

Sami Ristolainen

# Ohjauksen suunnittelu Formula Student -kilpa-autoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

7.5.2016

Tekijä(t) Otsikko	Sami Ristolainen Ohjauksen suunnittelu Formula Student -kilpa-autoon
Sivumäärä Aika	38 sivua + 2 liitettä 7.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja(t)	Tuntiopettaja Pasi Oikarinen
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula Student -kilpa-auton HPF016 ohjaus. Kilpa-autoon suunniteltiin progressiivinen ohjaus ja vaihtoehtoisesti lineaarinen ohjaus. Suunnittelussa on huomioitu, kuinka alusta- ja ohjausgeometriat vaikuttavat ohjauksen suunnitteluun.</p> <p>Opinnäytetyön lähtökohtana oli kyetä antamaan kuljettajalle eri ajotilanteisiin parempi ohjaustuntuma ja saavuttaa tarkempi ohjaus nopeissa käänöksissä. Tämä on toteutettu progressiivisella ohjauksella, jossa käytetään epäkeskeistä hammaspyörää ja hammastankoa. Progressiivisella ohjauksella pienillä ohjauspyörän kääntökulmilla ohjaus on hidas ja suurilla nopeuksilla nopeampi.</p> <p>Suunnitteluprosessin jälkeen progressiivisesta hammastangosta ja hammaspyörästä teetettiin 3D-prototyypit toimivuuden varmistamiseksi. Näiden perusteella tehtiin tarvittavat muutokset varsinaisiin osiin, jotka koneistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa ja hammastukset teetettiin lankasauhauksella.</p> <p>Progressiivista ohjausta ei kyetty testaamaan radalla, koska HPF016-kilpa-auto ei ollut vielä ajokunnossa ennen tämän opinnäytetyön valmistumista. Testikaudella progressiivista ohjausta tullaan testaamaan, ja nämä testaustulokset antavat varmasti lisätietoa progressiivisen ohjauksen jatkokehittelyyn.</p>	
Avainsanat	Ohjaus, Formula Student

Author(s) Title	Sami Ristolainen Designing Steering System for a Formula Student Race Car
Number of Pages Date	38 pages + 2 appendices 7 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive engineering
Specialisation option	Automotive design engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design and manufacture a steering system for a Formula Student race car. The goal was to design both progressive and linear steering systems. During the design of the steering system, the effect of suspension and steering geometries were taken into account.</p> <p>The main objective was to design a progressive steering system which would give a driver better steering response in different kind of driving situations. The progressive steering system consists of eccentric pinion and rack. With the progressive steering system, the steering is slow with small steering angles and gets faster with big steering angles.</p> <p>After the design of progressive steering system, a 3D-prototype was made to check that calculations were correct. After testing the prototypes, some modifications were made before the final parts were manufactured. Eccentric pinion and rack were machined from aluminium and teeth profiles were made with wire-cut EDM.</p> <p>The design work was carried out successfully. The aim was to test the progressive steering system with the Metropolia Motorsport HPF016 race car, but race car was not moving before this thesis was finished. Therefore, the progressive steering system will be tested later on during the test season, and these tests will give more information for the further development of the system.</p>	
Keywords	Steering system, Formula Student

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ohjausmekanismejä	2
3	Jousitusgeometria	5
3.1	Caster-kulma	5
3.2	Etujättö ja rengas-caster	7
3.3	Kingpin-kulma ja a-mitta	7
3.4	Kääntövarsi	8
4	Progressiivinen ohjaus ja lineaarinen ohjaus	9
5	Suunnittelu	12
5.1	Säännöt	12
5.2	Ohjausgeometria	12
5.3	Ackermann	13
5.4	Rengasdata	15
5.5	Progressiivinen hammastanko	17
5.6	Ohjausvaihde	22
5.7	Lineaarinen hammastanko	24
5.8	Hammaskosketuksen säätö	26
5.9	Kulmavaihde	28
5.10	Steer ratio ja c-factor	29
5.11	Prototyyppi	30
6	Valmistus	31
6.1	Sorvaus ja jyrsintä	32
6.2	Lankasahaus	32
7	Sovitus autoon	33
8	Testaus ja mittaaminen	34
9	Pohdinta	36
9.1	Ohjauksen suunnittelu	36

9.2	Progressiivisen ohjauksen suunnittelu	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. PA2200-muovin tekniset tiedot	39
	Liite 2. Dxf -kuvat	41

## Lyhenteet

FS            Formula Student

KPI           Kingpin inclination, kääntöakselin sivukallistuma

HPF016      Helsinki Polytechnic Formula 2016

## 1 Johdanto

Formula Student on yliopistoissa ja ammattikorkeakouluissa opiskeleville opiskelijoille tarkoitettu kansainvälinen suunnittelu-, rakennus- ja ajokilpailu. Virallisia kilpailuja järjestetään vuosittain Yhdysvalloissa, Englannissa, Saksassa, Italiassa, Itävallassa, Australiassa, Italiassa, Brasiliassa ja Japanissa.

Formula Student -kilpailu koostuu staattisista ja dynaamisista osuuksista. Staattisiin osuuksiin kuuluvat design event, cost and manufacturing event ja presentaatio. Design eventissä arvostellaan auton suunnittelua sekä toteutusta. Cost and manufacturing eventissä käydään läpi auton valmistuskustannukset. Presentaatio on auton myyntiesitys, joka esitetään tuomareiden edessä. Jokaisesta staattisesta osuudesta saa eri määrän pisteitä riippuen kilpailusta. Dynaaminen osuus koostuu neljästä erilaisesta ajokilpailusta: 75 metrin kiihdytyksestä, kahdeksikkoajosta, sprinttiajosta eli yhdestä kierroksesta ja 22 km kestävästä kestävyysajosta. Kilpailuissa tuomareina toimivat eri alojen työntekijät.

Metropolia Motorsport on yksi sarjan vanhimmista ja menestyksekkäimmistä tiimeistä Euroopassa. Metropolia Motorsport, aiemmin Stadia Motorsport, on perustettu vuonna 2000 ja ensimmäinen auto on suunniteltu ja toteutettu vuonna 2002. Tiimistä on vuosien varrella valmistunut yli 100 insinööriä eri teollisuuden aloille.

Tässä opinnäytetyössä avataan Metropolia Motorsportin vuoden 2016 auton HPF016 ohjauksen suunnittelu sekä valmistus. HPF016-kilpa-autoon suunniteltiin progressiivinen ohjaus, joka on toteutettu progressiivisella hammastangolla, ja siihen suunniteltiin myös lineaarinen hammastanko-ohjaus.

Ensimmäisessä luvussa tarkastellaan erilaisia ohjausmekanismeja, jollaisia käytetään ajoneuvoteollisuudessa. Toisessa luvussa käydään läpi, kuinka jousitusgeometriat sekä ohjausgeometriat vaikuttavat itse ohjaukseen. Jousitus- ja ohjausgeometrioilla voidaan vaikuttaa muun muassa ohjauksen tunnokkuuteen ja jäykkyyteen.

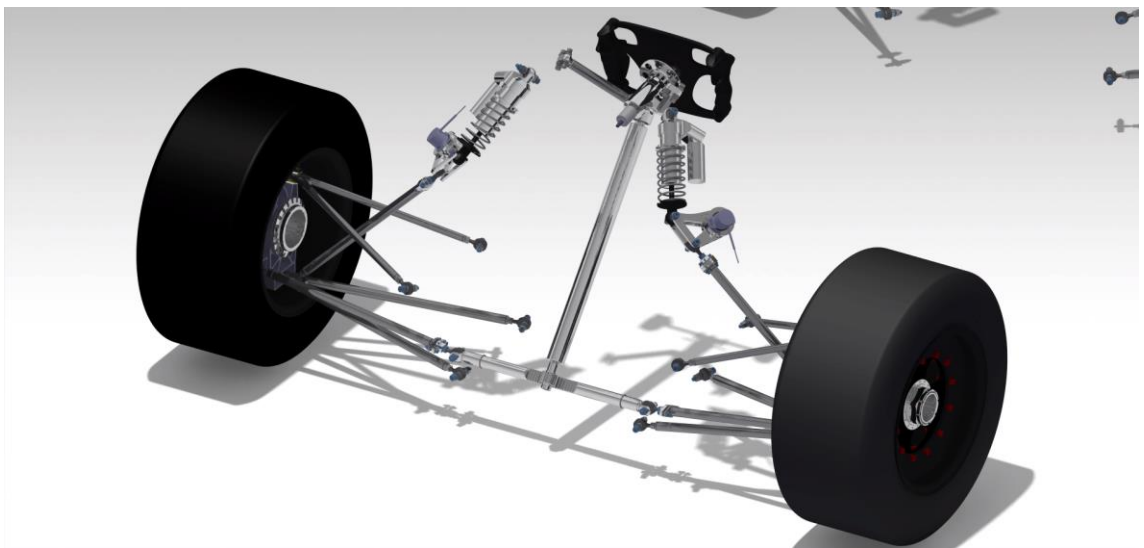
Kolmannessa luvussa käydään läpi progressiivisen ohjauksen ja niin sanotun lineaarisen ohjauksen hyviä ja huonoja puolia ja sitä miksi progressiivista ohjausta käytetään autoteollisuudessa.

Neljännessä luvussa kuvataan ohjauksen suunnittelua läpi progressiiviselle ohjaukselle sekä lineaariselle ohjaukselle. Viidennessä luvussa käydään läpi ohjauksen valmistusta.

Kuudennessa luvussa ohjaus sovitetaan kilpa-auton runkoon ja tämän jälkeen keskitytään ohjauksen testaamiseen ja mittaamiseen. Lopuksi tehdään yhteenveto siitä, mitä asioita kannattaisi ottaa vielä huomioon progressiivisessä ohjauksessa sekä ohjauksen suunnittelussa.

## 2 Ohjausmekanismit

Useimmat nykypäivän tuotantoautoista käyttävät hammastanko- ja hammaspyörä ohjausmekanismeja. Hammastanko- ja hammaspyöräohjauksessa ohjauspyörä kääntää hammaspyörää ja hammaspyörä muuttaa pyörivän liikkeen lineaarisiksi auton sivusta sivulle liikkeeksi (kuva 1).

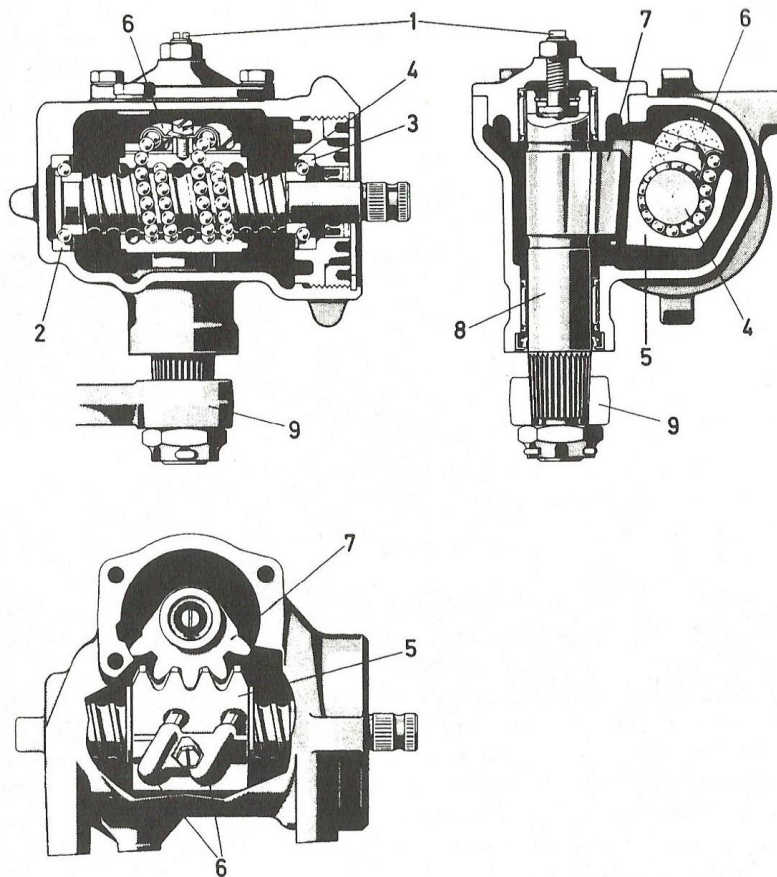


Kuva 1. Hammastanko-ohjaus

Hammaspyörä- ja hammastanko-ohjausmekanismeissa on etuna sen suuri palaute ja ohjaustuntuma ohjauspyörällä. Tuotantoautoissa voidaan haittapuolena pitää sitä, ettei hammaskosketusta voida säätää, mikäli siihen tulee käytöstä johtuvaa kulumaa. Kuluma aiheuttaa ohjausvaihteeseen väljyyttä joten, kun rattia kääntää niin renkaat pysyvät paikoillaan. Formula Studentin säännöissä tämä kulumasta johtuva väljyys on maksimoitu 7 asteeseen ohjauspyörällä [1, s. 59]. Sen vuoksi kilpa-autoissa käytetään erilaisia säätömekanismeja, jolla saadaan väljyys pois ohjauksesta.

Simpukkavaihdeohjausta käytetään tänä päivänä monissa kuorma-autoissa ja katumaastureissa eikä niinkään henkilöautoissa. Mekanismi, joka kääntää renkaita, on erilainen kuin hammastanko-ohjauksessa. Se sisältää kierukkavaihteen, jossa on kuulamutteri, jonka ulkopuolella on hammastus, joka siirtää sektorivipua. Ohjauspyörä on yhdistetty eräänlaiseen kierretankoon, joka on mutterin sisällä. Kun ohjauspyörää kääntää, samalla kiertyy myös kierretanko. Kierretanko ei itsestään liiku vaan tässä tapauksessa mutteri liikkuu ja näin myös vaihde liikkuu ja kääntää renkaita (kuva 2).

Vaihteen sisällä käytetään myös kierteen välissä teräskuulia, jotka liikkuvat kun ohjauspyörää käännetään, näin ollen plokki liikkuu ja kääntää heilurivartta. Teräskuulat vähentävät kitkaa ja vaihteen kulumista (kuva 2).



Kuva 2. Simpukkaohjaus teräskuulilla [2, s. 280]

Tämänkaltaisissa vaihteissa on etuna suurempi mekaaninen hyöty, jolloin siitä on etua isommissa ajoneuvoissa. Vaihteessa on yleensä kuollut alue ohjauspyörän ollessa keskellä, jolloin ohjauspyörää käännettäessä ei tapahdu renkaiden kääntymistä heti. Tämän väljän poisto on toteutettu mutterilla, jota kiristämällä saadaan väljyys pois. Liiallinen kiristys aiheuttaa muualle vaihteeseen sisäisiä voimia ja muilla ohjauspyörän asennoilla vaihde alkaa kulumaan.

Näiden lisäksi ohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi vaijerien avulla, jolloin vaijeri on kiinnitetty kääntövarteen. Kun ohjauspyörää käännetään, niin vaijeri kietoutuu akselin ympärille, jolloin renkaat kääntyvät.

Hammastanko-ohjaus on yleisesti käytetty autoissa tai muissa kulkuneuvoissa, joissa renkaat kääntyvät. Simpukkaohjauksella pystytään siirtämään suurempia voimia kuin hammastanko-ohjauksella, mutta tämä hyöty on vähentynyt ohjaustehostimen käyttöönoton takia. [2, s. 278.] Hammastanko-ohjaus antaa kuitenkin enemmän palautetta ja ohjaustuntumaa ohjauspyörällä.

Ohjausmekanismeja avustetaan nykyään ohjaustehostimilla. Ohjaustehostimia on erilaisia, yleisemmin käytössä ovat hydraulisesti tai sähköisesti avustetut. Ohjaustehostimilla saadaan pienillä nopeuksilla ja suurilla renkaiden kääntökulmilla ohjauksesta kevyempi, jolloin parkkipaikoilla on helpompi toimia. Suurilla nopeuksilla ja pienillä renkaiden kääntökulmilla ohjaustehostimesta ei ole niin paljon hyötyä. Formula Student kilpa-autoissa käytetään harvoin jos koskaan ohjaustehostimia. Tämä johtuu enimmäkseen Formula Student -kilpasarjan autojen painoista, jotka vaihtelevat välillä 150 kg – 350 kg. Näin ollen kuljettaja pystyy ajamaan autoa ilman tehostinta. Myös ohjaus-pyörän kääntämiseen tarvittavaan voimaan liittyy myös olennaisesti ohjausgeometria. Ohjauspyörälle tulee noin 4 – 11 Nm vääntöä, kun renkaat ovat paikoillaan. Kun autoa lähdetään rullaamaan, niin ohjaus kevenee samalla huomattavasti. [3, s. 1–4.]

Ohjaus- ja jousitusgeometrialla voidaan muuttaa ohjauksen jäykkyyttä ja tuntumaa. Tarkoituksena on tehdä ohjauksesta mahdollisimman tunnokas muttei liian raskas, jotta kuljettaja jaksaa ajaa 22 kilometria väsymättä.

### **3 Jousitusgeometria**

#### **3.1 Caster-kulma**

Caster-kulma tarkoittaa kääntöakselin taka- tai etukallistumaa sivustapäin katsottuna. Caster-kulman kuvitteellinen akseli piirretään yläpallonivelen ja alapallonivelen keskipisteistä toiseen ja kulma määryytyy tämän akselin kulmasta suhteessa renkaan pystyakseliin (kuva 3).

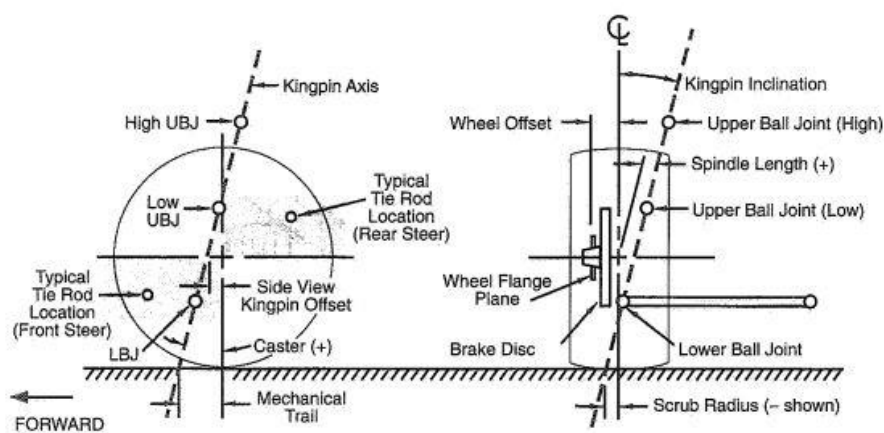
Positiivinen caster-kulma tarkoittaa, että kääntöakseli on sivustapäin katsottuna taaksepäin kallistettu. Negatiivinen tarkoittaa, että kääntöakseli on eteenpäin kallistettu. Kääntöakselin sivukallistumalla voidaan määritellä etujätön suuruus. Caster-kulman suuruus voidaan pitää yhtä suurena, vaikka etujätön suuruutta lisätään tai vähennetään.

Caster-kulma aiheuttaa käännettäessä sisäpuolen renkaalle positiivista camber-muutosta ja ulkopuolen renkaalle negatiivista camber-muutosta. Caster-kulmalla voidaan kompensoida KPI-kulman vaikutusta kääntötilanteessa.

Liiallinen caster-kulma tekee ohjauksesta raskaan sekä vähentää herkkyyttä. Suurella caster-kulmalla saadaan parannettua camber-muutosta kaarreajossa, mikä on hyväksi renkaan sivuttaiskiiktyvyyden maksimoimiseen. Myös suurilla caster-kulmilla lyhyissä ajo-osuuksissa voidaan saada rengas lämpenemään nopeammin, koska renkaita kääntäessä camber-kulman muutos aiheuttaa renkaan lämpenemisen. Tämä voi olla hyvä asia Formula Student -kilpailuissa, joissa ajetaan yhden nopean kierroksen sprinttikilpailu. Näin ollen voitaisiin saada nopeasti rengas hyvään käyttölämpötilaan.

HPF016-kilpa-auton caster-kulma on 6,594 astetta. Casterista on tehty säädettäväksi vaihtamalla eri mittaisia tukivarsia, joten testaamalla saadaan haettua oikea caster-kulma eri ajotilanteeseen.

Symmetrisellä caster-kulman asetuksella etuakseli tuottaa diagonaalista painonsiirtoa ajoneuvossa. Tämä aiheuttaa ajoneuvolle ylioijautuvuutta mutka-ajossa.



Kuva 3. Pyörän asentokulmat [4, s. 712]

### 3.2 Etujättö ja rengas-caster

Etujättö on sivusta katsottuna ylä- ja alapallojen keskipisteiden lävitse kulkevan suoran sekä renkaan keskilinjan välinen etäisyys (kuva 3). Etujättö tuottaa ohjaustuntuman, kun caster-kulma lisää vaimennusta ja palautuvuutta. Palautukseen vaikuttavat renkaaseen kohdistuvien sivuvoimien sivuvoimien tuottama momentti kääntöakselin ympäri. Momenttiin vaikuttavat sivuvoima, etujätön ja rengas-casterin suuruus.

[4, s. 712–713.]

Etujättö voidaan määritellä halutun suuruiseksi, vaikka caster-kulma olisi minkä suuruinen tahansa tai sitä ei olisi ollenkaan. Kääntöakselin ei tarvitse lävistää renkaan keskipistettä, vaan kääntöakseli voidaan viedä eteen- tai taaksepäin, jolloin kääntöakselin ja renkaan keskipisteen etäisyys kasvaa.

Renkaaseen kohdistuvat sivuttaisvoimat eivät kohdistu suoraan renkaan keskilinjan ja maan leikkauspisteeseen vaan tietyn etäisyyden päähän renkaan keskilinjasta taaksepäin. Tämä etäisyys on nimeltään rengas-caster ja sen paikka muuttuu johtuen mm. nopeudesta, pystykuormasta, ohjauskulmasta, rengastyypistä ja rengaspaineesta. Rengas-casterista johtuen palauttavaa momenttia syntyy, vaikka caster-kulma olisi nolla tai negatiivinen.

HPF016-kilpa-autoon suunniteltiin etujätöksi 20 mm. Aiemman vuoden autossa oli melko tunnokas ohjaus 15 mm:n etujätöllä, joten ohjauksesta pyrittiin tekemään vieläkin tunnokkaampi.

### 3.3 Kingpin-kulma ja a-mitta

KPI-lyhenne tulee englanninkielien sanoista Kingpin Inclination, joka tarkoittaa kääntöakselin sivukallistumaa edestäpäin katsottuna. KPI-kulma määritellään kahden tai useamman pallonivelen kautta piirtämällä kuvitteellinen akseli pallonivelen keskipisteiden kautta.

KPI-kulmalla on monta hyvää puolta ja yksi niistä on a-mitan tai kääntövierinsäteen pienentäminen. A-mitta (scrub radius) määritellään KPI-akselin ja renkaan keskilinjan etäisyydellä toisistaan maanpinnalla (kuva 3). Mikäli KPI-akseli leikkaa renkaan kosketuspisteen ulkopuolella, on kyseessä negatiivinen a-mitta niin kuin kuvassa 3. Mikäli KPI-akseli leikkaa sisäpuolella, puhutaan positiivisesta a-mitasta.

Positiivisella a-mitalla jarrutuksessa rengas pyrkii kääntymään haritukselle ja kiihdytyksessä auraukselle. Negatiivisella a-mitalla rengas pyrkii kääntymään aurauksella jarrutustilanteessa. HPF016-kilpa-autoon suunniteltiin a-mitan pituudeksi 35 mm. Aiempien vuosien perusteella tiedetään, että ohjaus ei ala liikaa hakea jarrutuksissa, mikäli pysytään alle 40 mm:n a-mitan pituudessa. Liiallinen hakeminen vaikeuttaa mutkaan kääntymistä, jolloin voidaan hävitä aikaa.

KPI-kulma aiheuttaa myös auton nokan nousua kääntötilanteessa. Tämä on yksi seikka, joka aiheuttaa ohjauksen palautuvuutta, jolloin auton paino palauttaa ohjauksen keskelle. [4, s. 625–626.]

KPI-kulma aiheuttaa käännetylle renkaalle camber-muutosta aina positiiviseen suuntaan.

### 3.4 Kääntövarsi

Kääntövarren tehtävänä on määritellä, kuinka paljon renkaat kääntyvät. Kääntövarren pituuteen vaikuttaa hammastangon liike laidasta laitaan. Käytännössä mitä pidempi kääntövarsi, sitä vähemmän renkaat kääntyvät.

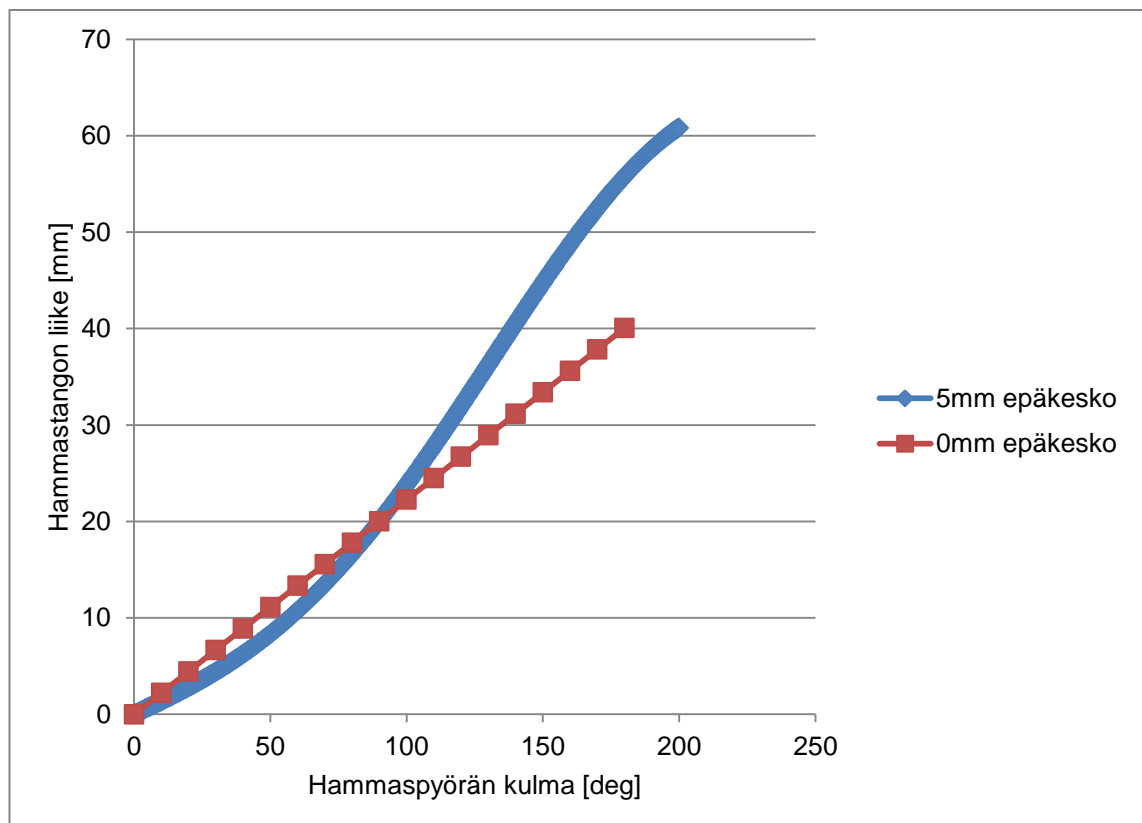
Kääntövarren avulla määritetään myös minkälaisella Ackermann-ohjauksella ajetaan. Kääntövarren sijainti sivuttaissuunnassa määrittelee, kääntyvätkö renkaat yhtä paljon vai eivät. Mikäli kääntövarsi on kääntöakselin ulkopuolella, niin silloin sisärenkas kääntyy enemmän ja mikäli sisäpuolella niin ulkorengas kääntyy enemmän.

Kääntövarren paikan avulla saadaan myös mahdolliset aurasmusuutokset minimoitua jouston ja kallistustilanteiden aikana. Aurasmusuutoksien minimointi on tärkeää, koska esimerkiksi jarrutustilanteessa ajoneuvon etupää voi alkaa hakea. Tämä vaikeuttaa kuljettajan ajamista mutkan läpi, koska renkaat alkavat kääntymään itsestään.

HPF016-kilpa-autoon tehtiin irroitettava kääntövarsi, jotta voitiin ohjausgeometriaa muokata erilaiseksi shimmiä avulla tai vaihtamalla kokonaan kääntövarsi.

#### 4 Progressiivinen ohjaus ja lineaarinen ohjaus

Progressiivinen ohjaus tarkoittaa tässä opinnäytetyössä sitä, että hammastanko ei liiku samalla välityksellä koko ajan. Normaalilla hammastangolla ja hammaspyörällä hammastangon liike on lineaarista hammaspyörän kulmaa kohden eli kulmakerroin suoralla on vakio. Progressiivisessa hammastangossa kulmakerroin ei ole vakio vaan muuttuu koko ajan. Alla olevassa kuvassa 4 punainen suora on lineaarisen hammastangon liike suhteessa hammaspyörän kulmaan, jonka kulmakerroin on vakio. Sininen käyrä on 5 mm epäkeskeisen hammaspyörän ja hammastangon liike, jonka kulmakerroin ei ole vakio. Aluksi kulmakerroin on pienempi ja alkaa suurentumaan ja lopuksi taas pieneneään, kun hammaspyörän kääntökulma on 135 astetta.



Kuva 4. Pystyakselilla hammastangon liike [mm] ja vaak akselilla hammaspyörän kulma [deg]

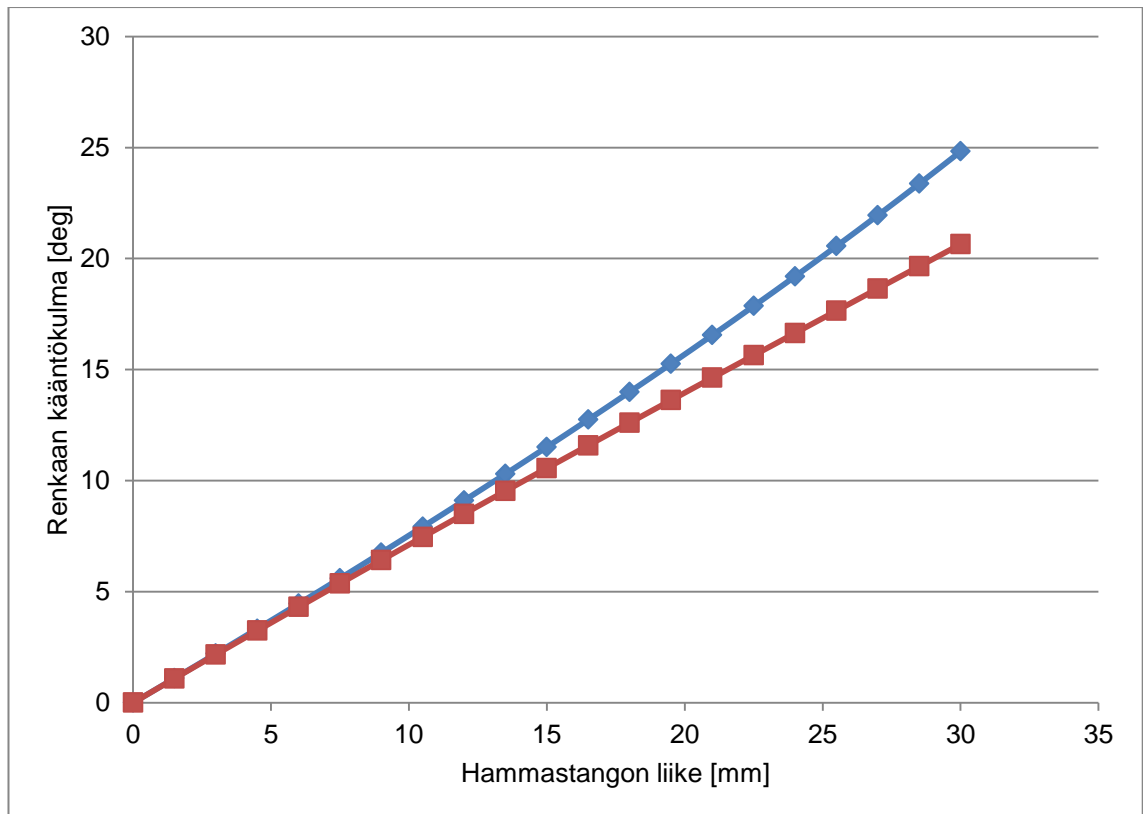
Progressiiviuudella haetaan erilaiseen ajotilanteeseen parempaa ohjaustuntumaa. Kilpa-autolla halutaan ohjaukselta nopeissa mutkissa tarkkaa ohjausta (hidas ohjaus), jolloin ohjaus on tarkempi ja kuljettaja tuntee paremmin, mihin auto on menossa. Progressiivisella ohjauksella nopeissa ja loivissa käänöksissä pystytään ajamaan oikealla sortokulmalla helpommin, jolloin renkaasta pystytään saamaan enemmän irti sivuttaiskiivyyttä. Tämä johtuu siitä, että nopeissa mutkissa renkaiden kääntökulma on suhteellisen pieni, ja näin ollen hammastanko liikkuu vähemmän kuin lineaarisen hammastangon tapauksessa.

Henkilöautoissa progressiivisuus on toteutettu toisinpäin kuin kilpa-autossa. Formula Student -kilpaluokassa ohjaukset on toteutettu lineaarisella hammastangolla johtuen valmistuksen helppoudesta ja kuljettajien kokemattomuudesta.

Progressiivisuus tai degressiivisuus voidaan toteuttaa monella tapaa. Näitä ovat esimerkiksi kaksoishammaspyörä tai epäkeskeinen hammaspyörä. Myös ryntökulmaa muuttamalla saadaan tehtyä pienehköä progressiivisuutta tai degressiivisyyttä hammastankoon.

Lineaarisella hammastangolla pystytään hammastangon ja kääntövarren sijainnilla tekemään renkaiden kääntökulmasta progressiivista tai degressiivista suhteessa hammastangon liikkeeseen. Suurin vaikutus tähän on hammastangon sijainnilla pituussuunnalla, jolloin voidaan kasvattaa raidetangon pituutta ja kulmaa. Kuvassa 5 sininen käyrä on sisäpuolen rengas ja punainen ulkopuolen. Kääntövarren paikka on sijoitettu kääntöakselin ulkopuolelle, jolloin käytetään Ackermann-geometriaa ja hammastankoa pituussuunnassa kääntövarren pisteen takapuolella. Progressiivisuus tässä tapauksessa sisäpuolen renkaalle johtuu kääntövarren liikkuessa kääntövarren pituuden mukaista ympyrää pitkin. Käännettäessä tarpeeksi rengasta on raidetangon ulkopäänpuoleinen piste kauimmaisessa kohdassa kääntövarren ympyrän kehällä. Tämän pisteen jälkeen rengasta käännettäessä lisää, hammastangon liikkeen perusteella rengas alkaa kääntymään progressiivisesti enemmän.

Kuvasta 5 nähdään, että sisäpuolen renkaan kulmakerroin kasvaa kokoajan, joten renkaan käänkökulma kasvaa progressiivisesti. Ulkopuolen renkaalle käy päin vastaisesti, jolloin ulkopuolen renkaan käänkökulma on degressiivinen. Anti-ackermann-geometrialla sisäpuolen renkaan käänkökulma on degressiivinen ja ulkorenkaan progressiivinen suhteessa hammastangon liikkeeseen. Tämänkaltaisella ratkaisulla rengas kääntyy enemmän kuin lineaarisella hammastangolla ja raidetangon kulman ollessa pieni.



Kuva 5. Sisemmän ja ulomman renkaan käänkökulmien ero [deg] suhteessa hammastangon liikkeeseen [mm]

Tässä opinnäytetyössä on päätetty toteuttaa progressiivisuus epäkeskeisellä hammaspyörällä ja sitä mukautuvalla hammastangolla, jolloin renkaiden käänkökulma pysyy alussa pienempänä suhteessa hammastangon liikkeeseen kuin lineaarisen hammastangon tapauksessa.

## 5 Suunnittelu

2016 vuoden Formula Student -kilpa-auton suunnittelu aloitettiin heti kesän lopulla 2015 ja ohjauksen suunnittelu aloitettiin alustan suunnittelun kanssa samoihin aikoihin.

### 5.1 Säännöt

Formula student -sarjan säännöt ohjaukseen ovat melko vähäiset ja selkeät. Ohjauspyörän pitää olla mekaanisesti yhdistetty etupyöriin, joten elektronisesti ohjattu ohjaus ei ole sallittu. Ohjausmekanismeissa pitää olla positiiviset pysäyttäjät (stopparit), joilla ehkäistään ohjauksen lukittuminen missä tahansa ajotilanteessa. Yleensä tämä on toteutettu hammastangon päähän tehdyillä muttereilla, joihin hammastangon liike pysähtyy. Tämän säännön tarkoituksena on myös ehkäistä renkaiden osuminen alustaan tai runkoon. Suurin sallittu välitys ratilla on 7 astetta ja ratin pitää olla kiinni pikakiinnityksellä, jotta sen saa pois nopeasti tarvittaessa. Ratin pitää olla melkein ympyrän tai ovaalinmallinen, mutta h-muotoinen ratti on kielletty. Ratti ei saa myöskään tulla etukaaren ylitse missään tilanteessa. Hammastangon pitää olla mekaanisesti kiinnitetty runkoon. [1, s. 59.]

### 5.2 Ohjausgeometria

Ohjausgeometria määrittelee, kuinka paljon renkaat kääntyvät. Samalla ohjausgeometria vaikuttaa, kuinka paljon sisään- ja ulosjoustossa tulee aurasuutosta, mikä pyritään minimoimaan. Ohjausgeometrian suunnittelussa pitää huomioida alustageometria, joten ohjausgeometria suunnitellaan yhteistyössä alustageometrian kanssa. Ohjauksen jäykkyyteen ja ohjaustuntumaan vaikuttaa casterkulma, a-mitta, etujättö, KPI-kulma jne.

Ohjausgeometrian suunnittelu aloitettiin laskemalla, paljonko ulkorenkään täytyy kääntyä, jotta auto kykenee kääntymään radalla tiukoissa mutkissa. Sääntöjen mukaan tiukin mutka on ns. neulansilmä, jonka ulkohalkaisija on 9 metriä, ja radan leveys on 4,5 metriä. Näin ollen käännöksen sisäsäde on 4,5 metriä.

$$R_r = \frac{l}{\sin \delta_u} + a \quad (1)$$

$R_r$  = Raideympyrän säde [m]

$l$  = Akseliväli [m]

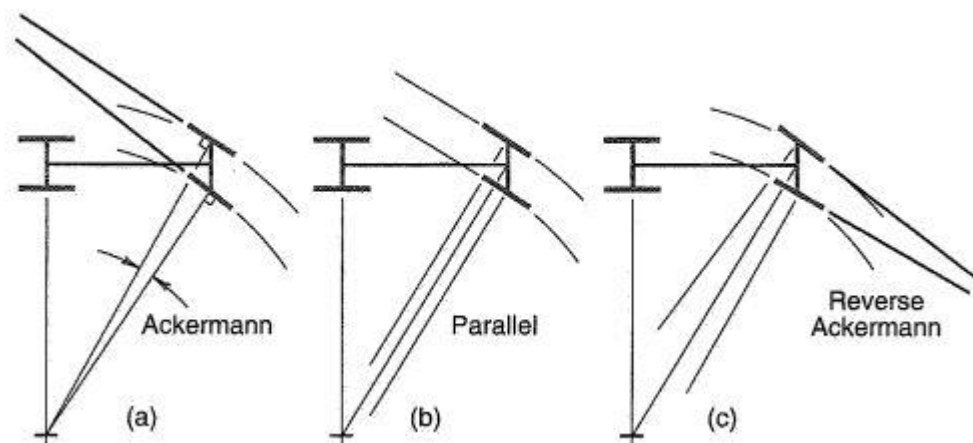
$\delta_u$  = Ulomman renkaan kääntökulma [deg]

$a = \frac{\text{raideleveys} - \text{nivelväli}}{2}$  [m]

Raideympyrän säteeksi saatiin 3,98 m ja ulkorenkaan kääntökulmaa kasvattamalla tai vähentämällä voidaan tehdä testikaudella muutoksia haluttuun suuntaan.

### 5.3 Ackermann

Ackermann-geometrialla tarkoitetaan ohjausgeometriaa, jossa molemmat pyörät kääntyvät ilman renkaan sortamista. Tämä toteutuu, mikäli kummankin renkaan kohtisuorat leikkaavat kaartokeskiössä taka-akselin kohdalla. Tämä onnistuu vain, mikäli sisempi eturenkas kääntyy ulompaa enemmän (kuva 6).



Kuva 6. Vasen kuva Ackermann-geometria, keskimäinen parallel-geometria ja oikean puoleinen anti-Ackermann-geometria [4, s. 714]

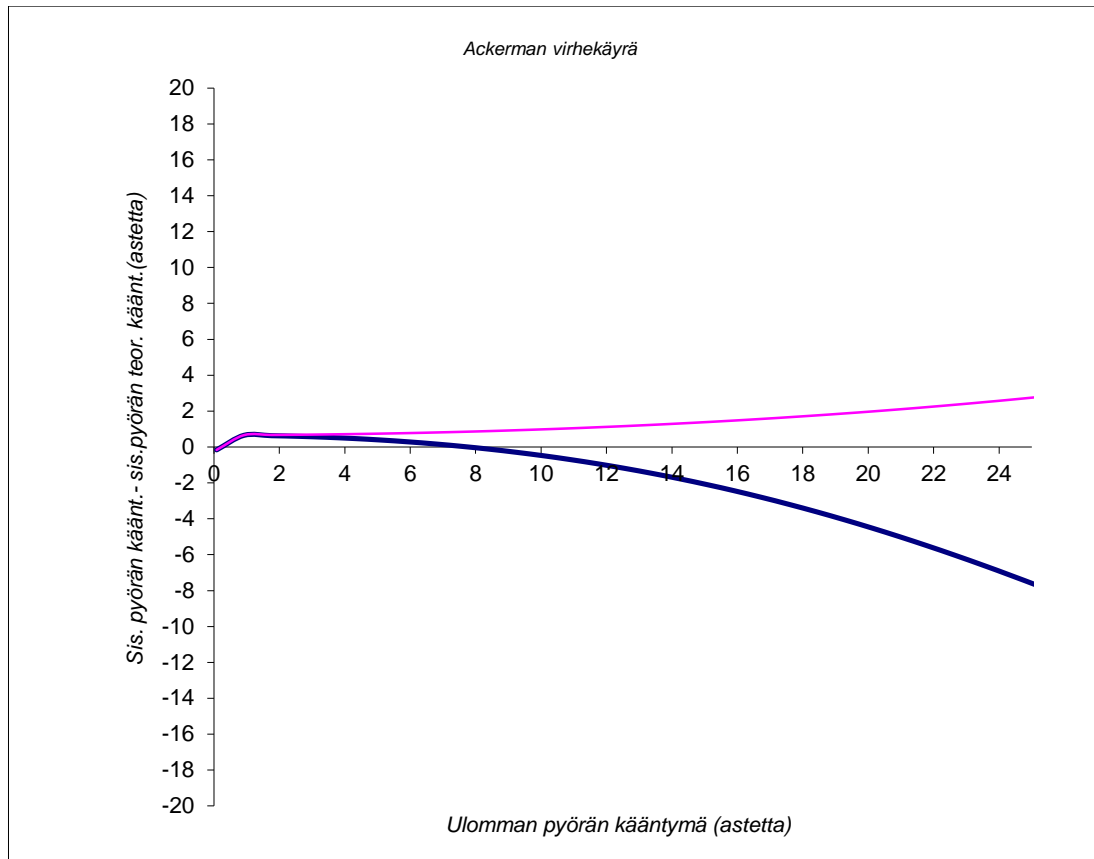
Mikäli ulompi rengas kääntyy enemmän kuin sisäpuolen rengas, on kyseessä reverse Ackermann -geometria tai anti-Ackermann-geometria. Tällöin ulompi rengas kääntyy suhteessa enemmän ackermann ehtoon. Kummankin eturenkaan kääntyessä saman verran on kyseessä tasaohjaus, josta käytetään myös nimitystä parallel-geometria.

Ackermann-ohjausta kuvataan yleensä prosentteilla. 0 prosenttia ackermannia tarkoittaa, että kumpikin renkaista kääntyy saman verran eli niin sanottu tasaohjaus. Mikäli prosentti on yli 100 niin silloin puhutaan pro-Ackermannista. Ohjauksen geometria totelee harvoin vain tiettyä geometriaa johtuen ohjauksen nivelistöstä. Tämän takia ohjaukselle tehdään Ackermann-virheikäyrä, jossa esitetään renkaiden kääntymien ero Ackermann-ehdon mukaiseen renkaiden kääntymiseen eri kääntökulmilla.

Ohjausgeometrian valinta riippuu hyvin paljon radan luonteesta sekä siitä sortokulmalla saavutetaan maksimisivuttaiskiihtyvyyttä. Mikäli radalla on paljon nopeita loivia mutkia, on tärkeää saada hyödynnettyä renkaan ominaisuudet. Nopeissa mutkissa tapahtuu paljon painonsiirtoa ulommalle renkaalle.. Näin ollen ulompi rengas on määräävämpi, jolloin Ackermann-ohjausgeometria ei tue rengasdataa ja olisi parempi käyttää tasaohjausta tai anti-Ackermann-geometriaa.

Hitaimmilla radoilla ei tapahdu paljoakaan painonsiirtoa, joten Ackermann-ehdon mukainen ohjausgeometria voisi olla parempi vaihtoehto. Mutkaan kääntäessä ei vielä tapahdu painonsiirtoa kovinkaan paljon, joten pro-Ackermannin käyttö voisi helpottaa mutkaan kääntöä, jolloin sisäpuolen renkaalla on vielä painoa.

Ackermann-ohjausgeometrian valintaan käytimme apuna Olavi Laineen kirjasta saatuja kaavoja (kuva 7), joita oli käytetty aiempinakin vuosina [5, s. 154–155].



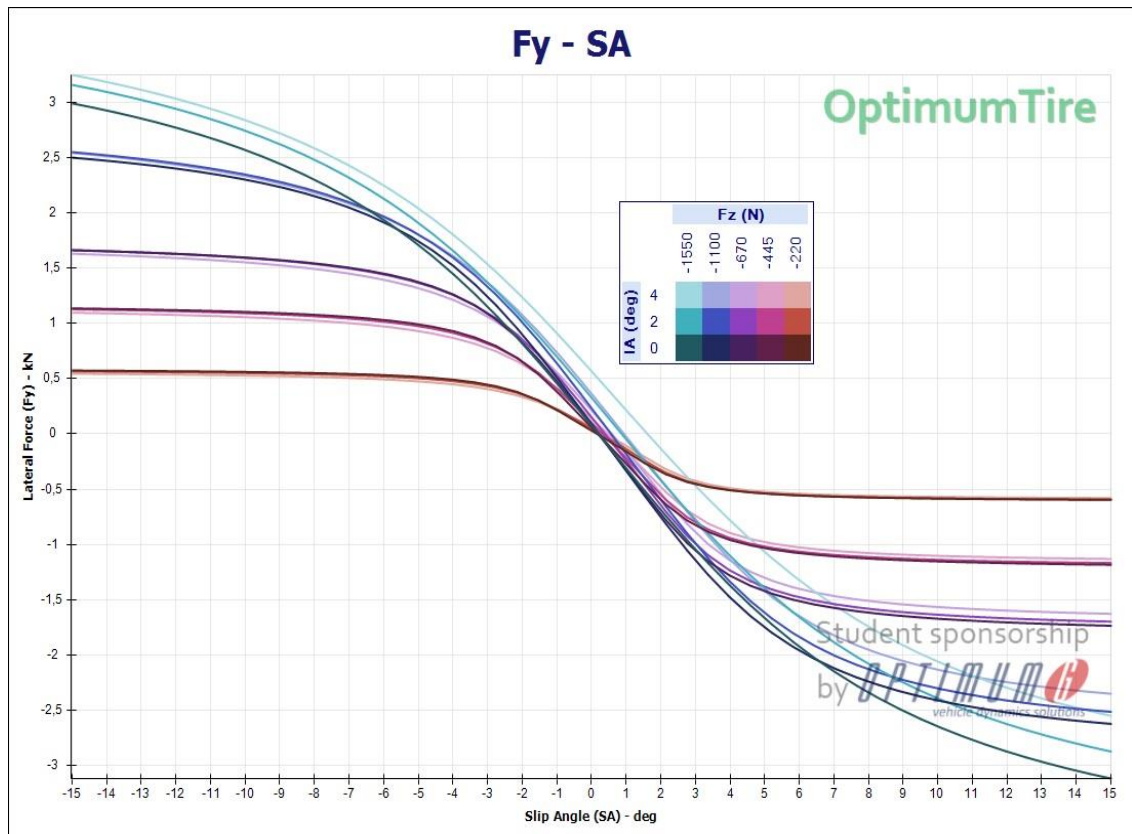
Kuva 7. Ackermann-virhekäyrä

Kuvassa 7 on tulevaan autoon suunniteltu ackerman virhekäyrä. Punainen käyrä tarkoittaa sisemmän ja ulomman renkaan kääntökulmien eroa. Sininen käyrä kuvaa sisemmän pyörän virhettä teoreettisesti oikeaan Ackermann-ehtoon. Kuvaajan mukaan ohjaus seuraisi pienillä renkaan kääntökulmilla pienellä virheellä, mutta suurilla kääntökulmilla virhe kasvaa eksponentiaalisesti. Kyseinen ehto toteutuu, kun ulkorengasta on käännetty 8 astetta.

#### 5.4 Rengasdata

Tärkeä osa ohjausgeometrian ja alustageometrian suunnittelua on rengasdatan analysointi. HPF016-kilpa-autossa tullaan käyttämään Hoosier LC0 6.0/18.0-10 -renkaita. Tässä insinööriyössä ei käsitellä, miksi kyseiseen renkaaseen päädyttiin. Rengasdata on ostettu Formula SAE Tire Test Consortiumilta (FSAE TTC) ja data on saatu käyttöön ja käsitelty Optimum G:n OptimumTire -ohjelmalla.

Kuvassa 8 on esitetty sivuttaisvoima ja sortokulma eri camber kulmilla ja pystykuormilla. Kuvasta nähdään, että camberin suuruus ei vaikuta juurikaan renkaan sivuvoiman tuottoon, mikäli camber-kulmaa on olemassa. HPF016-kilpa-auton painonsiirrossa ulkorengaalla on painoa noin 100 kiloa riippuen sivuttaiskiihtyvyydestä. Kuvaajasta nähdään, että maksimisivuttaisvoima kasvaa sortokulman kasvaessa tiettyyn pisteeseen asti.



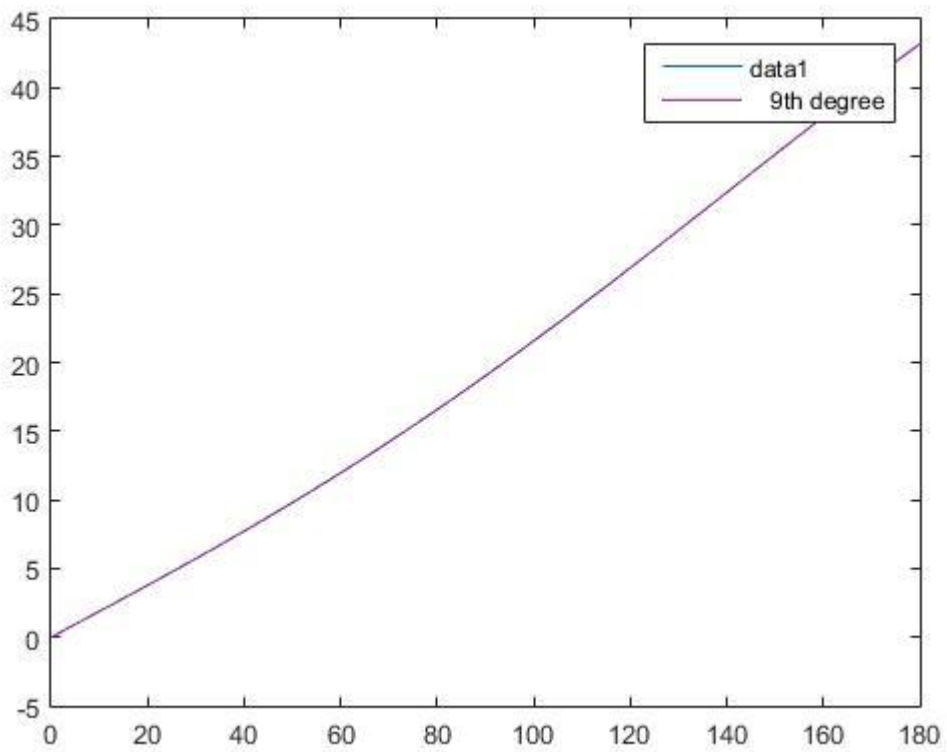
Kuva 8. Renkaan sivuttaiskiihtyvyys sortokulman funktiona

Progressiivisen ohjauksen tarkoituksena on pystyä pitämään rengas oikealla sortokulmalla, jotta renkaasta saadaan irti mahdollisimman paljon. Mikäli ohjaus on liian nopea nopeissa mutkissa, on mahdollista, että kuljettaja kääntää liikaa tai liian vähän ohjauspyörää ja näin menettää parhaimman pidon nopeissa mutkissa. Progressiivinen ohjaus tuo kuljettajalle paremman tarkkuuden nopeisiin mutkiin, koska hammastanko liikkuu vähemmän kuin suurilla ohjauskulmilla. Vaikka kuljettaja joutuisi kääntämään ohjauspyörää mutkan keskellä ja hakemaan renkaasta enemmän irti, tämä on hitaammalla ohjauksella tarkempaa kuin nopeammalla. Hitaissa mutkissa painonsiirtoa ei tapahdu paljoakaan, joten sortokulmatkin ovat pienempiä.

Maksimisivuttaisvoiman saavuttaminen tapahtuu suurella sortokulman alueella. Formula Student -kilparadat ovat nopeudeltaan keskiarvallisesti 40–50 km/h nopeuksisia ja huippunopeudet ovat noin 100 km/h.

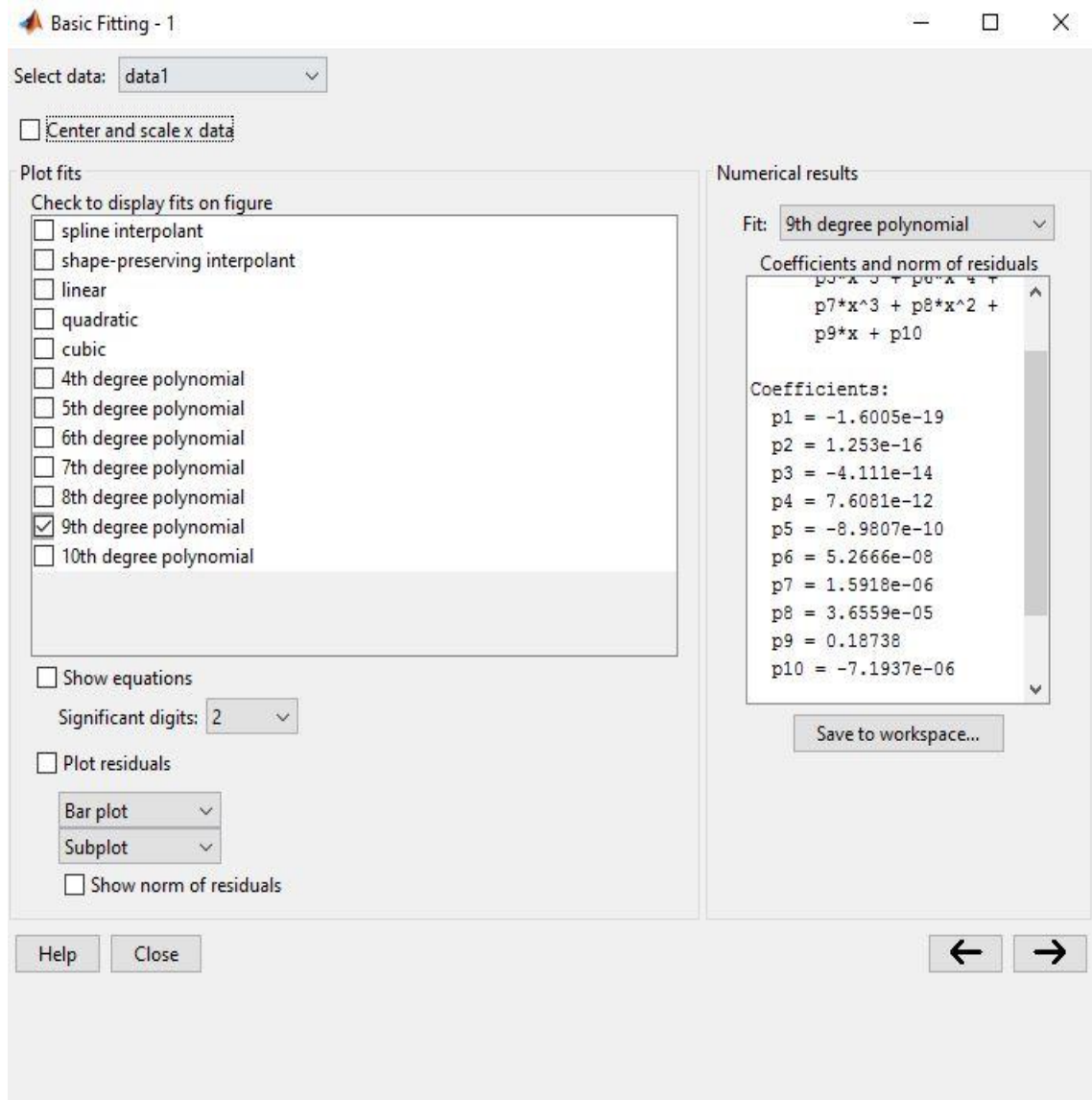
### 5.5 Progressiivinen hammastanko

Progressiivisen ohjauksen suunnittelu aloitettiin käyttämällä samaa hammasmoduulia kuin aiemmassakin autossa, moduulin ollessa 1,5. Hammaspyörän jakohalkaisija on 25,5 mm. Jakohalkaisija tarkoittaa halkaisijaa, jolla hammaspyörä hammas koskettaa hammastangon jakosuoraa ja vierii sitä pitkin. Näin ollen pystyttiin käyttämään aiemman auton ohjausvaihteen osia progressiivisen hammastangon testaamiseen. Näiden tietojen avulla pystyimme käyttämään Catia V5R20 -ohjelman 2D-piirroksia. 2D-piirroksella saatiin selvitettyä, kuinka paljon epäkeskeinen hammaspyörä leikkaa hammastangon jakohalkaisijan tietyllä hammaspyörän kulmalla. Epäkeskeinen hammaspyörän jakohalkaisija muuttuu jokaisella hammaspyörän kulmalla, joten näiden jakohalkaisijoiden pituuksilla pystymme laskemaan, paljonko hammastanko liikkuu. Kuvassa 9 pystyakselilla on hammastangon liike millimetreissä ja vaakarivillä hammaspyörän kulma asteina.



Kuva 9. Pystyakselilla hammastangon liike [mm] ja vaaka-akselilla hammaspyörän kulma [deg]

Näiden perusteella voitiin Mathworksin Matlabilla tehdä aiemmista pisteistä käyrä (kuva 9) ja käyrästä saatiin tehtyä Matlabilla yhtälön käyrästä. Alla olevassa kuvassa on käyrälle tehty yhtälö Matlabin basic fitting -työkalulla (kuva 10).



Kuva 10. Matlabin basic fitting -työkalu

Yhtälön teon jälkeen voitiin interpoloida kaikki pisteet missä kohdassa tahansa käyrää. Yhtälö tuotiin Exceeliin ja laskettiin kaikki pisteet 0,5 asteen välein. Saaduilla pisteillä toimme macron kanssa kaikki pisteet Excelistä Catiaan. Kaikkien pisteiden kautta tehtiin käyrä, joka vastaa hammastangon jakohalkaisijaa. Käyrästä tehtiin offset-työkalulla kaksi muuta viivaa, jotta hampaan profiili saadaan oikeanlaiseksi (kuva 11).



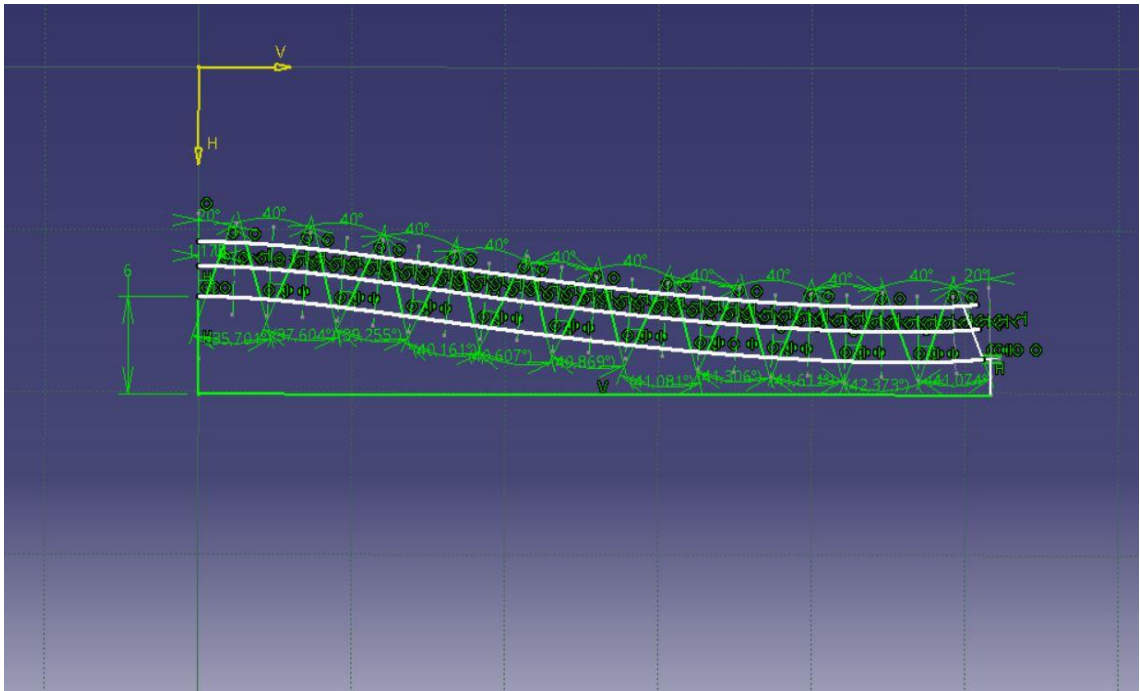
Kuva 11. Hammasprofiilin käyrät

Hampaiden sovittaminen käyrälle (kuva 12) tuotti hieman ongelmia johtuen hammastangon liikkeestä suhteessa hammaspyörän käänkökulmaan. Normaalin hammastangon hampaan väli toiseen hampaaseen on

$$\frac{m \cdot \pi}{2} = 2.35619 \approx 2,3256 \quad (3)$$

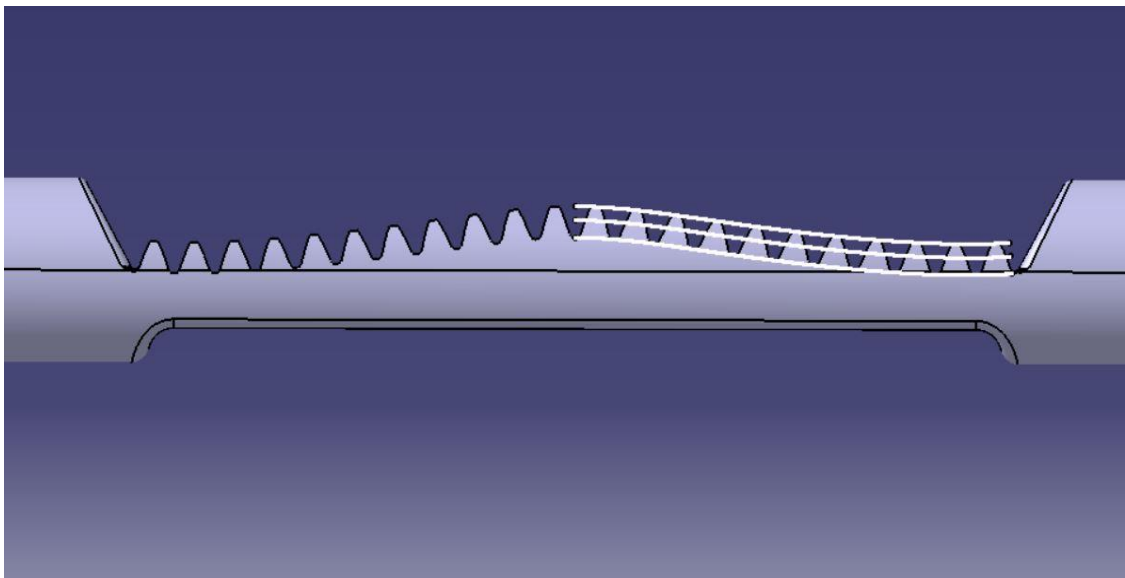
m = Moduuli

Progressiivisen hammastangon hammasväliksi jouduimme tekemään kompromissin ja lyhentämään tai pidentämään sitä riippuen hammastangon liikkeestä ja hammaspyörän kulmasta.



Kuva 12. Hammasprofiilin mallinnus

Hammastangon hampaiden mallinnuksen jälkeen pystyttiin Catia 3D -ohjelmassa tutkimaan, toimiiko systeemi. Tietäen hammastangon liikkeen ja hammaspyörän kulman saatiin tarkistettua hammaspyörän eteneminen hammastangolla. Koska hampaat seuraavat käyriä pitkin, ei hammasprofiili voi olla suorahampainen vaan hampaan kärkeen joudutaan tekemään loiva pyöristys, jotta hammaspyörä pystyy liikkumaan sulavasti hammastankoa pitkin.



Kuva 13. Valmis hammastanko Catia 3D -ohjelmassa

## 5.6 Ohjausvaihde

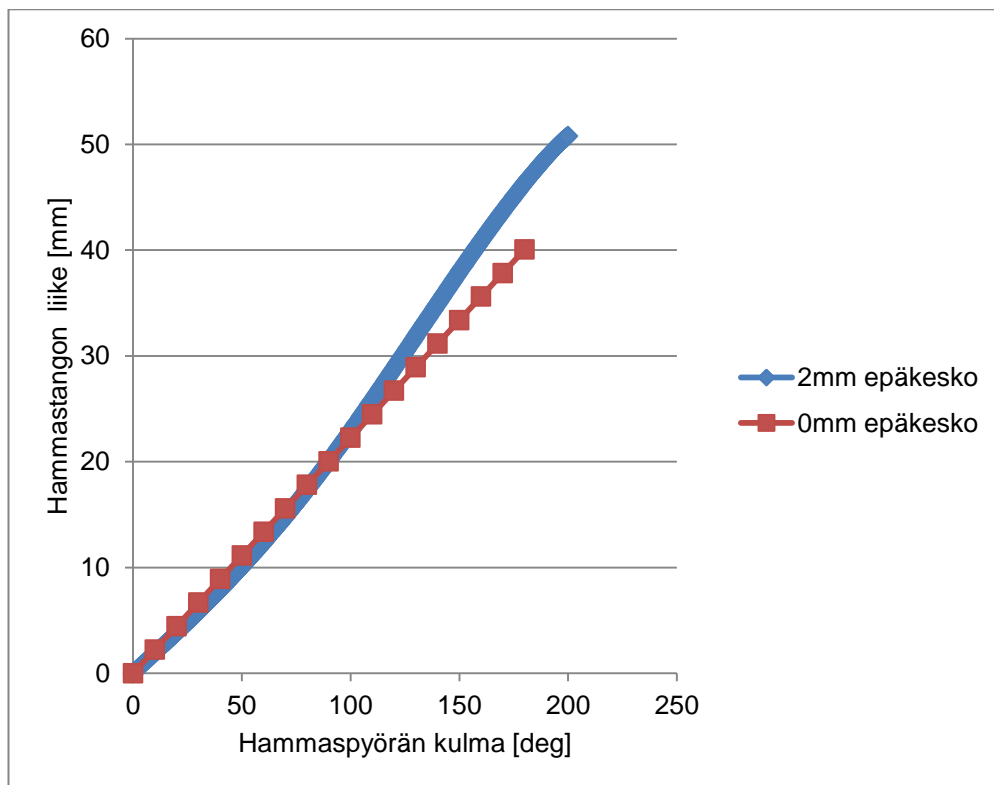
Ohjausvaihteen suunnittelu aloitettiin tekemällä yhteistyötä alustageometrian kanssa. Ensimmäiseksi piti päättää, mihin paikkaan ohjausvaihde sijoitetaan etuakselilla. Ohjausvaihteen paikkaan vaikuttavat tietyt asiat, joita pitää huomioida. Ohjausvaihde voidaan sijoittaa joko etuakselin takapuolelle vai etupuolelle. Kuvassa 3 on näytetty ohjausvaihteelle ihanteelliset paikat, jotka ovat etuakselin etupuolella renkaan keskilinjan alapuolella ja etuakselin takapuolella renkaan keskilinjan yläpuolella. Nämä siitä syystä, että sivuttaisvoiman vaikutus renkaaseen voi aiheuttaa erilaisen sivuttaissiirtymän esimerkiksi tukivarren pallonivelen ja raidetangon nivelen kanssa. Sivuttaisvoima voi aiheuttaa renkaiden kääntymistä. Tämän takia on suotuisampaa, että sivuttaisvoima aiheuttaa haritusta kuin aurausta. [4, s. 627.]

Formula Student -kilpasarjan säännöt määrittelevät, että käytännössä renkaan keskipisteen yläpuolelle ei voi laittaa ohjausvaihdetta missään tilanteessa, joten etuohjaus oli paras vaihtoehto.

Aiemmin käytiin läpi progressiivisen hammastangon suunnittelua, joten tässä luvussa käydään läpi ohjausvaihteen suunnittelua progressiiviselle ja lineaariselle hammastangolle. HPF016-kilpa-auton ohjaukseen suunniteltiin mahdollisuus testata kumpaakin hammastankoa testikaudella. Testikaudella on tarkoitus päästä koikeilemaan progressiivista ohjausta ja sen vaikutusta ajettavuuteen ja auton käyttöön.

Ohjausvaihde koostuu hammastangosta ja hammaspyörästä. Ohjausvaihteen paikan valinnan jälkeen tehtiin Catia 3D -ohjelmalla malli, jonka avulla pystyttiin määrittämään kääntövarren maksimi pituus. Autossa käytetään 10-tuumaisia renkaita, joten aiempien vuosien kokemuksen perusteella kääntövarren pituus ei voi kasvaa liikaa. Hammastangon maksimi liikematkaksi saatiin 35 mm pienellä varmuuskertoimella ja kääntövarren pituudeksi n. 90 mm.

Ongelmaksi muodostui päättää, kuinka paljon progressiivisuutta halutaan, koska tiimillä ei ollut aiempaa kokemusta asiasta. Ensimmäisen progressiivisen hammastangon toimivuus haluttiin varmistua, joten päätettiin, että hammaspyörän kulman tulee olla suurempi kuin 90 astetta. Progressiivisuus on hammaspyörän kulmaan 90 astetta asti hitaampi kuin normaalilla hammastangolla. 90 asteen jälkeen progressiivinen hammastangon liike muuttuu nopeammaksi. Hammaspyörän kulman ollessa 90 astetta on progressiivisen ja normaalin hammastangon liike samanpituinen eli noin 20 millimetriä. Alla olevassa kuvassa 13 on punainen viiva on normaalin hammastangon liike suhteessa hammaspyörän kulmaan ja sininen epäkeskeisellä hammaspyörällä.



Kuva 14. Hammastankojen liikkeet

Hammastangon liikkeeksi päätettiin käyttää maksimiliikettä, jota voidaan käyttää ilman raidetangon osumista alustaan tai runkoon. Alapuolella taulukossa 1 on yhden millimetrin välein epäkeskeisyydellä saadut hammaspyörän kulmat asetetulle maksimi hammastangon liikkeelle.

Taulukko 1. Eri hammaspyörän epäkeskeisyydellä saadut hammaspyörän kulma ja hammastangon liike

Epäkeskeisyys	Hammaspyörän kulma (deg)	Hammastangon liike (mm)
0 mm	157.5	≈35
1 mm	147.5	≈35
2 mm	140	≈35
3 mm	135	≈35
4 mm	130.5	≈35
5 mm	127	≈35

Formulaan päätettiin ensimmäiseksi progressiiviseksi hammastangoksi käyttää 1 mm:n epäkeskeistä hammaspyörää, joten hammaspyörän kääntökulmaksi tuli 147,5 astetta suuntaansa.

## 5.7 Lineaarinen hammastanko

Lineaarisen hammastangon suunnittelussa päätettiin käyttää samaa hampaan moduulia ja jakohalkaisijaa, koska silloin voitiin käyttää muita samoja ohjauksen komponentteja. Tällöin vaihtamalla ainoastaan hammastanko ja hammaspyörä voidaan muuttaa ohjaus progressiiviseksi. Lineaarisen hammastangon tapauksessa haluttiin steer ratio 5:1, koska aiempien vuosien kokemuksella tämä on todettu hyväksi.

Taulukkoon 3 on valittu SFS 3093:n mukaisen standardin moduuleja, jotka ovat esitetty taulukossa 2. Standardin mukaan sarjan 1 moduuleja tulisi ensisijaisesti käyttää.

Taulukko 2. SFS 3093:n mukaiset moduulit [6, s. 496]

Moduuli											
<b>Sarja 1</b>	0,5	0,6	0,8	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5
<b>Sarja 2</b>	0,55	0,7	0,9	1,125	1,375	1,75	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5
<b>Sarja 1</b>	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	-
<b>Sarja 2</b>	7	9	11	14	18	22	28	36	45	-	-

Taulukossa 3 on sarakkena moduuli ja rivillä eri hammasluku. Näiden avulla pystyttiin määrittämään jakohalkaisijan hammaspyörälle. Jakohalkaisijan ja halutun hammaspyörän kulman avulla pystyttiin määrittämään hammastangon liikkuman matkan.

Taulukko 3. Jakohalkaisijan laskenta.

	1	1.25	1.5	2
10	10	12.5	15	20
11	11	13.75	16.5	22
12	12	15	18	24
13	13	16.25	19.5	26
14	14	17.5	21	28
15	15	18.75	22.5	30
16	16	20	24	32
17	17	21.25	25.5	34
18	18	22.5	27	36
19	19	23.75	28.5	38
20	20	25	30	40

Alla olevassa taulukossa 4 on laskettu hammastangon liike tietyllä hammaspyörän kulmalla. Sarakkeella on hammasluku ja rivillä on hampaan moduuli. Ohjauspyörästä haluttiin pitää kiinni kahdella kädellä jokaisella radan osuudella ja ajotilantessa. Rungosta tehtiin malli, johon integroitiin tärkeimmät osat ja näin maksimikulmaksi tuli 300 astetta. Kuitenkaan ei haluttu kääntää rattia noin paljoa, joten valittiin hammaspyörän kääntökulmaksi 270 astetta. Kuitenkin ohjauspyörän kulmaksi haluttiin 250 astetta, joten tämä pystyttiin toteuttamaan kulmavaihteen välityksen kanssa. Aiemmin todetun mukaan HPF016-kilpa-autossa pystytään käyttämään kumpaakin hammastankoa, joten tämän takia tehtiin kompromissejä ja kummallakin tulee ohjaus kääntymään eri määrän.

Taulukko 4. Hammastangon liikkeen laskenta

	1	1.25	1.5	2
10	23.56194	29.45243	35.34292	47.12389
11	25.91814	32.39767	38.87721	51.83628
12	28.27433	35.34292	42.4115	56.54867
13	30.63053	38.28816	45.94579	61.26106
14	32.98672	41.2334	49.48008	65.97345
15	35.34292	44.17865	53.01438	70.68583
16	37.69911	47.12389	56.54867	75.39822
17	40.05531	50.06913	60.08296	80.11061
18	42.4115	53.01438	63.61725	84.823
19	44.7677	55.95962	67.15154	89.53539
20	47.12389	58.90486	70.68583	94.24778

HPF016-kilpa-autoon suunniteltiin ohjaukseen suorahampainen hammastanko ja hammaspyörä. Koska normaalista hammastangosta haluttiin tehdä yhteensopiva, käytetään samaa hammasmoduulia ja hammasmäärää kuin progressiivisessä hammastangossa. Samalla hammasmäärällä jakohalkaisija pysyy samana. Näin ollen 1,5-moduulilla saamme taulukon mukaan 17 hampaalla noin 60 mm liikettä hammastangolle.

Alapuolella laskettu samat arvot kuin taulukossa.

Moduuli = 1,5

Z = 17

Hammaspyörän kääntökulma = 270 deg

Muutetaan asteet radiaaneiksi kaavassa 4.

$$270 \text{ astetta} = \frac{270 * \pi}{180} = 4,712389 \text{ rad} \quad (4)$$

Lasketaan jakohalkaisija kaavassa 5.

$$D = m * z = 1.5 * 17 = 25,5 \text{ mm} \quad (5)$$

$$R = D / 2 = 25,5\text{mm} / 2 = 12,75 \text{ mm} \quad (6)$$

Hammastangon siirtymä:

$$s = \frac{r}{\text{Ohjauskulma}} = \frac{12,75\text{mm}}{270 \text{ astetta}} = 60,08296\text{mm} \quad (7)$$

## 5.8 Hammaskosketuksen säätö

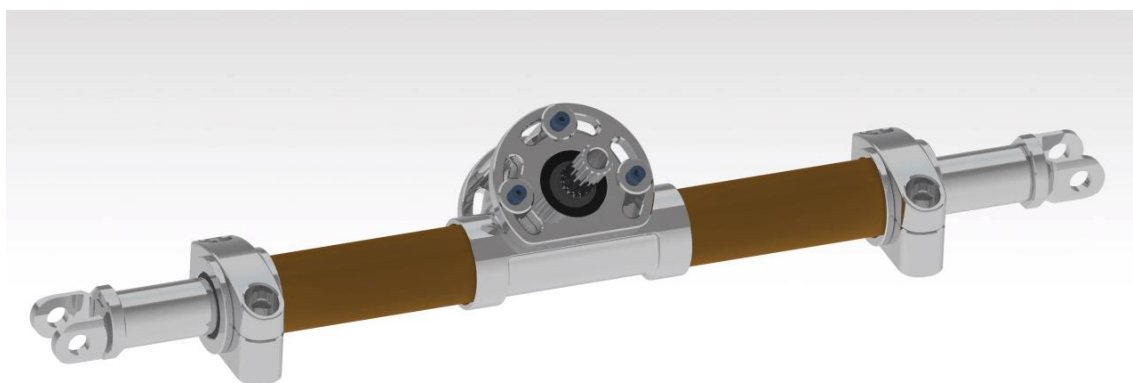
Ohjausvaihteeseen on tärkeää saada toteutettua hammaskosketukselle säätömahdollisuus. Ohjausvaihteessa voi olla koneistuksista johtuvaa väljyyttä, tai hampaat voivat kulua käytön jäljiltä. Erilaisia säätömahdollisuuksia on esimerkiksi epäkeskeisyydellä tai shimmissäädöllä toteutetut systeemit. HPF016-kilpa-auton hammaskosketuksen säätö on haluttu tehdä portaattomasti.

Hammaskosketuksen säätö on toteutettu epäkeskeisillä laipoilla ohjausvaihteen molemmin puolin (kuva 15). Epäkeskeisyyttä laipoissa on 0,5 mm, jolla saadaan tarpeeksi säätöä, jotta hammaskosketuksesta saadaan kulumasta tai valmistuksesta tullut välys minioitua.

Laipasta johtuva 0,5 mm epäkeskeisyyden avulla pystytään säätämään hammaspyörää teoriassa alaspäin 0,5 mm. Tähän jouduttiin tekemään rajoitus, koska osat haluttiin pitää mahdollisimman pieninä ja kevyinä. Rajoitus asetettiin mahdollisimman suureksi ja näin pystytään laippoja kääntämään 31 astetta suuntaansa. Joten hammaspyörää pystytään liikuttamaan alaspäin:

$$\sin(31\text{deg}) * 0,5\text{mm} = 0.257519 \text{ mm} \approx 0,26 \text{ mm} \quad (8)$$

Tämä on riittävä säätömahdollisuus, koska valmistuksesta johtuvaa virhettä ei uskottu syntyvän paljoakaan enemmän. Oletettiin myös, että hampaiden kulumisesta johtuvaa väljystä ei synny noin paljon ajokilometreihin nähden. Mikäli kuitenkin määritetty säätömahdollisuus ei riitä, niin uusien epäkeskeisien laippojen koneistaminen onnistuu muutamassa tunnissa.



Kuva 15. Ohjausvaihteen kokoonpano

## 5.9 Kulmavaihde

2016 vuoden auton ohjaus on toteutettu progressiivisella hammastangolla ja lineaarisella hammastangolla kuten aiemmin todettiin. Autoteollisuudessa käytetään paljon niveliä ohjausvaihteen ja ratin välissä. Tällaisella systeemillä ratti kääntyy saman verran kuin ohjausvaihteen hammaspyörä. HPF016-kilpa-autoon on suunniteltu vaihde, joka koostuu kahdesta kartiohammaspyörästä. Kulmavaihteen avulla pystyttiin päättämään ohjausvaihteen jälkeen, paljonko ohjauksen välityssuhteeksi (steer ratio) halutaan.

Normaalin hammastangon liikematka (s) on 60 mm ja hammaspyörän säde (r) on 12,75 mm. Hammaspyörän kääntökulmaksi tulee

$$\frac{s}{r} = 4,706 \text{ rad} \approx 270 \text{ deg} \quad (9)$$

Progressiivisen hammastangon siirtymä (s) on 70 mm, jolloin vielä saadaan kääntövarsi mahtumaan vanteen sisälle ja saamme halutun progressiivisuuden ohjaukseen. Hammaspyörän kääntökulma on laskettu aiemmin esitetyn yhtälön perusteella, jolloin 1 mm:n epäkeskeisellä hammaspyörällä kääntökulmaksi tulee 295 astetta.

HPF016-kilpa-autoon suunniteltiin ohjauspyörän kääntökulma niin, että jokaisessa ohjauspyörän asennossa pystytään pitämään ratista kiinni kahdella kädellä. Kuitenkin kääntökulmaa haluttiin tarpeeksi, jotta kuljettaja kykenee ajamaan oikealla sortokulmalla. Oletettiin aiempien vuosien kokemuksen mukaan, että jos rattia kääntää vähemmän kuin 200 astetta, on ohjauksen tarkkuus kaukana halutusta tarkkuudesta. Päätettiin määrittää sen suunnilleen 240 – 270 asteeseen. Kulmavaihteen kartiohammaspyöräparilla määritettiin halutun välityksen, jotta päästään haluttuun ratin kääntökulmaan. Tässä tapauksessa joudutaan tekemään kompromissi, koska hammastangot liikkuvat eri siirtymän ja samalla hammaspyörrien kääntökulmat eroavat toisistaan.

Kulmavaihteeseen toteutettiin ylennysvaihteiston, jolloin välityssuhde on alle yksi. Tämä muuttaa akselin pyörimisnopeutta suuremmaksi ja samalla pienentää vääntömomenttia. Välityksen avulla ratin kääntökulmaa saadaan pienennettyä noin 250 asteeseen.

Hampaita on käytävässä kartiohammaspyörässä ( $Z_1$ ) 18 ja käytettävässä ( $Z_2$ ) 16, jolloin välityssuhteeksi saadaan

$$n = \frac{Z_2}{Z_1} = 0,88889 \approx 0,89 \quad (10)$$

Välityksen avulla saadaan laskettua paljonko ohjauspyörän kääntökulma on.

Lineaaraisella hammastangolla ohjauspyörä kääntyy

$$0,88889 * 269,6 \text{ deg} = 239.555855 \text{ deg} \approx 239,6 \text{ deg} \quad (11)$$

Eli ohjauspyörä kääntyy suuntaansa noin 120 astetta.

Progressiivinella hammastangolla ohjauspyörä kääntyy

$$0,88889 * 295 \text{ deg} = 262.22255 \text{ deg} \approx 262,2 \text{ deg} \quad (11)$$

Eli ohjauspyörä kääntyy suuntaansa noin 131 astetta.

#### 5.10 Steer ratio ja c-factor

HPF016-kilpa-autossa tullaan testaamaan progressiivinen hammastanko sekä lineaarinen hammastanko. Välitykset on laskettu kummallekin vaihtoehdolle.

Ohjauksen välityssuhde (Steer ratio) määritetään ohjauspyörän kulman ja renkaiden kulman keskiarvon avulla. HPF016-kilpa-auton ohjauspyörän kulma on 239,6 astetta lineaarisella hammastangolla, ja renkaat kääntyvät keskimäärin 25 astetta, joten näin ollen

$$\text{Steer ratio} = \frac{120,deg}{25 \text{ deg}} = 4,8:1 \quad (12)$$

C-factor tarkoittaa paljonko hammastanko liikkuu sivuttaissuunnassa, kun hammaspyörää käännetään 360 astetta eli yhden täyden kierroksen. HPF016-autoon suunniteltiin hammastangon liikkeeksi 60 mm ja hammaspyörän kääntökulmaksi 270 astetta. Näin ollen

$$\text{C-factor} = \frac{60 \text{ mm} \cdot 360 \text{ deg}}{270 \text{ deg}} = 80 \text{ mm} \quad (13)$$

Progressiivisen ohjauksen välityssuhde lasketaan renkaiden maksimikäntökulmalla

$$\text{Steer ratio} = \frac{131,1 \text{ deg}}{25 \text{ deg}} = 5,24:1 \quad (12)$$

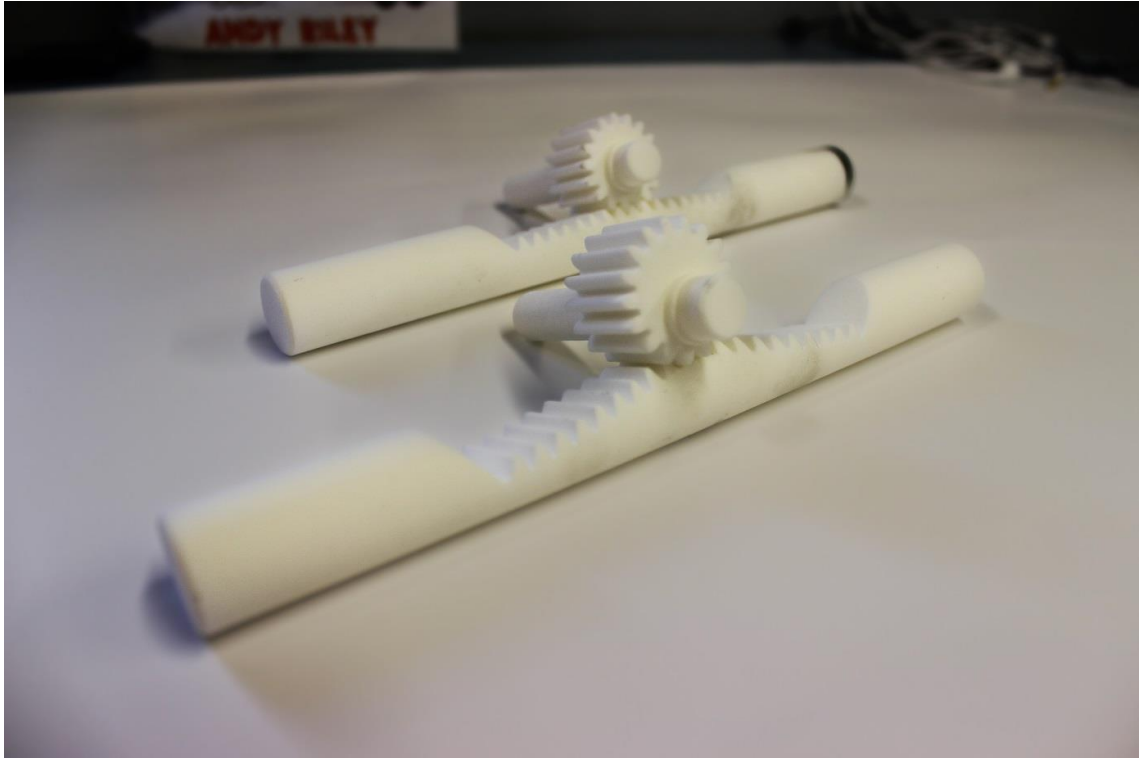
Progressiivisen hammastangon liike on 70 mm ja hammaspyörä kääntyy 295 astetta. Näin ollen

$$\text{C-factor} = \frac{70 \text{ mm} \cdot 360 \text{ deg}}{295 \text{ deg}} = 85,4 \text{ mm} \quad (13)$$

## 5.11 Prototyyppi

Ennen kuin progressiivista hammastankoa alettiin valmistamaan alumiinista, teetettiin prototyyppi. Prototyyppi haluttiin valmistaa 3D-tulostamalla jo aikaisessa vaiheessa, jotta pystyttiin testaamaan progressiivista hammastankoa käytännössä. Prototyyppijä tilattiin muutamalla eri epäkeskeisyydellä (kuva 16). 3D-tulostus valittiin, koska se oli nopea ja helppo tapa tehdä prototyyppijä verrattuna koneistamiseen.

Metropolia Motorsportilla on sponsorointisopimus Proto Labs -yrityksen kanssa, joka teettää muun muassa 3D-tulostuksia sekä erilaisia valuosia. Proto Lab tulosti prototyypit, joita pystyi testaamaan vanhan auton HPF015 ohjauksen osissa. Näin ollen pystyttiin varmistamaan ohjauksen toimivuudesta ilman, että olisi tarvinnut tehdä kaikkia osia valmiiksi asti. Materiaalina käytettiin PA2200-muovia (liite 1). PA2200:sta saadaan tulostettua valmiiksi asti tarkkoja osia, joten kyseinen materiaali sopi todella hyvin prototyypin tekemiseen. Materiaali kestää hyvin hammastangon testaamisen ilman, että se rikkoutuu.



Kuva 16. Progressiivisen hammastangon prototyyppi

## 6 Valmistus

Kaikki koneistettavat osat koneistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun koneistuslaboratoriossa. Hammaspyörän ja hammastangon hampaat on lankasahannut Metropolia Motorsportin yhteistyökumppani Seger Automation Oy. Valmistin osat itse lukuun ottamatta kulmavaihteen kuoren avarruksia, jotka teki Tatu Makkonen HAAS UMC-750 -koneistuskeskuksella. Itselläni ei ollut aiempaa kokemusta koneistamisesta ennen kuin liityin Metropolia Motorsport -tiin. Ohjauksen osien suunnittelussa on otettu huomioon koneistettavuus, jotta ne pystytään valmistamaan Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa.

## 6.1 Sorvaus ja jyrshintä

Sorvattavat osat valmistettiin Mazak Super Quick Turn 10M -koneella, johon työstöradat syötettiin Catia 3D -ohjelmalla tehtyjen työpiirustusten mittojen perusteella. Manuaalisorviakin käytettiin tarvittaessa, mikäli se oli parempi vaihtoehto. Kaikki sorvatut osat ovat tehty 7075-alumiinista, joka tulee Metropolia Motorsportin yhteistyökumppanilta Alumeco Finland Oy:lta. 7075-alumiinilla on erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet ja samalla kulutuskestävyys on hyvä.

Jyrsinnät suoritettiin konelaboratorion Quaser MV154PL -työstökeskuksella, johon työstöradat tehtiin Mastercam-ohjelmalla suoraan 3D-malleista. Samoin kuin sorvattavat osat myös jyrsityt osat ovat tehty 7075-alumiinista. Jyrsintöjä häiritsi Quaser MV154PL -työstökeskuksen neljännen akselin toimimattomuus, joten manuaalijyrsimellä tehtiin urituksia ohjauksen komponentteihin.

## 6.2 Lankasahaus

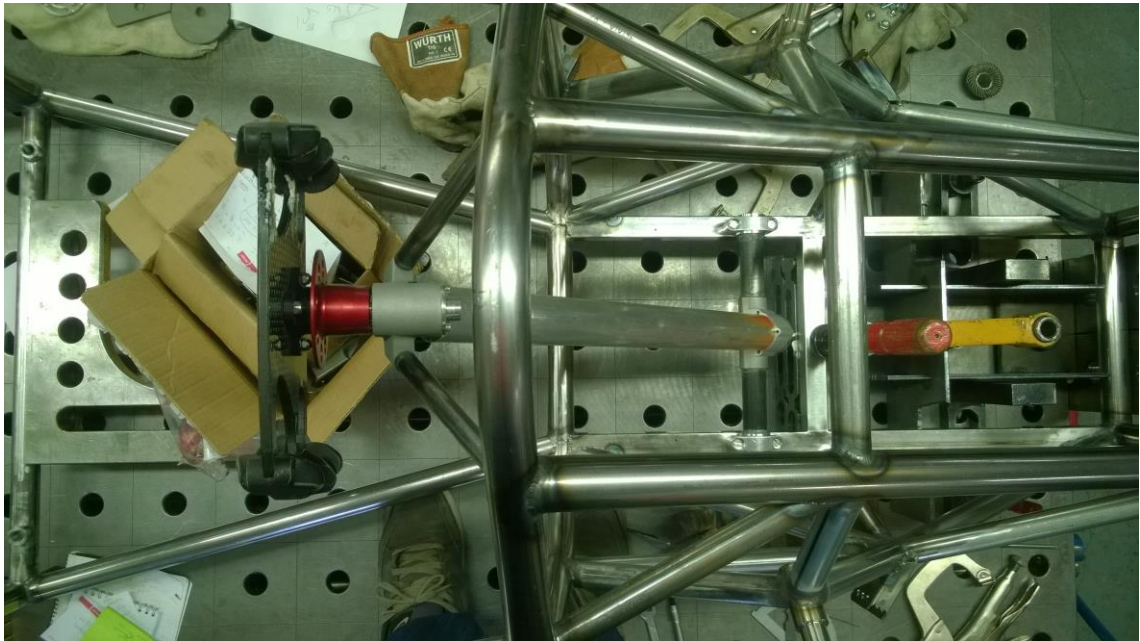
Hampaiden koneistusta mietittiin tehtäväksi itse jyrsimällä, mutta aiempien vuosien kokemuksen perusteella lankasahaus oli parempi vaihtoehto kuin jyrsimällä. Jyrsimällä tehtynä olisi varmasti päästy melkein yhtä hyvään lopputulokseen. Erilaisten hammaspyörien hampaiden koneistamisesta oli kokemusta, mutta ajallisesti oli järkevämpää käyttää ulkopuolista apua niiden tekemisessä, koska siihen oli mahdollisuus. Kulmavaihteenkin kartiohammaspyöräpari on myös lankasahattu.

Lankasahaus on mittatarkka työstötapa, ja pinnan laatu on hyvä hampaiden tekemiseen. Lankasahaus on tarkasti hallittu kipinätyöstömenetelmä, ja sillä voidaan päästä muutamien tuhannesosien tarkkuuteen. Lankasahaus perustuu samaan periaatteeseen kuin uppokipinätyöstökin. Kaikissa kipinätyöstömenetelmissä työstötapahtuman peruselementit ovat kipinätyöstöneste, työkappale ja elektrodi. Uppokipinätyöstön elektrodi on samanmuotoinen kuin haluttu koneistettava muoto. Lankasahauksessa elektrodi on liikkuva, sähköä johtavasta materiaalista valmistettu lanka. Työkappale leikataan tällä elektrodilangalla. Lankasahaamalla voidaan valmistaa monimutkaisia muotoja. Muotojen on oltava ulotettavissa kappaleen läpi.

Lankasahausta varten tehtiin työkuvat jokaisesta kappaleesta. Lankasahausta varten tarvitsee tehdä myös dxf-kuvat, joissa on leikattavan osan niin sanotut käyrät, jota pitkin elektrodi menee leikaten samalla. Dxf-kuvat liitteenä (liite 2).

## 7 Sovitus autoon

Kulmavaihteen tuenta etukaareen on toteutettu kahdella teräsputkella, jotka hitsataan etukaareen kiinni. Jotta ohjausvaihteen hammaspyörän ja kulmavaihteen kartiohammaspyörän akselit ovat suorassa toisiinsa nähden, niin ohjaus kokonaisuudessaan jigitetään autoon kiinni hitsauksen ajalle. Jotta varmistutaan ohjausakselin oikeasta kulmasta ja hammaspyörien suoruudesta, on ohjausvaihteen ja kulmavaihteen välille sorvattu alumiinista pitkä akseli (kuva 17). Ohjauksen kiinnityksen aikana voidaan varmistua myös, ettei ratti missään tilanteessa tule etukaaren ylitse.



Kuva 17. Ohjauksen sovitus runkoon

## 8 Testaus ja mittaaminen

Hammastangon liikkeen ja hammaspyörän kulman varmistamiseksi ne mitattiin. Mittaamiseen käytettiin Romer arm sigma 2025 -mittakättä. Mittakädellä pystyimme mittaamaan hammastangon liike ja hammaspyörän kulma. Hammaspyörän kulman mittaamiseen teetettiin laserleikkuussa laipan, joka sopii hammaspyörän akselin uritukseen (kuva 18).



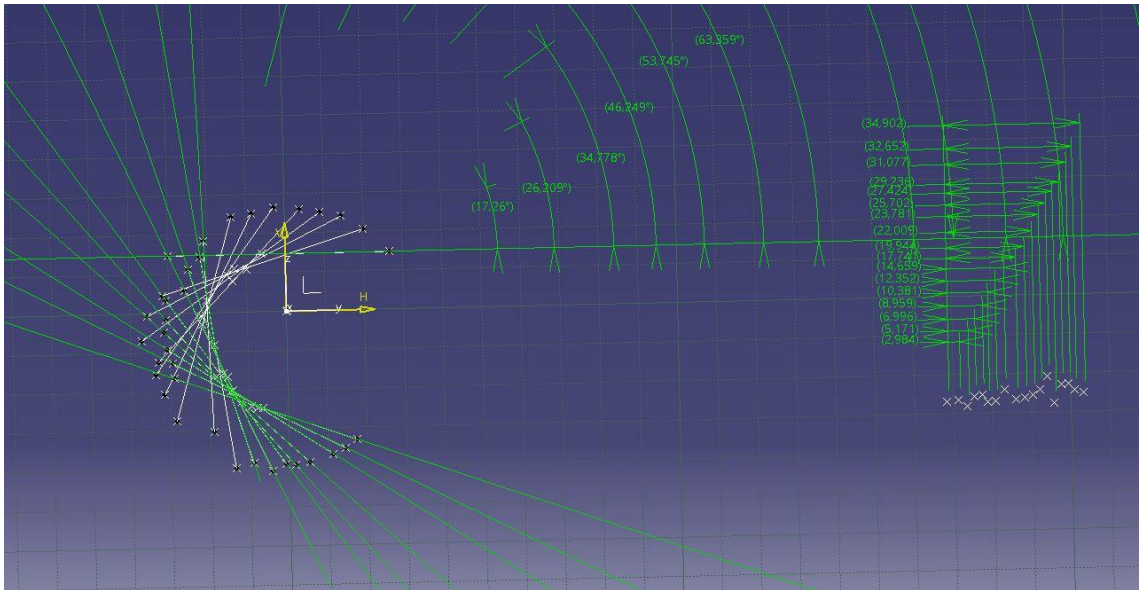
Kuva 18. Progressiivisen hammastangon mittauskoonpano

Pyrittiin mittaamaan hammastangon liikkeen useiden mittapisteiden välein ja sen jälkeen mittasimme kummastakin päästä laipan suoraa pintaa (kuva 19). Hammastangon liike tiedetään ääripäästä ääripäähän olevan 70 mm. Näin saatiin tietää, onko liike samanlaista kuin laskelmien mukaan.



Kuva 19. Progressiivisen hammastangon mittaus

Mittaamisen jälkeen pistevidakko vietiin Catia 3D -ohjelmaan, jossa pisteiden kautta voidaan määrittää suora laipasta mitatuille pisteille. Tämä viiva kertoo hammaspyörän kulman tietyllä hammastangon liikkeellä (kuva 20).



Kuva 20. Mittauksesta saatujen pisteiden yhdistäminen

Mittauksesta saatujen tulosten myötä voitiin tehdä pieniä muutoksia hammastankoon. Tarkoituksena oli myös testata ohjausta vanhassa HPF015-autossa, mutta se on purettuna eikä sitä tämän opinnäytetyön aikana pystytty testaamaan. Uusin auto HPF016 oli rakenteilla, ja ensiajo on tarkoitus suorittaa toukokuun aikana. Tulevalla testikaudella tullaan testaamaan progressiivisen hammastangon toiminta ja toimivuus erilaisissa ajotilanteissa tulevaisuutta ajatellen.

## 9 Pohdinta

### 9.1 Ohjauksen suunnittelu

Ohjauksen suunnittelu onnistui melko hyvin. Opinnäytetyössä käytiin läpi peruskaavoja ja kuvattiin, mitä ohjauksen suunnittelussa pitää ottaa huomioon. Tässä työssä ei laskettu ohjaukseen tulevien voimien suuruuksia vaan keskityttiin itse ohjauksen suunnitteluun. Ohjaukseen tulevat voimat tulevat renkaan sivuttaiskiihtyvyydestä, ja kääntövarsi toimii momenttivartena. Tulevaisuudessa on tarkoitus mitata erilaisilla mittaliuskoilla ohjauksen komponentteihin tulevia momenteja ja voimia.

Ohjausvaihteen ja kulmavaihteen suunnittelu onnistui hyvin, ja niistä saatiin tehtyä kompaktit paketit, jolloin painokin jäi pieneksi. Kaikki valmistukseen liittyvät asiat onnistuivat hyvin, mutta tulevaisuutta ajatellen olisi hyvä pystyä ulkoistamaan koneistuksia. Koneistukset vievät turhan paljon aikaa itse tekemällä, jolloin itse suunnittelu ei voi kestää pitkään.

## 9.2 Progressiivisen ohjauksen suunnittelu

Progressiivisen ohjauksen suunnittelussa tuli vastaan monia yllätyksiä, joihin ei osattu varautua. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui, minkälaisen progressiivisuuden Formula Student -kilpa-auto ja kuljettaja vaatii. Ilman erilaisten progressiivisten hammastankojen testaamista tätä on vaikea tutkia ja selvittää. Vanhojen Metropolia Motorsportin autojen kanssa asia voitaisiin testata, mutta ongelmaksi tulee monien osien korvaaminen uusilla osilla, jotta autosta saadaan erilaiset aurasmuutokset pois ja rengas kääntymään tarpeeksi.

## Lähteet

- 1 Formula SAE rules 2016. 2016. Verkkodokumentti. Fsaonline.  
<<https://www.fsaonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3>>. Luettu 10.10.2015.
- 2 Reimpell, Jörnßen, Stoll, Helmut & Betzler, Jürgen W. 2001. The Automotive Chassis: Engineering Principles. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- 3 Cockpit control forces. 2010. Verkkodokumentti. Society of Automotive Engineers. <[http://www.sae.org/students/cockpit\\_control\\_forces.pdf](http://www.sae.org/students/cockpit_control_forces.pdf)>. Luettu 12.10.2016.
- 4 Milliken, William F. & Milliken, Douglas L. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. USA: SAE.
- 5 Laine, Olavi. 1985. Autotekniikka 1. Osa Ajo-ominaisuudet. Helsinki: Suomen autoteknillinen liitto.
- 6 Airila, Mauri. 1995. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: WSOY.

## PA2200-muovin tekniset tiedot

### Material Data Sheet

#### Fine Polyamide PA 2200 for EOSINT P

##### *Application:*

PA 2200 is suitable for use in all EOSINT P systems with fine polyamide option. The recommended layer thickness is 0.15 mm. Unexposed powder can be reused. Depending on building time it has to be mixed with fresh powder by a ratio of 2:1 to 1:1 (old : new) in order to guarantee constant process parameters and persisting part quality.

Typical applications of the material are fully functional prototypes with high end finish right from the process. They easily withstand high mechanical and thermal load.

##### *Material Properties:*

Average grain size	Laser diffraction	60	µm
Bulk density	DIN 53466	0,435 - 0,445	g/cm <sup>3</sup>
Density of laser-sintered part	EOS-Method	0,9 - 0,95	g/cm <sup>3</sup>

##### *Mechanical Properties\*:*

Tensile Modulus	DIN EN ISO 527	1700 ± 150	N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	DIN EN ISO 527	45 ± 3	N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break	DIN EN ISO 527	20 ± 5	%
Flexural Modulus	DIN EN ISO 178	1240 ± 130	N/mm <sup>2</sup>
Charpy - Impact strength	DIN EN ISO 179	53 ± 3,8	kJ/m <sup>2</sup>
Charpy - Notched impact strength	DIN EN ISO 179	4,8 ± 0,3	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Impact Strength	DIN EN ISO 180	32,8 ± 3,4	kJ/m <sup>2</sup>
Izod - Notched Impact Strength	DIN EN ISO 180	4,4 ± 0,4	kJ/m <sup>2</sup>
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039	77,6 ± 2	
Shore D - hardness	DIN 53505	75 ± 2	

## Material Data Sheet

---

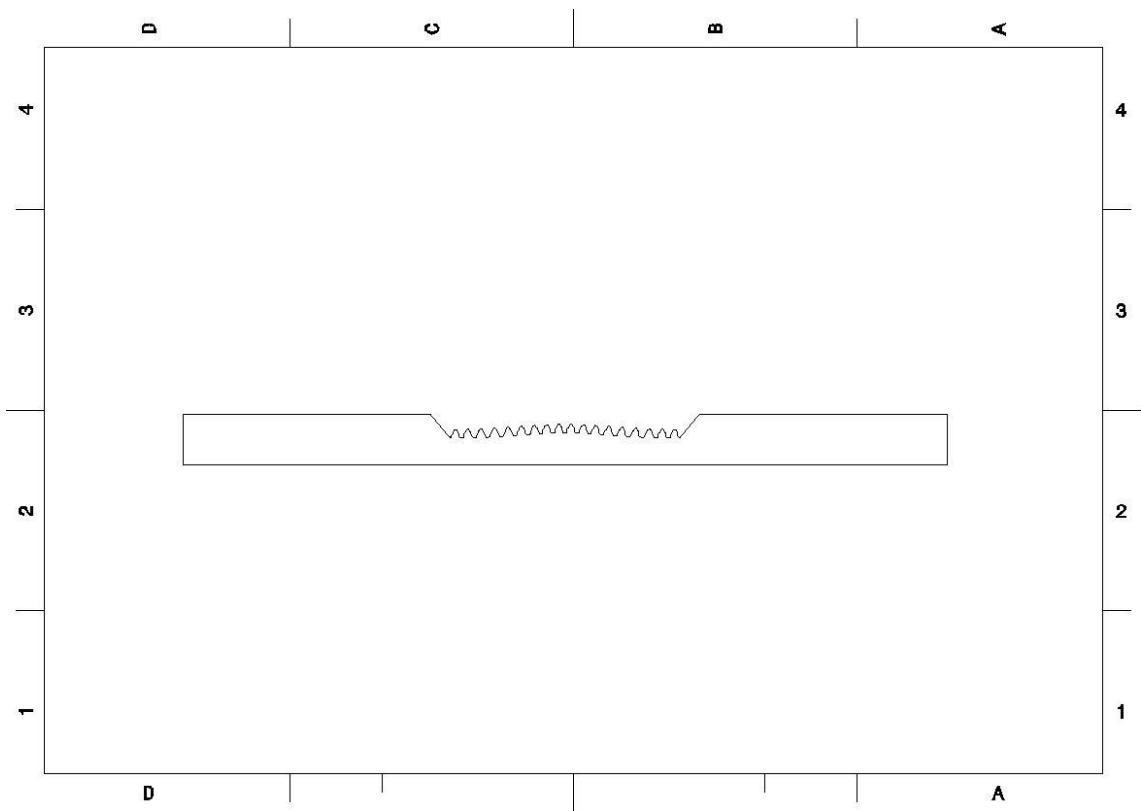
### *Thermal Properties:*

Melting point	DIN 53736	172 - 180	°C
Vicat softening temperature B/50	DIN EN ISO 306	163	°C
Vicat softening temperature A/50	DIN EN ISO 306	181	°C

\* The mechanical properties depend on the x-, y-, z-position and on the exposure parameters used.

The data are based on our latest knowledge and are subject to changes without notice. They do not guarantee properties for a particular part and in a particular application.

Dxf-kuva 1



Dxf-kuva

2

