



Tatu Ikävalko

## Alustan suunnittelu kilpa-autoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

2.6.2021

# Tiivistelmä

Tekijä: Tatu Ikävalko  
Otsikko: Alustan suunnittelu kilpa-autoon  
Sivumäärä: 57 sivua  
Aika: 2.6.2021

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma  
Ammatillinen pääaine: Ajoneuvosuunnittelu  
Ohjaajat: Lehtori Pasi Oikarinen

---

Tässä insinööriyössä tehtävänä oli suunnitella Metropolia Motorsportin uuteen nelivetoiseen kilpa-autoon alusta. Tavoitteena oli parantaa auton suorituskykyä edelliseen autoon verrattuna ja tehdä autosta aiempaa helpommin ajettava. Tavoitteena oli myös kehittää auton säädettävyyttä. Lisäksi pyrittiin luomaan jonkinlainen pohja seuraavien autojen kehitystyölle.

Metropolia Motorsportin edelliset autot ovat olleet takavetoisia, joten nyt nelivetoauton tapauksessa tilankäytön, vetopidon, moottoreiden ohjauksen sekä jousittamattoman massan muuttuessa myös alustan suunnitteluperiaatteita tuli pohtia uudelleen.

Ennen varsinaisen suunnittelun alkua selvitettiin työn tekemiseen vaadittua ajodynamiikan teoriaa. Teorian jälkeen edettiin luomaan autolle konseptia eri vaihtoehtoja vertailemalla.

Konseptin luomisen ja renkaiden valinnan jälkeen siirryttiin alustan suunnitteluun. Alustan suunnittelu toteutettiin Adams Car- sekä Catia V5 -ohjelmistojen avulla. Kinematiikan osalta alkuun asetettiin tavoitteet, jotka pyrittiin täyttämään eri parametreja muuttamalla, kunnes haluttu lopputulos saavutettiin.

Työn tuloksena saatiin alusta, jonka voidaan odottaa parantavan auton suorituskykyä sekä ajettavuutta ja säädettävyyttä.

Avainsanat: Formula Student, alusta, ajodynamiikka

## Abstract

Author: Tatu Ikävalko  
Title: Suspension Design for a Race Car  
Number of Pages: 57 pages  
Date: 2 June 2021

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Design Engineering  
Instructors: Pasi Oikarinen, Senior Lecturer

---

The objective of this Bachelor's thesis was to design a suspension system for the new four-wheel drive race car of Metropolia Motorsport. The aim was to improve the performance of the vehicle and make it easier to drive when compared to the previous car. The aim was also to develop the adjustability of the car. An additional aim was to create basis for the development work of the following cars.

The previous race cars of Metropolia Motorsport have been rear-wheel drive cars, but now the team decided to design a four-wheel drive race car. Because of this change and because of the changes in the usage of space, traction, control systems, and amount of unsprung mass, the design principles of the suspension system had to be reconsidered.

Before the actual design began, required theory of vehicle dynamics had to be examined. After getting familiar with the theory, the creation of a concept for the car began by comparing different options.

After creating the concept and selecting the tires, design of the suspension system began. The suspension was designed by using Adams Car and Catia V5 software. For the suspension kinematics, design goals were set in the beginning of design process. During the design process, parameters of the suspension were changed until the desired result was achieved.

As a result, a new design for the suspension system was achieved. It can be assumed that the new design will improve the performance, handling, and adjustability of the vehicle.

Keywords: Formula Student, Suspension, Vehicle Dynamics

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Formula Student	1
1.2	Metropolia Motorsport	2
1.3	Tavoitteet ja rajaukset	2
2	Renkaat	3
2.1	Kumikitka	3
2.2	Kitkaympyrä	4
2.3	Pintapaineen vaikutus renkaan ominaisuuksiin	6
2.4	Lämpötilan vaikutus renkaan ominaisuuksiin	8
2.5	Rengastestaus	9
3	Pyöräkuorman muutos	9
4	Alusta	12
4.1	Jousitus	12
4.2	Alustageometria	13
4.2.1	Camber	13
4.2.2	Kallistuskeskiöt	14
4.2.3	Antigeometriat	15
4.2.4	KPI	16
4.2.5	Caster	16
4.2.6	Kääntövierinsäde	17
4.2.7	Etujättö	17
4.3	Stabiliteetti	17
4.4	Ohjaus	18
5	Aerodynamiikka	19
5.1	Yleisesti	19
5.2	Aerobalanssi	20
5.3	Alustan vaikutus aerodynamiikkaan	21
5.4	Aerodynamiikan vaikutus alustaan	22

6	Suunnittelun lähtötiedot	23
6.1	FS-säännöt	23
6.2	Tiedot autosta	25
7	Konseptitason suunnittelu	27
7.1	Tavoitteellisen painojakauman valinta	27
7.2	Akselivälin valinta	30
7.3	Raideleveyksien valinta	30
7.4	Pyöräntuentaratkaisujen valinta	34
7.5	Jousitusratkaisujen valinta	35
8	Alustan yksityiskohtainen suunnittelu	37
8.1	Renkaiden valinta	37
8.2	Vanteiden valinta	41
8.3	Tukivarsigeometrioiden suunnittelu	42
8.4	Jousitus	43
8.5	Ohjaus	44
9	Tulokset	45
9.1	Kallistuskeskiöiden korkeudet	46
9.2	Kallistuskeskiöiden sivusuuntaiset siirtymät	47
9.3	Camber-kulman muutos	48
9.4	Raideleveyden muutos	50
9.5	Bumb-steer	52
9.6	Jousituksen välityssuhde	52
9.7	Ohjausvälitys	54
10	Yhteenveto	55
	Lähteet	1

## **Lyhenteet**

FS: Formula Student. Kansainvälinen korkeakoulujen opiskelijoille suunnattu kilpasarja.

TKI: Korkeakoulun tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminta.

KPI: King Pin Inclination. Renkaan kääntöakselin sivukallistuma.

TTC: Tire Test Consortium. Rengastestauskonsortio.

# 1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tehtävänä oli suunnitella Metropolia Motorsportin uuteen nelivetoiseen Formula Student -luokan kilpa-autoon alusta.

## 1.1 Formula Student

Formula Student on korkeakoulujen opiskelijoille suunnattu kansainvälinen autourheilusarja. Sarjassa mitataan erityisesti opiskelijoiden taitoja suunnitella, kehittää ja valmistaa formulatyypinen kilpa-auto. Kilpailut koostuvat erinäisistä staattisista sekä dynaamisista osioista, joten menestys kilpailuissa on useamman tekijän summa. Staattisia osuuksia ovat design, dokumentointi sekä business. Näistä ensimmäisessä tavoitteena on osoittaa tuomareille auton suunnittelutyön laadukkuus sekä tiimiläisten ymmärrys auton toiminnasta. Seuraavassa osiossa arvioidaan auton valmistukseen vaadittujen resurssien dokumentoinnin laatua. Business-osiossa kilpaillaan jonkin omavalintaisen autoon liittyvän liikeidean esittämisen paremmuudesta, joten sarja tarjoaa haasteita myös esimerkiksi liiketalouden opiskelijoille.

Dynaamisiin osuuksiin sisältyvät kiihdytys, skidpad, autocross, kestävyysajo sekä kestävyysajon aikana mitattava taloudellisuus. Kiihdytyksessä tavoitteena on paikaltaan lähtien ajaa 75 metriä pitkä suora mahdollisimman lyhyessä ajassa. Skidpad-osuudessa ajetaan vakionopeusympyrää ensin kaksi kierrosta oikealle ja tämän jälkeen kaksi vasemmalle. Jälkimmäisistä kierroksista otetaan keskiarvo ja tämä aika merkitään tuloksiin. Autocross-osuudessa ajetaan yksi nopea noin kilometrin pituinen ratakiekros ja kestävyysajossa ajetaan noin 22 kilometriä rataa. Ajoneuvojen taloudellisuutta arvioidaan kestävyysajon aikana kuluneen energiamäärän perusteella.

Sarjassa on kolme luokkaa, polttomoottoriautojen luokka, sähköautojen luokka sekä itseajavien ajoneuvojen luokka.

## 1.2 Metropolia Motorsport

Metropolia Motorsport on perustettu vuonna 2000, ja se on vanhin Suomen kolmesta Formula Student -tiimistä. Aiemmin Stadia Motorsport -nimellä tunnettu tiimi on Metropolia Ammattikorkeakoulun TKI-projekti. Tiimi koostuu lähinnä konetekniikan, ajoneuvotekniikan ja sähkötekniikan opiskelijoista, mutta mukana on myös opiskelijoita muilta aloilta, kuten liiketaloudesta sekä kulttuurialalta. Vantaalla toimiva tiimi on toistaiseksi ainut suomalainen tiimi sähköautojen luokassa. Lisäksi Metropolia Motorsport on sarjan ainut suomalainen kilpailun voittoon tai palkintosijoille yltänyt tiimi.

Ensimmäinen sähköauto valmistui kaudelle 2013, ja tämän jälkeen on vuosittain pyritty kehittämään uusi ja nopeampi auto Euroopassa ajettaviin kilpailuihin. Euroopan menestyneimmät tiimit ovat jo vuosia kilpailleet nelivetoisilla autoilla, ja näitä vastaan kilpailu takavetoisella autolla on ollut haasteellista. Näin ollen Metropolia Motorsportin viimeisin edistysaskel kohti yhä parempaa kierrosaikaa on siirtyminen takavetoisista autoista nelivetoisiin.

## 1.3 Tavoitteet ja rajaukset

Tässä työssä on tavoitteena suunnitella Metropolia Motorsportin uuteen nelivetoiseen Formula Student -luokan kilpa-autoon alustajärjestelmä, joka sallii nelivedon toteuttamisen autoon ja takaa autolle mahdollisimman korkean suorituskyvyn.

Tässä työssä ei käsitellä alustajousien tai kallistuksenvakaajien jäykkyyksien eikä vaimennusten laskentaa, sillä nämä työvaiheet toteutettiin auton suunnittelun aikana toisen opiskelijan toimesta. Lisäksi tämän työn luonteen vuoksi tarkoituksena ei ole käsitellä alustan komponenttien mekaanista suunnittelua tai valmistuksen suunnittelua, vaikka näillä on ollut vaikutusta alustan suunnittelussa tehtyihin valintoihin ja esimerkiksi alustan komponenttien kuten tukivarjojen jäykkyyksillä on merkittävä vaikutus auton ajodynamiikan toimintaan.



Tässä työssä keskitytään erityisesti auton kokonaisvaltaisen ajodynamiikan kehittämiseen, konseptitason suunnitteluun sekä alustakinematiikan suunnitteluun.

## 2 Renkaat

Kierrosajan kehittämiseksi kilpa-auton tulisi ylläpitää jatkuvasti mahdollisimman suurta nopeutta. Tämä tarkoittaa, että auton tulisi käytännössä kaikissa ajotilanteissa jatkuvasti joko kiihdyttää, jarruttaa tai kääntyä mahdollisimman suurella kiihtyvyydellä. Saavuttaakseen kiihtyvyyksiä auton tulee tuottaa voimia auton pitkittäis- ja sivuttaissuunnassa. Tärkein tekijä näiden voimien tuottamisessa on renkaat, sillä kaikki tien ja auton väliset voimat välitetään renkaiden kautta. Mikäli kyseessä on riittävän tehokas auto, renkaiden ja tien välinen kitka on suurin auton suorituskykyä rajoittava tekijä. Kitka on rajallista, ja alustan tehtävänä on maksimoida renkaasta hyödynnettävä potentiaali. Näin ollen alustan suunnittelun tulee lähteä renkaiden toiminnasta ja alustan tulisi luoda renkaalle parhaat mahdolliset olosuhteet kaikissa ajotilanteissa.

### 2.1 Kumikitka

Fysiikan luennolla on voitu oppia, että toisissaan kiinni olevien kappaleiden välillä vaikuttaa kitka. Kun kappaleet eivät liiku toisiinsa nähden, puhutaan lepokitkasta. Kappaleiden välinen kitkavoima kasvaa, kun kappaleita toisiinsa nähden liikuttamaan pyrkivä voima kasvaa. Kitka on suurimmillaan juuri ennen kuin kappaleet alkavat liukua toisiinsa nähden. Kun kappaleet liukuvat toisiinsa nähden, puhutaan liikekitkasta. Liikekitkan suuruus on tavallisesti vähemmän kuin lepokitkan. Normaalisti kitkakertoimen arvo voi olla suurimmillaan 1, eli kappaleiden liikuttamiseen vaaditun voiman suuruus on korkeintaan kappaleita yhteen puristavan voiman suuruus.

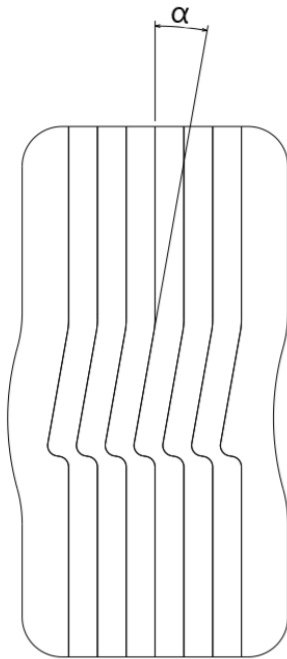
Renkaan ja tien välissä vaikuttava kitka ei kuitenkaan toimi samoin tavoin, kuten kitkaa yleisesti käsitellään. Kumikitkan ominaisuuksiin kuuluu kitkan kasvaminen luiston funktiona. Renkaan alkaessa luistaa kitkavoima ei siis heti heikkene

kuten yleensä, vaan voiman suuruus jatkaa edelleen kasvua johonkin tiettyyn pisteeseen asti, minkä jälkeen voiman suuruus alkaa taas heikentyä. Kitkakerroimen suuruus voi ylittää arvon 1 johtuen kumin sekä asfaltin välisestä adheesiosta, eli eräänlaisesta liimautumisesta. Kitkakerrointa parantaa myös pintojen pienet epätasaisuudet, sillä kumi uppoaa asfaltin epätasaisuuksiin. Lisäksi kumikitka eroaa perinteisestä kitkan määritelmästä siinä, että se on riippuvainen pintapaineesta ja pintapaineen kasvaessa kitkakerroin heikkenee. Normaaliwoiman vähentäminen tai kappaleiden välisen kosketuspinta-alan suurentaminen johtaa pintapaineen vähenemiseen ja näin ollen kitkakertoimen suurenemiseen. [1.]

## 2.2 Kitkaympyrä

Jotta auto voisi kiihdyttää tai jarruttaa, on renkaiden tuotettava pitkittäissuuntaista voimaa. Rengas kykenee tuottamaan pitkittäissuuntaista voimaa, mikäli renkaaseen kohdistetaan momentti joko auton voimansiirron tai jarrujen avulla. Kumikitkan ominaisuuksista johtuen renkaan tulee luistaa hieman, jotta voidaan saavuttaa suurin saavutettavissa oleva pitkittäissuuntainen voima. [1, s. 39.]

Jotta auto voisi kaartaa, on renkaiden tuotettava sivuttaissuuntaista voimaa. Sivuttaissuuntaista voimaa rengas alkaa tuottaa, kun renkaan suuntaa käännetään renkaan todelliseen kulkusuuntaan nähden. Todellisen kulkusuunnan ja renkaan pyörimistason välistä kulmaa sanotaan sortokulmaksi. Sortokulma aiheuttaa renkaaseen hetkellisen muodonmuutoksen, sillä tienpintaa vasten oleva osuus renkaasta asettuu renkaan todelliseen kulkusuuntaan. [2, s. 24–25.] Kuvassa 1 nähdään alhaalta kuvattu rengas. Havaitaan, että renkaaseen piirretyt viivat kulkevat tien ja renkaan välisen kontaktialueen kohdalla eri suuntaan, kuin muualla renkaassa. Muodonmuutoksen suuruus kasvaa mentäessä taaemmaksi kontaktialueella.



Kuva 1. Sortokulma.

Sortokulman aiheuttama muodonmuutos tuottaa renkaalle sivuttaissuuntaisen voiman, sillä rengas toimii eräänlaisena jousena, joka pyrkii palautumaan takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Mikäli tienpinnan ja renkaan välillä on riittävästi kitkaa, voidaan kontaktialueen ajatella olevan sidottuna tienpintaan. Tienpintaan sidottu osa renkaasta aiheuttaa jousivoiman ja vetää muuta rengasta muodonmuutoksen suuntaan. Mikäli sortokulmaa ylläpidetään ohjauskulman avulla, tuottaa rengas sivuttaissuuntaista voimaa ja mahdollistaa autolla kaartamisen. [2, s. 26–27.]

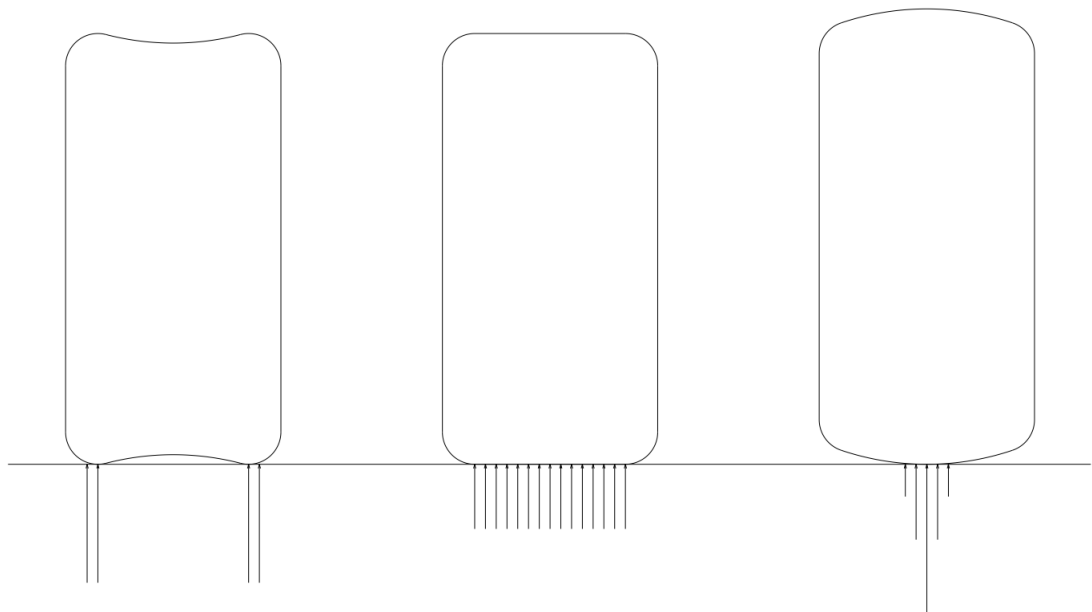
Rengas pystyy tuottamaan maksimaalisen sivuttaissuuntaisen tai pitkittäissuuntaisen voiman vain, jos näistä kahdesta ainoastaan toista pyritään tuottamaan. Todellisuudessa auto on kuitenkin kilparadalla usein tilanteessa, jossa renkaiden tulee tuottaa sekä pitkittäissuuntaista että sivuttaissuuntaista voimaa. Yhdistetyssä tilanteessa sivuttaisvoimantuottopotentiali riippuu siitä, kuinka paljon pitkittäissuuntaista voimaa tuotetaan. Näiden kahden voiman riippuvuus toisis-

taan voidaan esittää kitkaympyrällä. Kitkaympyrän muoto määrittää maksimaalisen sivuttaisvoiman suuruuden pitkittäisvoiman funktiona tai päinvastoin. [2, s. 41–43.]

### 2.3 Pintapaineen vaikutus renkaan ominaisuuksiin

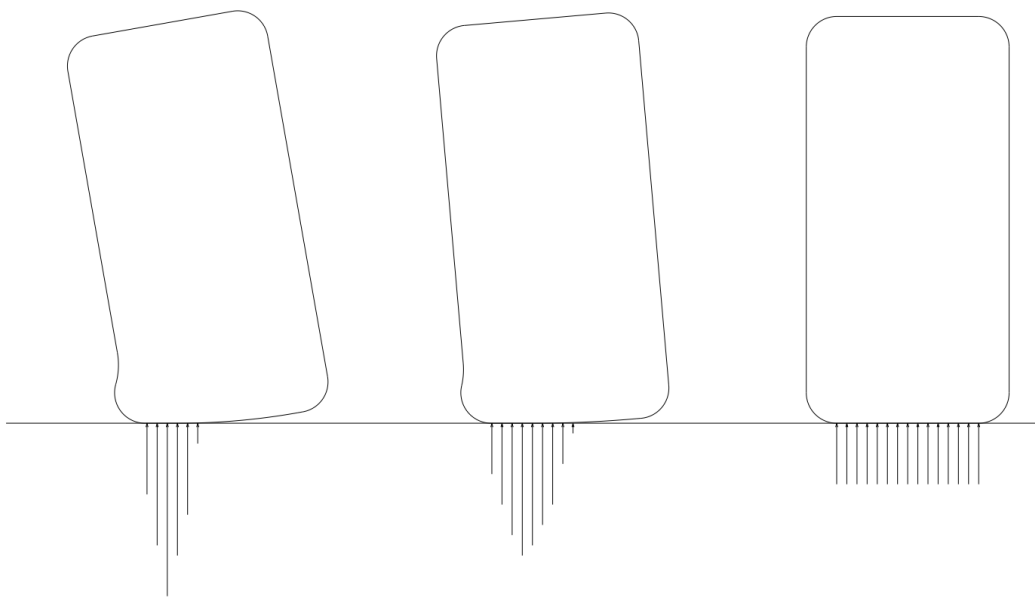
Kumikitkan ominaisuuksiin kuuluu, että kitkakerroin heikkenee pintapaineen kasvaessa. Näin ollen renkaalla vaikuttavan pystysuuntaisen voiman lisääminen heikentää renkaan ja tienpinnan välistä kitkakerrointa kasvaneen paineen myötä. Renkaan leveyden tai halkaisijan pienentäminen johtaa renkaan ja tienpinnan välisen kontaktialueen pienenemiseen, ja näin ollen myös renkaan koon pienentäminen heikentää kitkaa.

Liian suuri rengaspaine saa aikaan renkaan keskelle suuremman pintapaineen, ja näin ollen heikentää kitkaa. Vastaavasti liian alhainen rengaspaine aiheuttaa sen, että renkaan kyljet ottavat suuremman roolin kuorman kantamisessa ja paine keskittyy renkaan reunoille heikentäen taas kitkaa. [2, s. 21–22.] Kuvassa 2 nähdään kuorman jakautuminen eri rengaspaineilla.



Kuva 2. Rengaspaineen vaikutus kuorman jakautumiseen.

Kitkakertoimen paraneminen pintapaineen laskiessa tarkoittaa sitä, että pystykuorman haluttaisiin jakautuvan tasaisesti suurelle alueelle. Renkaan sivukallistuma usein pienentää renkaan ja tienpinnan välisen kontaktialueen kokoa ja aiheuttaa epätasaisuutta paineen jakautumiseen. Näistä syistä johtuen renkaan olisi yleensä parasta olla pystysuorassa parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi. Kuvassa 3 on visualisoituna sivukallistuman vaikutus pintapaineen jakautumiseen. Havaitaan kontaktialueen pienentyvän sivukallistuman kasvaessa.



Kuva 3. Sivukallistuman vaikutus kuorman jakautumiseen.

On kuitenkin havaittu, ettei kaikkien renkaiden kohdalla tilanne ole tämä, ja renkaan rungon rakenteesta johtuen rengas saattaa vaatia suurimman sivuttais-suuntaisen suorituskyvyn saavuttamiseksi jonkin verran sivukallistumaa. Sivukallistuma eli camber-kulma aiheuttaa renkaaseen sivusuuntaisen camber-voiman, sillä renkaan toinen reuna pakotetaan pyörimään pienemmällä halkaisijalla. Tämän vuoksi rengas kokee muodonmuutosta jälleen aiheuttaen jousivoimaa. On olemassa myös renkaita, joiden toisen reunan halkaisija on suurempi kuin toisen reunan. Näillä katkaistun kartion mallisilla renkailla suurin kontakti-

alueen koko saavutetaan tietyllä sivukallistumalla. Tällaisilla renkailla siis saavutetaan suurin mahdollinen kontaktialueen koko samalla, kun voidaan tuottaa suuri camber-voima. [2, s. 31–33.]

Renkaalla vaikuttava pystykuorma vaikuttaa kitkakertoimen lisäksi myös optimaalisen sortokulman suuruuteen [2, s. 29]. Suurimman sivuttaissuuntaisen voiman aiheuttava sortokulma siis muuttuu renkaalla vaikuttavan pystykuorman muuttuessa.

## 2.4 Lämpötilan vaikutus renkaan ominaisuuksiin

Renkaan on tehtävä työtä tuottaakseen voimia. Työtä kuitenkin kyetään aina tekemään vain jollain tietyllä hyötysuhteella osan energiasta muuttuessa lämmöksi. Näin ollen renkaan kokemat muodonmuutokset sekä tienpintaa vasten hankautuminen aiheuttavat lämpöä. Renkaan lämpötilan nousu johtaa kitkan paranemiseen renkaan pehmenemisen myötä, sillä tien epätasaisuudet uppoavat paremmin pehmeämpään renkaaseen. Lisäksi tienpinnan ja renkaan välinen adheesio paranee, sillä lämmin ja pehmeä rengas liimautuu paremmin kuin kylmä ja kova rengas. Kuitenkin mikäli rengas lämpenee liikaa, ei liimautumisessa nähdä enää merkittävää kehitystä ja kitka alkaa taas heikentyä. Kitka heikkenee, sillä tien epätasaisuudet alkavat lävistää pehmennyttä rengasta myös tienpinnan suunnassa, eikä ylikuumentunut rengas kykene välittämään voimia tehokkaasti. Toisin sanoen ylikuumentunut rengas alkaa toimia voiteluaineena auton ja tien välillä heikentäen kitkaa. [2, s. 19–21.]

Renkaan lämpenemiseen vaikuttavat esimerkiksi renkaan ominaisuudet, auton ominaisuudet, auton säädöt, ajo-olosuhteet, rata sekä kuljettajan toiminta. Eri renkaat käyttäytyvät eri tavoin lämpiämisen suhteen. Kitkan kannalta optimaalinen lämpötila vaihtelee eri renkaiden välillä ja jotkin renkaat voivat olla herkempiä lämpötilan muutokselle kuin toiset. Renkaan valinnassa tulisi pyrkiä varmistamaan siitä, että rengas olisi sopivan kokoinen autoon, sillä liian suuri rengas kevyessä autossa ei lämpene riittävästi ja vastaavasti liian pieni rengas paina-

vassa autossa saattaa kärsiä ylikuumentumisesta. Ajo-olosuhteet tulee huomioida, sillä esimerkiksi kylmempiin olosuhteisiin kannattaisi valita helpommin lämpenevä rengas kuin kuumiin olosuhteisiin.

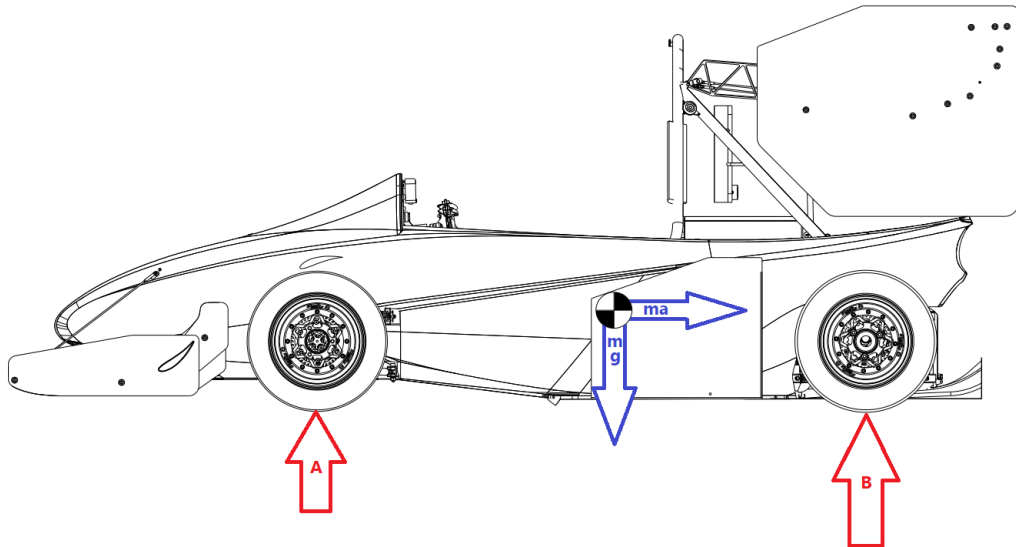
Renkaan lämpeneminen vaikuttaa myös renkaan sisällä vallitsevaan ilmanpaineeseen. Lämpötilan nousu johtaa paineen nousuun ja kuten aiemmin todettua, rengaspaineen muutos johtaa pystykuorman jakautumisen tasaisuuteen muuttaen samalla renkaan ja tienpinnan välisen kitkan suuruutta. Tämän vuoksi rengaspainetta valittaessa tulee ottaa huomioon renkaan lämpenemisestä johtuva paineen muutos.

## 2.5 Rengastestaus

Renkaiden ominaisuuksia voidaan arvioida erilaisilla testeillä. Testejä voidaan suorittaa esimerkiksi liikkuvalla autolla tai rengastestilaitteella. Testilaitteessa rengasta pyöritetään esimerkiksi eräänlaisella juoksumatolla. Testauksessa oleellista on, että sortokulma, pitkittäissuuntainen luisto sekä voimat pitkittäis-, sivuttais-, sekä pystysuunnassa voidaan luotettavasti mitata. Lisäksi lämpötilat renkaan eri kohdissa, tienpinnan lämpötila, ulkoilman lämpötila, rengaspaine sekä renkaan sivukallistuma ovat hyödyllisiä tietoja renkaan toiminnan arvioimisen kannalta. [1, s. 79–80.]

## 3 Pyöräkuorman muutos

Kiihdytettäessä autolla auton takapyörillä vaikuttava pystysuuntainen voima kasvaa, kun taas eturenkailla vaikuttava voima pienenee. Jarrutettaessa tilanne on päinvastainen etupyörillä vaikuttavan voiman kasvaessa ja takapyörillä vastaavasti pienentyessä. Tämä ilmiö voidaan selittää piirtämällä autosta kuvassa 4 näkyvä vapaakappalekuva ja kirjoittamalla tästä sekä voima- että momenttiyhälöt. Kuvasta on jätetty pois renkailla vaikuttavat pituussuuntaiset voimat, sillä nämä voimat eivät suoranaisesti vaikuta pystysuuntaisten pyöräkuormien laskentaan. Kuvasta on jätetty pois myös aerodynaamiset kuormat, sillä niitä käsitellään myöhemmin omassa luvussaan.



Kuva 4. Auton sivusta piirretty VKK.

Vapaakappalekuvasta kirjoitetuista voima- sekä momenttiyhtälöistä voidaan johdattaa kaava pyöräkuorman muutokselle [2, s. 54]:

$$\Delta W = \frac{h * W * a_x}{l} \quad (1)$$

jossa

- $\Delta W$  on pystykuorman muutos akselilla (N)
- $h$  on auton massakeskipisteen etäisyys maanpinnasta (m)
- $W$  on auton paino (N)
- $a_x$  on kiihtyvyys auton pituussuunnassa (g)
- $l$  on auton akseliväli (m).

Vastaava pätee auton sivuttaissuunnassa ja kaarreajon aiheuttama pyöräkuorman muutos saadaan kaavasta [2, s. 57]:



$$\Delta W = \frac{h * W * a_y}{t} \quad (2)$$

jossa

- $\Delta W$  on pystykuorman muutos (N)
- $h$  on auton massakeskipisteen etäisyys maanpinnasta (m)
- $W$  on auton paino (N)
- $a_y$  on kiihtyvyys auton sivuttaissuunnassa (g)
- $t$  on auton raideleveys (m).

Kuten tiedetään, renkaalla vaikuttavan pystykuorman kasvattaminen heikentää renkaan ja tienpinnan välistä kitkakerrointa. Vaikka kitkakerroin paranee niillä renkailla, joilla pystykuorma pienenee, auton tuottama kokonaisvoima heikkenee, sillä heikomman kitkakertoimen omaavilla renkailla on suurempi vastuu voimien tuottamisessa. Tämän vuoksi renkailla vaikuttavien pystykuormien muutokset tulisi minimoida ja auton massa tulisi jakaa tasaisesti auton pyörien kesken.

Kaavasta havaitaan painopisteen korkeuden suurentamisen suurentavan pyöräkuorman muutoksen suuruutta. Raideleveys tai auton akseliväli sen sijaan esiintyy nimittäjässä, joten näiden arvojen suurentaminen puolestaan vähentää pyöräkuorman muutosta. Renkaiden ja tienpinnan välisen kitkan kannalta parasta siis olisi, että auto olisi mahdollisimman leveä, pitkä ja matala.

Kiihdytyksestä, jarrutuksesta sekä kaartamisesta aiheutuvien pyöräkuormien muutoksen lisäksi pyöräkuormat voivat muuttua esimerkiksi tilanteessa, jossa auton renkaista yksi ylittää tien pinnassa olevaa epätasaisuutta. Mikäli yhden renkaan korkeussuuntaista sijaintia korotetaan, on tällä renkaalla vaikuttavan pystykuorman kasvettava. Myös toisen akselin toisen puolen pyörällä vaikuttavan pystykuorman on noustava, kun taas kahdella muulla renkaalla pystykuormien tulee vähentyä. Tämä voidaan selittää ajattelemalla ääritapaus, jossa yhtä

pyörää nostetaan ylös niin paljon, että auton muista renkaista kaksi nousee ilmaan. Tällöin auton koko massan on jakauduttava kahden maassa olevan renkaan välille. Pyöräkuormat muuttuvat myös, mikäli autolla ajetaan hypyn tai nypyn yli. Tällöin pyörillä vaikuttavat pystykuormat pienenevät jokaisen renkaan osalta. Tämänkin voidaan selittää ääritapauksella, sillä mikäli auto nousee kokonaan ilmaan, on renkailla vaikuttavien pystykuormien oltava nolla. Mikäli autolla taas ajetaan konveksilla pinnalla, pyöräkuormat voivat kasvaa staattisia pyöräkuormia suuremmiksi, jos putoamiskiihtyvyyden ja auton keskeiskiihtyvyyden tienpintaa kohden kohtisuorien komponenttien summa on suurempi kuin putoamiskiihtyvyys.

## 4 Alusta

### 4.1 Jousitus

Kumikitkan ominaisuuksista johtuen pyöräkuormien muutokset aiheuttavat aina kitkakertoimen heikkenemistä ja tämän vuoksi näitä muutoksia halutaan kilpa-autossa aina vähentää. Tien epätasaisuuksista johtuviin pyöräkuorman muutoksiin voidaan vaikuttaa kiinnittämällä renkaat auton runkoon joustavin elementein, jousin. Jousitus sallii renkaiden pysyvän kosketuksissa tienpintaan pinnan epätasaisuuksista huolimatta kehittäen näin käytettävissä olevaa kitkakerrointa. Jousilla voidaan vaikuttaa auton ajettavuuteen ja käyttäytymiseen. [3.]

Mikäli auto olisi tuettu pelkillä jousilla, jäisi se heilahtelemaan pitkäksi aikaa aina ylitettäessä tien epätasaisuuksia. Tämän vuoksi autoissa käytetään heilahdukseenvaimentimia. Vaimennin on komponentti, joka vastustaa liikettä. Kilpa-autoissa vaimentimia käytetään myös ajettavuuden kehittämiseen, sillä vaimentimilla voidaan vaikuttaa auton korin kallisteluihin ja nyökkäilyihin. Vaimentimet voivat toimia myös iskuvaimentimina. Mikäli auton renkaat kokevat äkillisiä suuria pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä, vaimentimet absorboivat iskuja. Oikeanlaisilla vaimentimilla tien epätasaisuuksien aiheuttamat pystykuorman muutokset saadaan minimoitua ja samalla auton varmistetaan vastaavan kuljettajan asettamiin herätteisiin nopeasti. [4.]

Jousien ja vaimentimien lisäksi auton kallistelua vähennetään usein kallistuksenvakaajien avulla. Kallistuksenvakaaja on usein tanko tai putki, jolla vasemman ja oikean puolen pyörätuennat ovat yhdistetty. Kaarreajon aikana ulkokaarteiden puoleiselta pyörältä välitetään vakaajan avulla voimaa sisäkaarteiden puoleiselle pyörälle. Ulkokaarteiden puolella kasvaneella pystykuormalla siis pyritään painamaan sisäkaarteiden puoleista rengasta sisäänjouston suuntaan näin vähentäen auton kallituskulmaa. [5.]

## 4.2 Alustageometria

Jousituksen toteuttamiseksi renkaat on tuettava auton runkoon jollakin tavalla. Pyöräntuenta varten on kehitetty useita erityyppisiä ratkaisuja, jotka yleensä hyödyntävät jonkin tyyppisiä tukivarsia. Formula-autoissa käytetyin ratkaisu on olkatukien liittäminen auton runkoon päällekkäisten kolmiotukivarsien avulla.

### 4.2.1 Camber

Camber-kulmalla tarkoitetaan renkaan sivukallistumaa. Camber-kulmaa sanotaan positiiviseksi, mikäli renkaat ovat yläreunastaan kallistettu autosta ulospäin. Vastaavasti camber on negatiivinen, mikäli renkaat ovat kallistettu yläreunastaan auton keskikohtaa kohden. [2, s. 32.]

Kuten aiemmin todettiin, renkaan sivukallistuma vaikuttaa renkaan kykyyn tuottaa voimia sekä pitkittäis- että sivuttaissuunnassa. Negatiivinen camber aiheuttaa camber-voimaa auton keskikohtaa kohden, joten mikäli auton pyörät ovat asetettu negatiiviselle camber-kulmalle, kaarreajossa ulkokaarteiden puoleiset renkaat tuottavat voimaa siihen suuntaan, johon autolla halutaan kääntyä. Sisäkaarteiden puoleiset renkaat tällöin tuottavat camber voimaa vastakkaiseen suuntaan, mutta pyöräkuorman muutoksen vuoksi sisäkaarteiden renkailla vaikuttavat voimat ovat vähäisiä verrattuna ulkokaarteiden puoleisilla renkailla vaikuttaviin voimiin. Tämän vuoksi saattaa olla perusteltua käyttää autossa negatiivista camber-kulmaa.

Pyöräkuorman muutoksesta johtuvan jousien painautumisen myötä auton kori kuitenkin kallistuu kaarreajon aikana. Mikäli pyörät olisi tuettu niin, että niiden sivukallistuma pysyy vakiona koko joustoliikkeen ajan, kallistuvat myös pyörät samaan kulmaan auton korin kanssa. Tämä tarkoittaa positiivisempaa camber-kulmaa ulkokaarten pyörille. Positiivisen camber-kulman välttämiseksi tai sen vähentämiseksi auton alustakinematiikan tulisi olla suunniteltu niin, että renkaan sivukallistuma muuttuu joustomatkan funktiona. Näin rengas saataisiin pysymään pystysuorassa tai sen camber-kulma saataisiin negatiiviseksi. Kuitenkin tällöin sivukallistuma muuttuu myös kiihdytys- ja jarrutustilanteissa aiheutuvan joustoliikkeen myötä ja tämän myötä kitka saattaa heikentyä näissä tilanteissa.

Kilpa-autoissa on usein päädytty toteuttamaan kaarreajoon riittävä camber-kulma kinematiikan aiheuttaman camber-muutoksen avulla, mutta osittain camber koostuu myös staattisesta camberista. Pyörillä on siis jonkin verran camber-kulmaa jo auton seistessä paikoillaan. Näin renkaille taataan riittävä camber-kulma kaarreajoon kuitenkin tekemättä liian suuria uhrauksia muun kinematiikan suhteen. Yleensä pieni staattinen camber ei heikennä auton suorituskykyä suorilla, sillä vaikutus kitkaan on melko pieni ja autot eivät kuitenkaan kykene tuottamaan renkaille enempää pitkittäissuuntaista voimaa, kuin mihin tienpinnan ja renkaan välinen kitka riittäisi.

#### 4.2.2 Kallistuskeskiöt

Kun camber-kulman halutaan muuttuvan joustoliikkeen mukaan, tulee pyörän liikkua takaata katsottuna pitkin ympyrän kaaren muotoista rataa. Tämän kuvitteellisen ympyrän keskipistettä sanotaan nopeusnavaksi. Vasemman ja oikean puolen nopeusnavat määrittävät kinemaattisen kallistuskeskiön sijainnin. Kallistuskeskiön sijainti määritetään piirtämällä suorat nopeusnavoista renkaan kontaktipintaan. Näiden kahden suoran leikkauspiste on kinemaattinen kallistuskeskiö. [2, s. 203.]

Kallistuskeskiön ja painopisteen välinen korkeussuuntainen etäisyys on voiman varsi kaarreaajosta aiheutuneen keskeiskiihtyvyyden aiheuttamalle näennäisvoimalle. Näin tämä painopisteessä vaikuttava ”keskipakovoima” aikaansaa autoa kallistavan momentin. Mitä kauempana painopisteestä kallistuskeskiö on, sitä suuremman momentin sivuttaisvoima saa aikaiseksi. [2, s. 207.]

Suurempi sivuttaisvoiman aiheuttama momentti tarkoittaa, että kallistuskulman pienentämiseksi auton jousituksen täytyisi toteuttaa suurempi kallistusjäykkyys. Kallistuskeskiön sijainti muuttuu jousituksen liikkeiden mukaan, joten vakiolla kallistusjäykkyydellä auton kallistuma muuttuu jousituksen liikkeiden funktiona, vaikka sivuttaisvoima pysyisi vakiona.

Kallistuskeskiön korkeus myös aiheuttaa auton runkoon vaikuttavan nostovoiman. Mikäli kallistuskeskiö sijaitsee maanpinnan yläpuolella, auton runkoon kohdistuu autoa nostava voima sivuttaisvoiman vaikuttaessa. Mikäli kallistuskeskiö taas sijaitsee maanpinnan alapuolella, aiheutuu auton koria alaspäin painava voima. Mitä kauempana maanpinnasta kallistuskeskiö on, sitä suurempi on runkoon vaikuttava pystysuuntainen voima. [2, s. 211–212.]

Kun kallistuskeskiön sijaintia korottamalla autoa kallistava momentti vähenee, vähenee myös jousien painauma ja auton kallistuma. Pyöräkuorman muutoksen kuitenkin pysyessä samana voidaan ajatella osan pyöräkuorman muutoksesta tapahtuvan muun pyöräntuennan kuten tukivarsien kautta, sillä tämä osuus ei vaikuta jousien painaumaan.

#### 4.2.3 Antigeometriat

Mikäli auton renkaat liikkuvat joustoliikkeen aikana ympyrän kaaren muotoista rataa pitkin myös auton sivusta katsottaessa, on autossa tällöin antigeometrioita. Auton nyökkääminen on vastaava tapahtuma kuin kallistuminen, ja nopeusnapojen sijainneilla voidaan vaikuttaa auton alustan toimintaan pitkittäis-suuntaisten voimien vaikuttaessa renkailla. Mikäli nopeusnavan sijaintia korotetaan, kasvaa tukivarsien osuus pyöräkuorman muutoksesta. Jousien kautta

muutos on tällöin pienempi, ja jouset eivät painu kuten ne painuisivat ilman anti-geometriaa. Autoissa voidaan käyttää antidive, antisquat ja antilift -ominaisuuksia. Antidivellä tarkoitetaan jarrutustilanteessa etujousituksen painautumisen vähentämistä, antisquat tarkoittaa kiihdyttämisestä johtuvan takajousituksen painautumisen vähentämistä ja antilift puolestaan tarkoittaa etujousituksen nousemisen vähentämistä auton kiihdyttäessä tai takajousituksen nousemisen vähentämistä jarrutustilanteessa. [6, s. 617–620.]

#### 4.2.4 KPI

KPI-kulma tarkoittaa ohjaavalla akselilla renkaan kääntöakselin sivukallistumaa. Kääntöakselin kallistaminen aiheuttaa sen, että ohjausliikkeen myötä renkaan ja tienpinnan välinen kontaktialue painuu alaspäin suhteessa auton runkoon. Käytännössä auton runko siis nousee ylöspäin, mikäli ohjauspyörän asento poikkeaa keskiasennosta. Auton jousitetun massan vaikutuksesta ohjaus pyrkii palautumaan takaisin keskiasentoon. Liian pienellä KPI-kulmalla tämä itsekeskittävyyks voi jäädä liian heikoksi, mutta liian suuri KPI voi tehdä ohjauksesta raskaan. KPI-kulman valinnassa tulee myös huomioida vaikutus camber-kulmaan. KPI muuttaa ohjausliikkeen myötä renkaan camber-kulmaa ulkokaarteen renkaalla positiiviseen suuntaan, joka puolestaan ei ole toivottua. [2, s. 217–219.]

#### 4.2.5 Caster

Caster-kulma tarkoittaa renkaan kääntöakselin takakallistumaa. Caster-kulmalla voidaan kompensoida KPI-kulman aiheuttama camber-kulman muutos ohjausliikkeessä, sillä taaksepäin kallistunut kääntöakseli aiheuttaa negatiivista camber-kulmaa ulkokaarteen renkaalle. Caster aiheuttaa myös sen, että sisäkaarteiden puolen renkaan ja tienpinnan välinen kontaktipinta laskee, mutta toisin kuin KPI:n tapauksessa, ulkokaarteiden puoleisella renkaalla tilanne on päinvastainen kontaktipinnan noustessa. Käytännössä tämä tarkoittaa auton kallistumista. Kuitenkin kun taka-akselilla muutoksia ei tapahdu, voidaan havaita auton ristikkäisillä pyörillä pystykuorman lisääntyvän, kun kahdella muulla pyörällä pystykuorma taas puolestaan vähenee. [2, s. 219–220.]

#### 4.2.6 Kääntövierinsäde

Kääntövierinsädeellä tarkoitetaan kääntöakselin ja tienpinnan leikkauskohdan ja renkaan kontaktipinnan keskikohdan välistä sivusuuntaista etäisyyttä. Mikäli autossa on suuri kääntövierinsäde, rengas kulkee ohjausliikkeen aikana pitkin suurta ympyrän kehää. Tämä aiheuttaa renkaalle suuremman pituussuuntaisen liikkeen, kuin mitä pienempi kääntövierinsäde aiheuttaisi. Myös renkaan sivusuuntainen liike on suurempi. Suuri kääntövierinsäde siis aiheuttaa ohjausliikkeen myötä raidelevyden sekä akselivälien muutosta. Ulkokaarten puolella akseliväli pitenee, kun taas sisäkaarten puolella se lyhenee. Kääntövierinsäde toimii myös voiman vartena renkaan tuottamalle pitkittäisvoimalle jarrutus- ja kiihdytystilanteissa. Pitkittäisvoima aikaansaa siis momenttia kääntöakselin ympäri. Mikäli vasemman ja oikean puolen pyörillä vaikuttaa erisuuruiset pitkittäis-suuntaiset voimat, nähdään ohjauksen kääntyvän siihen suuntaan, johon suuremman voiman aiheuttama momentti on. Tämä ilmiö on tuttu erityisesti suorituskykyistä etuvetoautoista, joissa ohjaus ei välttämättä pysy suorassa kiihdytyksen aikana. [2, s. 220–221.]

#### 4.2.7 Etujättö

Casteria kannattaa yleensä hyödyntää autoissa myös suuremman etujätön aikaansaamiseksi. Etujättö on pituussuuntainen etäisyys kääntöakselin ja maanpinnan leikkauskohdasta renkaan ja tienpinnan kontaktialueen keskelle. Etujättö aiheuttaa jarrutustilanteessa suuntavakautta, sillä jarrutusvoima pyrkii suoristamaan rengasta. Konkreettisenä esimerkkinä voidaan ajatella ostoskärryn pyörää, joka pyrkii aina suoristumaan. [2, s. 220.]

### 4.3 Stabiiliteetti

Kallistuskeskiöiden sijainnit, jousien jäykkyydet, vakaajan jäykkyys ja raidelevyys vaikuttavat akselin kallistusjäykkyyteen. Mikäli auton toisella akselilla on suurempi kallistusjäykkyys, toteutuu tällä akselilla suurempi pyöräkuorman

muutos. Asian voi selittää ajattelemalla auton toinen akseli kallistusjäykkyydeltään täysin löysäksi ja toisen täysin jäykäksi. Tällöin autoa kallistaessa jäykemmän akselin on tuotettava vaadittu tukireaktio kokonaisuudessaan.

Jäykemmällä eli suuremman tukireaktion aiheuttamalla akselilla siis toteutuu suurempi pyöräkuorman muutos, joten tällä akselilla heikkenee myös kitka enemmän kumikitkan ominaisuuksista johtuen. Todellisuudessa akselien kallistusjäykkyydet ovat lähellä toisiaan, mutta eroavat kuitenkin jonkin verran esimerkiksi renkaiden ominaisuuksista ja halutusta käytöksestä riippuen.

Mikäli toisella akselilla pitoa on enemmän kuin toisella, tulee autosta yli- tai aliohjaava, eli toinen akseli alkaa luistaa aiemmin. Tämä saattaa heikentää auton suorituskykyä ja muuttaa ajettavuutta. Mikäli pitoon vaikuttavat asiat, kuten raideleveys, camber tai kallistuskeskiön sijainti muuttuu jatkuvasti, voi autosta tulla haasteellinen ajettava, sillä myös yli- tai aliohjautuminen muuttuu jatkuvasti. Tämän vuoksi nämä alustan muutokset jousituksen liikkeiden funktiona tulisi minimoida.

#### 4.4 Ohjaus

Sivuttaissuuntaisten voimien tuottamiseksi renkaille tulee saada aikaiseksi sortokulma. Sortokulma aikaansaadaan ohjaukskulman avulla ja ohjaukskulman toteuttamista varten autoon vaaditaan ohjaus.

Ackermann-ohjauksella tarkoitetaan sellaista ohjausta, jossa auton kaikkien pyörien pyörimisakselit lävistävät toisensa samassa pisteessä, kun rattia on käännetty. Tällaisella ohjauksella saavutetaan se etu, että kaikki renkaat kiertävät samaa pistettä. [2, s. 221–222.]

Kuitenkin tiedetään, että pystykuorma muuttuu kaarreajon aikana, ja että optimaalinen sortokulma muuttuu pystykuorman muuttuessa. Molemmille eturenkaille olisi parasta saada sellainen sortokulma, jolla voidaan saada aikaiseksi



suurin mahdollinen sivuttaissuuntainen voima. Näin ollen etenkin kilpa-autossa ei ole perusteltua käyttää Ackermann-ehdon toteuttavaa ohjausta vaan mahdollisesti parasta olisi käyttää rengasdataan perustuvaa ohjausgeometriaa. Yleensä tämä tarkoittaa, että ulkokaarten puoleisen pyörän tulisi kääntyä enemmän. [2, s. 223.]

Bumb-steeriksi kutsutaan alustan ominaisuutta, joka saa renkaan kääntymään joustomatkan funktiona. Yleensä tällaista ominaisuutta pyritään välttämään, joskin autoissa yleensä erinäisistä syistä johtuen jonkin verran bumb-steeriä on. Ohjaukulman muutos joustomatkan funktiona voi olla myös haluttu ominaisuus, sillä mikäli taka-akselilla sisään joustavaa rengasta voidaan kääntää sisäänpäin ja ulos joustavaa pyörää kääntää ulospäin, voidaan saada aikaiseksi eräänlainen passiivinen takapyöräohjaus. Tätä kutsutaan roll-steeriksi. Roll-steerin suhteen tulee kuitenkin muistaa, että ohjaukulma muuttuu aina jousituksen liikkeen mukaan, eikä ainoastaan auton kallistuessa. Tasajoustossa sekä yksipyöräjoustossa tapahtuva ohjaukulman muutos ei ole haluttu ominaisuus, mutta joissain tapauksissa roll-steerin käyttö voi silti olla perusteltua. [2, s. 223–224.]

## 5 Aerodynamiikka

### 5.1 Yleisesti

Kilpa-autoissa on käytetty esimerkiksi erilaisia siipiä, diffuusoreja sekä pohjalevyjä aerodynamiikan kehittämiseksi. Näillä välineillä pyritään aiheuttamaan auton tai sen osien alapuolelle alipainetta ja yläpuolelle ylipainetta. Kuten tiedetään, paine-ero tuottaa voiman yhdessä pinta-alan kanssa. Kilpa-autoissa tätä voimaa kutsutaan negatiiviseksi nosteeksi. Negatiivinen noste kasvattaa renkailla vaikuttavien pystykuormien suuruuksia ja vaikka pystykuorman kasvattaminen heikentää kitkaa, auton suorituskyky kohenee. Tämä johtuu renkailla vaikuttavien voimien kasvamisesta ilman, että auton massa nousee samassa suhteessa.

Aerodynamiikka siis mahdollistaa autolle suuremman pidon, kuin mitä kitkakeroin antaa ymmärtää. Kuitenkin negatiivisen nosteen tehostamisen myötä kasvaa myös aerodynaaminen vastus. Auton liikkeessä eteenpäin auton edessä on aina suurempi paine kuin auton takana, joten syntyy autoa taaksepäin vetävä voima [7, s. 42–43]. Vaikka tätä autoa hidastavaa voimaa pyritään minimoimaan suunnittelulla, se siis kasvaa käytännössä aina, kun aerodynamiikan tehokkuutta kasvatetaan. Lisäksi negatiivisen nosteen kasvattaessa pyörillä vaikuttavia pystykuormia, kasvaa myös renkaiden vierinvastus ja näin vastusvoimat kasvavat edelleen.

Kasvaneiden ajovastusten vuoksi tehokkaan aerodynamiikan autolla nopeuden ylläpitämiseen tai autolla kiihdyttämiseen vaaditaan enemmän voimaa kuin autolla, jossa ei ole käytössä tehokasta aerodynamiikkaa. Suuremman pitkittäisvoiman tarpeen myötä aerodynamiikka myös rajoittaa hyödynnettävissä olevaa sivuttaisvoimantuottopotentiaalia, joten auton suorituskyky ei kohene, mikäli negatiivista nostetta ei tuoteta riittävästi suhteessa ajovastusten kasvuun sekä aerodynaamisten välineiden tuoman lisämässän vaikutukseen.

Kiihdytyksessä pidon puute on yleensä ongelma vain alhaisissa nopeuksissa, ja suoralla ajettaessa aerodynamiikan edut liittyvät lähinnä ajovakauden parantamiseen. Tehokkaasta aerodynamiikasta on lähinnä vain haittaa suoralla ajaessa kasvaneiden ajovastusten myötä. Kuitenkin jarrutustilanteessa aerodynamiikasta on ainoastaan etua, sillä negatiivinen noste kasvattaa renkaiden voimantuottokykyä ja lisäksi aerodynaaminen vastus hidastaa autoa.

## 5.2 Aerobalanssi

Kilpa-auton aerodynamiikka kasvattaa auton pyöräkuormia auton nopeuden noustessa. Aerobalanssiksi kutsutaan sitä suhdetta, jonka mukaan aerodynaaminen kuorma jakautuu auton etu- ja taka-akselin välille. Auton aerobalanssi on etupainoinen, mikäli etupyörillä vaikuttaa suurempi aerodynaaminen kuorma kuin taka-akselilla.

Mikäli aerobalanssi poikkeaa auton painojakaumasta, muuttaa tämä auton käyttäytymistä ajonopeuden funktiona. Painojakaumaa takapainoisempi aerobalanssi saa auton aliohjaamaan suuremmissa nopeuksissa, kun taas etupainoinen aerobalanssi tekee autosta yliohtavammaksi. Näin aerobalanssilla voidaan mukauttaa auton käytöstä haluttuun suuntaan, sillä joissain tapauksissa voi olla edullista saada autosta esimerkiksi yliohtavampi hitaissa nopeuksissa ja korkeammassa nopeuksissa aliohtavampi. Näin auto voisi olla ketterämpi hitaissa mutkissa, mutta vakaampi nopeissa. Ilman aerodynamiikkaa tai aktiivisia järjestelmiä tällaisen käyttäytymisen toteuttaminen olisi mahdotonta. [8.]

### 5.3 Alustan vaikutus aerodynamiikkaan

Alustan liikkeet tarkoittavat myös auton aerodynaamisten välineiden asentojen muuttuvan jatkuvasti ajotilanteiden muuttuessa. Auton takapäätä voi esimerkiksi madaltua kiihdytyksen aikana tai auto kallistua kaarreaajossa.

Auton kallistuminen kaarreaajon aikana johtaa usein aerodynamiikan tehokkuuden heikkenemiseen. Esimerkiksi etusiiven tapauksessa siiven kallistuminen johtaa siihen, että maavaikutus heikkenee ainakin siinä reunassa, joka loittonee maanpinnasta. Maavaikutuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa maanpinnan läheisyys rajoittaa alipaineen ”karkaamista” auton alta näin tehostaen aerodynamiikan toimintaa. Myös siiven toisessa reunassa voidaan havaita tehokkuuden heikkenemistä, sillä liian matalalle sijoittunut osa siipeä rajoittaa ilmavirtausta siiven alla näin heikentäen negatiivisen nosteen määrää. Kuitenkaan kaikki komponentit eivät ole yhtä herkkiä kallistuskulman muutokselle, joten auton kallistuessa voidaan havaita aerobalanssin muutosta. [6, s. 522–524]

Etenkin maavaikutusta hyödyntävien välineiden osalta sivusuuntainen aerobalanssi saattaa myös muuttua kaarreaajossa. Auton kallistuessa kohti ulkokaarretta tämä usein saattaa tarkoittaa ulkokaarreen puolella tehostunutta maavaikutusta. Ulkokaarretta kohti siirtynyt aerodynaamisen pystykuorman keskipiste

kasvattaa ulko- ja sisäkaarten pyörien välistä eroa pystykuormassa entisestään, ja olisikin mahdollisesti mielekkäämpää lisätä kuormaa sisäkaarten renkaille, joilla on alhaisemmasta pystykuormasta johtuen korkeampi kitkakerroin.

Jarrutustilanteessa auton etuosan painuessa lähemmäs maanpintaa etusiipi saattaa rajoittaa ilmavirtausta ja etusiiven toiminta saattaa heikentyä näin rajoit- taen negatiivisen nosteen määrää. Myös kiihdyttäessä etusiiven toiminta saat- taa kärsiä etusiiven noustessa kauemmaksi maanpinnasta. Toki myös ajono- peuden muutos kasvattaa aerodynaamisen pystykuorman määrää, joka taas muuttaa auton ajokorkeutta riippuen auton jousituksesta. Auton ajokorkeus vai- kuttaa jälleen aerodynamiikan toimintaan aerodynaamisten välineiden kor- keusaseman muuttumisen myötä.

Mainituista auton kaartamiseen, kiihdyttämiseen ja jarruttamiseen liittyvistä on- gelmista johtuen auton alustan tulisi olla teoriassa täysin jäykkä, jotta se sallisi aerodynamiikalle parhaan toimintaympäristön. Tämä on taas ristiriidassa sen kanssa, mikä olisi alustan kannalta parasta.

Toisaalta alustan liikkeistä voi olla joissain tapauksissa myös hyötyä. Esimer- kiksi auton alustageometriasta ja jousituksesta riippuen auton kohtauskulma saattaa kasvaa auton kallistuessa. Kohtauskulmalla tarkoitetaan etu- ja taka-ak- seleiden korkeuseroista johtuvaa auton pituussuuntaista asentokulmaa. Kasva- nut kohtauskulma saattaa joissain tapauksissa johtaa suurempaan negatiivisen nosteen määrään, tai ainakin auto voitaisiin suunnitella niin, että suoralla ajetta- essa autolla on vähemmän kohtauskulmaa pienemmän vastuksen saavutta- miseksi, mutta kaarreajon aikana auton kohtauskulma muuttuisi jyrkemmäksi suuremman negatiivisen nosteen saavuttamiseksi. [6, s. 523]

#### 5.4 Aerodynamiikan vaikutus alustaan

Kuten aiemmin mainittiin, aerobalanssilla voidaan hallita auton käyttäytymisen muuttumista ajonopeuden funktiona. Kuitenkaan auton käyttäytymiseen vaikut- taminen pelkän aerobalanssin avulla ei ole niin yksinkertaista. Ajonopeuden

noustessa aerodynaamisen pystykuorman kasvaminen aiheuttaa samalla auton ajokorkeuden madaltumisen. Ajokorkeuden muutos muuttaa auton käyttäytymistä esimerkiksi kallistuskeskiöiden sijaintien, raidelevyysien ja camber-kulmien muuttumisen myötä. Joissain tapauksissa myös mahdolliset anti-geometriat kokevat muutoksia ja mikäli autossa on roll- tai bumb-steer ominaisuuksia, muuttuu myös renkaan ohjauskulma.

Koko auton madaltumisen lisäksi eroavaisuudet etu- ja taka-akselin jousituksissa sekä auton aerobalanssi johtavat siihen, että auton etuosa ei painu välttämättä alaspäin takaosaa vastaavalla tavalla. Näin muutokset alustalle saattavat olla vähäisempiä toisella akselilla kuin toisella.

Kaikki nämä asiat vaikuttavat akselien pitoon ja tätä kautta auton suorituskykyyn sekä balanssiin, ja on siksi otettava huomioon autoa suunnitellessa tai säätäessä. Lisäksi kilpailujen säännöt saattavat aiheuttaa sen, että aerodynaamikka vaikuttaa alustan suhteen tehtäviin ratkaisuihin tai toisinpäin. On siis tärkeää ymmärtää alustan ja aerodynaamikan toimintaa yhdessä ja pyrkiä löytämään parhaan mahdollisen lopputuloksen tuova ratkaisu.

## **6 Suunnittelun lähtötiedot**

### **6.1 FS-säännöt**

Suunnittelun aluksi tärkeintä on perehtyä Formula Studentin sääntöihin. Eurooppalaisiin kilpailuihin osallistumiseksi on suunniteltava ja valmistettava formula-tyyppinen kilpa-auto. Auton on noudatettava Formula Student Germanyn julkaisemaa sääntökirjaa [9]. Alustaa erityisesti koskevia sääntöjä ei kuitenkaan ole montaa, mutta joitakin huomioon otettavia asioita kuitenkin on. Autossa esimerkiksi tulee olla neljä pyörää ja auton akselivälin tulee olla pituudeltaan vähintään 1525 mm:n suuruinen. Auton kahdesta akselistä kapeamman tulee olla vähintään 75 % leveämmän akselin leveydestä ja auton maavaran on oltava vähintään 30 mm. Autolla tulee olla iskunvaimentimin varustettu jousitus ja joustomatkan tulee olla vähintään 50 mm. Kuljettajan istuessa autossa autolla tulee

olla vähintään 25 mm käytettävissä olevaa sisäänjoustoa. Lisäksi katsastuksissa suoritettava kallistustesti asettaa vaatimuksen painopisteen korkeuden ja raidelevyysien suhteelle. Testissä auto ei saa kaatua, kun sitä kallistetaan 60 astetta sivulle. Kaikkien alustan kiinnityspisteiden tulee olla nähtävillä, ja mikäli ne ovat peitetty, tulee suojien olla helposti poistettavissa.

Mikäli auton pyörien kiinnityksessä käytetään tavallisia pyöränpultteja, tulee näiden olla terästä ja ne eivät saa olla onttoja. Kustomoituja pyöränpultteja tai erikoisvalmisteisia kiinnitystapoja käytettäessä tulee todistaa, että suunnittelussa on noudatettu hyviä suunnittelukäytäntöjä. Keskimutterikiinnitystä käytettäessä tulee käyttää lukitusmekanismeja ja mikäli pyörämutterit ovat valmistettu alumiinista, niiden tulee olla kova-anodisoituja ja turmelemattomia. Renkaiden lämmitimet tai renkaan ja tienpinnan välistä kitkaa lisäävät aineet eivät ole sallittuja. Samalle akselille asennettujen renkaiden tulee keskenään olla samalta valmistajalta ja edustaa samaa kokoa sekä seosta. Autoa varten on oltava erilliset sadekelin sekä kuivan kelin renkaat, ja sadekelille tarkoitettujen renkaiden urasyvyyden on oltava vähintään 2,4 mm. Sadekelirenkaiden urien tulee olla renkaan valmistajan tai heidän nimittämänsä toimijan tekemiä.

Ohjauspyörän tulee mekaanisesti ohjata auton etupyöriä ja ohjauksessa saa olla korkeintaan 7 astetta väljää mitattuna ohjauspyörältä. Hammastangon tulee olla mekaanisesti kiinnitettynä auton runkoon. Ohjauksen toteuttamiseksi ei saa käyttää minkäänlaisia vaijereita tai vöitä ja hammastankoon tulee asentaa liikkeenrajoittimet niin, että vältetään ohjauksen lukittumiselta ja ettei renkaat tai vanteet osu ohjauksen ääriasennoissa tukivarsiin tai muihin auton osiin. Ohjauksen tulee olla mahdollista auton ollessa paikoillaan ja ohjauspyörän tulee olla nopeasti irrotettavissa. Kuljettajan tulee pystyä irrottamaan ohjauspyörä autossa istuessaan normaalissa ajoasennossa. Ohjauspyörän ulkomuodon tulee pääpiirteittäin noudattaa pyöreää tai ovaalia muotoa, mutta suorat osuudet sallitaan. Ohjauspyörän ulkoreunoissa ei siis saa olla koveria muotoja. Kaikki komponentit, jotka yhdistävät ohjauspyörän hammastankoon, tulee olla mekaanisia ja helposti esillä. Liimatut liitokset tällä välillä eivät ole sallittuja ilman mekaa-

nista varmistusta. Tämän varmistuksen tulee kyetä vastaamaan ohjauksen vaatimuksiin yksinään liimaliitoksen pettäessä. Sähköinen takapyöräohjaus on sallittu, mutta renkaita saa kääntää korkeintaan kuusi astetta. Mikäli tällaista järjestelmää käytetään, tulee tuon kuuden asteen rajan sisällä pysyminen pystyä osoittamaan auton katsastuksessa.

Auton ohjauksen tulee yhdessä auton rungon kanssa täyttää joitakin sääntöjä. Auton ohjauspyörä ei saa olla enempää kuin 250 mm taaempana auton rungon etummaisesta turvakaaresta, eikä ohjauspyörän korkeimmalla oleva kohta saa missään asennossa ylittää tuon kaaren korkeutta.

Lisäksi jotkin sarjan yleiset säännöt vaikuttavat alustan ja ohjauksen suunnitteluun. Esimerkiksi kaikkien näissä järjestelmissä käytettyjen kiinnitystapojen on oltava varmistettuja esimerkiksi turvalankojen tai lukkomuttereiden avulla. Myös aerodynamiikan sekä rungon suunnitteluun liittyvät säännöt ovat vahvasti sidoksissa alustan suunnitteluun. Lisäksi kilparatoja koskevat säännöt tulee ottaa huomioon, sillä auto tulee optimoida juuri sellaiselle radalle, jollaisella on tarkoitus ajaa.

## 6.2 Tiedot autosta

Suunniteltaessa täysin uutta autoa, ei alkuun ollut olemassa juurikaan tietoa autosta. Tiimi oli päättänyt siirtyä takavetoisesta konstruktiosta nelivetoiseen, mutta teräksisestä putkirungosta ei vielä päätetty siirtyä kevyempään hiilikuitu-monokokkiin. Autossa kuitenkin oli päätetty käyttää hiilikuituisia sivutörmäysuojia teräsputkien sijaan, joten kyse on eräänlaisesta hybridirakenteesta, eikä puhtaasti putkirungosta. Putkirungon hyödyntäminen tarkoittaa alustan suunnitteluun joitain rajoitteita. Alustapisteiden sijainteja ei voida määrittää samoin vapauksin kuin monokokin tapauksessa, sillä tukivarsien kiinnityspisteiden tulisi kohdata rungon putkien solmukohtia. Lisäksi joidenkin runkoputkien sijainnit rajoittavat alustan komponenttien sijoittelua. Monokokin tapauksessa pisteiden sijainnit voitaisiin määrittää melko vapaasti ja esimerkiksi alatukivarsista voitaisiin

tehdä pidemmät kuin putkirungon tapauksessa, sillä monokokin muotoilulla voidaan saada aikaseksi lisää tilaa. Myös erilliselementein toteutettu jousitus toimi paremmin monokokin yhteydessä, sillä toisin kuin runkoputkiin, monokokiin voidaan suunnitteleamalla tehdä tilaa elementeille. Putkirungollisessa autossa elementit sijoittuisivat estämään kuljettajan näkymää sekä korottamaan auton painopistettä.

Tilarajoitteiden vuoksi etuakselilla oli päädytty käyttämään pyörien sisälle sijoitettuja napamoottoreita nelivedon toteuttamiseksi. Kaikki Metropolia Motorsportin aiemmat autot ovat hyödyntäneet taka-akselilla rungon sisälle asennettuja moottoreita, mutta uuden nelivetoisen putkirungollisen auton tapauksessa tämän ei koettu olevan mahdollista etuakselilla, sillä putkirungon vaatimien putkien vuoksi rungon sisäpuolella ei koettu olevan riittävästi tilaa. Jotkin tiimit käyttävät etuakselilla auton runkoon kiinnitettyjä moottoreita ja välittävät vääntömomentin renkaille vetoakselien avulla, mutta nämä kyseiset tiimit ovat päätyneet käyttämään hiilikuituista monokokkia teräksisen putkirungon sijaan.

Aiemmin käytössä olleen voimansiirron käyttäminen auton taka-akselilla ei ollut perusteltua, sillä se oli suunniteltu vastaamaan auton pitkittäissuuntaisen kiihtyvyyden tuottamisesta yksinään ja nyt osa tuosta kuormasta haluttiin siirtää etuakselille. Painonsäästön vuoksi haluttiin siis luopua suurista moottoreista ja siirtä käyttämään paremmin uuteen autoon soveltuvaa voimansiirtoa. Taka-akselille ei kuitenkaan haluttu suunnitella erikseen täysin uutta voimasiirtoa ja näin ollen tiimi oli päättänyt käyttää samaa uutta voimansiirron konseptia molemmilla akseleilla välttyäkseen liialliselta työmäärältä suunnittelun ja valmistamisen suhteen. Tämä tarkoitti napamoottoreiden käyttämistä myös taka-akselilla. Napamoottorit lisäävät jousittamatonta massaa merkittävästi ja pienessä Formula Student -autossa suuret ja tehokkaat sähkömoottorit vaativat myös paljon tilaa. Alustakinematiikan suunnittelussa tuli varmistua siitä, etteivät moottorit kohtaisi tukivarsia tai muita alustan osia missään tilanteessa. Näin ollen napamoottorit rajoittivat ja monimutkaistivat alustan suunnittelua.



Moottoreiksi oli valittu saksalaisvalmistaja Fischerin pienikokoiset mutta suuren vääntömomentin tuottavat moottorit, jotta voitaisiin varmistua auton korkeasta suorituskyvystä. Näiden moottorien yhteydessä oltiin päädytty käyttämään Lenzen inverttereitä. Toisin kuin aiempien autojen kohdalla, invertterit oli päädytty pitämään alkuperäisissä koteloissaan. Nämä alkuperäisissä koteloissa pidettävät invertterit ovat huomattavasti painavimmat kuin aiemmin käytössä olleet Siemensin valmistamat invertterit erikoisvalmisteisissa koteloissa. Invertterit on päädytty sijoittamaan autoon kuljettajan taakse korkeajänniteakun yläpuolelle kuten aiemmissakin autoissa. Korkealle asennettujen painavien invertterien massa nostaa auton painopisteen korkeutta. Lisäksi napamoottorien vaatima tila tarkoittaa luopumista vetotankojousituksesta etuakselilla. Vetotankojousituksesta luopumisen tiedetään myös nostavan painopisteen korkeutta. Lisäksi auton massan voidaan odottaa nousevan nelivedon sekä sen vaatimien vaihteistojen, moottorien, invertterien sekä tehokkaamman jäähdytyksen myötä.

Nelivetoon siirtyminen myös tarkoittaa, ettei vetopidon puutteen tulisi koitua enää kovin suureksi ongelmaksi. Näin ollen on todennäköisesti kannattavaa keskittyä parantamaan sivuttaisvoimantuottokykyä ja näin ansaita suurempaa sivuttaiskiihtyvyyttä. Sääntöjen, napamoottorien sekä putkirungon asettamat rajoitteet sekä nelivedon merkitys huomioon ottaen pyrittiin seuraavissa luvuissa suunnitella parhaan suorituskyvyn tuova alustajärjestelmä.

## **7 Konseptitason suunnittelu**

### **7.1 Tavoitteellisen painojakauman valinta**

Metropolia Motorsportin aikaisemmat autot ovat olleet takapainoisia takavetoisuudesta johtuen. Takavetoisessa autossa on edullista kasvattaa takapyörillä vaikuttavan pystykuorman suuruutta suhteessa etupyörillä vaikuttavaan pystykuormaan, sillä etupyörien tehtävänä ei ole tuottaa pitkittäissuuntaista voimaa muutoin kuin jarrutuksen aikana. Takavetoisen auton takapainoisuus mahdollistaa autolle suuremman kiihtyvyyden, sillä vaikka takarenkaiden kitkakerroin heikkenee kumikitkan ominaisuuksien vuoksi pystykuorman kasvaessa, voivat

takapyörät silti tuottaa enemmän voimaa kasvaneen pystykuorman vuoksi. Lisäksi takapainoisuudesta on etua jarruttaessa, sillä pitkittäissuuntaisen painon siirron vuoksi jarrutustilanteessa etuakselilla on kuitenkin suurempi pystykuorma kuin taka-akselilla. Takapainoisen auton massa on siis jarrutustilanteessa jaettu tasaisemmin eri pyörien kesken kuin sellaisen auton kohdalla, jossa massakeskipiste sijaitsee lähempänä etuakselia. Kaarreaajossa takapainoisuus on kuitenkin haitallista, sillä silloin kaikille renkailla haluttaisiin korkea kitkakerroin, eli auton painovoiman haluttaisiin jakautuvan tasaisemmin auton neljän renkaan kesken.

Nelivetoisessa autossa tilanne on kuitenkin eri kiihdytyksen osalta ja kannattavampaa olisi auton etupainoisuus. Tällöin kiihdytyksessä pitkittäisestä painon siirrosta johtuen auton paino olisi jakautunut tasaisemmin auton akselien välille ja saavutettaisiin suurempi kitkakerroin. Kumikitkan ominaisuuksista johtuen auton massan haluttaisiin mahdollisesti jakautuvan tasaisesti kaikille neljälle renkaalle. Näin päästäisiin kaikkien ajotilanteiden suhteen kompromissiin, jolla voitaisiin saavuttaa suurin pito ja auton renkaat kykenisivät tuottamaan enemmän voimaa kuin takapainoisen auton kohdalla.

Formula Student -autoissa painojakaumaa voidaan muuttaa lähinnä akseleita siirtämällä. Suuremmissa kilpa-autoissa painojakoon voidaan usein vaikuttaa komponenttien sijoittelulla, mutta pienessä FS-autossa komponenttien sijaintiin ei voida merkittävästi vaikuttaa. Käytännössä ainoat komponentit, joilla painojakaumaan voidaan FS-autossa vaikuttaa, ovat matalajänniteakku sekä jäähdyttimet. Joissain sarjassa kilpailleissa autoissa on nähty ratkaisuja, joissa korkea-jänniteakku tai invertterit ovat sijoitettu auton etuosaan jalkatilan alle. Näissä autoissa on käytetty hiilikuituista monokokkia, ja vastaavan ratkaisun implementointi putkirunkoiseen autoon koetaan varsin ongelmalliseksi tilarajoitusten vuoksi.

Metropolia Motorsportin uudessa autossa oli päädytty luopumaan matalajänniteakusta ja aerodynamiikan toiminnan kehittämiseksi jäähdyttimiä ei haluttu sijoittaa auton etuosaan tai sivuille. Näin ollen akseleiden siirtäminen taaemmaksi suhteessa runkoon koettiin ainoaksi tavaksi saada painopistettä edemmäksi.

Formula Student -luokassa vaikuttavien sääntöjen mukaan etusiipi saa ulottua korkeintaan 700 mm:n etäisyydelle eturenkaista eteenpäin. Näin ollen taaksepäin siirretty etuakseli tarkoittaa myös auton etusiiven siirtämistä taaksepäin. Tämä tarkoittaa siiven siirtymistä entistä enemmän auton rungon alle. Yleisesti FS-autoissa rungon ulottuminen etusiiven päälle saattaa heikentää etusiiven toimintaa. Samalla painopisteen siirtäminen eteenpäin kuitenkin edesauttaa aerodynamiikan suunnittelun kehityksessä, sillä eteenpäin siirretty painopiste tarkoittaa myös aerodynaamisen balanssin siirtoa edemmäksi. Tehokkaan etupainoisen aerodynamiikkapaketin suunnittelun on havaittu olevan helpompaa kuin takapainoisen, sillä toisin kuin takasiipi, etusiipi hyödyntää maavaikutusta. Lisäksi etusiiven sijainti auton etupäässä takaa siivelle puhtaan ilmavirtauksen ja saattaa näin kehittää etusiiven tehokkuutta.

Painojakauman suhteen tavoitteeksi asetettiin se, että puolet auton painosta kohdistuisi etuakselille ja toinen puolisko taka-akselille. Tämän uskotaan auttavan auton suorituskyvyn kehittämisessä. Mahdollisesti hieman heikentyneitä aerodynamiikan toimintaa tai heikentyneitä kitkakerrointa jarrutustilanteessa ei koettu niin merkittäviksi tekijöiksi, että auton olisi kannattavampaa olla takapainoinen.

Aerobalanssin suhteen toiveeksi asetettiin sama painojakauman kanssa. Päätettiin siis, ettei auton käyttäytymisen haluta muuttuvan ajonopeuden funktiona. Näin auto olisi kuljettajalle mahdollisesti mielekkäämpi ajaa, kun auto tuntuu samanlaiselta kaikissa ajonopeuksissa. Moottoreiden älykkään ohjauksen myötä auton käytöstä voidaan kuitenkin halutessa muuttaa ja autosta voidaan tehdä esimerkiksi yliohjaavampi hitaissa nopeuksissa, mikäli näin myöhemmin halutaan.

## 7.2 Akselivälin valinta

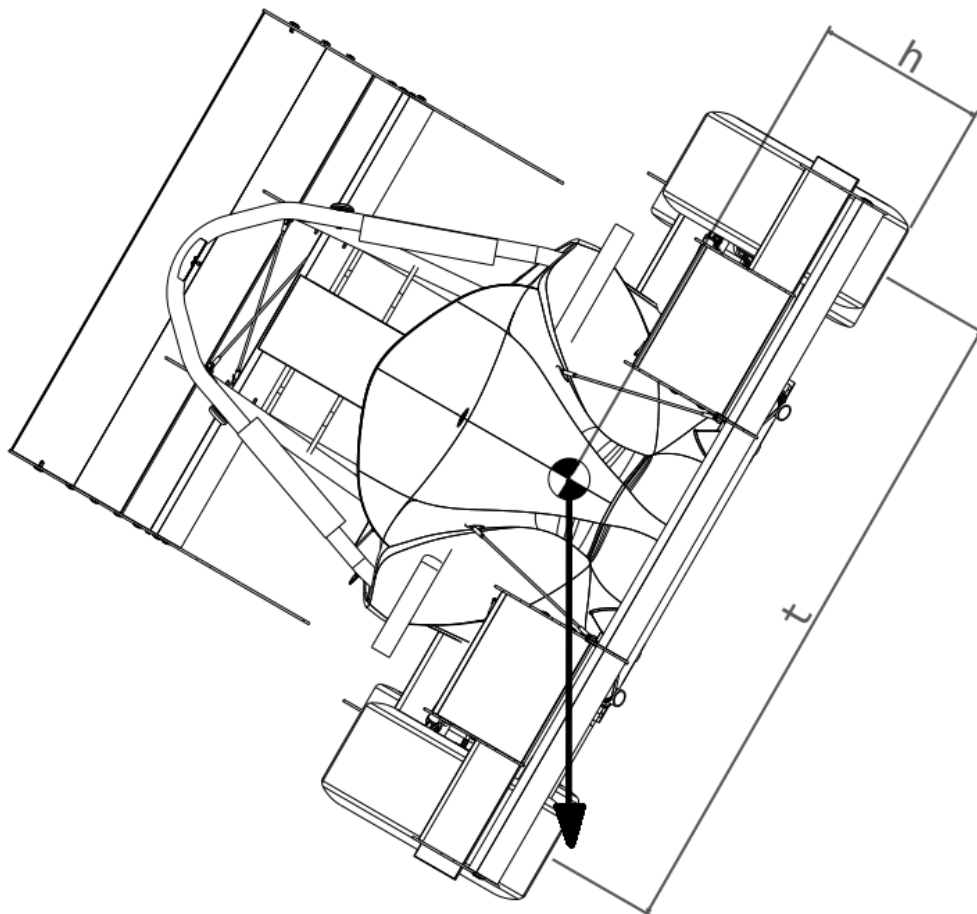
Metropolia Motorsportin autot ovat olleet huomattavasti pidempiä kuin säännöissä määritelty minimimita määrää. Pituus tuo autolle vakautta ja se myös vähentää pitkittäissuuntaista painonsiirtoa näin parantaen auton suorituskykyä. Pituus voi myös tehostaa aerodynamiikan toimintaa, sillä etusiipeä voidaan siirtää edemmäksi ja akselien välissä on enemmän tilaa sivusiiville ja pohjalevyille. Lyhyempi auto kuitenkin vastaa paremmin kuljettajan asettamiin herätteisiin ja lyhyys monesti tarkoittaa myös keveyttä. Koska FS-radat ovat ahtaita ja sisältävät tiukkoja mutkia, auton ketteryydestä on etua. Lyhyt auto olisi ketterämpi, ja sillä olisi helpompi selvittää tiukin säännöissä määritelty mutka. Lyhyys myös tarkoittaa, että etupyörien kääntökulman tulisi olla tietyssä mutkassa pienempi kuin pidemmällä autolla. Näin ohjauksen välitys voidaan halutessaan suunnitella hitaammaksi ja näin vähentää kuljettajalta vaadittua momenttia. Etenkin nyt painavamman ja etupainoisemman auton tapauksessa riskinä on, että ohjauksesta tulisi liian raskas, joten suunnittelussa annettiin mahdollisuus keventää ohjausta lyhyemmän auton avulla. Näiden syiden vuoksi autosta haluttiin mahdollisimman lyhyt kuitenkin jättäen jonkin verran marginaalia sääntöjen määräämään minimiin.

Auton rungon valmistustavasta johtuen riskinä on, että auton putkirunko lyhenee hieman hitsauksen aikana. Valmistustoleranssien mahdollisesti aiheuttama poikkeama lopulliseen akseliväliin tuli ottaa huomioon akseliväliä päätettäessä. Lisäksi pyöräntuennan mahdollisesti aiheuttama akselivälin muutos renkaan joustomatkan funktiona tuli ottaa huomioon, jotta sääntöjen täyttämiseksi ei tarvitsisi tehdä kompromissia auton lopullisen ajokorkeuden valinnassa. Nämä asiat huomioon ottaen marginaaliksi päätettiin 5 mm eli auton akselivälin suhteen päädyttiin arvoon 1530 mm.

## 7.3 Raideleveyksien valinta

Raideleveyksien määrittäminen alkoi selvittämällä vähimmäisleveys, jolla auto täyttää sääntöjen asettamat vaatimukset. FS-kilpailuiden katsastuksissa autolle

suoritetaan kallistustesti. Tässä testissä auto kallistetaan 60 asteen kulmaan (kuva 5). Sääntöjen mukaan auton tulee selvittää tämä testi ehjänä ja kaatumatta. Tämä testi asettaa ehdottoman alarajan auton raidelevyksille.



Kuva 5. Kallistustesti.

Jotta auto selvittää kallistustestin kaatumattomuuden osalta, yllä olevassa kuvassa olevan painovoimavektorin tulee kulkea renkaiden välistä. Kuvasta johtamalla voidaan trigonometriaa hyödyntämällä aikaansaada kaava raidelevyden vähimmäisarvolle. Ajatellaan siis suorakulmainen kolmio, jonka toinen kateetti on painopisteen korkeus. Painopistevektorin suuntaisen hypotenuusan ja edellä mainitun kateetin välinen kulma on 60 astetta, joten tästä voidaan laskea toisen

kateetin pituus. Tämän kateetin pituus tulee kertoa kahdella, jotta saadaan auton koko raideleveys:

$$t_{min} = \tan(60^\circ) * h * 2$$

jossa

- $t_{min}$  on auton raideleveys vähintään
- $h$  on auton painopisteen korkeus.

Auton painopisteen sijainti kuljettajan kanssa on arvioitu noin 310 mm:n korkeudelle perustuen Metropolia Motorsportin aiempien autojen painopisteiden korkeuksiin. Arviossa on otettu huomioon voimansiirron aiheuttamat muutokset painopisteen sijaintiin, kuten moottorien sijoitus, vetotankojousituksesta luopuminen sekä raskaiden invertterien suunniteltu sijainti autossa. Tarkasti painopisteen sijaintia ei voida arvioida ennen auton valmistumista. Suunnittelun edessä arviota voidaan kuitenkin tarkentaa.

Kallistustestin osalta raideleveyden tulisi siis olla vähintään 1100 mm, mikäli jätetään hieman varaa sääntöön nähden, jotta voidaan olla varmoja auton sääntömääräisyydestä.

Jotta auto ei kaatuisi myöskään radalla, tuli laskea, kuinka kapealla raideleveydellä sisäkaarten puoleiset alkavat nousta ilmaan. Toisin sanoen tuli aiemmin mainittua kaavaa (kaava 2) soveltamalla laskea raideleveys, jolla pyöräkuorman muutoksen suuruus on sisäkaarten puoleisilla renkailla vaikuttavan staattisen pyöräkuorman suuruus. Tosin suuren aerokuorman autolla pyöräkuorman muutokseen voidaan lisätä vielä renkaalla vaikuttavan aerodynaamisen pystykuorman määrä, sillä auton aerodynamiikka edelleen pitää auton renkaita maassa, vaikka auton massaa kannattelisikin kokonaisuudessaan ulkokaarten puoleiset pyörät.

Yhdelle renkaalle kohdistuvan negatiivisen nosteen suuruudeksi arvioitiin noin 125 N ja auton suurimmaksi sivuttaiskiihtyvyydeksi 2,1 g. Ajonopeudella, jolla negatiivisen nosteen määrä olisi näin alhainen, auto ei saavuttaisi näin korkeaa

sivuttaiskiihtyvyyttä, mutta laskentaan haluttiin varmuutta. Kaavasta 2 ratkaistiin raideleveys ja kaavaan sijoitettiin arviot auton arvoista:

$$t = \frac{h * W * a_y}{\Delta W} = \frac{0,31 \text{ m} * 3000 \text{ N} * 2,1}{1500 \text{ N} + 250 \text{ N}} = 1,116 \text{ m}$$

Näin raideleveyden minimiarvoksi kaatumattomuuden varmistamiseksi radalla saatiin noin 1116 mm, mutta autosta päätettiin tehdä tätä leveämpi, sillä FS-raidoilla leveydestä on haittaa lähinnä vain pujotteluissa. Pujottelut halutaan selvittää ongelmitta, mutta muutoin pyöräkuorman muutosta haluttaisiin vähentää.

Metropolian Motorsportin autojen taka-akselin raideleveys on ollut usein kapeampi kuin etuakselin. Kapeampaan taka-akseliin on päädytty siksi, että taka-akseli oikaisee suhteessa ohjaavan etuakselin kulkemaan matkaan. Näin ollen kuljettajan tulee ajaa leveämpää linjaa, jotta myös takapyörät pysyvät radalla. Kapeampi taka-akseli kuitenkin heikentää aerodynamiikan toimintaa, sillä Formula Studentissa käytettävien sääntöjen mukaan takasiiven on mahduttava sivuttaissuunnassa takarenkaiden väliin. Näin kapeampi taka-akseli siis kaventaa takasiipeä ja heikentää sen tehokkuutta. Lisäksi kapeampi taka-akseli saattaa heikentää diffuusorin toimintaa, sillä renkaan tuottama pyörteilevä ilmavirta on lähempänä diffuusoria. Tämä epätoivottu ilman pyörteily saattaa sotkea diffuusorin alla virtaavan ilman virtausta ja näin ollen heikentää diffuusorin toimintaa.

Aerodynamiikan tehostamisen lisäksi leveämmän akselin tuoman tilan koettiin antavan toivottuja vapauksia alustakinematiikan suunnitteluun. Kapea akseli yhdessä napamoottorien kanssa olisi tarkoittanut varsin tiukkoja rajoitteita tukivarsigeometrioiden suunnittelulle. Näistä syistä sekä painonsiirron vähentämiseksi taka-akseli päätettiin leventää aiemmasta 1160 mm:n leveydestä 1200 mm:n leveyteen. Etuakselin leveys säilytettiin aiemmin käytetyssä 1200 mm:n arvossa. FS-ratojen rataprofiilit huomioon ottaen 1200 mm:n raideleveyden nähtiin tuovan paras kompromissi ajolinjojen parantamisen sekä pyöräkuorman muutosten vähentämisen välillä.

## 7.4 Pyöräntuentaratkaisujen valinta

Lähes kaikki maailman FS-autot ovat varustettu päällekkäisillä kolmiotukivarsilla toteutetulla jousituksella. Myös Metropolia Motorsportin kaikissa aiemmissa autoissa on käytetty päällekkäisiä kolmiotukivarsia. Sarjan autoissa on kuitenkin ollut käytössä myös muita ratkaisuja, kuten monivarsituenta, trailing-arm tai jäykät akselit. Sopivimman pyöräntuentaratkaisun valitsemiseksi vertailtiin muutamaa eri vaihtoehtoa.

Jäykällä akseleilla olisi saavutettu lähes täysin paikoillaan pysyvät kinemaattiset kallistuskeskiöt ja muuttumattomat raidelevyydet. Tämä ratkaisu olisi myös mahdollistanut camber-kulman säilyttämisen halutussa arvossa auton kallistuksessa sekä tasajalkajoustossa tai näiden yhdistelmässä. Heikkoutena olisi ollut toiminta yksipyöräjoustossa, sillä tällöin tien epätasaisuudet toisella puolella vaikuttavat toisen puolen pyörän camber-kulmaan.

Jäykkien akselien mekaaninen toteuttaminen osoittautui haasteelliseksi etenkin ohjaavan akselin tapauksessa. Tukivarret olisi tullut kiinnittää niin, että ne olisivat välittäneet sekä pitkittäis- että sivuttaissuuntaisia voimia renkaiden ja korin välillä tehokkaasti. Kuitenkin ne olisi täytynyt kiinnittää myös niin, että vältyttiin akselin sivusuuntaisilta ja pitkittäissuuntaisilta liikkeiltä. Useiden erilaisten linkustojen toteuttaminen varsin tiukkojen tilarajoitusten kanssa vaikutti haasteelliselta. Lisäksi etuakselille olisi täytynyt toteuttaa ohjauksen vuoksi renkaiden kääntöakselit ja vanteen sisällä ei napamoottorien vuoksi ollut juurikaan tilaa. Myös massaa olisi kertynyt muita vaihtoehtoja enemmän, vaikka akselit olisivat olleet hiilikuituisia. Lisäksi jäykällä akseleilla olisi ollut merkittävä vaikutus auton aerodynamiikan toimintaan, sillä suuret akselit olisi jouduttu sijoittamaan ainakin etuakselilla auton alle.

Monivarsituenta olisi luonut laajat mahdollisuudet renkaiden liikeratojen suunnitteluun, sillä jokaisen tukivarren asento, sijainti ja pituus olisi voitu määrittää erikseen. Myös auton säätämiseen tämä ratkaisu olisi tuonut enemmän mahdolli-



suuksia, jos säätäessä jokaisen tukivarren pituutta olisi voitu muuttaa yksilöllisesti. Samalla nämä mahdollisuudet tosin tarkoittavat, että suunnittelu sekä säätäminen olisi useiden eri vaihtoehtojen myötä monimutkaista. Etenkin ohjauksella akselilla monimutkaisuus korostuu, sillä ohjauskulman muutos muuttaa esimerkiksi renkaan pituussuuntaista sijaintia. Suurin haaste monivarsituennan toteuttamisessa olisi ollut kuitenkin riittävän jäykkyyden saavuttaminen. Pieni vällys nivelissä tai komponenttien joustaminen ei aiheuta välttämättä esimerkiksi kolmiotukivarren tapauksessa niin suurta muutosta renkaan ohjauskulmaan, kun vastaava aiheuttaa erillisten varsien tapauksessa. Autoon ei tietenkään haluttu väääräntyyppistä ohjauskulman muutosta. Mekaaniselta toteutukselta tämä vaihtoehto olisi sen sijaan ollut jopa helpoin, sillä tukivarret olisivat olleet vain suorina tankoja.

Päällekkäisten kolmiotukivarsien katsottiin tuovan paras kompromissi. Suunnittelun katsottiin olevan helppoa niin ajodynamiikan, kuin fyysisen toteuttamisenkin näkökulmasta. Katsottiin, että tällä ratkaisulla päästään vastaaviin raidelevyyden, camber-kulman sekä kallistuskeskiön sijainnin muutoksiin kuin monivarsituennan tapauksessa. Tällä vaihtoehdolla tiedettiin pääsevän myös jäykimpään ja kevyimpään lopputulokseen. Aerodynamiikan tai yksipyöräjouston suhteen ei tarvinnut tehdä yhtä suuria uhrauksia kuin jäykkien akselien tapauksessa, ja tilanpuutteen ei koettu olevan kovin suuri haaste.

## 7.5 Jousitusratkaisujen valinta

Vartenotettavia vaihtoehtoja jousituksen toteuttamiseksi olivat työntötankojousitus, vetotankojousitus sekä nk. direct link -jousitus. Metropolia Motorsportin eri autoissa on ollut käytössä kaikkia näitä mainittuja vaihtoehtoja. Viimeisimmässä autossa oli etuakselilla vetotankojousitus, kun taka-akselilla puolestaan käytettiin työntötankoja.

Nk. direct linkin etuihin kuuluivat lähinnä pieni massa sekä vaadittujen osien vähäinen määrä. Erillisiä linkustoja ei tarvitsisi suunnitella ja valmistaa, eikä näille tarvitsisi kiinnikkeitä auton runkoon. Heikkouksiin puolestaan kuului jousituksen

välityssuhde, vaikutus aerodynamiikkaan sekä vakaajan kiinnitys. Tässä konseptissa jousituksen välityssuhde olisi ollut haasteellista saada halutunlaiseksi. Ainakaan vakioksi ei välityssuhdetta olisi ollut mahdollista saada, ellei vaimennin olisi ollut asennettu täysin pystyasentoon, mikä puolestaan oli mahdotonta. Välityssuhteen arvoakaan ei olisi ollut mahdollista saada kovin korkeaksi ja jousi olisikin aina liikkunut reilusti vähemmän kuin rengas. Iskunvaimentimien sijoittaminen auton katteiden ulkopuolelle olisi vaikuttanut jonkin verran auton aerodynamiikkaan lisäten aerodynaamista vastusta sekä sotkien esimerkiksi takasiiven ilmavirtausta. Kallistuksenvakaaja on yleensä kiinnitetty juuri linkkujen välille. Niissä autoissa, joissa linkkuja ei ole, ei yleensä ole myöskään vakaajia. Autoon haluttiin vakaajat, jotta jousien suhteen ei tarvitsisi tehdä liikaa kompromisseja. Tämän konseptin keveyttä ei katsottu riittäväksi eduksi haittoihin nähden ja autoon päätettiin toteuttaa linkuin varustettu jousitus.

Työntö- ja vetotankojousituksen suhteen vaihtoehtoina olivat perinteinen järjestelmä sekä erilliselementein varustettu järjestelmä. Kolmannen elementin käyttämistä ei tilanpuutteen sekä järjestelmän tuoman lisämassan vuoksi harkittu. FS-radat ovat usein myös niin tasaisia, ettei kolmannesta elementistä olisi juuri hyötyä verrattuna erilliselementteihin.

Vetotankojousituksen suhteen oli jo alkuun selvää, ettei tätä voitaisi auton etuakselilla käyttää tilanpuutteen vuoksi. Napamoottorien vaatima tila estää täysin vetotankojen käyttämisen. Sen sijaan taka-akselilla vetotankojen käyttäminen olisi ollut mahdollista, sillä pyörät eivät käänny ja jousitus voidaan asentaa moottorin etu- tai takapuolelle. Vetotankojousitus olisi ollut perusteltua massakeskipisteen alentamisen sekä vetotangon nurjahtamattomuuden vuoksi, mutta jousien, linkkujen sekä vaimentimien asentaminen alas auton takaosassa olisi syönyt tilaa auton diffuursorilta. Tämä olisi heikentänyt auton aerodynamiikan toimintaa, eikä vetotankojousituksen käyttämisen nähty olevan kannattavaa.

Jousitus päätettiin siis toteuttaa molemmilla akseleilla työntötangoin. Näin voitiin saavuttaa iskunvaimentimelle parhaat olosuhteet ja jousituksen liikesuhde voi-

tiin suunnitella halutunlaiseksi. Iskunvaimentimien sijainti auton rungon yläosassa helpotti myös auton säätämistä, mikäli verrataan tilanteeseen, jossa iskunvaimentimet ovat sijoitettu auton pohjaan. Työntötangoin toteutetun jousituksen hyviin puoliin kuuluu myös kallistuksenvakaimen helppo implementointi sekä aerodynaamisen haitan minimointi. Auton massa sekä painopisteen sijaintiin tällä valinnalla oli kuitenkin negatiivinen vaikutus, mutta muita heikkouksia ei ollut. Vetotangon nurjahtamattomuuskaan ei olisi ollut etu työntötaimijousitukseen nähden, sillä vetotangot olisi tullut asentaa loivempaan kulmaan, jolloin niissä vaikuttava voima olisi noussut suuremmaksi kuin työntötangossa vaikuttava vastaava voima.

Etuakselilla päädyttiin perinteiseen, kahta erillistä iskunvaimenninta ja perinteistä vakaajaa soveltavaan ratkaisuun erilliselemettien sijaan. Syy tähän oli auton runko. Runkoputkien sijainteihin ei voitu juurikaan vaikuttaa, joten elementit olisi jouduttu sijoittaa hyvin korkealle, runkoputkien yläpuolelle suoraan kuljettajan näkökenttään. Jousitusta ei haluttu nostaa näin korkealle, sillä painopiste on muutenkin kovin korkealla ja näkyvyys autosta ei ole erityisen hyvä. Taka-akselilla päädyttiin etuakselin tapaan vastaavaan ratkaisuun, sillä suunnittelun, valmistamisen ja säätämisen yksinkertaistamiseksi haluttiin konstruktioiden olevan suunnittelultaan lähellä toisiaan.

## **8 Alustan yksityiskohtainen suunnittelu**

### **8.1 Renkaiden valinta**

Renkaiden valinnassa haluttiin ottaa huomioon renkaiden voimantuottokyky sivuttais- ja pitkittäissuunnassa, kitkakertoimen riippuvuus pystykuormasta, kitkakertoimen riippuvuus sivukallistumasta, kaartojäykkyys, kestävyys, aerodynaaminen vastus ja massa. Lisäksi rengaslämmittimien ollessa kilpailuissa kiellettyjä, renkaiden mahdollistama suorituskyky kylmänä oli merkittävä tekijä vertaillessa eri renkaiden välillä. Valinnassa haluttiin myös huomioida sopivuus kuljettajien ajotaidoille, sopivuus radoille ja ajo-olosuhteisiin sekä saatavilla olevan tiedon määrä.

Renkaat haluttiin valita Formula Studentiin tarkoitettujen renkaiden joukosta, sillä näistä on kattavasti tietoa tarjolla ja renkaat ovat kooltaan sopivia. Näille renkaille löytyy myös laaja valikoima erilaisia kevyitä ja autoon soveltuvia vanneita. FS-renkaita myydään sekä 13 tuuman että 10 tuuman vannekoossa. Pienemmällä vannekoolla voidaan saavuttaa noin kymmenen kilogramman painonsäästö, mutta pienemmät renkaat tarjoavat aina heikomman voimantuottokyvyn.

Renkaiden suorituskyvyn vertailuun käytettiin TTC:ltä saatua Calspanin tuottamaa rengasdataa ja datan analysointiin käytettiin OptimumTyre-ohjelmaa. Calspan on testannut useita erilaisia FS-renkaita monelta valmistajalta kuten Continental, Hoosier, Avon sekä Good Year. Näillä eri valmistajilla oli tarjota eri kokoisia renkaita erilaisilla seoksilla. Valinta tehtiin näiden renkaiden välillä, sillä alustan suunnittelussa haluttiin käyttää pohjana Calspanin tuottamaa rengasdataa.

Isommista renkaista, eli 13 tuuman vanneeseen renkaista, ainoastaan Continentalin nähtiin tarjoavan riittävästi voimantuottokapasiteettia, jotta isomman vanteen tuoma lisämassa olisi perusteltua. Pienemmistä renkaista harkittiin Avonin ja Hoosierin renkaita useassa eri koossa sekä erilaisilla seoksilla.

Continentalin kohdalla kuitenkin havaittiin kyseisen renkaan olevan erittäin herkkä camber-kulman muutokselle ja lisäksi renkaan havaittiin tuottavan suurta momenttia pysty akselin ympäri. Nämä tekijät olisivat johtaneet auton suunnittelun vaikeutumiseen, ja lopputuloksena olisi kuitenkin ollut vaikeasti ajettava auto, joka lisäksi vaatii kuljettajalta paljon voimaa.

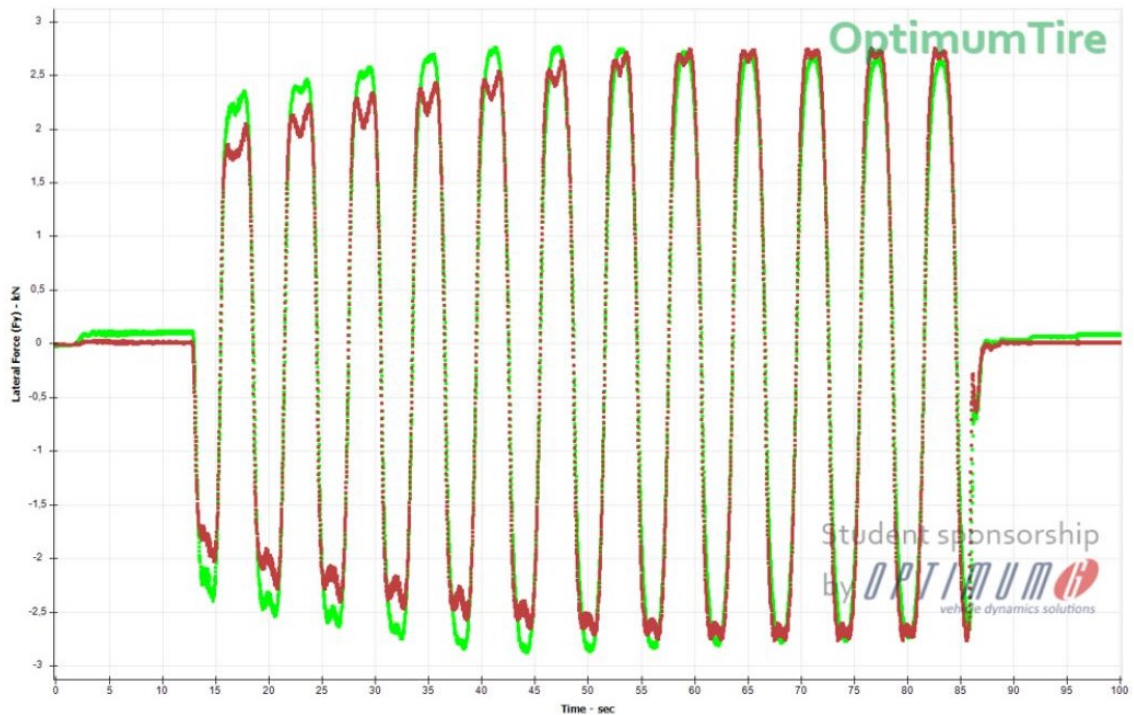
Avonin eri vaihtoehtojen todettiin vastaavan ominaisuuksiltaan hyvin vahvasti Hoosierin renkaita, mutta voimantuottokyvyn ei nähty olevan vastaavalla tasolla.

Hoosierilla oli tarjota kahta eri seosta, leveyttä sekä halkaisijaa. 18 tuuman ulkohalkaisijalla varustettujen renkaiden ei nähty tarjoavan merkittävästi parempaa voimantuottokykyä kuin 16 tuuman ulkohalkaisijalla varustetut ja lisäksi isommillä renkailla oli alhaisempi kaartoajokyky. Autoon haluttiin kevyemmät ren-

kaat ja auton haluttiin vastaavan nopeasti kuljettajan asettamiin herätteisiin, joten renkaan ulkohalkaisijaksi päätettiin 16 tuumaa. Vaihtoehtoina olivat seokset LC0 ja R25B. Molemmista oli tarjolla 6 ja 7,5 tuumaa leveät vaihtoehdot.

Formula Studentissa rengaslämmittimet ovat kiellettyjä ja tämän lisäksi eri ajo-osuudet ovat varsin lyhyitä. Näin ollen renkaan toiminta kylmänä on tärkeä tekijä auton suorituskyvyn kannalta. Skidpad ja etenkin kiihdytys ajetaan käytännössä täysin kylmillä renkailla ja Autocross-osiossakin renkaat ovat kunnolla lämpöiset vain radan loppuosalla. Vain kestävyysajossa renkaan toiminta käytölämpötilassa on oleellinen tekijä. Kestävyysajossa puhdas suorituskyky ei kuitenkaan välttämättä takaa parasta lopputulosta ja huomioon tulisi ottaa myös asioita kuten kestävyys ja ajomukavuus.

Tehdessä valintaa LC0- ja R25B-seoksen välillä, haluttiin tutkia renkaiden käyttäytymistä lämmitysjakson aikana. Kuvassa 6 nähdään kahden eri renkaan tuottamat sivuttaissuuntaiset voimat ajan suhteen lämmitysjakson aikana. Rengastestissä renkaan on annettu pyöriä vapaasti asfalttia jäljittelevällä pinnalla ja renkaan sortokulmaa on muutettu tasaisesti ääriasennosta toiseen ja takaisin useita kertoja. Kuvaajassa x-akselilla on aika ja y-akselilla renkaan tuottama sivuttaisvoima. Havaitaan, että renkaan tuottaman sivuttaisvoiman huippu kasvaa ajan funktiona.



Kuva 6. Renkaan lämmitysjakso.

Kuvasta havaitaan, että erilaiset renkaat käyttäytyvät eri tavoin lämmityksen aikana. Kuvassa nähdään vihreällä Hoosierin LC0-seoksen rengas ja punaisella R25B-seoksen rengas. Renkaat ovat keskenään samankokoisia, ja niitä on kuormitettu testin aikana samalla tavalla. Huomataan, että tavoitelämpötilassa pienemmän voiman tuottava rengas tuottaa kylmänä huomattavasti enemmän sivuttaissuuntaista voimaa kuin tavoitelämpötilassa suuremman voiman tuottava rengas. Kuitenkin lämmitysjakson loppuvaiheessa kahden renkaan ero suorituskyvyssä on varsin vähäinen.

Renkaiden suhteen valinta kohdistui Hoosierin LC0-seokseen ja molemmilla akseleilla päädyttiin käyttämään tämän seoksen rengasta koossa 16 x 7.5–10. Tähän päädyttiin, sillä uskottiin kyseisen renkaan tuovan paras suorituskyky autolle. Joidenkin muiden renkaiden kohdalla nähtiin enemmän teoreettista suorituskykyä, mutta valitun renkaan potentiaalin uskottiin olevan helpommin hyödynnettävissä. Renkaan myös uskottiin olevan muita vaihtoehtoja sopivampi amatöörikuljettajalle.

## 8.2 Vanteiden valinta

Vanteiden suhteen löytyi useita eri vaihtoehtoja, joita olivat OZ-merkkiset magnesiumvanteet, Braid-merkkiset hiilikuitu- tai alumiinivanteet, hiilikuituiset tai alumiiniset vannekehät omavalmisteisilla vannekeskiöillä sekä kokonaan omaa suunnittelua edustavat hiilikuituvanteet. On selvää, että omavalmisteisilla hiilikuituvanteilla voitaisiin päästä suurimpiin painonsäästöihin ja että vanteen leveys voidaan valita vapaasti näin kehittäen auton suorituskykyä. Näistä syistä johtuen sarjan menestyksekkäimmät tiimit käyttävät autoissaan yleensä itse suunniteltuja hiilikuituvanteita. Kuitenkin tämän auton kohdalla päädyttiin hylkäämään idea omien vanteiden valmistamisesta rajallisten työvoimaresurssien vuoksi. Kaikki valmiina myytävät hiilikuituvanteet tai -vannekehät päädyttiin hylkäämään tiimin omien aikaisempien kokemusten sekä muiden tiimien jakamien mielipiteiden vuoksi. Uskottiin, ettei markkinoilta löydy riittävän kestävästä hiilikuituvannetta tähän käyttötarkoitukseen.

Vaihtoehtoiksi jäivät OZ-magnesiumvanteet, Braid-alumiinivanteet sekä valmiit alumiinikehät varustettuna omavalmisteisilla vannekeskiöillä. Näistä kaksi ensimmäistä vaativat oletettavasti vähiten työvoimaa, sillä ne eivät vaadi omavalmisteisia osia. Näin suunnittelun sekä valmistamisen suhteen voitaisiin säästää resursseja muuhun tarkoitukseen. Magnesiumvanteilla päästäisiin kevyimpään lopputulokseen, mutta nämä vanteet ovat saatavilla ainoastaan 7 tuumaa leveinä. Muut vaihtoehdot ovat saatavilla myös leveämpänä vaihtoehtona. Leveämmän vanteen tiedetään rengasdatan perusteella kasvattavan renkaan suorituskykyä sekä kaartojäykkyyttä. Näin ollen leveämpi vanne saattaisi olla suorituskykyä kohentava tekijä.

Aiemmin tiimi on käyttänyt autoissaan valmiita alumiinikehiä omavalmisteisilla vannekeskiöillä, mutta näiden koottavien vanteiden eräänä haasteena on ollut vanteiden tiivistäminen. Mikäli vanteet alkavat vuotaa, rengaspaineiden muutokset hankaloittavat merkittävästi auton testausta sekä kehittämistä.

Vanteiden suhteen valinta kohdistui magnesiumvantesiin tuntuvan painonsäästön sekä huolettomuuden vuoksi. Näillä vanteilla saavutetaan yli neljän ja puolen kilon säästö painossa verrattuna yksiosaisiin alumiinisiin vanteisiin. Koottaisiin vanteisiin verrattuna säästetään painossa lähes kaksi kiloa ja lisäksi säästetään resursseja suunnittelun sekä valmistuksen osalta. Vanteen kapeudella nähtiin olevan varsin vähäinen vaikutus auton suorituskykyyn.

### 8.3 Tukivarsigeometrioiden suunnittelu

Kinematiikan suunnitteluun käytettiin Adams Car -ohjelmistoa. Adams-mallin rinnalle luotiin Catia V5 -mallinnusohjelmaan auton malli. Tällä 3D-mallilla voitiin tarkistaa kaikkien komponenttien sopivuus paikoilleen kaikissa jousto- sekä ohjaustilanteissa. Näin voitiin helposti varmistaa, ettei tukivarsi kohtaa esimerkiksi napamootoria tai auton vannetta alustan liikkeiden seurauksena.

Auton nelivetoisuudesta johtuen auton pitkittäispidolle ei annettu juuri painoarvoa kinematiikan suunnittelussa. Sen sijaan pyrittiin maksimoimaan sivuttaisuuntainen pito. Rengasdatasta nähtiin autoon valitun renkaan sivuttaisvoimantuottokyvyn olevan huipussaan, kun renkaan kallistuskulma on nolla astetta. Tämän vuoksi taka-akselilla camber-kulman muutoksen haluttiin vastaavan auton kallistuskulman muutokseen niin, että rengas pysyisi suorassa koko kallistusliikkeen ajan. Näin suuri camber-muutos oli kuitenkin vaikeasti tavoitettavissa ja olisi tarkoittanut suuria kompromisseja kallistuskeskiöiden suhteen. Kyseisen renkaan kohdalla oikeanlaisen camber-muutoksen ei myöskään nähty olevan kovin tärkeää, sillä rengas ei ole kovin herkkä kallistuskulman muutokselle. Näin ollen camber-kulman muutos auton kallistuessa haluttiin maksimoida, mutta sen ei haluttu asettavan kompromisseja kallistuskeskiöiden sijainneille ja niiden muutoksille.

Kallistuskeskiöiden suhteen tavoitteena oli saada ne pysymään mahdollisimman hyvin paikoillaan kaikissa ajotilanteissa ajettavuuden ja suorituskyvyn parantamiseksi. Tavoitteena oli myös saada kallistuskeskiöt sijoittumaan mahdollisimman alas, kuitenkin niin että ne pysyisivät maanpinnan yläpuolella kaikissa



ajotilanteissa. Näin saataisiin nostovoiman suuruus pieneksi ja sen suunta ylöspäin kaikissa tilanteissa. Taka-akselilla kallistuskeskiö haluttiin kuitenkin hieman korkeammalle kuin etuakselilla, jotta taka-akselilla kinemaattisen pyöräkuorman muutoksen osuus olisi suurempi kuin etuakselilla. Näin auto saataisiin vastamaan kuljettajan asettamiin herätteisiin nopeammin. Toinen syy taka-akselin korkeampaan kallistuskeskiöön oli aerodynamiikan toiminta. Auton kohtauskulman haluttiin kasvavan kaarreajon aikana, jotta voitiin kasvattaa auton negatiivisen nosteen määrää kaarreaossa ilman, että aerodynaaminen vastus nousisi suoraan ajettaessa.

Ohjauksen keventämiseksi etuakselilla KPI ja caster -kulmat sekä kääntövierinsäde haluttiin mahdollisimman pieniksi. Liian pieniksi näitä ei tilanahtauden vuoksi ollut edes mahdollista saada. Etuakselin kinematiikka pyrittiin suunnittelemaan niin, että tavallisella FS-radalla kaarreaossa ulommalle eturenkaalle syntyisi keskimäärin nollan asteen camber-kulma. FS-ratana käytettiin vuoden 2019 Saksan osakilpailun rataa.

Jotta autossa voitiin käyttää löysiä jousia, auton antigeometriat suunniteltiin säädettäviksi. Säädettävyys toteutettiin mahdollistamalla tukivarsien runkokiinnikkeiden korkeussuuntaisen sijainnin muuttamisen.

Raidelevyden muutokset haluttiin minimoida tasajoustossa sekä kallistuksessa auton stabiiliteetin ja suorituskyvyn parantamiseksi.

## 8.4 Jousitus

Jousina päätettiin käyttää teräksisiä kierrejousia. Ilmajousilla oltaisiin päästy noin puolen kilon painonsäästöön, mutta ilmajousen progressiivisuuden sekä ilmasäiliön aiheuttaman ylimääräisen tiivistekitkan vuoksi ilmajousia ei autoon valittu. Kierrejousen massasta oltaisiin voitu säästää käyttämällä titaanisii jousia, mutta tätä ei nähty riittävän kustannustehokkaana ratkaisuna.

Iskunvaimentimiksi valikoitui Öhlinsin TTX25 mkii -vaimentimet niiden laajojen säätömahdollisuuksien, pienen koon sekä keveyden vuoksi.

Pystysuuntaiset voimat oltiin päätetty siirtää renkaalta jouselle linkuston avulla. Molemmilla akseleilla linkusto pyrittiin suunnittelemaan niin, että sääntöjen vaatima joustomatka hyödyntäisi vaimentimen koko toimintapituuden. Säännöt vaativat jousitukselle 50 mm joustomatkaa, mutta tähän haluttiin jättää jonkin verran varaa, jotta voitaisiin varmistua auton säätömääräisyydestä. Joustomatkaksi päätettiin 55 mm ja yhdessä vaimentimen 50 mm:n toimintapituuden kanssa tämä tarkoitti 1.1-liikesuhdetta renkaan ja vaimentimen välille. Tämän suhteen haluttiin säilyvän valitussa arvossa koko joustomatkan, jotta vaimentimet sekä jouset toimisivat halutulla tavalla kaikissa tilanteissa.

Autoon päätettiin suunnitella säädettävät veitsivakaajat molemmille akseleille laajojen säätömahdollisuuksien aikaansaamiseksi. Myös vakaajan välityssuhteen haluttiin pysyvän lähellä valittua arvoa riippumatta jousituksen asennosta.

## 8.5 Ohjaus

Uuden auton moottoreiden vääntömomenttipyyntöjen säätelyä varten tiimi oli päättänyt kehittää autoon älykkään voimanjakojärjestelmän. Tämän järjestelmän oli määrä merkittävästi kehittää auton kykyä tuottaa kiertokihtiä, joten ohjauksen suunnittelussa voitiin keskittyä enemmän maksimaalisen sivuttaisvoiman kehittämiseen, eikä välttämättä niinkään auton reagoimisnopeuteen. Kuitenkin FS-radat sisältävät paljon suunnanvaihdoksia, eikä niinkään esimerkiksi pitkiä mutkia, joten auton reagointi on avainasemassa. Toisaalta kilpailuissa ajetaan skidpad-osio, jossa on käytännössä ainoastaan sivuttaisvoimantuotokyvulla merkitystä.

Näiden tekijöiden myötä autoon pyrittiin suunnittelemaan tasaohjaus, sillä sen nähtiin olevan paras kompromissi Ackermann ja anti-Ackermann -ohjausten välillä.

Ohjausvälityksestä haluttiin mahdollisimman suuri, jotta ohjauksesta tulisi kevyt. Aiemman kokemuksen perusteella näissä autoissa ei ole ongelmana liian hidas vaan liian jäykkä ohjaus. Ohjausvälitys määritettiin niin, että renkaiden suurin ohjauskulma olisi riittävä pienimmän säännöissä määritellyn mutkan selvittämiseen ja että ratin kääntökulma olisi tällöin mahdollisimman suuri. Suurin kääntökulma ratille määritettiin käyttämällä penkkiä, jossa istuma-asento voitiin säätää autoa vastaavaksi. Tässä penkissä kuljettaja käänsi rattia niin paljon kuin pystyi irrottamatta käsiään ratista. Tämä kääntökulma oli ratin suurin mahdollinen kääntökulma ja sen havaittiin olevan noin 135 astetta.

Taka-akselille suunniteltiin mahdollisuus säätää roll-steer-ominaisuutta säätämällä raidetangon kiinnityspisteen korkeutta rungossa, mutta oletuksena autossa ei ole lainkaan roll-steeriä. Haluttaessa roll-steer voidaan ottaa myöhemmin käyttöön.

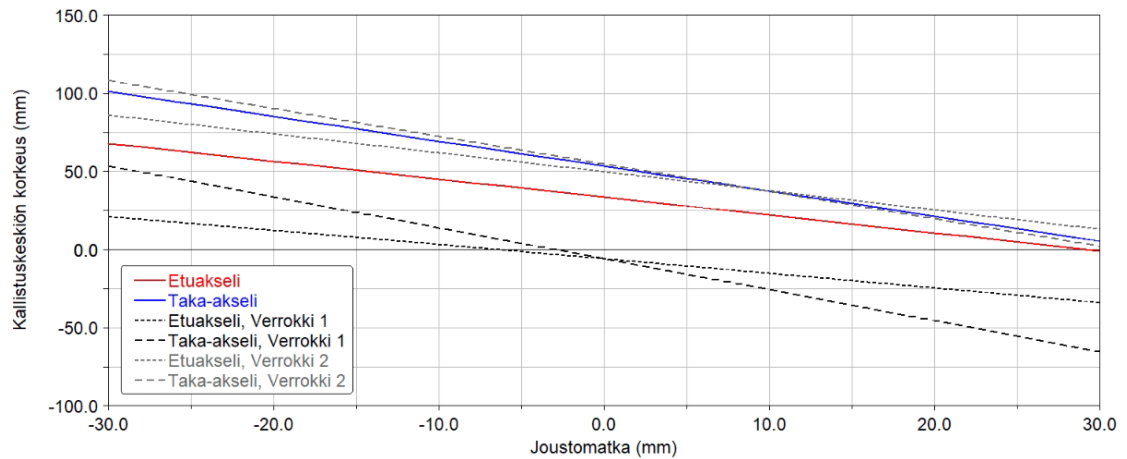
## 9 Tulokset

Kinematiikan osalta saavutettua lopputulosta tarkasteltiin simulaatioissa kallistustilanteessa ja tasajoustossa. Todellisuudessa auto on varsin harvoin puhtaasti kallistus- tai tasajoustotilanteessa, mutta näiden tilanteiden ajateltiin antavan hyvän käsityksen auton alustan toiminnasta kaikissa tilanteissa.

Kuvaajissa punaisella on merkitty etuakselia ja sinisellä taka-akselia. Lisäksi vertailua varten vastaavat simulaatiot on tehty myös kahdelle Metropolia Motorsportin toistaiseksi menestyksekkäimmälle sähköautolle. Verrokkeina toimivien autojen tulokset nähdään kuvaajissa mustalla ja harmaalla. Vertaamalla vanhoihin autoihin voidaan vetää joitain johtopäätöksiä suunnittelun menestyksestä, vaikka edeltävissä autoissa on saatettu soveltaa joiltain osin poikkeavia suunnitteluperiaatteita. Nämä kaksi verrokiautoa ovat takavetoisia, ja niissä moottorit on sijoitettu rungon sisään.

## 9.1 Kallistuskeskiöiden korkeudet

Kallistuskeskiöiden korkeudet tasajoustossa nähdään kuvassa 7. Havaitaan kallistuskeskiöiden laskevan sisäänjoustossa molemmilla akseleilla. Kuvaajaa tulkitessa tulee muistaa, että kuvaajan arvot ulottuvat 30 mm:n joustomatkaan saakka, vaikka auton suunniteltu suurin joustomatka on 27,5 mm.

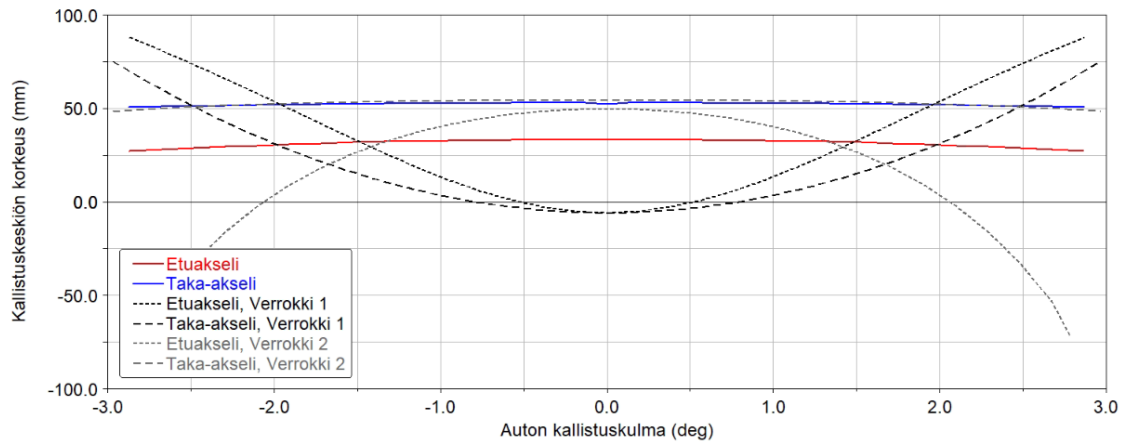


Kuva 7. Kallistuskeskiön korkeus.

Staattisessa tilanteessa kallistuskeskiö sijaitsee etuakselilla 34 mm:n etäisyydellä maanpinnasta ja taka-akselilla 53 mm:n etäisyydellä. Matalimmillaan kallistuskeskiöt ovat täydessä sisäänjoustossa, jolloin korkeudet ovat vain 1,5 mm ja 9 mm. Täydessä ulosjoustossa korkeudet ovat 66 mm ja 98 mm.

Edeltäviin autoihin verrattessa voidaan havaita jonkin verran vähentynyt kallistuskeskiön liike. Lisäksi verrokkiin 1 verrattessa voidaan havaita kaikissa tilanteissa maanpinnan yläpuolella pysyvät kallistuskeskiöiden sijainnit.

Kuvassa 8 voidaan nähdä kallistuskeskiöiden korkeusasemat ja niiden muutokset kallistuskulman funktiona.



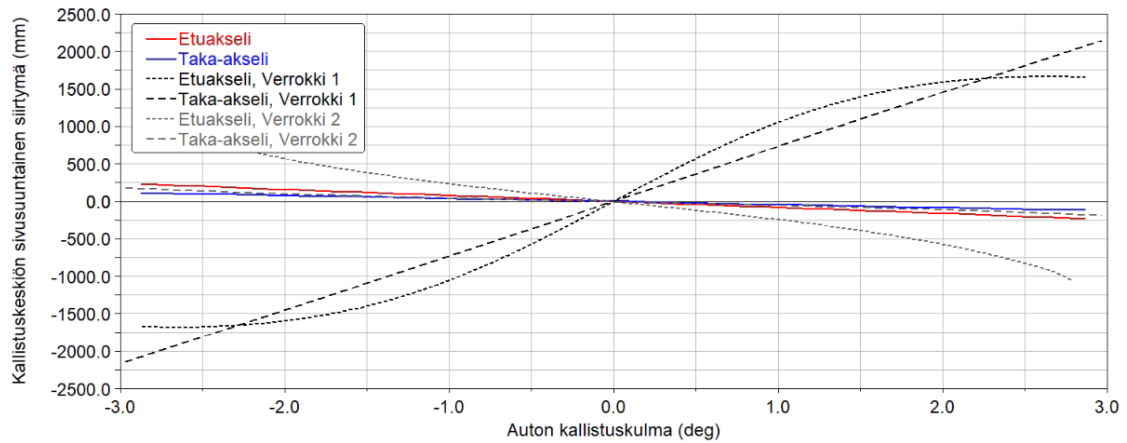
Kuva 8. Kallistuskeskiöiden korkeudet kallistuksessa.

Havaitaan, että kallistuskeskiöt pysyvät käytännössä täysin paikoillaan korkeussuunnassa, kun auto on puhtaassa kallistustilanteessa. Taka-akselilla havaitaan muutosta suurimmillaan vain 4 mm. Etuakselilla muutosta on hieman enemmän, mutta sielläkin vain noin 6 mm. Lisäksi tulee muistaa, että tässä on kyseessä kinemaattisesti suurin mahdollinen kallistuskulma, eikä auto kallistu radalla näin paljoa.

Verrokiautoihin nähden kallistuskeskiöiden liikkeet ovat pienentyneet ja kallistuskeskiöt käyttäytyvät samoin akselien välillä. Kallistuskeskiöt myös säilyvät maanpinnan yläpuolella. Lisäksi verrokkiin 1 verratessa havaitaan kaikissa tilanteissa etuakselin kallistuskeskiötä korkeammalla sijaitseva taka-akselin kallistuskeskiö.

## 9.2 Kallistuskeskiöiden sivusuuntaiset siirtymät

Kuvassa 9 nähdään kallistuskeskiöiden sivusuuntaiset siirtymät auton kallistuksessa.



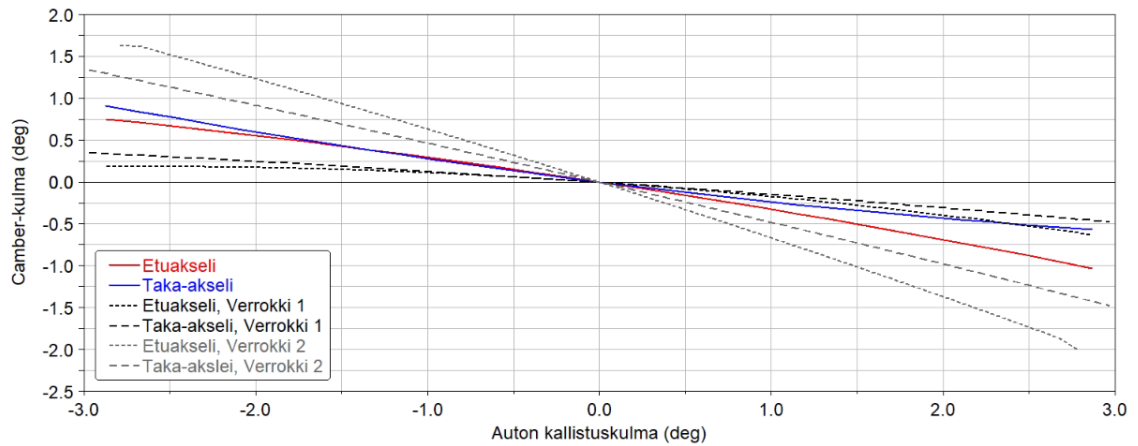
Kuva 9. Kallistuskeskiöiden sivuliike kallistuksessa.

Havaitaan kallistuskeskiöiden liikkuvan varsin vähän sivusuunnassa. Etuakselilla sivusuuntainen etäisyys auton keskeltä on suurimmillaan noin 220 mm ja taka-akselilla vain noin 110 mm.

Verratessa edeltäviin autoihin voidaan havaita, että akselien väliset erot kallistuskeskiön sijainnin käyttäytymisessä ovat merkittävästi vähäisempiä. Kallistuskeskiöt myös liikkuvat vähemmän. Verrokissa 1 havaitaan taka-akselilla noin 20-kertainen ero sivusuuntaisen liikkeen suuruudessa.

### 9.3 Camber-kulman muutos

Kuvassa 10 nähdään camber-kulmat auton kallistuskulman funktiona. Havaitaan, että etenkin taka-akselilla camber-kulman muutos on jäänyt hyvin vähäiseksi. Tähän syynä nelivedon aiheuttama tilanpuute. Tukivarsien asentoihin ei saatu riittäviä vapauksia, ja camber-kulman muutos jäi vähäiseksi.

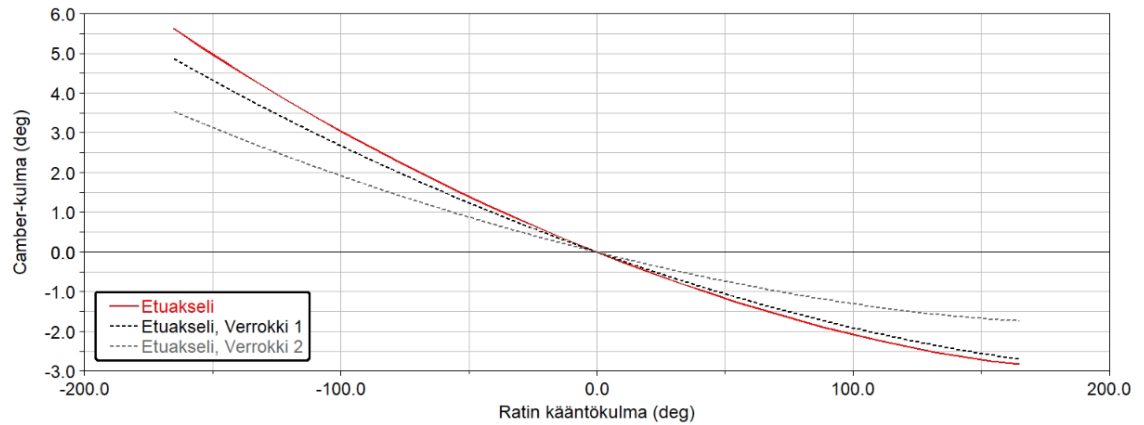


Kuva 10. Camber-kulma kallistuksessa.

Taka-akselilla nähdään camberin muuttuvan noin 0,25 astetta jokaista auton kallistumaa astetta kohden, joten nollan asteen camberin saavuttaminen kallistustilanteessa vaatii autolle staattista camberia. Esimerkiksi kahden asteen kallistuma vaatisi noin 1,5 astetta staattista camberia. Tähän tulee lisätä komponenttien joustamisesta aiheutuvan camber-kulman muutoksen kompensointi. Etuakselilla nähdään noin 0,33 asteen muutos camberissa jokaista auton kallistumaa astetta kohden.

Verrokkiin 2 verratessa nähdään napamoottorien vaikutus tilankäyttöön. Uudessa autossa ei napamoottorien vuoksi ollut juuri vapauksia tukivarsien asetteluun, joten camber-kulman muutos jäi vähäiseksi. Verrokki-autossa numero 2 moottorit eivät ole asettaneet rajoitteita tukivarsien asetteluille, joten nähdään huomattavasti suurempi camber-kulman muutos. Toisessa verrokki-autossa on päädytty pienemmän camber-muutoksen tuomaan ratkaisuun, vaikka moottorit eivät tämänkään auton tapauksessa ole rajoittaneet tukivarsien asettelua.

Etuakselilla joustoliikkeen lisäksi camber-kulmaan vaikuttaa ohjauskulma. Kuvassa 11 nähdään camber-kulman muutos ohjauskulman muuttuessa.

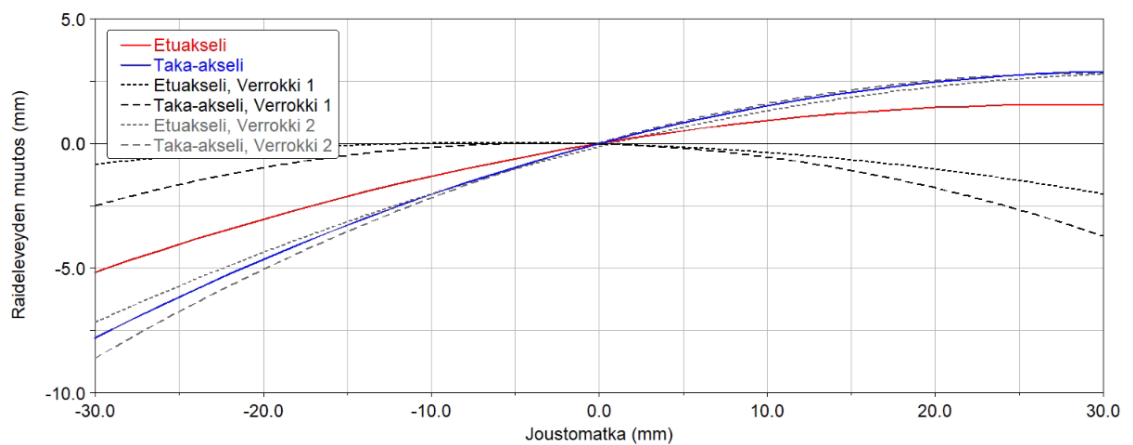


Kuva 11. Camber-kulman muutos ohjausliikkeen johdosta.

Ohjauksen ollessa ääriasennossa camber-kulman voidaan havaita olevan ulko-kaarten pyörällä noin -2,8 astetta ja sisäkaarten puoleisella renkaalla noin 5,6 astetta.

#### 9.4 Raidelevyyden muutos

Kuvassa 12 nähdään molempien akselien raidelevyydet tasajoustopäivän aikana. Havaitaan auton raidelevyyden kasvavan sisäänjoustossa.



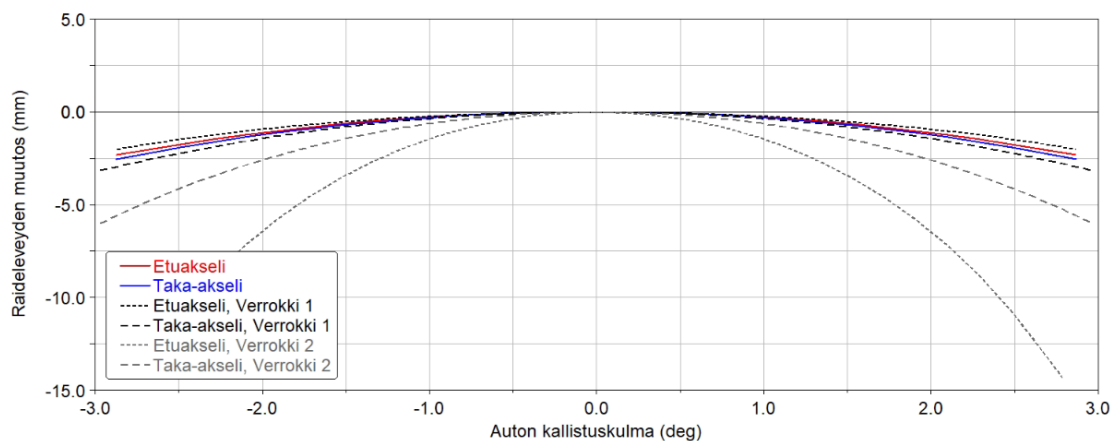
Kuva 12. Raideleveys tasajoustopäivän aikana.



Suunnitellut raidelevyydet olivat 1200 mm molemmilla akseleilla. Täydessä sisäänjoustossa etuakseli levenee noin 1,5 mm ja taka-akseli noin 3 mm. Ulosjoustossa akselit kapenevat noin 5 mm ja 7 mm. Ero akselien välillä johtuu tukivarsien pituuksista, taka-akselille ei voitu tilanpuutteen vuoksi suunnitella yhtä pitkiä tukivarsia kuin etuakselille ja tämän johdosta taka-akselilla nähdään suurempaa raidelevyyden muutosta.

Verrokkiin 1 verratessa voidaan havaita merkittävästi suurentunut raidelevyyden muutos. Sen sijaan verrokkiin 2 verrattuna raidelevyyksien muutokset ovat uudessa autossa pienempiä molemmilla akseleilla.

Kuvassa 13 nähdään raidelevyyksien muutokset kallistustilanteessa.



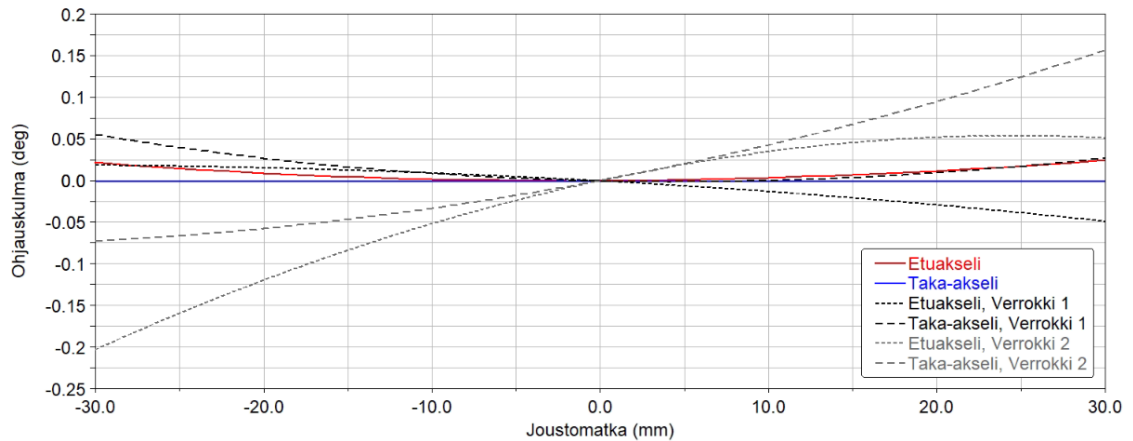
Kuva 13. Raidelevyyden muutos kallistuksessa.

Havaitaan etuakselilla raidelevyyden muuttuvan suurimmillaan noin 2 mm ja taka-akselilla pari kymmenystä enemmän.

Verrattaessa ensimmäiseen verrokkiin voidaan havaita taka-akselilla hieman pienempi raidelevyyden muutos. Etuakselilla ero on puolestaan päinvastainen. Taka-akselin pienempi muutos selittyy pidemmällä tukivarsilla, verrokki-auton taka-akseli on uuden auton taka-akselia kapeampi. Verrokkiin 2 verratessa voidaan nähdä merkittävästi vähentynyt raidelevyyden muutos etenkin etuakselin tapauksessa, jossa ero on kuusinkertainen.

## 9.5 Bumb-steer

Kuvassa 14 nähdään ohjauskulmien muutoksen joustoliikkeen aikana. Kuvassa sinisellä nähdään ohjauskulma taka-akselin tapauksessa. Autoon ei haluttu roll- tai bumb-steer ominaisuuksia, ja kuvasta voidaankin nähdä, ettei taka-akselilla pyörän ohjauskulma muutu lainkaan joustomatkan funktiona.



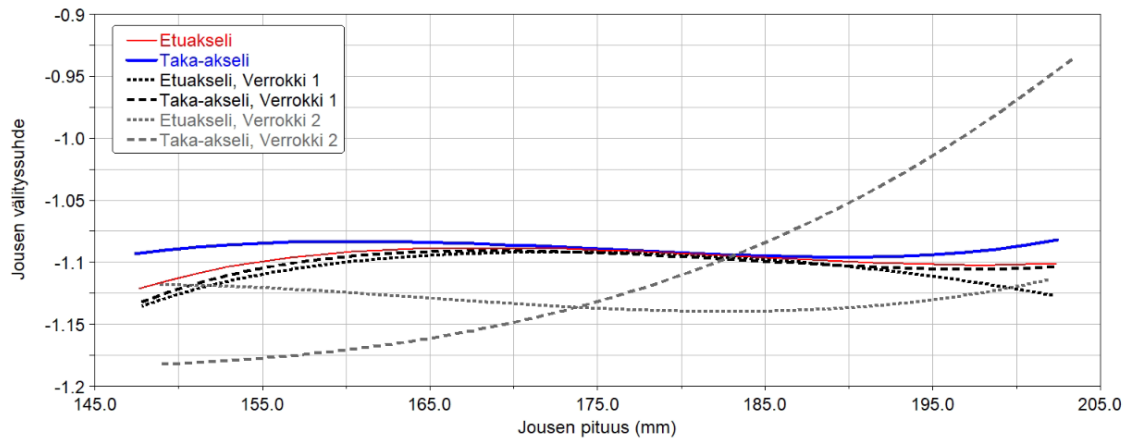
Kuva 14. Ohjauskulma tasajoustossa.

Taka-akselista poiketen etuakselilla kuitenkin nähdään muutosta ohjauskulmassa. Muutos on varsin vähäinen ja se johtuu antigeometrian aiheuttamasta yläpallonivelen pituussuuntaisesta liikkeestä. Koska muutos on suurimmillaankin vain noin kaksi asteen sadasosaa, voidaan muutos olettaa nolaksi.

Jälleen voidaan havaita kehitystä verrattuna edeltäviin autoihin, sillä ohjauskulman muutosta on saatu pienennettyä molemmilla akseleilla.

## 9.6 Jousituksen välityssuhde

Kuvassa 15 nähdään joustomatkan derivaatta jousen pituuden suhteen. Kuvassa siis nähdään, kuinka paljon pyörä liikkuu pystysuunnassa tietyllä jousen liikkeellä. Välityssuhteen arvoksi haluttiin 1.1 ja tämän haluttiin pysyvän mahdollisimman vakiona koko joustomatkan ajan.

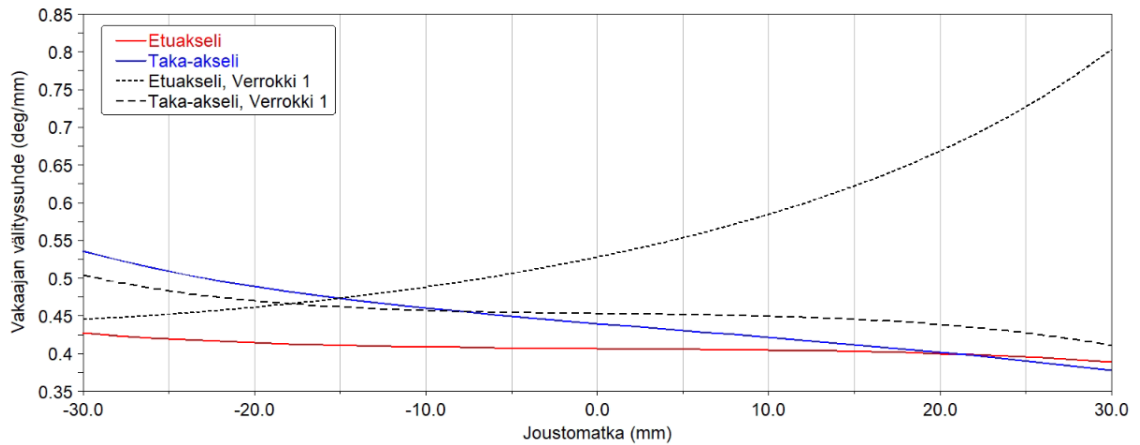


Kuva 15. Jousen välityssuhde.

Voidaan havaita välityssuhteen arvon pysyvän lähes samassa koko joustomatkan ajan molemmilla akseleilla.

Verrokkiin 1 verratessa ei havaita merkittäviä eroja. Taka-akselilla havaitaan hieman lievempi progressio lähestyttäessä täyttä sisäänjoustoa. Myös täyttä ulosjoustoa lähestyttäessä nähdään pieniä eroja. Keskialueella toiminta on kuitenkin jotakuinkin samanlaista. Verrokissa 2 sen sijaan on ilmeisesti tavoiteltu erityyppistä käytöstä, ja tähän vertaaminen ei ole kovin mielekästä.

Jousen välityssuhteen lisäksi myös kallistuksenvakaajan välityssuhteella oli merkitystä. Kuvassa 16 nähdään vakaajan pään kääntymän derivaatta suhteessa joustomatkaan.



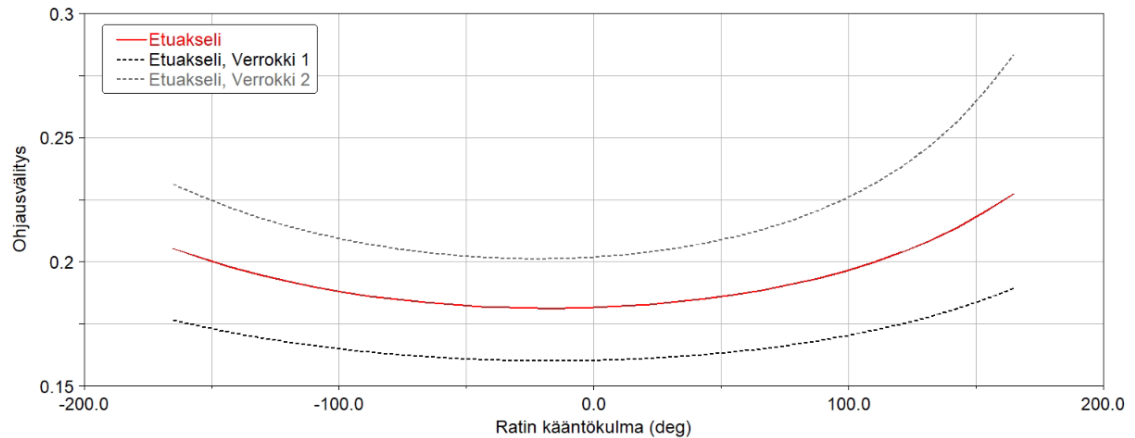
Kuva 16. Vakaajan välityssuhde.

Etuakselilla vakaajan pään havaitaan kääntyvän noin 0,4 astetta jokaista joustuksen painumaa millimetriä kohden. Tämä välityssuhde säilyy lähes muuttumattomana koko joustomatkan. Taka-akselilla sen sijaan ei tilanahtauden vuoksi voitu vakaajaa sijoittaa ilman kompromisseja, joten taka-akselin kohdalla voidaan havaita muutosta välityssuhteessa joustomatkan aikana. Välitys on joustuksen puolivälissä noin 0,44, ja joustomatkan funktiona se vaihtelee arvojen 0,53 ja 0,38 välillä.

Verrattaessa ensimmäiseen verrokkiautoon voidaan havaita taka-akselilla olevan hieman epälinearisempi välityssuhde. Etuakselilla välityssuhteen havaitaan sen sijaan pysyvän huomattavasti lähempänä haluttua kuin verrokki-autossa. Toisesta verrokki-autosta tietoa ei ollut saatavilla.

## 9.7 Ohjausvälitys

Kuvassa 17 nähdään ohjausvälityksen kehitys suhteessa ratin kääntökulmaan.



Kuva 17. Ohjausvälitys rattia käännettäessä.

Havaitaan ohjausvälityksen vaihtelevan arvojen 0,18 ja 0,22 välillä.

## 10 Yhteenveto

Tavoitteena tässä insinööriyössä oli selvittää kilpa-auton alustan suunnittelua ja suunnitella nelivetoiseen Formula Student -luokan kilpa-autoon alusta. Kinematiikan suunnittelussa käytettiin Adams-ohjelmistoa, ja komponenttien sopivuus varmistettiin Catia V5 -mallinnusohjelman avulla. Työn lopputuloksena syntyi suunniteltu alustakinematiikka Metropolia Motorsportin uusimpaan autoon.

Kinematiikan suunnittelussa kannattaisi käyttää optimointityökaluja sekä ajan että työtaakan säästämiseksi. Alustakinematiikka määrittää koko auton suunnitteluun liittyviä asioita hyvin vahvasti, joten olisi hyödyllistä, mikäli alustapisteeet voitaisiin sijoittaa kohdilleen nopeasti auton suunnittelun alkuvaiheessa. Tästä olisi hyötyä kaikille auton osa-alueille ja auton kehitykselle jäisi enemmän mahdollisuuksia. Myös itse kinematiikan osalta päästäisiin parempaan lopputulokseen.

Tässä työssä päästiin kuitenkin tyydyttävään lopputulokseen ja saavutetun alustakinematiikan voidaan katsoa luovan valituille renkailla riittävän hyvät toimintaolosuhteet. Kinematiikan voidaan myös odottaa kehittävän auton ajettavuutta.

Verratessa Metropolia Motorsportin toistaiseksi suorituskykyisempiin autoihin voidaan mahdollisesti nähdä jonkin asteista kehitystä.

Suunnitellussa alustassa kallistuskeskiöt pysyvät varsin hyvin paikoillaan kaikissa tilanteissa, raideleveydet eivät koe suuria muutoksia ja camber-kulmat muuttuvat riittävästi joustossa. Valitut renkaat ovat tarjoavat suorituskykyä, ja niiden potentiaali saadaan tehokkaasti hyödynnettyä, sillä nämä renkaat eivät ole kovin herkkiä camber-kulman tai pystykuorman muutoksille. Nämä tekijät tekevät autosta teoriassa varsin suorituskykyisen sekä vakaan. Auton voidaan odottaa olevan helposti ajettavissa ja säädettävissä.

## Lähteet

- 1 The Tyre, Grip. 2001. Luentomoniste. Michelin.
- 2 Balkwill, James. 2018. Performance Vehicle Dynamics: Engineering and Applications. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- 3 Coil Springs. Verkkoaineisto. Suspension Secrets. <<https://suspensionsecrets.co.uk/coil-springs/>>. Luettu 10.5.2021.
- 4 Dampers. Verkkoaineisto. Suspension Secrets. <<https://suspensionsecrets.co.uk/damper/>>. Luettu 10.5.2021.
- 5 Anti-roll bars. Verkkoaineisto. Suspension Secrets. <<https://suspensionsecrets.co.uk/anti-roll-bars/>>. Luettu 10.5.2021.
- 6 Milliken, William & Milliken, Douglas. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- 7 Katz, Joseph. 2006. Race Car Aerodynamics, Designing for Speed. Cambridge, MA: Bentley Publishers.
- 8 O'Connell, Jay. 2016. Understeer vs Oversteer: Part 3 - Balancing the Car. Youtube. Verkkoaineisto. <<https://www.youtube.com/watch?v=ys-bPxfFaMug>> Luettu 12.5.2021.
- 9 Formula Student Rules 2020. Verkkoaineisto. Formula Student Germany. <[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)>. 13.9.2019. Luettu 13.9.2019.