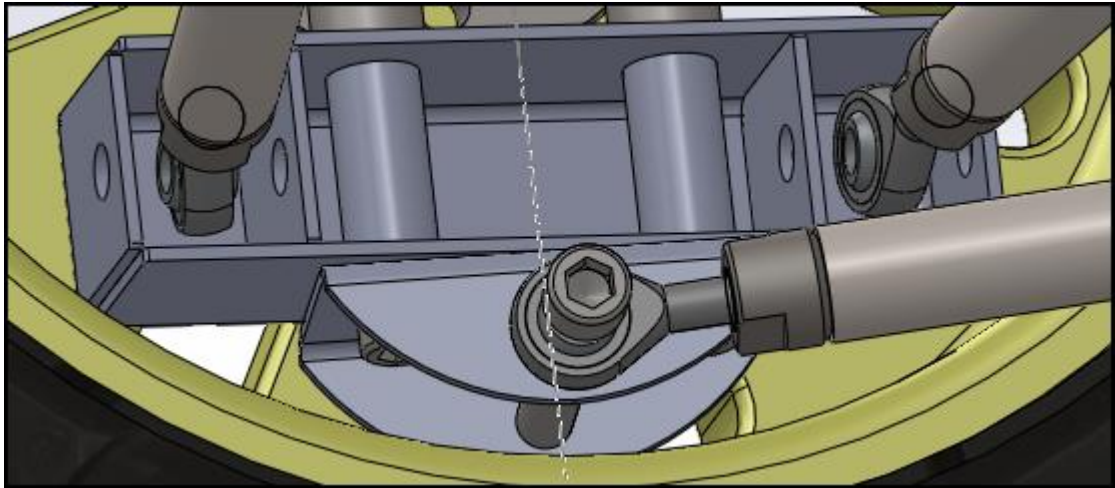
Eteenpäin suuntautuvan tukivarren paikka on sijoitettu niin, että voidaan käyttää korin alkuperäisen tukivarren kiinnityspaikkaa hyödyksi. Kuvassa 20. on taka-akseli kuvattuna edestäpäin.

### 6.14 Pyörännapa

Pyörännapana käytetään alkuperäistä etuvetoauton pyörännapaa, jossa on valmiiksi paikka macpherson -tyyppiselle joustintuelle. Lisäksi kyseistä komponenttia on helposti saatavilla ja se on myös melko kevyt jo lähtötilanteessa.

## 6.15 Pyörännavan kiinnityspisteet tukivarsille

Tukivarsien kiinnitystä varten pyörännapaan on tehtävä lisäosa johon nivellaakerit voidaan kiinnittää.



Kuva 21. Tukivarsien kiinnitys napaan

Tämä lisäosa korvaa alkuperäisen alapallonivelen hyödyntäen samoja pallonivelen kiinnityspisteitä. Lisäosa on esitelty kuvassa 21.

## 7 POHDINTA

Kilpa-auton alustan suunnittelu oli aiheena erittäin kiinnostava. Aiheesta löytyy paljon kirjallisuutta, joka on pääsääntöisesti englanninkielistä. Tässä työssä olisi pystynyt syventymään huomattavasti enemmän aiheeseen, jos aika ei olisi ollut rajallista. Alustan geometrian suunnittelussa myös koko ajan oppii uutta ja jo suunniteltua geometriaa voisi lähes loputtomasti hioa paremmaksi.

Työ on mielestäni onnistunut ja siinä on pystytty esittelemään aihealueita, jotka vaikuttavat kilpa-auton käyttäytymiseen. Tässä opinnäytetyössä, oli alunperin tarkoitus myös esitellä testituloksia prototyypin toiminnasta. Prototyypin valmistaminen kestää kuitenkin arvioitua kauemmin ja on tätä kirjoittaessa kokoonpanovaiheessa. Vasta käytännön testeissä päästään näkemään uuden taka-akseliston todellinen toiminta.

Alustan ratkaisussa lopulta päädyttiin käyttämään macpherson tyyppistä jousitusratkaisua sen yksikertaisen rakenteen ja kompaktin koon vuoksi. Ensin oli tarkoitus toteuttaa taka-akseli päällekkäisin kolmiotukivarsin, mutta rakenteesta olisi tullut monimutkainen ja painava, kun ylätukivarren komponentit olisi joutunut suunnittelemaan kiertämään runkopalkit. Tästä syystä myös tukivarsista olisi joutunut tekemään melko lyhyet, joka taas ei vaikuttanut kovin hyvältä ratkaisulta geometrian kannalta. Päätöstä helpotti se, että joustintukiratkaisua on menestyksekkäästi käytössä eri luokkien kilpa-autoissa. Päällekkäisin tukivarsin toki saisi pyöränkulmia hallittua paremmin kuin joustintuella, mutta akselistorakenteen tekeminen ja valinta on aina samalla myös kompromissien tekoa.

Mielenkiintoista oli myös päästä tekemään Turun ammattikorkeakoulun tiloissa vetokoetta tukivarrelle. Tuloksista päästiin väärän materiaalin jäljille. Tästä voi ottaa opiksi ja vastaisuudessa pyytää materiaalin aineistodistuksen teräksen toimittajalta.

## LÄHTEET

Aird Forbes. 2008. THE RACE CAR CHASSIS. New York: Penguin Group Inc.

Bolles Bob. 2010. ADVANCED RACE CAR CHASSIS TECHNOLOGY. New York: Penguin Group Inc.

Smith Carroll. 1984. ENGINEER TO WIN. Wisconsin: Motorbooks International Publishers & Wholesalers Inc.

Adams Herb. 1992. Chassis engineering: chassis design building & tuning for high performance handling. New York: Penguin Group Inc.

Hammill Des. 2008. THE SPORTS CAR & KIT CAR SUSPENSION & BRAKES HIGH-PERFORMANCE MANUAL. Dorchester: Veloce Publishing Limited.

Hautala Mikko.; Peltonen Hannu.; 2011. Insinöörin (AMK) FYSIIKKA OSA1. Saarijärvi: Saarijärven OFFSET Oy.

Laine Olavi. 1979. AUTOTEKNIikka 1. osa ajo-ominaisuudet. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.

Laine Olavi. 1981. AUTOTEKNIikka 2. osa. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.

Gillespie Thomas D. 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc.

Mauno Esko. 1991. Virittäjän Käsikirja 2, Alusta. Helsinki: Alfamer Oy.

Milliken W.F. & Milliken D.L. 1995. Race car vehicle dynamics. Rosewood: SAE Publications Group

Historic Race 2016. Viitattu 17.5.2016. <http://www.historicrace.fi/KERHO.HTM>.

Historic Race 2016. Viitattu 3.2.2016 [http://www.historicrace.fi/saannot/Roadsport\\_2015.pdf](http://www.historicrace.fi/saannot/Roadsport_2015.pdf)

Google Books 2016. Viitattu 13.6.2016. [https://books.google.fi/books?id=yOzHBQAAQBAJ&pg=PA27&lpg=PA27&dq=camber+thrust&source=bl&ots=IJ5-aVc-D5&sig=AJgVKJ-CuFo2VIBW2XgZYv70PU&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwiy7oPL8OzKAhWJJJoKHZ\\_CBvoQ6AEIbzAM#v=onepage&q=camber%20thrust&f=false](https://books.google.fi/books?id=yOzHBQAAQBAJ&pg=PA27&lpg=PA27&dq=camber+thrust&source=bl&ots=IJ5-aVc-D5&sig=AJgVKJ-CuFo2VIBW2XgZYv70PU&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwiy7oPL8OzKAhWJJJoKHZ_CBvoQ6AEIbzAM#v=onepage&q=camber%20thrust&f=false)

Rennlist 2016. Viitattu 25.2.2016. [http://rennlist.com/forums/upload/cf\\_versus\\_load\\_e\\_small.jpg](http://rennlist.com/forums/upload/cf_versus_load_e_small.jpg)

Demon Tweaks 2016. Viitattu 13.6.2016. [http://www.demon-tweaks.co.uk/oncirus/3/image/product/tab/0123456789/0123456789/whi\\_diagram-camber.jpg](http://www.demon-tweaks.co.uk/oncirus/3/image/product/tab/0123456789/0123456789/whi_diagram-camber.jpg)

Performance trends 2016. Viitattu 3.2.2016. <http://performancetrends.com/Definitions/Camber-Gain.htm>

Viking speed shop 2016. Viitattu 13.6.2016. <http://www.vikingspeedshop.com/wp-content/uploads/caster.jpg>

Motorized couch 2016. Viitattu 13.6.2016. <http://motorizedcouch.com/2011/Steering/kingpininc.jpg>

Clubprotege 2016. Viitattu 13.6.2016. <http://www.clubprotege.com/forum/attachment.php?attachmentid=41640&stc=1&d=1268630069>

Maxxis UK 2016. Viitattu 13.6.2016. [http://www.maxxis.co.uk/media/35802/Over-Steer-Under-Steer\\_497x290.jpg](http://www.maxxis.co.uk/media/35802/Over-Steer-Under-Steer_497x290.jpg)

Billzilla 2016. Viitattu 13.6.2016. <http://www.billzilla.org/rc.gif>

Hotrod 2016. Viitattu 13.6.2016. [http://image.hotrod.com/f/14802416+w660+h495+cr1/ctrp\\_0809\\_05\\_z%2Bstock\\_car\\_suspension%2Bmoment\\_center\\_guide.jpg](http://image.hotrod.com/f/14802416+w660+h495+cr1/ctrp_0809_05_z%2Bstock_car_suspension%2Bmoment_center_guide.jpg)

Pro Touring 2016. Viitattu 13.6.2016. <http://www.pro-touring.com/attachment.php?attachmentid=51895&d=1322684983>

Autopropect 2016. Viitattu 31.5.2016 <http://www.autopropect.ru/vaz/2105-zhiguli/images/ruk4-28.jpg>

Autopropect 2016. Viitattu 31.5.2016. <http://www.autopropect.ru/vaz/2105-zhiguli/images/4-30.jpg>