

Samuel Kaariniemi

**NRC-PROTOTYYPPIAUTON PYÖRÄNTUENNAN  
KIINNITYSPISTEIDEN MÄÄRITTÄMINEN**

# **NRC-PROTOTYYPPIAUTON PYÖRÄNTUENNAN KIINNITYSPISTEIDEN MÄÄRITTÄMINEN**

Samuel Kaariniemi  
Opinnäytetyö  
Syksy 2016  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

---

Tekijä: Samuel Kaariniemi  
Opinnäytetyön nimi: NRC-prototyypiauton pyöräntuennan kiinnityspisteiden määrittäminen  
Työn ohjaaja: Janne Ilomäki  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2016  
Sivumäärä: 59

---

Opinnäytetyössä suunniteltiin NRC-prototyypiauton pyöräntuennan kiinnityspisteiden paikat, jotta niitä voitaisiin käyttää prototyypin rakennusvaiheessa sujuvasti ja luotettavasti. Työssä käytiin läpi myös teoreettista pyöräntuennan vaikutusta ajodynamiikkaan. Tavoitteena oli saada yksiselitteiset tulokset, joista olisi realistista hyötyä prototyypin rakennuksen ja suunnittelun seuraavassa vaiheessa.

Teoriaosuudessa käsiteltiin pyöräntuennan, joista erityisesti keskityttiin camber- ja aurauskulmiin. Työssä käytiin myös läpi teoreettista Ackerman-kaarta ja pyöräntuennan vaikutusta korin pyöräntuennan. Työ aloitettiin määrittämällä tavoitteelliset camber- ja aurauskulmat joustoliikkeen aikana. Lähtökohtana tavoitekulmille käytettiin Citroen DS3 R5 -autosta mitattuja pyöräntuennan joustoliikkeen aikana. Suunnittelussa käytettiin Solidworks-ohjelmaa, johon oli mallinnettu pyöräntuennan ja tarvittavat komponentit.

Työn tuloksissa käytiin läpi saadut pyöräntuennan joustoliikkeen aikana. Pyöräntuennan vastasivat tavoitearvoja melko tarkasti, vaikka Solidworks-ohjelma ei ollut paras mahdollinen työkalu työn tekemiseen. Työn tulos kiteytyy lopuksi koordinaatiston pisteisiin, joihin pyöräntuennan komponentit kiinnitetään, sekä komponenttien mittoihin. Koordinaatiston pisteet on kaikki esitetty suhteessa samaan origoon, joka sijoittuu mallissa etupään tukivarsien takimmaisten kiinnityspisteiden väliin. Taulukko koordinaatiston pisteistä on yksiselitteinen työn tulos, jota voidaan käyttää jopa sellaisenaan prototyypin rakennusvaiheessa. Pyöräntuennan paikkaa autossa ei laskettu, sillä ilman massakeskipisteen paikkaa pyöräntuennan sijaintitiedolla ei ollut hyötyä työn ajankohdassa. Tulokset ovat tavoitteiden mukaiset ja palvelevat prototyypin seuraavan vaiheen tekijöitä.

---

Asiasanat: NRC, McPherson, pyöräntuennan, ralli

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree programme in Mechanical and Production Engineering, Vehicle and  
Transport Engineering

---

Author: Samuel Kaariniemi

Title of thesis: Designing attachpoints for strut components to NRC-prototype rally car.

Supervisor: Janne Ilomäki

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2016

Pages: 59

---

The aim of this thesis was to define the points where to attach the strut components in an NRC-prototype rally car in a way that would make the toe and camber angles have a desired action during suspension travel. The aim was to put together a reliable table that would contain geographical points of attachment in the coordinate system and make designing the NRC-prototype easier. Another goal was to examine the subject through a theory basis and to reflect this theory basis in the results.

Almost all of the reference literature was in English and about road racing cars, but it was still useful for getting acquainted with the theory basis. The toe and camber angles used in defining the attachment points were taken from a Citroen DS3 R5 rally car. The angles were examined and calculated using Solidworks computer program.

The results were good and useful. The main part of the thesis results contains a table that includes the aforementioned attachment in a coordinate system and the length of the control arms and the steering arms.

---

Keywords: NRC, toe angle, camber angle, Solidworks, McPherson

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää erikoisasiantuntija Arto Lehtosta työn tilaamisesta, mikä mahdollisti mielenkiintoisen työn tekemisen päättötyökseni Oulun ammattikorkeakoulussa. Haluan kiittää myös laboratorioinsinööri Janne Ilomäkeä, joka ohjasi opinnäytetyöni ja tarjosi asiantuntevaa apuaan aina tarvittaessa.

Erityisesti haluan kiittää vaimoani Nooraa ja lapsiani Vilhoa ja Annaa, jotka tukivat työni valmistumista ja uhrasivat omaa vapaa-aikaansa työni vuoksi. Kiitos myös muille läheisilleni tuesta.

Oulussa 16.11.2016

Samuel Kaariniemi

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	8
2 PYÖRÄNKULMAT, GEOMETRIA JA AJOKÄYTTÄYTYMINEN	9
2.1 Rengas	9
2.1.1 Vertikaalinen kuorma ja renkaan pito	9
2.1.2 Cornering efficiency eli mutkatehokkuus	10
2.1.3 Camber-kulma	11
2.1.4 Pitoympyrä	12
2.2 Painojakauma	14
2.3 Korin pyörintäkulma	14
2.4 Pyörintäkeskiö	15
2.5 Pyöräntuenta	17
2.5.1 Auraus	17
2.5.2 Kääntöakseli	18
2.5.3 Keskiön akselietäisyydet	20
2.5.4 Kääntövierintäsäde ja jättämä	20
2.5.5 Kääntöakselin sivuttaiskallistuma	21
2.5.6 Bump steer	22
2.6 Iskunvaimennin ja jousi	23
2.7 Sortokulma	25
2.8 Teoreettinen eli Ackermanin kaartoharitus	26
3 PYÖRÄNKULMIEN TAVOITTEITA	28
3.1 Ennakkotietoja	29
3.2 Tavoitemitat	30
4 SUUNNITTELU	32
4.1 Tavoitearvot	32
4.2 Etupään aurauksen arvojen suunnittelu	35
4.3 Takapään lähtöarvojen suunnittelu	36

5 TIETOKONEMALLIN KÄYTTÖ JA PYÖRÄNKULMIEN OPTIMOINTI	
KIINNITYSPISTEIDEN KAUTTA	39
5.1 Mallin toiminta	39
5.2 Kulmien hakeminen mallissa	44
6 HAETUT KULMAT	46
6.1 Etupään bump steer	46
6.2 Etupään camber	47
6.3 Takapään bump steer	49
6.4 Takapään camber kulmat	50
6.5 Kaartoharitus	51
7 KIINNITYSPISTEIDEN SJAINNIT	53
8 POHDINTA	55
LÄHTEET	57

# 1 JOHDANTO

NRC-konsepti on Oulun ammattikorkeakoulun hanke, jonka tavoitteena on rakentaa ralliauto, jota voitaisiin hyödyntää uuden kilpasarjan autonä. Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella NRC-konseptiauton pyöräntuennan kiinnityspisteiden paikat ja määrittää ne koordinaatistoon, jotta suunnittelutyön tulosta pystyttäisiin hyödyntämään prototyypin rakennusvaiheessa mahdollisimman sujuvasti ja yksiselitteisesti. Tavoitteena on myös ensin tutkia teoriaosuudessa optimaaliset pyöräntuennat, jotka toteutuisivat erilaisilla pyöräntuennan kiinnityspisteiden ratkaisulla, ja pohtia tavoitearvot suunnittelun lähtökohdiksi. Lisäksi tavoitteena on pohtia alustageometrian vaikutusta ajokäyttäytymiseen kilpaautossa.

Suunnittelun työkaluina käytetään tietokonemallinnusta ja mitattua dataa Citroen DS3 -verrokkiautosta. Tavoitteena on myös tutkia pyöräntuennan eli roll centerin paikkaa prototyypiautossa. Pyöräntuennan lopullista paikkaa on kuitenkin vaikea määrittää, sillä autosta ei tiedetä massakeskipisteen paikkaa.



## 2 PYÖRÄNKULMAT, GEOMETRIA JA AJOKÄYTTÄYTYMINEN

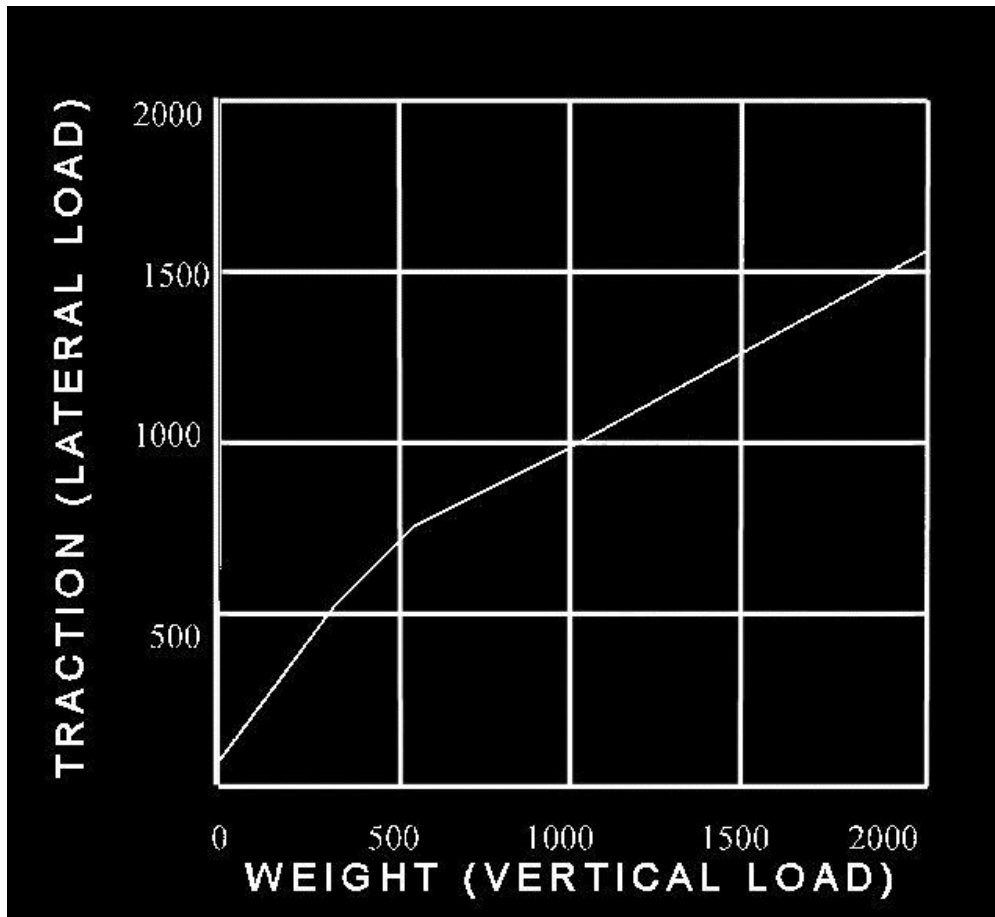
### 2.1 Rengas

Rengas on suurin yksittäinen tekijä ajodynamiikassa ja sen vaikutuksessa auton ajokäyttäytymiseen. Rengas on ainoa fyysinen kosketus auton ja tienpinnan välillä. Teoriassa rengasta tarkastellaan niin sanotulla musta laatikko -metodilla, mikä tarkoittaa, että renkaan sisäisiä tapahtumia kuten ilman lämpenemistä tai muodonmuutoksia ei huomioida. Rengasta tarkastellessa huomioidaan vain siihen ulkopuolelta tuotu kuorma eli vertikaalinen kuorma tai paino ja sen antama pito eli hyötyyn saatu lateraalinen kuorma tiehen. Arkikielessä kuormaa kutsutaan pidoksi. (1, s. 1.)

#### 2.1.1 Vertikaalinen kuorma ja renkaan pito

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että vertikaalisen kuorman kasvaessa myös renkaan pito kasvaa. Pito kasvaa aluksi paljon vertikaalisen kuorman lisääntyessä, mutta ei kuitenkaan kasva äärettömästi, eikä varsinkaan lineaarisesti. (1, s. 1.)

Vaikka renkaita on lukuisia erilaisia, voidaan teoretarkastelussa olettaa kaikille renkaille suunnilleen samanlainen vertikaalisen kuorman ja pidon suhde, jota voidaan käyttää tarkastelussa. Oikeammin voidaan olettaa, että käyrä olisi samanmuotoinen kuvaajassa, johon olisi piirretty renkaan lateraalinen kuorma vertikaalisen kuorman funktiona. Kuvassa 1 on esitetty vertikaalisen kuorman ja tiehen saatavan pidon suhde. Kuvaa 1 tarkasteltaessa huomataan, että vertikaalisen kuorman eli auton massan lisäys ei ole lineaarinen suhteessa pitoon, vaan pito nousee ensin jyrkästi suhteessa vertikaaliseen kuormaan, kunnes kuorman lisäys ei käytännössä enää kasvata pitoa. Voidaan todeta, että hyvän vertikaalisen kuorman ja pidon suhteen löytäminen on yksi avaintekijä renkaan maksimaalisen hyödyn saamiseksi. (1, s. 1.)



KUVA 1. Renkaan vertikaalisen kuorman ja pidon suhde (2)

### 2.1.2 Cornering efficiency eli mutkatehokkuus

Mutkatehokkuus on vertikaalisen kuorman ja pidon hyötysuhde. Se kertoo karkeasti, millaisella voimalla mutka voidaan ajaa renkaiden puolesta. Mutkatehokkuus lasketaan kaavalla 1. (1, s. 2.)

$$\text{mutkatehokkuus} = \frac{\text{lateraalinen kuorma}}{\text{vertikaalinen kuorma}} * 100 \quad \text{KAAVA 1}$$

Jos esimerkiksi valitaan kuvasta 1 vertikaalinen kuorma 1500,0 lbs eli 680,4 kg ja sitä vastaava pidon arvo 1250,0 lbs eli 567,0 kg ja sijoitetaan kaavaan 1 saadaan seuraavaa:

$$\text{mutkatehokkuus} = \frac{567,0 \text{ kg}}{680,4 \text{ kg}} * 100 \approx 83 \%$$

Tulokseksi saatu 83 % tarkoittaa, että mutkaan pystytään ajaa noin 0,83 g:n voimalla. Jos otetaan esimerkiksi kuvasta 1 vertikaalinen kuorma 500 lbs eli 226,8 kg ja sitä vastaava pidon arvo 700 lbs eli 317,5 kg ja sijoitetaan kaavaan 1 saadaan seuraavaa:

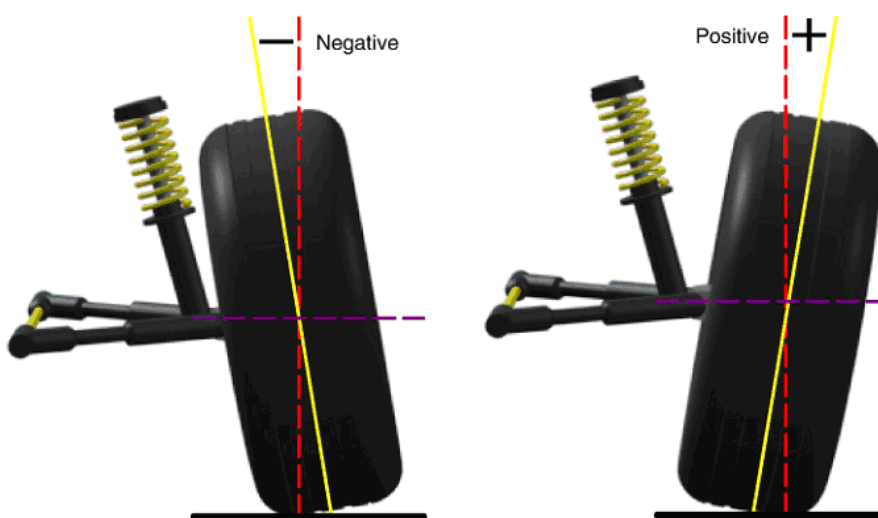
$$\text{mutkatehokkuus} = \frac{31705 \text{ kg}}{226,8 \text{ kg}} * 100 \approx 140 \%$$

Tulokseksi saadaan noin 1,4g:tä voimaa mutkaan. Todetaan, että mutkaan voidaan renkaiden puolesta ajaa nopeimmalla vauhdilla, kun auto on mahdollisimman kevyt ja renkaan pito hyvä. Huomataan myös, että renkaan mutkatehokkuus huononee, mitä enemmän kuormaa siihen kohdistetaan. Tämä on osa renkaan luonnetta, oli rengas minkäläinen vain, ja sitä voidaankin pitää teoriassa hyvänä lähtökohtana tutkittaessa renkaan mutkakäyttäytymistä. (1, s. 2.)

### 2.1.3 Camber-kulma

Camber-kulmalla tarkoitetaan renkaan sivuttaiskallistumaa. Kallistuma ei ole vakio McPherson-pyöräntuennassa, vaan se muuttuu joustoliikkeen aikana.

Kulma on positiivinen, kun renkaan yläpuoli on ulompana kuin alapuoli, ja negatiivinen, kun alapuoli on ulompana kuin renkaan yläpuoli (kuva 2). (10, s. 20.)



KUVA 2. Camber-kulma (3)

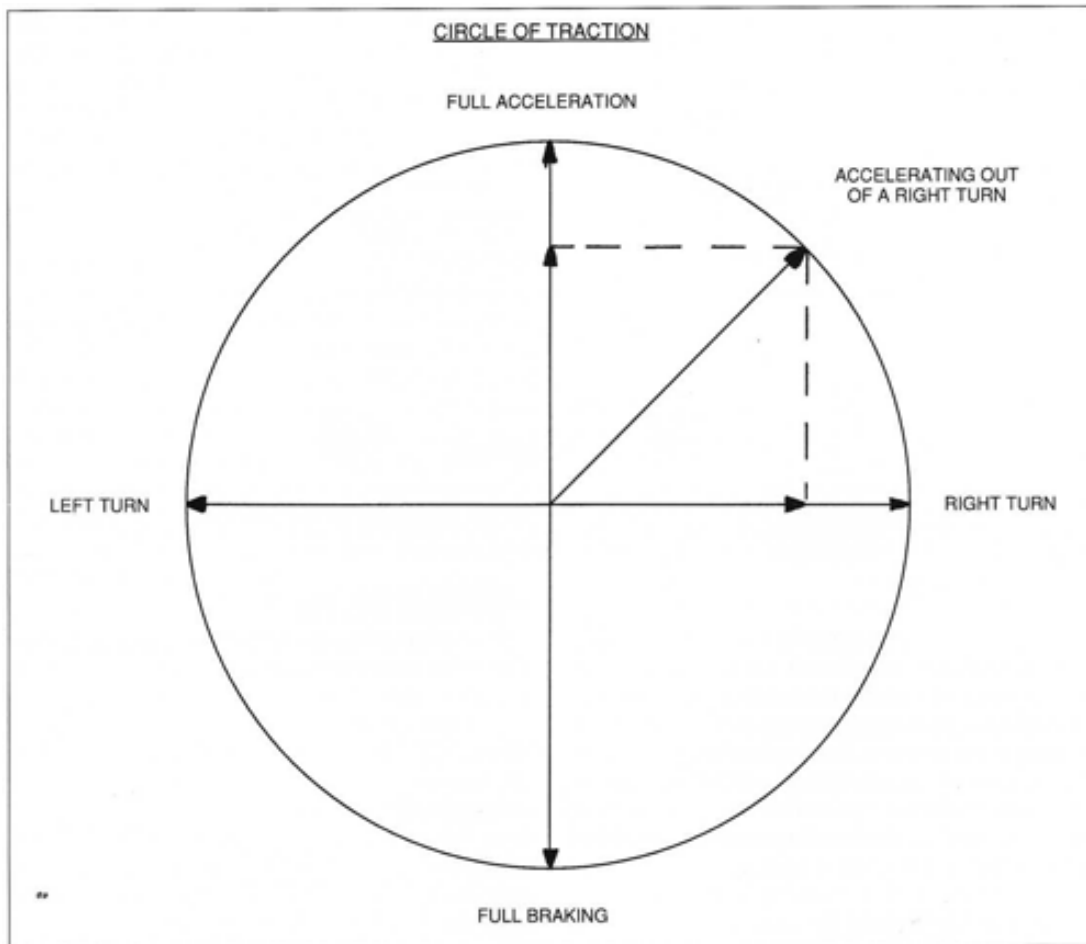
Teoriassa paras pito renkaalla saavutetaan kun camber-kulma on  $0^\circ$ . Tällöin renkaasta on mahdollisimman suuri pinta-ala tiekosketuksessa. Tämä tarkoittaa, että ajotilanteessa jossa tarvitaan mahdollisimman paljon pitoa, camber-kulman on oltava mahdollisimman lähellä  $0^\circ$ :ta. (10, s. 20.)

Kuitenkin negatiivisella camper-kulmalla renkaaseen muodostuu camber trustia eli vääristymää renkaassa, kun renkaaseen kohdistuu lateraalista kuormaa, jolloin renkaan painojakauma muuttuu (11, s. 170). Tämä tarkoittaa, että renkaan sisäreuna on kovemman paineen alainen kuin ulkoreuna, mikä johtaa lateraaliin kuorman kasvamiseen renkaan pyöriessä (11, s. 170). Tämä tilanne parantaa renkaan lateraalista pitoa, kun taas positiivinen camper-kulma huonontaa sitä (11, s. 170). Camper-kulman muutos joustoliikkeen aikana on pyrittävä pitämään mahdollisimman pienenä, jotta ajokäyttäytyminen ei muuttuisi ennalta-arvaamattomaksi (11, s. 171).

#### **2.1.4 Pitoympyrä**

Renkaalla on vain tietty määrä pitoa, ja sen määrä riippuu monesta tekijästä kuten sää-oloista, tien pinnasta ja renkaan kuviosta. Pito voidaan käyttää joko kääntyessä, jarruttaessa tai kiihdytettäessä. Renkaan liikkeillä ja alustan geometrialla voidaan ohjata renkaan pitoa oikeaan suuntaan. (1, s. 3.)

Pidon määrää voidaan kuvata ympyrällä (kuva 3), jossa oikealla ja vasemmalla on sivuttaispito ja ylhäällä ja alhaalla kiihdytys tai jarrutus pito. Ympyrään voidaan piirtää vektori, joka kuvastaa, minne pito suuntautuu, eli suunta, jossa pitoa käytetään eniten kullakin hetkellä. (1, s. 3.)



KUVA 3. Circle of Traction eli pitoympyrä (1, s. 4)

Kuvassa 3 näkyy esimerkkinä tilanne, jossa kiihdytetään oikealle kääntyvästä mutkasta. Vektori joka kuvaa täyttä pitoa, on piirretty tasan oikealle kääntymisen ja täyden kiihdytyksen välille. Täyttä pitoa kuvaavasta vektorista saadaan näin määritettyä, paljonko pitoa on saatavilla sivuttais- ja pitkittäissuuntiin. Esimerkiksi tilanteessa, jossa kiihdytetään suoraan ja vetävät pyörät sutivat, vektori piirrettäisiin suoraan ylöspäin eli kaikki käytettävissä oleva pito olisi kiihdytyksessä, mistä seuraa vetävien pyörien ajelehtiminen sivuille kiihdytyksen aikana. (1, s. 4.)

Ympyrällä voidaan selittää myös osaltaan yliohtautuminen takavetoisella autolla mutkasta lähdettäessä, vaikka auto olisi normaalisti aliohtautuva. Kun ajetaan ulos mutkasta ja kiihdytetään rajusti, takarenkaiden pito suuntautuu suurimmaksi osaksi kiihdytykseen, eikä juurikaan sivuttaispitoon. Pidon puute sivut-

taissuunnassa aiheuttaa ylioheijautumisen. Teoriassa voidaan myös ajatella tilanne, jossa auto liikkuu kylki edellä alamäessä, jolloin kaikki pito on sivuttaissuunnassa eikä kiihdytyksessä tai jarrutuksessa. Samalla tavalla tilanteessa, jossa eturenkaat ovat jarrutettu lukkoon, ratin kääntäminen ei käännä autoa, sillä kaikki pito on jarrutuksessa eikä sivuttaispitoa ole ollenkaan. (1, s. 5.)

## 2.2 Painojakauma

Painojakaumalla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon vertikaalista kuormaa kullekin renkaalle kohdistuu (1, s. 6). Paras pito mutkassa saavutettaisiin painojakauman ollessa 50 % edessä ja 50 % takana (1, s. 12). Pito mutkassa on parhaimmillaan myös, kun lateraalinen painojakauma on 50 % / 50 % (1, s. 012).

Lateraalinen painojakauma on yksinkertainen käsitellä ajettaessa suoraan tasaisella nopeudella, jolloin voidaan ajatella jakauman olevan käytännössä sama kuin paikallaan ollessa. Painon siirtyminen mutkassa ulommille renkailla on monimutkaisempaa. Ulkokaarten puolen renkailla siirtyy mutkassa enemmän painoa, jolloin kuvan 1 mukaisesti myöskin pito kasvaa. Kun tiedetään, paljonko paino siirtyy renkaalta toiselle, saadaan määritettyä paljonko sivuttaispitoa kullakin renkaalla on käytettävissä kaarteessa (1, s. 8). Painosiirtymä mutkassa voidaan laskea kaavalla 2 (1, s. 8).

$$\text{lateraalinen painosiirtymä} = \frac{m_a * g_m * h}{G * l} \quad \text{KAAVA 2}$$

$m_a$  = auton massa

$g_m$  = mutkan g voimat

$h$  = painopisteen korkeus tienpinnasta

$G$  = painovoima = 1G

$l$  = raideleveys

## 2.3 Korin pyörintäkulma

Kun autolla ajetaan mutkaan, se pyörii oman pyörintäkeskiönsä ympäri ulkokaarteeseen päin. Pyörinnän määrää mitataan pyörintäkulmana, joka on hyvin havainnollistettavissa kuvassa 4. Korin pyörintä muuttaa ohjausta huonoon

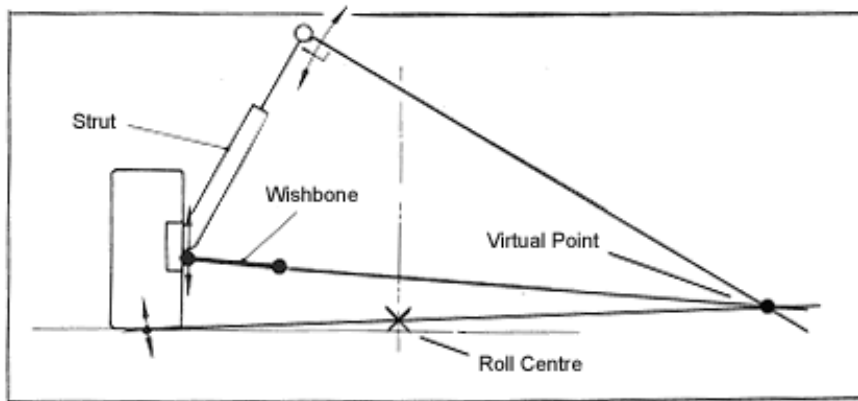
suuntaan, sillä se muuttaa pyöräntulmia, joten pyörintää on vähennettävä erilaisilla pyöräntuennan ratkaisuilla. Koska korin pyörintää ei saada kokonaan poistettua, se täytyy ottaa huomioon suunnittelemalla auton pyöräntuenta niin, että pyöräntulmat muuttuvat ajossa halutuiksi. Säätämällä korin pyörintää edessä ja takana erikseen voidaan vaikuttaa auton ajokäyttäytymiseen. (1, s. 13.)



*KUVA 4. Pyöräntäkulma (4)*

## **2.4 Pyöräntäkeskiö**

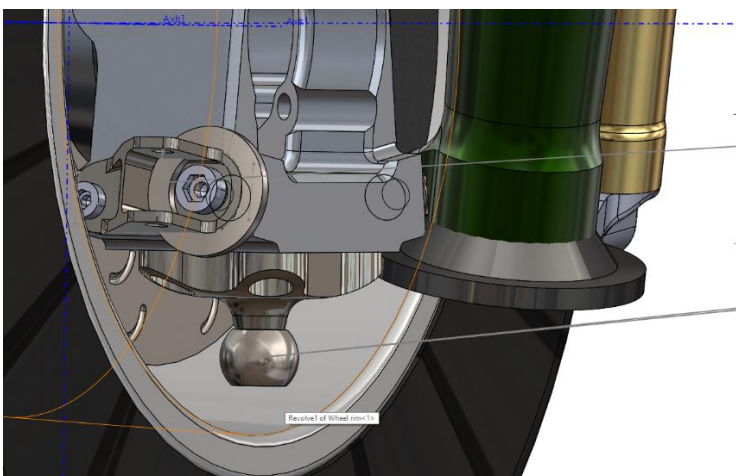
McPherson-pyöräntuennassa pyöräntäkeskiön paikan määrittää alatukivarren kulma, jousitolpan kulma ja painopisteen paikka. Kuvassa 5 on esitetty teoreettinen paikka pyöräntäkeskiölle (roll centre).



KUVA 5. Pyörintäkeskiö (8)

Pyörintäkeskiö luo momenttivarren korille, mikä tarkoittaa, että mitä suurempi pyörintäkeskiön ja auton painopisteen etäisyys toisistaan on, sitä enemmän kori pyörii ja aiheuttaa pyöräntulmien muutosta. Kuvasta 5 huomataan, että muuttamalla alatukivarren kiinnityspistettä korin puolelta ylöspäin, tai laittamalla paksumpi säätölevy navan ja tukivarren kiinnityspisteen väliin viemään tukivarren kiinnityspiste alemmas, saadaan pyörintäkeskiö nostettua lähemmäksi painopistettä. Kuvassa 6 on NRC-auton mallinnettu napakonstruktio, johon voidaan laittaa lisälevy pulttiliitoksella olevan uniball-niveleen kiinnityspisteen ja navan väliin. Toinen vaihtoehto on suurentaa jousitolpan kulmaa lateraalisuunnassa. Myös painojakauman siirtäminen alaspäin on hyvä keino pienentää korin pyörintää.

(1.)



KUVA 6. NRC-auton alatukivarren kiinnityspiste navan päässä

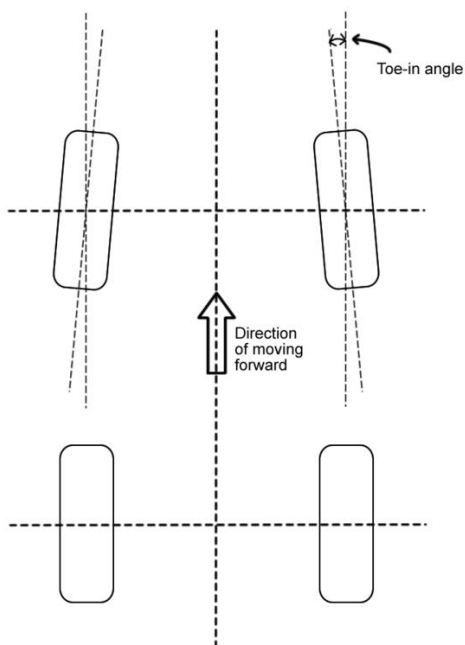


## 2.5 Pyöräntuenta

Pyöräntuennalla tarkoitetaan tapaa, jolla napa- ja rengaskonstruktio ovat kiinni autossa. Pyöräntuennan osiin kuuluvat tukivarret, iskunvaimentimet, jouset ja edessä raidetanko. Pyöräntuennan tyyppiä on lukuisia, mutta tässä työssä keskitytään tarkastelemaan McPherson-tuuntaa, jollainen NRC-autoon on suunniteltu. Pyöräntuenta vaikuttaa auton renkaiden liikkuvuuteen ja asentoihin eri tilanteissa.

### 2.5.1 Auraus

Aurauksella tarkoitetaan sitä, kuinka paljon renkaiden pitkittäinen suunta eroaa auton keskilinjan suunnasta. Auraus kompensoi pituussuuntaisten voimien aiheuttamaa pyöräntulmien muutosta joko kiihdyttäessä tai jarruttaessa. Aurauskulma on esitetty kuvassa 7. Kuvassa 7 esitetty kulma on aurausta eli kulma on positiivinen. Jos renkaat kääntyvät ulospäin, sanotaan sitä haritukseksi eli kulma on negatiivinen. (5, s. 684.)



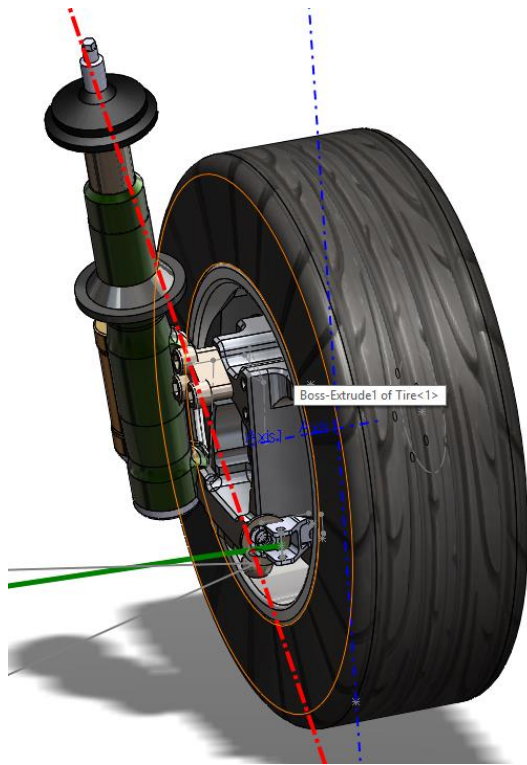
KUVA 7. Aurauskulma (6)

Aurauskulma muuttuu suoralla ajettaessa enemmän haritukseen päin ajossa tahtahtuvien lateraalisten voimien takia. Kun autossa on haritusta, renkaat pyrkivät sortokulman vuoksi ohjautumaan poispäin autosta, eli kumpikin renkaista pyrkii ohjaamaan autoa eri suuntaan. Kun harituskulma on kummallakin renkaalla samansuuruinen, auto kulkee suoraan. Jos renkaiden sortokulma muuttuu harituskulman muuttuessa esimerkiksi renkaan osuessa tien epätasaisuuksiin, toisen renkaan sortokulman kasvaessa toisen renkaan sortokulma pienenee. Tämä esiintyy kuljettajalle "vetelemisenä", eli auto seilaa sivuttaissuunnassa ja sitä täytyy ohjata aktiivisemmin. Harituskulma voi muuttua myös mutkassa eli rattia käännettäessä. Haritus edessä aiheuttaa mutkassa yliohtautumista. (10, s. 75.)

### **2.5.2 Kääntöakseli**

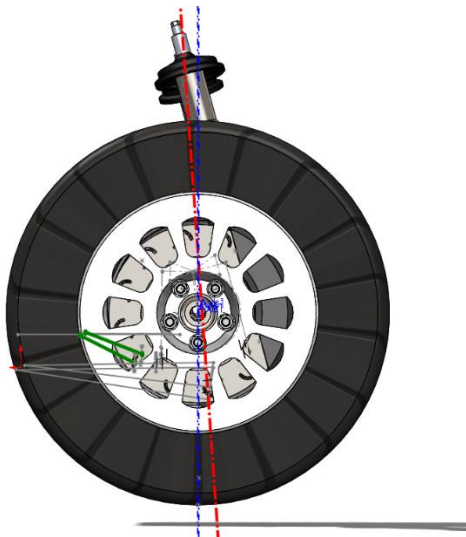
Kääntöakselilla tarkoitetaan kuvitteellista akselia, jonka ympäri rengas liikkuu käännettäessä. Jos pyöräntuennassa on ylä- ja alapallonivel, akseli muodostuu niiden keskilinjan läpi. Jos taas pyöräntuennassa on vain alapallonivel ja iskunvaimennin/jousipaketin yläpään laakeri, muodostuu kääntöakseli alapallonivelen ja laakerin läpi. (5, s. 684.)

NRC-autossa kääntöakseli muodostuu siis iskunvaimentimen yläpään ja alapallonivelen leikkaavasta akselistä. Kuvassa 8 on NRC:n Solidworks-malli, johon on piirretty kääntöakseli punaisella.



*KUVA 8. Kääntöakseli*

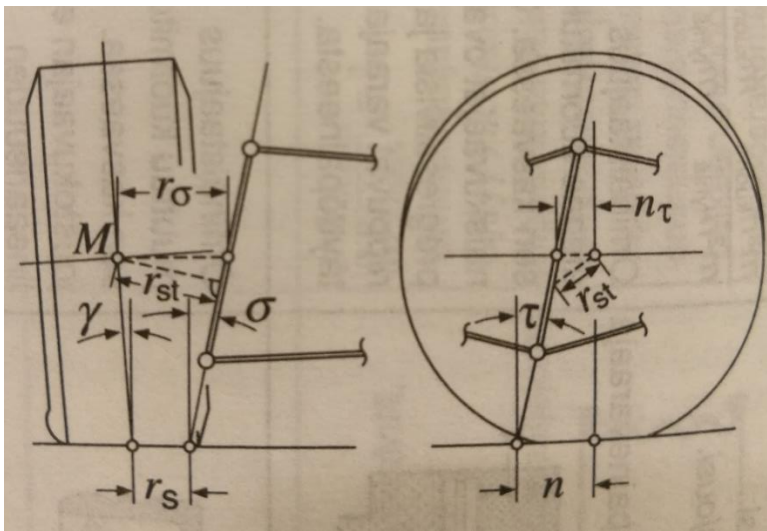
Kuvassa 9 on esitetty kääntöakseli sivultapäin kuvattuna. Sininen viiva on renkaan keskilinja sivultapäin.



*KUVA 9. Kääntöakseli*

### 2.5.3 Keskion akselietäisyydet

Keskion kääntöetäisyydellä tarkoitetaan lyhintä etäisyyttä pyörän keskipisteestä kääntöakseliin (5, s. 684). Etäisyys on merkitty kirjaimella  $r_{st}$  kuvaan 10. Kääntöetäisyys vaikuttaa momenttiin, joka välittyy renkaan vetovoimista rattiin (5, s. 684). Kuvassa 10 on esitetty keskiöetäisyys kirjaimella  $r_{\sigma}$ , joka tarkoittaa kääntöakselin vaakasuoraa etäisyyttä keskiöön (5, s. 684). Kääntöetäisyys ja keskiöetäisyys pyritään pitämään niin pienenä kuin mahdollista, että ohjaukseen välittyisi mahdollisimman vähän häiritseviä voimia renkaalta (7, s. 768).



KUVA 10. Pyöräntuennan mittoja (5, s. 684)

### 2.5.4 Kääntövierintäsäde ja jättämä

Kääntövierintäsäde eli olkapoikkeama on renkaan keskilinjan ja kääntöakselin etäisyys tien pinnassa mitattuna (5, s. 685). Se on negatiivinen, kun renkaan kosketuspiste sijaitsee sisempänä kuin kääntöakselin kosketuspiste (5, s. 685).

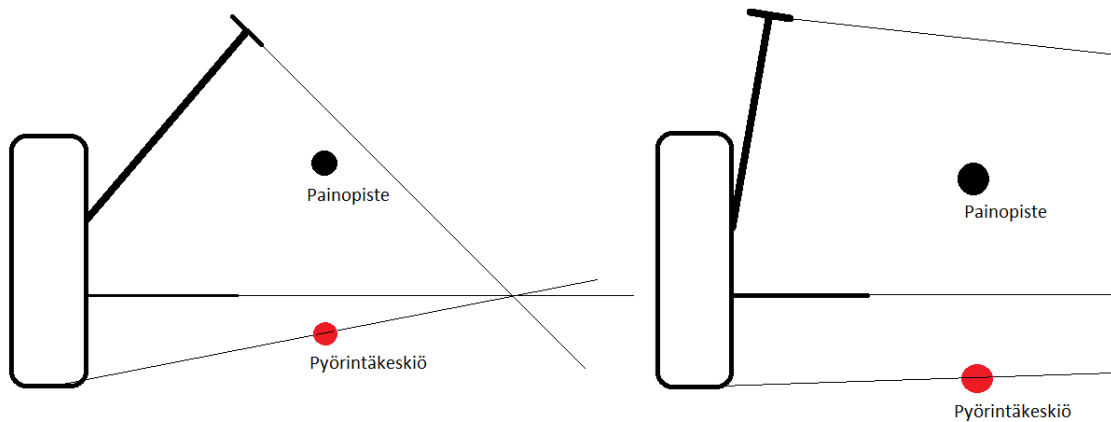
Säteen ollessa negatiivinen aurasukulma pyrkii muuttumaan positiiviseen suuntaan eli lisäämään aurausta jarrutustilanteessa, mistä on etua tilanteessa, jossa renkaat eivät ole yhtä pitävillä alustoilla. Jos säde on positiivinen, aurasukulma pyrkii muuttumaan negatiivisemmaksi, mistä on etua kaarteissa jarrutettaessa. Näiden kahden yhteisvaikutuksen vuoksi kääntövierintäsäde pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. (7, s. 768.)

Olkapoikkeamaa pystytään muuttamaan navan ja vanteen väliin tulevilla spacerilla. NRC-autossa tullaan käyttämään spaceria sopivan olkapoikkeaman määrittämiseen.

Jättämällä tarkoitetaan sivusta katsottuna renkaan keskiön ja kääntöakselin etäisyyttä mitattuna tien pinnassa (5, s. 684). Kuvassa 10 jättämä on merkattu kirjaimella *n*. Jättämä vaikuttaa renkaan palautusmomenttiin suoralla ajettaessa ja samalla myöskin momenttiin, jolla rattia täytyy kääntää renkaan liikuttamiseksi (5, s. 684). Esimerkiksi ostokärryissä on erittäin suuri jättämä, jolloin rengas palautuu itsestään helpommin menosuuntaan. Kilpa-autossa jättämällä ei ole juurikaan merkitystä renkaan palauttavana tekijänä koska autoa ohjataan ”aktiivisemmin” kuin tavallista käyttö-autoa, eikä sillä ajeta matka-ajoa laisinkaan.

### **2.5.5 Kääntöakselin sivuttaiskallistuma**

Kääntö-akselin sivuttaiskallistumalla tarkoitetaan akselin kallistuskulmaa lateraaliosuunnassa. Kuvasta 11 voidaan todeta, että sivuttaiskallistuma olisi auton pyörintäkeskiön paikan kannalta oltava mahdollisimman paljon. Suuri sivuttaiskallistuma aiheuttaa kuitenkin liikaa muita ongelmia, kuten suuren olkapoikkeaman. Suuri sivuttaiskallistuma myös vaatisi huomattavasti enemmän tilaa autossa. Sivuttaiskallistuman määrä onkin usein kompromissi tilan ja ominaisuuksien välillä ja pyörintäkeskiön paikkaa säädetäänkin enemmän alatuki-varren kulmalla.

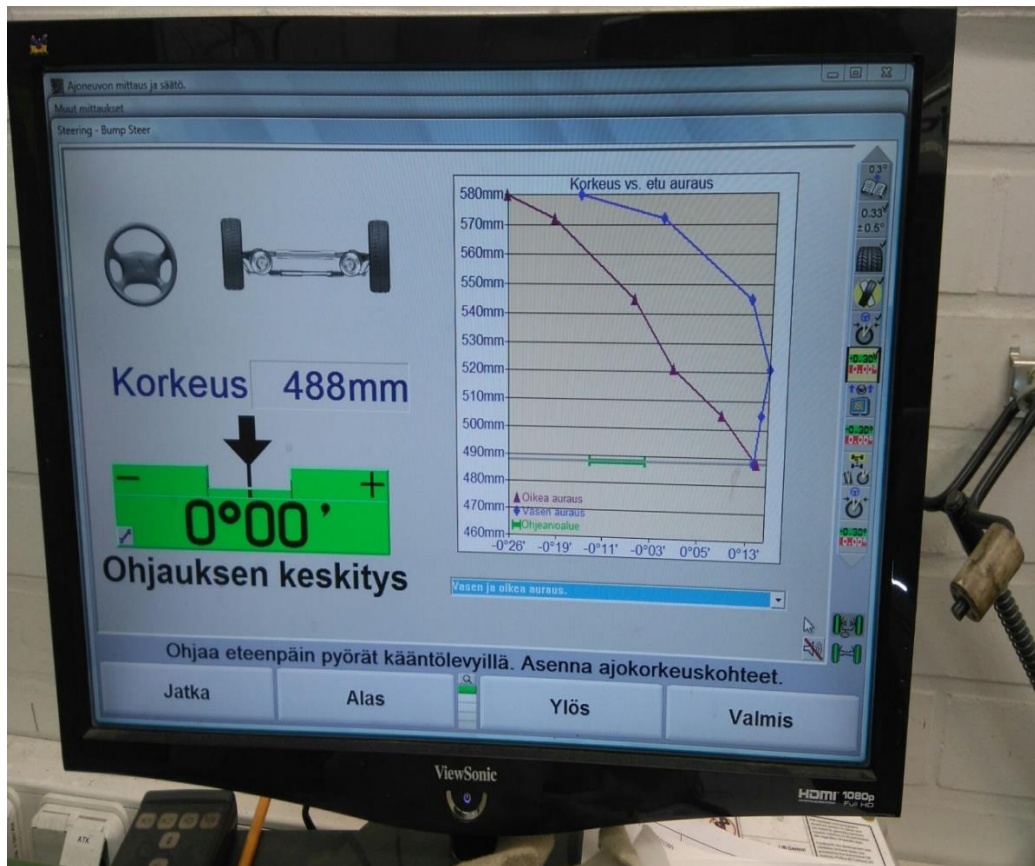


*KUVA 11. Kääntöakselin sivuttaiskallistuman vaikutus pyörintäkeskiön paikkaan*

### 2.5.6 Bump steer

Bump steer -termillä tarkoitetaan aurauksen muutosta joustoliikkeen aikana. Muutoksen vaikutus ajettavuuteen on merkittävä, ja se usein ratkaiseekin auton ohjattavuuden luonteen. Bump steer on asia, johon kannattaa erityisesti kiinnittää huomiota soralla ja muilla epätasaisilla alustoilla ajettaessa, sillä epätasaisuus näkyy yllättävinä ja ennalta-arvaamattomina joustoliikkeen vaikuttajina. Esimerkiksi ajettaessa kovilla nopeuksilla suoraan renkaan osuminen kumpuun tai kuoppaan voi vaikuttaa hyvinkin paljon ohjaukseen ja aiheuttaa jopa vaaratilanteita kuskille ja kartturille. Paras mahdollinen tilanne olisi sellainen, jossa aurauksen ei muuttuisi yhtään joustoliikkeen aikana, mutta tämä on erittäin vaikea saavuttaa McPherson-pyöräntuennassa. Jos ja kun bump steeriä ei saada täysin nollassa joustoliikkeen aikana, tärkeintä on, että se pysyy sisäänjoustossa aurauksen puolella. (10, s. 92.)

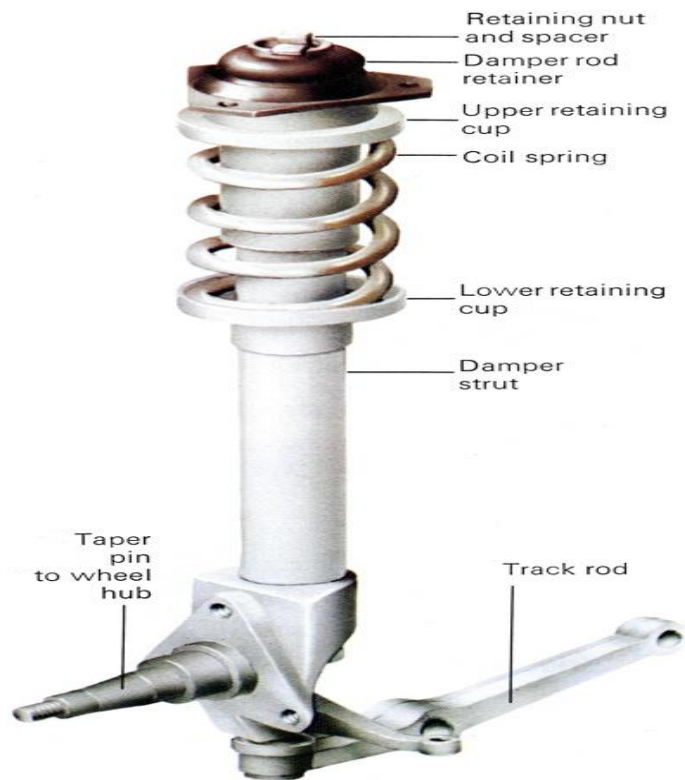
Citroen DS3 R5 -auton bump steer ulosjoustossa mitattiin Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriossa keväällä 2016. Kuvassa 12 on kuva Hunter-mittalaitteen mittaustuloksista. Tuloksissa näkyy oikean ja vasemman puolen etupään auraukulmat ajokorkeuden funktiona. Tuloksissa ajokorkeus 488 mm on 1G:n asennossa.



KUVA 12. Citroen DS3 bump steer -mittaus

## 2.6 Iskunvaimennin ja jousi

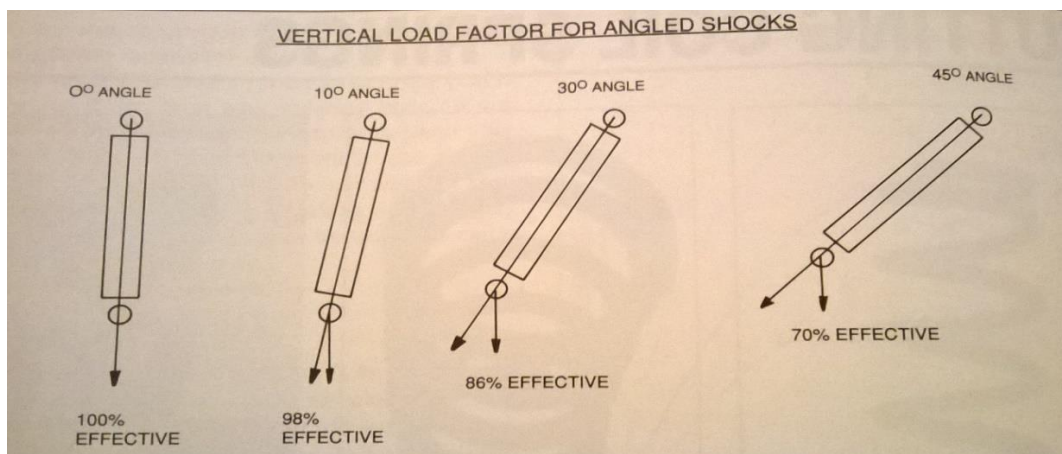
McPherson-pyöräntuennassa jousi ja iskunvaimennin ovat samassa paketissa (kuva 13). Tämä ratkaisu säästää hyvin paljon tilaa ja antaa näin ollen varaa asettaa muut pyöräntuennan komponentit vapaammin.



KUVA 13. Iskunvaimennin (9)

Jotta jouseen ei tulisi turhaa vääntövartta tukivarresta, se tulisi laittaa mahdollisimman lähelle alapalloniveltä (1. s. 30). Autoissa, joissa iskunvaimennin ja jousi ovat erillisiä, jousessa pitää usein olla suurempi jousivakio, sillä jousta ei saada yhtä lähelle alapalloniveltä kuin mitä se saataisiin jos iskunvaimennin ja jousi olisivat samassa paketissa. (1. s. 30). Iskunvaimentimen tehokkuus on parhaimmillaan, kun se on täysin pystysuorassa renkaan liikesuuntaan nähden. Käytännössä kulma ei aina voi olla pystysuora tilanpuutteen vuoksi. Kuitenkin, jotta iskunvaimentimen tehokkuus pysyisi järkevällä alueella, kannattaa kulman suuruus pitää pienempänä kuin 30 astetta (1. s. 36). Kuvassa 14 on esitetty iskunvaimentimen tehokkuus eri kallistuskulmilla.

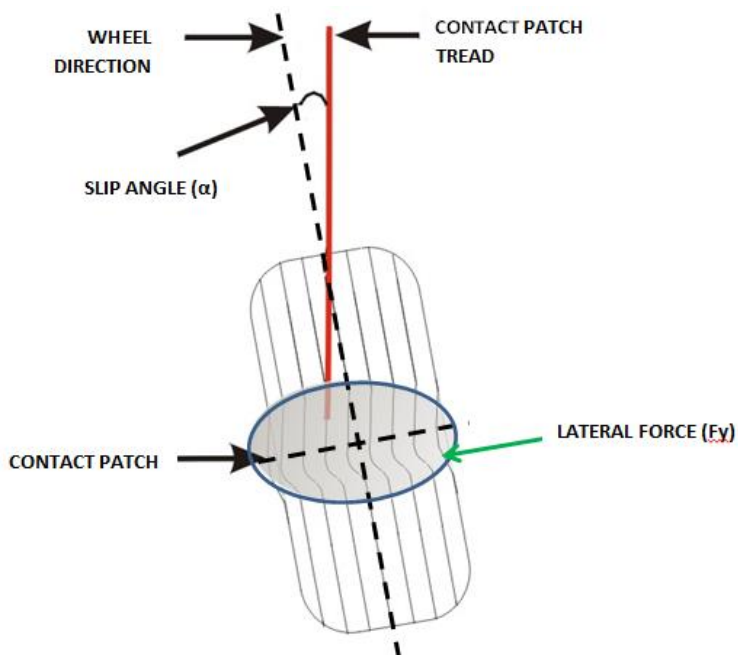




KUVA 14. Iskunvaimentimen kallistuksen vaikutus sen tehokkuuteen (1, s. 36)

## 2.7 Sortokulma

Sortokulmalla tarkoitetaan kulmaa joka muodostuu renkaan keskilinjan ja renkaan kulkusuunnan linjan väliin (11, s. 170). Sortokulma on esitetty kuvassa 15.



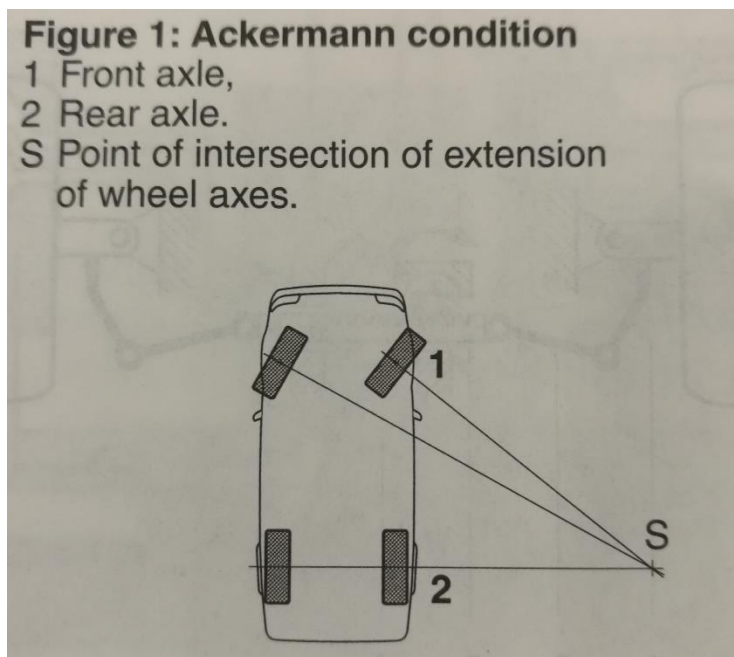
KUVA 15. Sortokulma (12)

Kun rengas on mutkassa, eli siihen kohdistuu lateraalista kuormaa, sen kuvion kulkusuuntaan syntyy häiriö. Renkaan kontaktipinnassa syntyy kuvion ja renkaan kyljen ylläpitämä tasapaino tien ja renkaan väliin. Häiriö renkaassa kasvaa niin kauan, että renkaasta loppuu pito, jolloin se alkaa luistaa. Kun rengas alkaa

luistaa, sortokulma häviää käytännössä kokonaan. Kilpa-autossa käytetään ren-  
gasta, jossa sortokulma käyttäytyy niin, että se saavuttaa hyvin nopeasti maksi-  
maalisen pidon ja myöskin nopeasti palautuu. Tämä ominaisuus on haluttu  
kilpa-autoon, jottei kuljettajan tarvitse odottaa renkaan mukautumista tilantee-  
seen, vaan rengas vastaa kuljettajan ohjaukseen mahdollisimman nopeasti.  
(11, s. 170.)

## 2.8 Teorettinen eli Ackermanin kaartoharitus

Teoreettisessa kaartoharituksessa renkaiden keskiakseleiden kuvitteelliset pi-  
dennykset risteisivät samassa kohtaa (kuva 16). Jos kaartoharitus on Acke-  
rmanin mukainen, niin renkaat eivät kulu liikaa ja renkailla on mahdollisimman  
puhdas kulku. (7, s. 901.)



KUVA 16. Ackerman kaartoharitus (7, s. 901)

Teoreettista kääntöharitusta voidaan tarkastella kääntökulmien yhteyksien  
kautta kaavalla 3 (13).

$$\frac{1}{\tan \delta_s} = \frac{1}{\tan \delta_u} - \frac{b_o}{L}$$

KAAVA 3

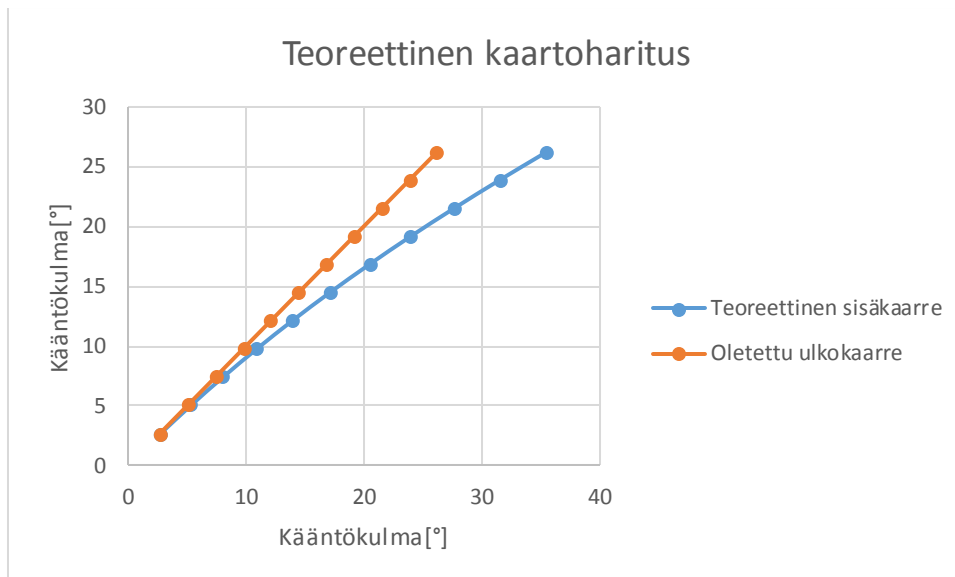
$\delta_s$  = sisäkaarten eturenkaan kääntökulma

$\delta_u$  = ulkokaarten eturenkaan kääntökulma

$b_o$  = etupään alapallonivelten kiinnityspisteiden etäisyys

$L$  = akseliväli

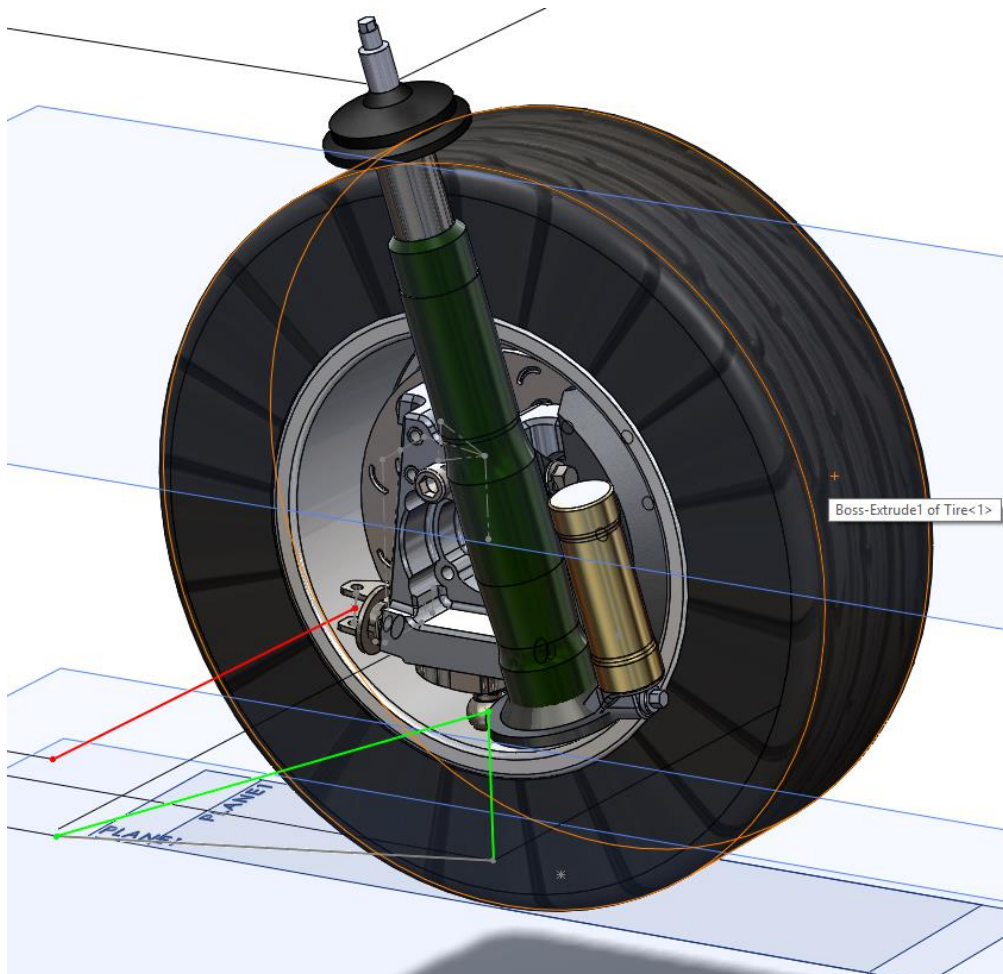
Kuvassa 17 on esitetty teoreettinen ulkokaarteen kääntökulma sisäkaarteen renkaan suhteen. Sisäkaarteen renkaan täytyy ajaa pienempää sädettä kaarteissa, jolloin myös kääntökulma on suurempi.



KUVA 17. Teoreettinen kaartoharitus

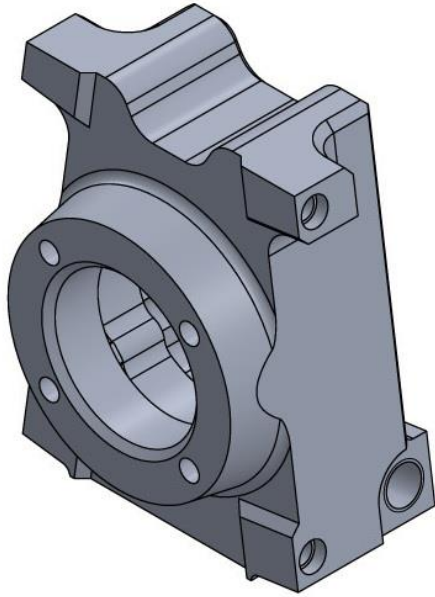
### 3 PYÖRÄNKULMIENTAVOITTEITA

NRC-prototyypiautossa oli ennen tämän opinnäytetyön aloitusta tehty osaprojekteja ja päätetty joitakin mittoja, jotka liittyvät pyöräntuentaan ja alustageometriaan. Autoon oli suunniteltu napa, johon pyöräntuennan komponentit kiinnittyvät uniball-nivelillä. Auton pyöränripustus oli jo suunniteltu, mutta korinpuoleisia kiinnityspisteiden sijainteja ei. Kuvassa 18 on Solidworks-ohjelmalla tehty 3D-malli pyöräntuennan konstruktiosta.



*KUVA 18. Pyöräntuennan konstruktio*

Kuvassa 19 on NRC-autoon suunniteltu napa. Navassa on paljon yhtäläisyyksiä Citroenin R5-auton navan kanssa.



*KUVA 19. Napa*

### **3.1 Ennakkotietoja**

NRC-autossa käytetty moottori-vaihdelaatikko paketti on leveä, mikä aiheutti hankaluutta saada raideleveys pidettyä ennalta määrätystä. Taulukossa 1 on esitetty yleisiä mittoja, jotka olivat tiedossa ennen kiinnityspisteiden suunnittelua.

*TAULUKKO 1. NRC-auton lähtöarvot*

Raideleveys	1 700 mm
Akseliväli	2 380 mm
Paino ilman kuljettajaa	1 200 kg
Painojakauma	55 % etu ja 45 % taka
Iskunvaimentimen liike- matka	100 mm sisään/140 mm ulos
Rengastus	205/65 R15 ET18 spacerin kanssa

### 3.2 Tavoiteimitat

Tavoitteena oli tehdä prototyyppiautosta mahdollisimman hyvin ajettava. Alustan kiinnityspisteiden määritys määrää, kuinka hyvin auto tottelee kuljettajan ohjausta. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin valitsemaan kiinnityspisteet tukivarjille, raidetangolle ja jousitolpan yläpäälle. Kiinnityspisteiden suunnittelua varten valittiin tavoitearvoja alustageometrialle. Työssä käytettiin Solidworks-ohjelmaa, jolla mitattiin pyöräntuennan geometriaa ja kiinnityspisteiden vaikutusta pyöräntuennan joustoliikkeen aikana.

Camber-kulman määrää suunniteltaessa voidaan asiaa lähteä katsomaan kahdesta näkökulmasta: ajettaessa mutkassa ja suoralla. Mutkassa ajaessa kannattaa kulman olla sen suuruinen, että keskivertomutkassa ulomman renkaan kulma on mahdollisimman lähellä  $0^\circ$ :ta.

Ulommat renkaat ottavat vastaan suurimman osan vertikaalisesta kuormasta, mikä tarkoittaa, että ulkorenkaat ovat olennaisempia pidon kannalta kuin sisärenkaat. Pidon kannalta on aina parempi, että rengas koskettaa tien pintaa mahdollisimman paljon. Mutkassa ajettaessa suunnittelun hankaluuden aiheuttaa korin pyörintä ja sen aiheuttama sivukallistuman muutos. Kilpa-autossa se, kuinka nopeaa mutka voidaan ajaa, on monesti kriittisempi ajan kannalta kuin se, kuinka nopeaa suoralla ajetaan. Huonosta pidosta aiheutuva hitaasti ajettu mutka ei monestikaan korjaannu nopealla suora-ajolla. Suunnitteluvaiheessa täytyy ottaa huomioon myös se, että eturenkaat ovat käännettynä mutkassa ajettaessa. Ralliautossa renkaat ovat todennäköisesti hieman vähemmän käännettynä kuin mitä mutkan säde teoriassa vaatisi, sillä sorapinnalla ajettaessa auto kulkee hieman sivuttain, mikä vaatii mutkan aikana korjausta ohjauksen osalta.

Suoralla ajettaessa voidaan karkeasti ajatella suunnittelun kannalta neliveto-autossa, että camber-kulmaa voidaan tarkastella niin sanotussa 1G-asemassa.

Tämä tarkoittaa sitä tilaa, jossa auto on normaalisti paikallaan ilman ylimääräisiä kuormituksia. Jotta suoralla päästään mahdollisimman hyvään pitoon, on camber-kulman oltava mahdollisimman lähellä  $0^\circ$ :ta.

Seuraavassa kappaleessa käydään läpi tavoitearvoja pyöränkulmille, ja selvitetään syitä, miksi näihin ollaan päädytty. Pelkkä teoreettinen tarkastelu ei aina ole järkevää käytännön kannalta, ja tätä asiaa pohditaan seuraavassa kappaleessa.

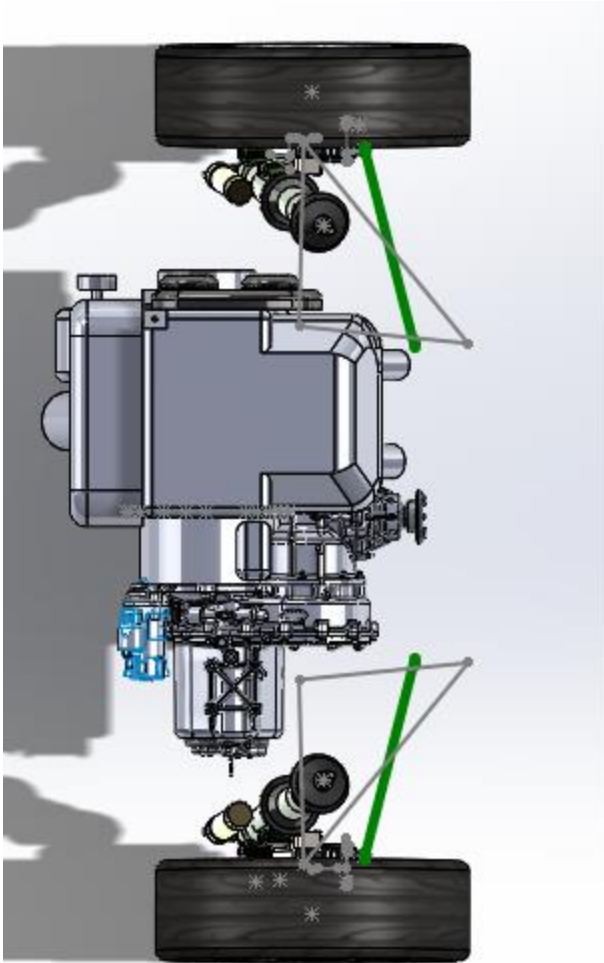
## 4 SUUNNITTELU

### 4.1 Tavoitearvot

Rallia on ajettu nykyaikaisella pyöräntuennalla varustetuilla autoilla jo vuosikymmeniä. Tämän vuoksi ei ole mielekästä suunnitella uudestaan kaikkia geometrian ratkaisuja ja komponentteja, sillä pyöränkulmien arvot ovat hioutuneet käytännössä hyväksi havaittuihin suuntiin vuosien aikana. Auton käyttäytyminen ajon aikana on niin monien tekijöiden summa, että asia joka teoriassa toimii, ei välttämättä toimi käytännössä laisinkaan. Jos auton ajokäyttäytymistä laajentaa vielä teorian ulkopuolelle, eli ajotuntumaan tai jopa kuskikohtaiseen tunteeseen ajon aikana, saadaan geometrian suunnittelusta vielä monimutkaisempi toteuttaa.

NRC-konseptin tarkoitus on olla mahdollisimman hyvän ajettavuuden omaava kilpa-auto jo prototyyppi-vaiheessa, mikä käytännössä tarkoittaa pyöränkulmien arvojen ottamista jo valmiiksi hyvän ajettavuuden omaavasta kilpa-autosta. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin Citroen DS3 R5 -auton pyöränkulmia. Pyöränkulmat ovat mitattu Oulun ammattikorkeakoulun autolaboratoriossa, jossa mittauksen suoritti Janne Ilomäki. Pyörän ripustuksen kiinnityspisteitä, joita tässä opinnäytetyössä suunnitellaan, ei voitu kuitenkaan kopioida suoraan Citroen R5 -autosta, sillä NRC-auton moottori-vaihdelaatikkopaketti on huomattavasti leveämpi, ja näin ollen tukivarret eivät mahdu samoille paikoille. Kuvassa 20 on Solidworks-mallista otettu kuva moottori-vaihdelaatikkopaketin sommitelusta prototyyppiin.

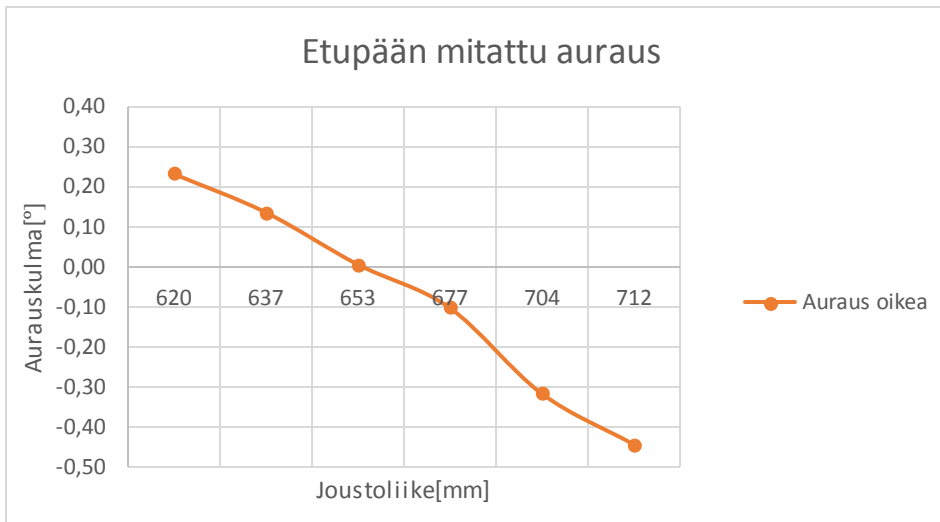




*KUVA 20. Moottori ja vaihdelaatikko NRC-mallissa*

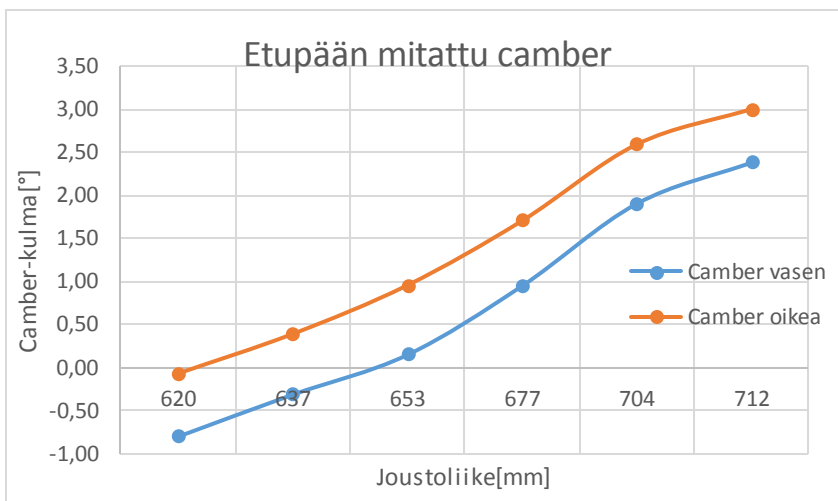
Kummankin pään arvoissa oli huomattavissa McPherson-pyöräntuennalle ominainen camberin muutos ulosjoustossa, eli kulma muuttuminen negatiivisesta positiiviseen. Etupään positiivinen camber-kulma on raju verrattuna takapäähän. Citroenissa on käytetty samaa napaa ja iskunvaimenninta edessä ja takana. Ainoa ero on tukivarren ja raidetangon pituudessa ja kiinnityspisteissä.

Etupään mittaustuloksista voitiin havaita, että vasemman puolen aurasikulmat olivat epäjohdonmukaiset. Todettiin, että mitatun auton pyöräntuennassa on ollut todennäköisesti jumittamista, joka aiheuttaa kulmien mittausten vääristymistä. Koska oikean puolen kulmat näyttivät johdonmukaisilta ja käyttökelpoisilta, nämä kulmat päätettiin ottaa kummankin renkaan tavoitekulmiksi, eli tehdä puolista identtiset. Kuvassa 21 on esitetty oikean puolen auruksen mittaustulos.



KUVA 20. Oikean puolen mitattu auraus joustoliikkeen funktiona

Myös etupään camber-kulmissa oli havaittavissa vääristymää, joten tavoitteeksi asetettiin samansuuntainen mittausten kanssa oleva camber-kulman muutos joustoliikkeen aikana ja lähtötilanteeksi 1G:n asennossa määritettiin  $-1.0^\circ$  kummallekin puolelle. Kuvasta 22 näkee hyvin, minkälaiseen suuntaan camber-kulma mittauksissa muuttuu joustoliikkeen aikana.

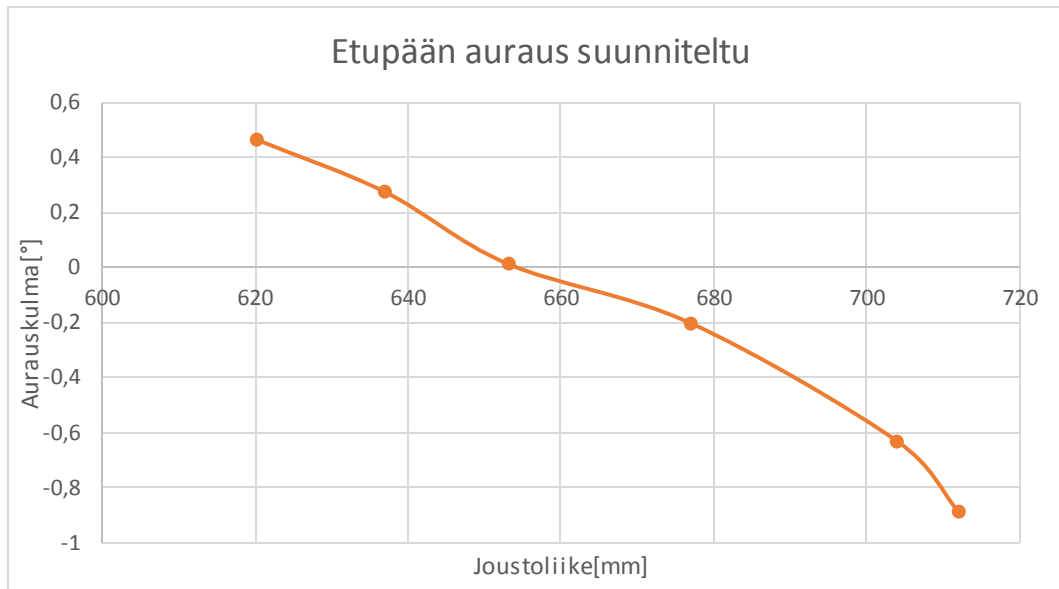


KUVA 22. Etupään mitattu camber joustoliikkeen funktiona

Mitatuissa camber-kulmissa havaittiin kuitenkin samanmuotoinen käyrä, joten mittaustulosten vääristymä voi johtua myös esimerkiksi mittauskorkeuden mita-  
tusta vääristymästä. Ero voi olla myös samaa vikaa kuin aurauksen vääristyneet  
mitta-arvot.

## 4.2 Etupään aurauksen arvojen suunnittelu

Koska etupäässä oli paljon vääristymää vasemman puolen aurauksessa, päätettiin kummallekin puolelle käyttää vertailuarvoina oikean puolen aurauksen mittaustuloksia. Kuvassa 23 on esitetty kokonaisauraus, joka laskettiin käyttämällä oikean puolen aurauksen mittaustulosta kummallekin puolelle.



*KUVA 23. Suunniteltu etupään auraus joustoliikkeen funktiona*

Kuvasta 23 huomattiin, että auruskulma oli 1G:n asennossa, eli korkeudella 620 mm noin 0,48°. Auraus muuttuu suunnilleen lineaarisesti koko matkan 1G:n asennosta aina mitattuun ulosjoustoon asti. Tätä aurausta käytettiin suunnittelun lähtökohtana etupäässä. Taulukossa 2 näkyvät tarkat arvot suunnitelluille kokonaisaurauskulmille.

*TAULUKKO 2. Suunniteltu kokonaisauraus*

Korkeus [mm]	Kokonaisauraus [°]
620	0,466
637	0,274
653	0,014
677	-0,202
704	-0,63
712	-0,884

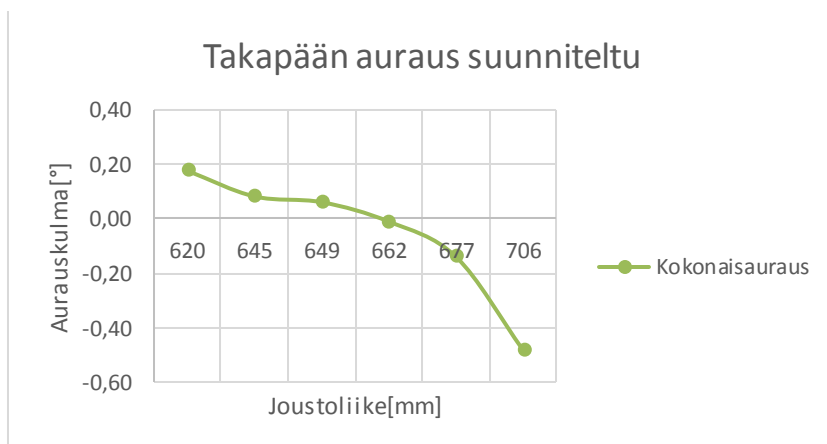
### 4.3 Takapään lähtöarvojen suunnittelu

Takapään mitatuissa aurauksen arvoissa oli myös eroa vasemmalla ja oikealla. Koska on mahdoton tietää pelkkien mittaustulosten perusteella, kumman puolen kulmat ovat auton ajettavuuden kannalta paremmat, päätettiin pitää mitattuja arvoja suuntaviivoina ja tarkastella niitä kriittisesti lähtökohtana aurauskulmiksi. Taulukossa 3 on esitetty mitatut takapään aurauskulmat joustoliikkeen aikana.

TAULUKKO 3. Takapään mitatut aurauskulmat

Korkeus[mm]	Auraus vasen[°]	Auraus oikea[°]	Kokonaisaurauskulma[°]
620	0,23	0,23	0,46
637	0,24	0,14	0,38
653	0,26	0,01	0,27
677	0,21	-0,10	0,11
704	-0,03	-0,32	-0,34
712	-0,25	-0,44	-0,69

Taulukosta näkee, kuinka paljon eroa vasemman ja oikean puolen kulmilla on. Takapäässä ei kuitenkaan valittu etupään tavoin johdonmukaisempaa puolta, jota käytettäisiin tavoitteena, sillä takana kummatkin puolet ovat kelpaavia arvoja aurauskulmiksi, vaan käytettiin mitattua kokonaisaurausta tavoitteena. Kuvassa 24 on esitetty takapään kokonaisaurausta, jota käytettiin tavoitteena NRC-autoon.



KUVA 24. Suunniteltu takapään auraus joustoliikkeen funktiona

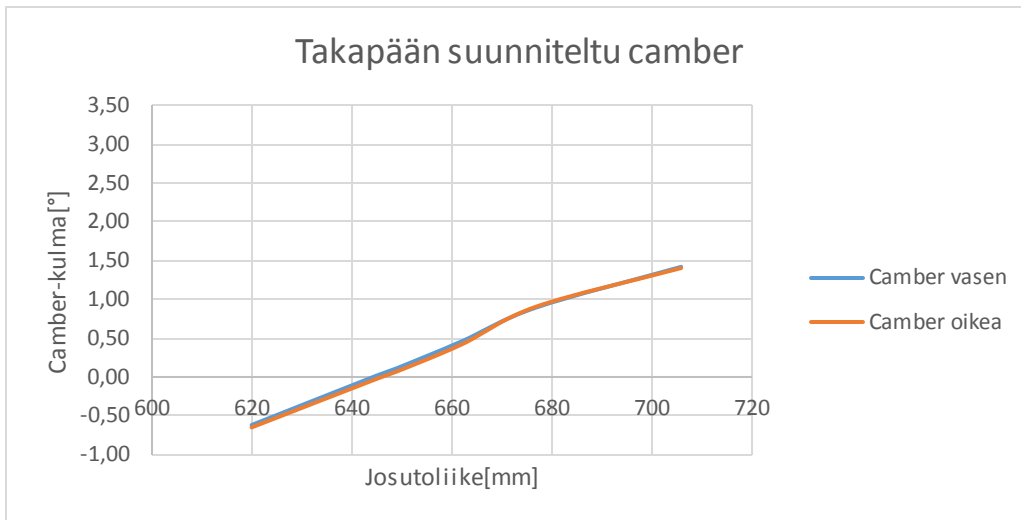
Kuvan 24 perusteella takapään aurausta alettiin suunnitella ja mallista alettiin hakea kulmia, jotka sijoittuisivat mahdollisimman tarkasti kokonaisaurauksen alueelle koko joustomatalla.

Citroen-auton takapästä mitattu camber-kulman muutos joustomatalla oli erittäin hyvä lähtökohta NRC-auton takapään kulmille. Mitatut camber-kulmat olivat käytännössä samat kummallakin puolella, mistä voitiin päätellä, että takapäessä ei ollut joustoliikkeen aikana tapahtuvaa jumittamista alustassa, toisin kuin etupäässä. Takapään aurauskulmien erot johtuvat todennäköisesti raidetankojen nivelten kunnosta tai mutkaisuudesta. Taulukossa 4 on esitetty mitatut takapään camber-kulmat 1G:n asemasta 86mm ulosjoustoon asti, eli koko mitattu joustoliike.

*TAULUKKO 4. Takapään mitattu camber ulosjoustossa.*

Korkeus[mm]	Camber vasen[°]	Camber oikea[°]
620	-0,62	-0,65
645	0,02	-0,02
649	0,11	0,07
662	0,46	0,42
677	0,90	0,91
706	1,42	1,41

Kuvassa 25 on esitetty takapään camber-kulman muutos joustoliikkeen aikana. Kuvasta 25 näkee hyvin, kuinka vähän eroa vasemman ja oikean puolen välillä on kulmissa. Mittausta käytettiin suoraan tavoitteena työn takapään camber kulmien arvoina. Tosin 1G:n asennossa sovellettiin camber-kulmaa  $-1^{\circ}$ , samoin kuin etupäässä.

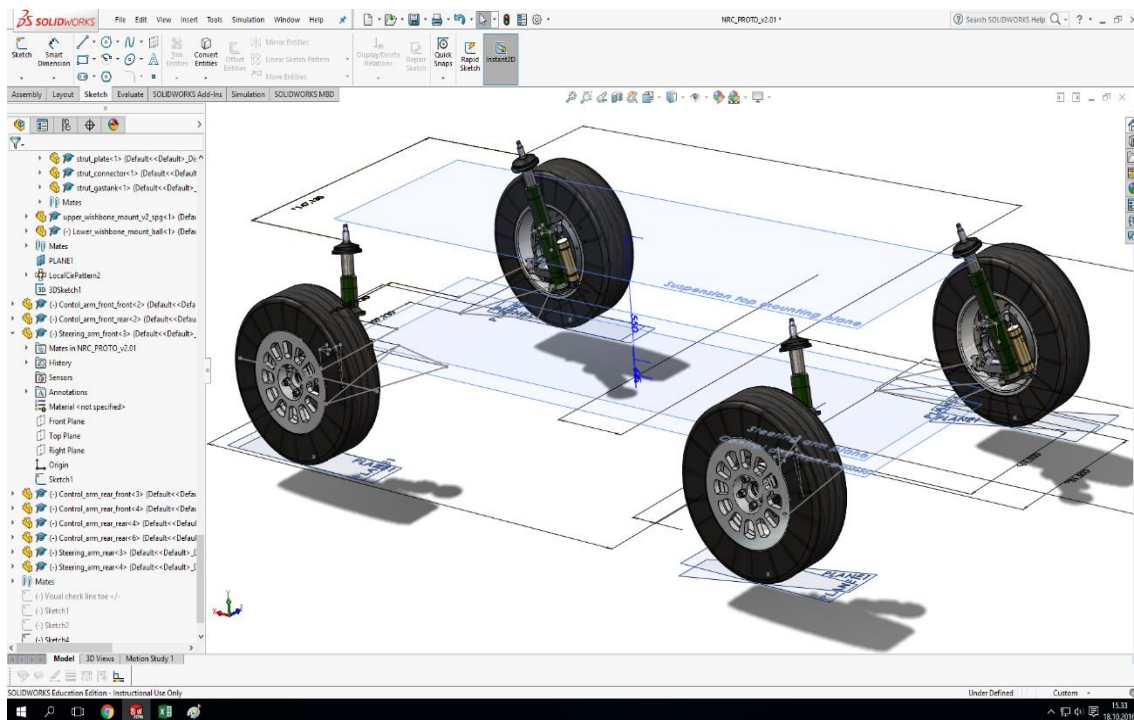


*KUVA 25. Takapään suunniteltu camber joustoliikkeen funktiona*

# 5 TIETOKONEMALLIN KÄYTTÖ JA PYÖRÄNKULMIEN OPTIMOINTI KIINNITYSPISTEIDEN KAUTTA

## 5.1 Mallin toiminta

Suunnittelun työkaluna käytetty Solidworks-malli rakennettiin siten, että iskunvaimentimien yläpäät oli asetettu samalle aputasolle vertikaalisessa suunnassa. Etu- ja takapään vaimentimet olivat myöskin samassa tasossa. Solidworksissä näitä tasoja kutsutaan Planeiksi. Kuva 26 on yleiskuva mallista 1G:n asennossa, jossa sinisellä näkyvät aputasot ovat hyvin nähtävissä.



KUVA 26. Yleiskuva Solidworks-mallista

Iskunvaimentimien yläpäitä pystyi liikuttamaan halutessa kyseisellä tasolla pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Iskunvaimentimen joustomatka rajoitettiin Limit Distance-toiminnolla, jolloin suurin mahdollinen ulosjousto sai arvon 760 mm ja suurin mahdollinen sisäänjousto sai arvon 520 mm. Iskunvaimentimen ollessa pituudessa 620 mm auto oli 1G:n asennossa eli lepäsi pyörien varassa ilman kuormitusta. Citroen-ralliautosta saaduissa tavoitepyöränkulmissa oli mitattu

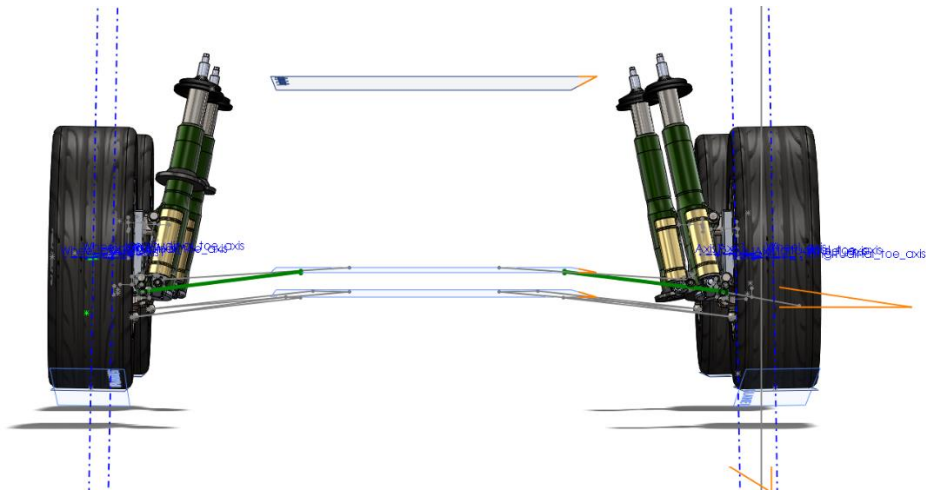
ulosjousto 112 mm 1G:n asennosta. Tämän vuoksi suunnittelutyössä käytettiin myöskin lähtökohtaisesti ulosjouston arvoa 712 mm.

Alatukivarsien etu- ja takakiinnityspisteille tehtiin omat aputasot, joissa tukivarsien kiinnityksien paikkoja voitiin muuttaa. Tasojen korkeutta vertikaalisessa suunnassa voitiin myös muuttaa halutessa. Tukivarsista tehtiin niin sanotut rautalankamallit, eli tukivarsien tilalle tehtiin yksinkertaiset viivat samoilla mitoilla. Viivat kohdistettiin uniball-nivelen keskusta. Rautalankamallit tehtiin, jotta malli olisi helpompi ja nopeampi muuttaa, mikä teki työn tekemisestä sujuvampaa. Tukivarret värjättiin eriväriseksi kuin raidetangot, jotta ne erottuisivat silmään eri viivoina helpommin, eivätkä sekoittuisi esimerkiksi mittaviivojen kanssa. Tukivarsien sisäpäät olivat etäisyydeltään vakiot. Myös tukivarsien pituudet pidettiin vakiona.

Myös raidetangoista tehtiin rautalankamallit ja tangon sisäpäähän kiinnityspisteille tehtiin oma aputasonsa. Erillistä aputasoa voitiin liikutella vertikaalisessa suunnassa. Koska ohjausvaihdetta ei ollut vielä päätetty, raidetankojen sisäpäiden kiinnityspisteiden etäisyyttä toisistaan voitiin myös muuttaa. Raidetankojen pituutta voitiin muuttaa halutuksi ja sisäpäiden nivelten paikkaa voitiin muuttaa pitkittäissuunnassa. Kun sisäpäitä muutettiin pitkittäissuunnassa, alatukivarsien kiinnityspisteiden paikkaa täytyi pitää silmällä, etteivät tukivarret ja raidetanko käytännössä tulisi osumaan toisiinsa. Renkaiden kääntymistä simuloitiin siirtämällä raidetankojen sisäpäitä samaan suuntaan sivuttain haluttu mitta. Raidetankojen mallit väritettiin eri värillä kuin tukivarsien mallit.

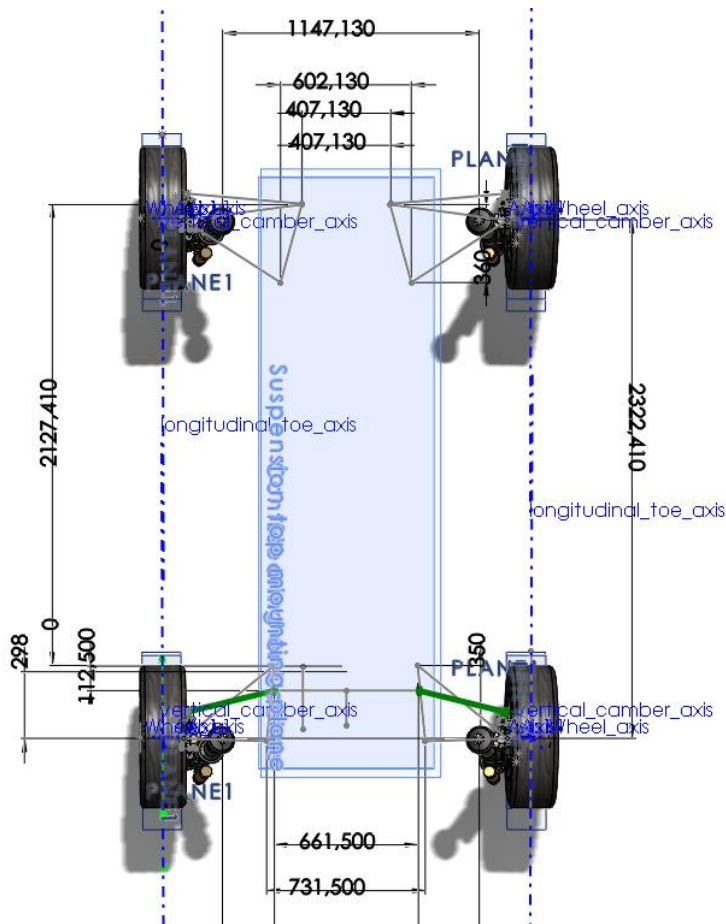
Malliin tehtiin renkaiden keskilinjaan akselit, jotka renkaan asennosta riippumatta osoittivat sivulta katsottuna toinen suoraan ylös ja toinen sivulle: akselit oli sidottu origon suuntaisiin akseleihin. Nämä akselit nimettiin auras- ja camber-akseleiksi. Camber-akseli oli sidottu mallin front planeen, mikä esti renkaan pyörimisen ja liikkumisen väärin mallissa. Kuvasta 27 näkee hyvin siniset camber-kulman mittauksiin tarkoitetut akselit ja oikealla puolella harmaana olevan apuviivan akselin vieressä.





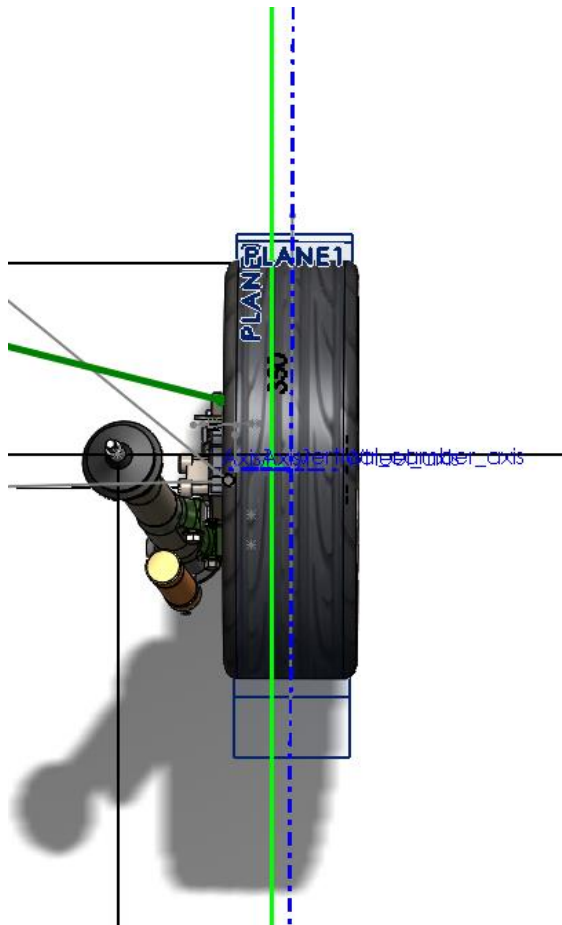
KUVA 27. Kuva edestä 1G:n asennossa

Kuvassa 28 on Solidworks-malli ylhäältäpäin kuvattuna. Kuvassa näky renkaiden keskiakselit ja mittoja, joita voitiin muuttaa kulmia haettaessa.



KUVA 28. NRC-auton Solidworks-malli ylhäältäpäin kuvattuna

Akseleiden avulla voitiin tutkia aurasta ja camberia vertaamalla akseleita auton keskilinjassa sijaitsevaan aputasoon. Aurausta tutkiessa käytettiin kokonais-aurasta, eli mallissa mitattiin kummankin renkaan auraus-akselien välistä kulmaa, jolloin saatiin suoraan kokonaisauraus. Koska Solidworksin mittaustulos ei kerro, onko tulos aurasta vai haritusta tai miinus- vai pluscamberia, malliin tehtiin apuviivat suoraan pitkittäissuunnassa ja vertikaalisessa suunnassa, ja sijoitettiin ne muutaman millin päähän renkaiden akselien keskilinjasta. Apuviivat eivät liikkuneet vaikka renkaiden asentoa muutettiin. Katsottaessa apuviivaa ylhäältä päin aurausakseliin verraten, näki silmällä nopeasti oliko kyseessä aurasta vai haritusta. Esimerkiksi kuvasta 27 näkee pelkästään apuviivaa avuksi käyttäen, että renkaissa on negatiivista camber-kulmaa. Kuvasta 29 näkee, että kyseessä on auraus eikä haritus.



*KUVA 29. Auruskulman apuviiva*

Lisäksi tilanteisiin, jossa kulmat ovat muutaman asteen luokkaa ja silmällä apuviivaa ja akselia verraten ei voi varmaksi sanoa, onko kulma negatiivinen vai positiivinen, toisen puolen renkaan keskilinjaan tehtiin aurasakselin päälle apuviiva, jonka päät ulottuivat hieman renkaan ulkopuolelle. Viivan päihin piirrettiin pisteet. Pisteiden etäisyyden mittaus auton keskilinjasta kertoi, oliko kyseessä auras- vai harituskulma.

Koska Citroen-vertailuautosta ei saatu mitattua pyöränkulmia sisäänjoustossa, ne täytyi päätellä, ja kulmia täytyi sisäänjouston osalta ajatella teoreettisesti. Citroenin pyöränkulmat oli mitattu epätasaisin korkeuden muutoksin, joten suunnittelussa iskunvaimentimet asetettiin aina samoille joustopituuksille kuin Citroenin mittauksissa, jotta pystyttäisiin vertailemaan tuloksia tarkemmin. Malliin tehtiin pika-asetat, joka toimi siten, että kaikkien iskunvaimentimien pituutta voitiin muuttaa kerralla ennalta määrättyihin pituuksiin. Jousitolpalle asetetut pituudet ovat taulukossa 5. 1G:n aseman, eli 620 mm jälkeiset sisäänjouston mitat on otettu 20 mm välein. Ulosjouston, eli 620 mm suuremmat mitat on otettu samoin välein kuin Citroenin mitatut arvot.

*TAULUKKO 5. Mallissa käytetyt jousitolpan pituudet*

<b>Etupään jousitolpan pituudet Solidworks-mallissa[mm]</b>	<b>Takapään jousitolpan pituudet Solidworks-mallissa[mm]</b>
520	520
540	540
560	560
580	580
600	600
620	620
637	645
653	649
677	662
704	677
712	706

## 5.2 Kulmien hakeminen mallissa

Kun malli oli saatu sellaiseen kuntoon, että suunnittelutyö voitaisiin aloittaa, valittiin, aloitettaisiinko ensin etu- tai takapäältä. Etupään suunnittelu tehtiin ensin, sillä kääntyvät renkaat ovat monimutkaisempia, sillä niissä jouduttiin tarkkailemaan myös kääntöharitusta. Mallissa ei ollut tässä vaiheessa vielä siirrelty kiinnityspisteiden paikkoja, joten lähtötilanne mitattiin. Etupään aurasikulmien lähtötilanne mallissa ennen työn aloittamista on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Mallin alkuperäinen etupään auraus

Korkeus [mm]	Kokonaisauraus [°]
520	-1,33
540	-1,76
560	-2,12
580	-2,42
600	-2,65
620	-2,82
637	-2,93
653	-2,99
677	-3,00
704	-2,88
712	-2,82

Alkutilanteen aurasikulmat olivat kokonaan reilusti harituksen puolella. Solidworks-ohjelmalla siirreltiin kiinnityspisteitä ja muutettiin raidetangon ja ohjausvaihteen pituuksia. McPherson-pyöräntuenta teki pisteiden hakemisesta vaikeaa, sillä tuennassa on ominaista, että kaikki komponentit vaikuttavat kaikkien, eli muutosten vaikutusta on vaikea ennustaa. Kiinnityspisteitä muutettiin niin kauan, että kulmat olivat halutut koko joustomatalla.

Auton raideleveys säädettiin lopuksi 1 700 mm siirtämällä pyöräntuennan kaikkia kiinnityspisteitä sisäänpäin saman verran. Tällä tavoin varmistettiin, että kiinnityspisteet pysyivät samana suhteessa joustoliikkeeseen eli pyöräkohtaisesti.

Seuraavaksi mallissa haettiin takapään kiinnityspisteiden sijainnit samalla tavoin kuin etupäässä. Takapäässä oli erona se, että raidetangon ja alatukivarren taakemmat sisäpään kiinnityspisteet olivat lateraalisuunnassa samalla kohdalla. Jos jommankumman kiinnityspisteiden sijaintia haluttiin muuttaa lateraalisuunnassa, jouduttiin myös toisen sijainti muuttaa. Vain näiden kiinnityspisteiden etäisyyttä vertikaalisessa suunnassa voitiin muuttaa. Alatukivarren etummaista kiinnityspistettä voitiin muuttaa samalla tavoin kuin etupäässä. Jousitolppien yläpäiden kiinnitystä ei muutettu vertikaalisessa suunnassa, sillä niiden täytyi olla samalla tasolla kuin etupäässä: muuten auto olisi valmiiksi epäsuorassa pitkittäissuunnassa 1G:n asennossa. Takapäässä tarkkailtiin työn tekemisen aikana kokonaisaurausta ja camber-kulmaa.

## 6 HAETUT KULMAT

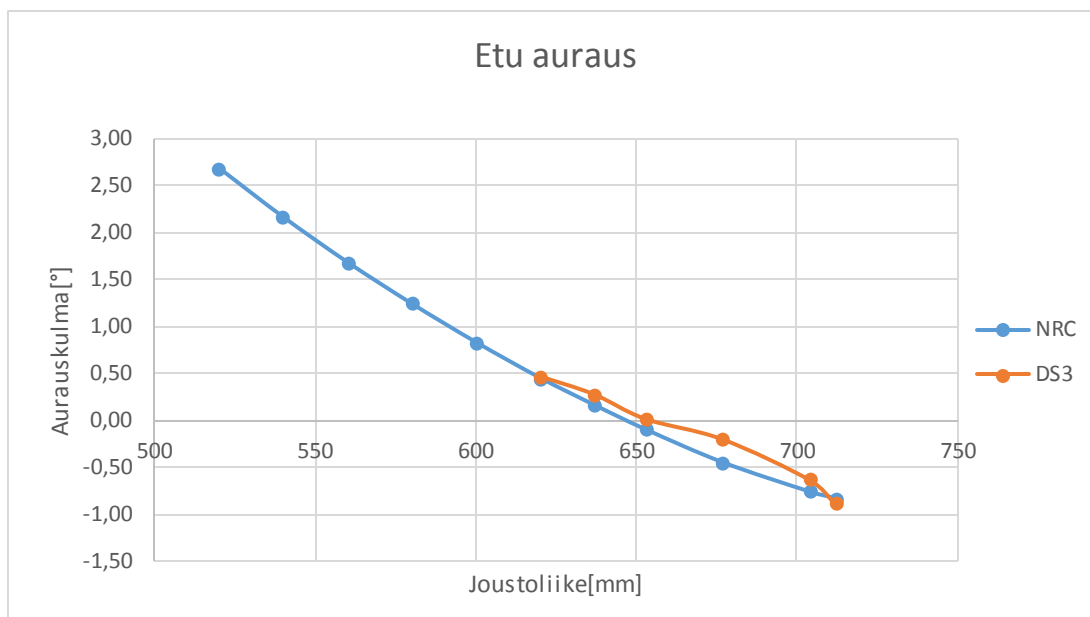
### 6.1 Etupään bump steer

Etupään bump steer eli aurauksen muutos joustoliikkeen aikana saatiin melkein lineaariseksi joustoliikkeen aikana. Taulukossa 7 on lopullinen kokonaisauraus joustoliikkeen aikana.

*TAULUKKO 7. Etupään lopulliset kokonaisaurauskulmat*

Korkeus [mm]	Kokonaisauraus [°]
520	2,68
540	2,16
560	1,68
580	1,24
600	0,83
620	0,45
637	0,16
653	-0,10
677	-0,45
704	-0,76
712	-0,83
751	-1,04

Kokonaisauraus lähtee kehittymään tasaisesti ollen sisäänjoustossa aurauksella, 1G:n asennossa eli 620 mm korkeudessa 0,45° aurauksella ja ulosjoustossa -1,04° harituksella. Kuvasta 30 nähdään hyvin, että arvot ovat lähellä tavoiteltuja ja kehitys aurauksulmissa joustoliikkeen aikana on melkein lineaarinen.



*KUVA 30. Etupään lopulliset aurauskulmat joustoliikkeen funktiona*

Kuvasta 30 huomataan, että Citroenista mitatut aurauskulmat ovat huomattavasti epätasaisemmin kehittyvät joustoliikkeen aikana kuin työssä suunnitellut kulmat. Kuitenkin mallinnettu bump steer on tasaisesti suunnilleen samoissa lukemissa kuin tavoitteessa. Aurauskulma on 1G:n asennossa  $0,45^\circ$  ja sisäänjoustossa kulma muuttuu enemmän auraukselle. Tämä tarkoittaa että mutkaan ajettaessa ulkokaarteessa oleva rengas kääntyy painonsiirtymän ja korin kierimisen takia enemmän auraukselle, mikä aiheuttaa sen, että auto pyrkii menemään sisäkaarteeseen päin enemmän.

Ralliautossa käytetään monenlaisia ratkaisuja bump steer-arvoissa, sillä toisin kuin rata-autoissa, rallissa renkaiden kääntymisellä koitetaan kaarteessa pitää yliohtautuminen kurissa kääntämällä ulkokaarteeseen päin. Tämä tekee bump steerin suunnittelusta vaikeaa ja auton käyttäytymisen ajossa huomaakin vasta prototyypin rakentamisen jälkeen.

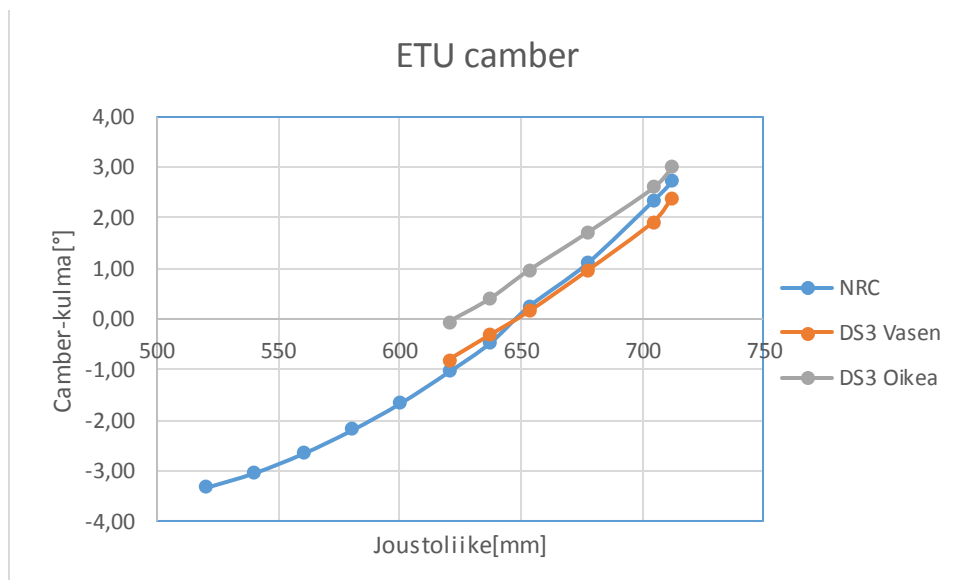
## 6.2 Etupään camber

Camber-kulmat saatiin edessä menemään suunnitelmien mukaan ja arvot sopivat suunniteltuun. Taulukossa 8 on etupään lopulliset camber-kulmat joustoliikkeen aikana.

TAULUKKO 8. Etupään camber-kulmat

Korkeus [mm]	Camber vasen/oikea [°]
520	-3,32
540	-3,03
560	-2,65
580	-2,19
600	-1,66
620	-1,04
637	-0,47
653	0,25
677	1,10
704	2,32
712	2,71

Taulukosta 8 huomataan, että camber-kulma on suunnitellussa  $0,04^\circ$  tarkkuudella 1G:n asennossa. Kuvassa 31 on esitetty mitatut camber-kulmat ja työn mallinnuksen camber kulmat.



KUVA 31. Etupään camber-kulmat joustoliikkeen funktiona



Kuvasta 31 huomataan että camber kulmien arvot leikkaavat mitattujen DS3-kulmien kanssa. Mallinnettujen kulmien kuvaaja myös jyrkkenee hieman ulosjoustoon päin mentäessä, mutta niin tekevät myös mitatut arvot. Erona mitattuihin huomataan myös 1G:n asennossa, että mitatuissa arvoissa camber-kulma ei ole yhtä suuri kuin mallinnuksen kulmissa.

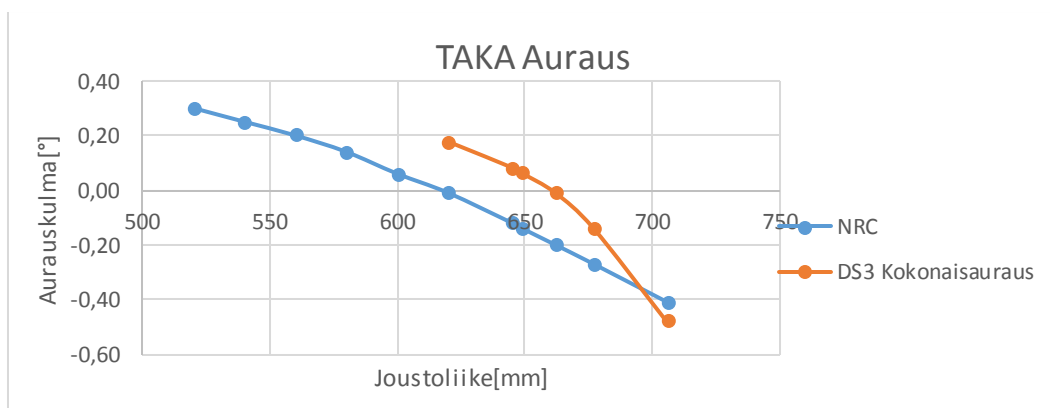
### 6.3 Takapään bump steer

Takapäässä bump steer -arvot saatiin mallinnettua juuri niin kuin oli suunniteltu. Taulukossa 9 on takapään bump steer -kulmat.

TAULUKKO 9. Takapään bump steer

Korkeus [mm]	Kokonaisauraus [°]
520	0,30
540	0,25
560	0,20
580	0,14
600	0,06
620	-0,01
645	-0,12
649	-0,14
662	-0,20
677	-0,27
706	-0,41

Kuvassa 32 on Citroenista mitatut bump steer -arvot. Kuvassa 32 on myös mallinnettu NRC auton bump steer.



KUVA 32. Takapään bump steer -arvot joustoliikkeen funktiona

Kuvasta 32 huomataan, että bump steer -käyrät saatiin samoihin lukemiin ja malleihin, kuin mitatut DS3 Citroenin arvot. Vaikkakin Citroenin mitatut arvot erosivat puolikohtaisesti, niin voidaan huomata että NRC-autossa käyrät ovat samansuuntaiset ja arvioidaan että mahdollisesti myös sisäänjoustossa DS3:n kulmat menisivät samansuuntaisesti, kuin NRC-autossa. Takapäässä oleva mieto haritus sisäänjoustossa aiheuttaa omalta osaltaan yliohtautumista.

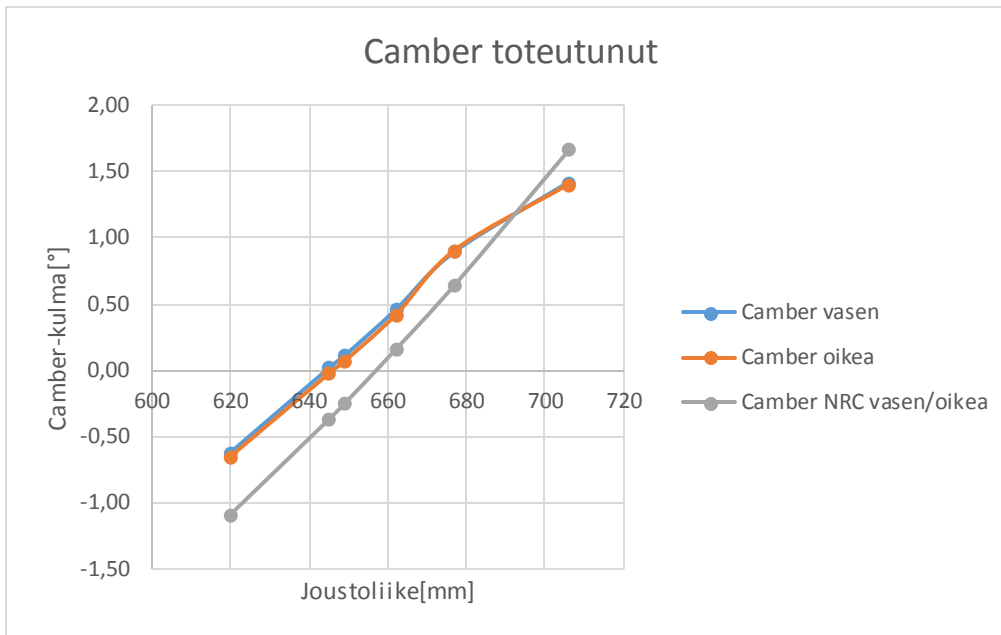
#### 6.4 Takapään camber kulmat

Myös takapään camber-kulmat saatiin suunnitelluiksi. Taulukossa 10 on takapään camber-kulmat joustoliikkeen aikana.

*TAULUKKO 10. Takapään camber-kulmat*

Korkeus [mm]	Camber vasen/oikea [°]
520	-3,20
540	-2,88
560	-2,51
580	-2,09
600	-1,18
620	-1,09
645	-0,37
649	-0,25
662	0,16
677	0,65
706	1,67

Kuvassa 33 on esitetty takapään suunnitellut ja toteutuneet camber-kulmat. Toteutuneet kulmat eroavat 1 G:n asennossa noin 0,5 °.



*KUVA 33. Toteutunut takapään camber joustoliikkeen funktiona*

Kuvasta 33 huomataan että suunta on oikea ja käytännössä sama noin 680 mm asti. Ulosjouston loppupäässä on mitatussa Citroenissa alkanut camber-kulma loivenemaan joustoliikkeen edetessä, mutta NRC:ssä ei.

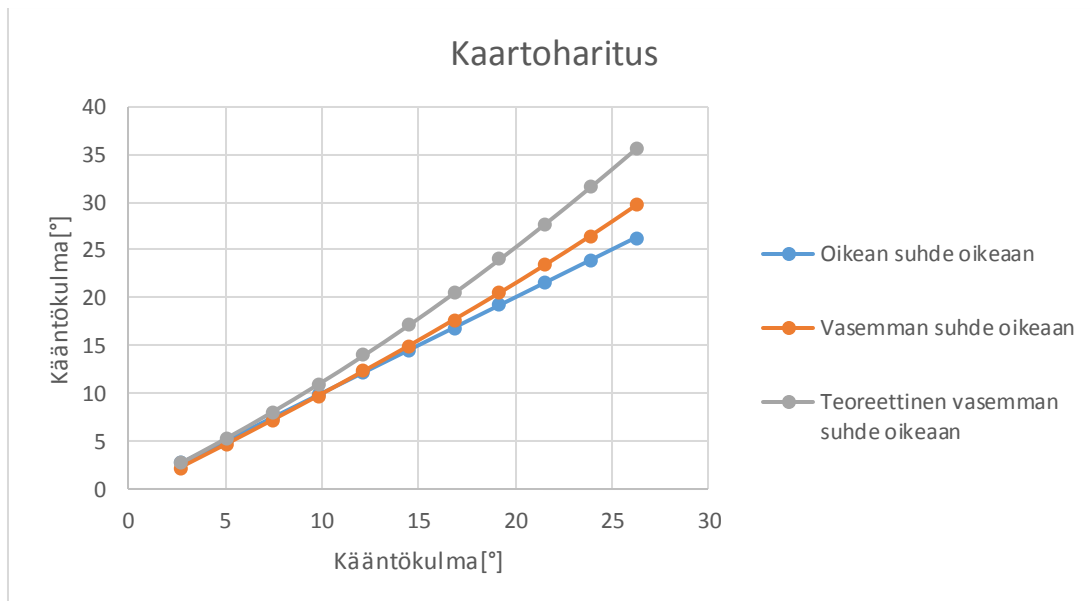
### 6.5 Kaartoharitus

Kaartoharitus mitattiin siirtämällä hammastankoa oikealle 5 mm kerrallaan ja mittaamalla sitten kummankin renkaan aurauskulma. Tilanne vastasi siis kääntämistä siten, että raidetangon sisäpäähän kiinnityspiste liikkuu 5mm sivuttaisuunnassa, oikealla puolella ulospäin ja vasemmalla puolella sisäänpäin. Mallista mitattiin vain kääntyminen toiseen suuntaan, sillä malli on niin tarkasti tehty, että puolet ovat symmetriset. Taulukossa 11 on vasemman ja oikean puolen aurauskulmat ja hammastangon liikuttamisen määrä.

TAULUKKO 11. Kaartoharitus

Kään- netty[mm]	Vasen[°]	Oikea[°]
5	2,21	2,63
10	4,67	5,02
15	7,16	7,39
20	9,7	9,76
25	12,29	12,11
30	14,94	14,46
35	17,67	16,8
40	20,47	19,15
45	23,39	21,5
50	26,43	23,86
55	29,63	26,22

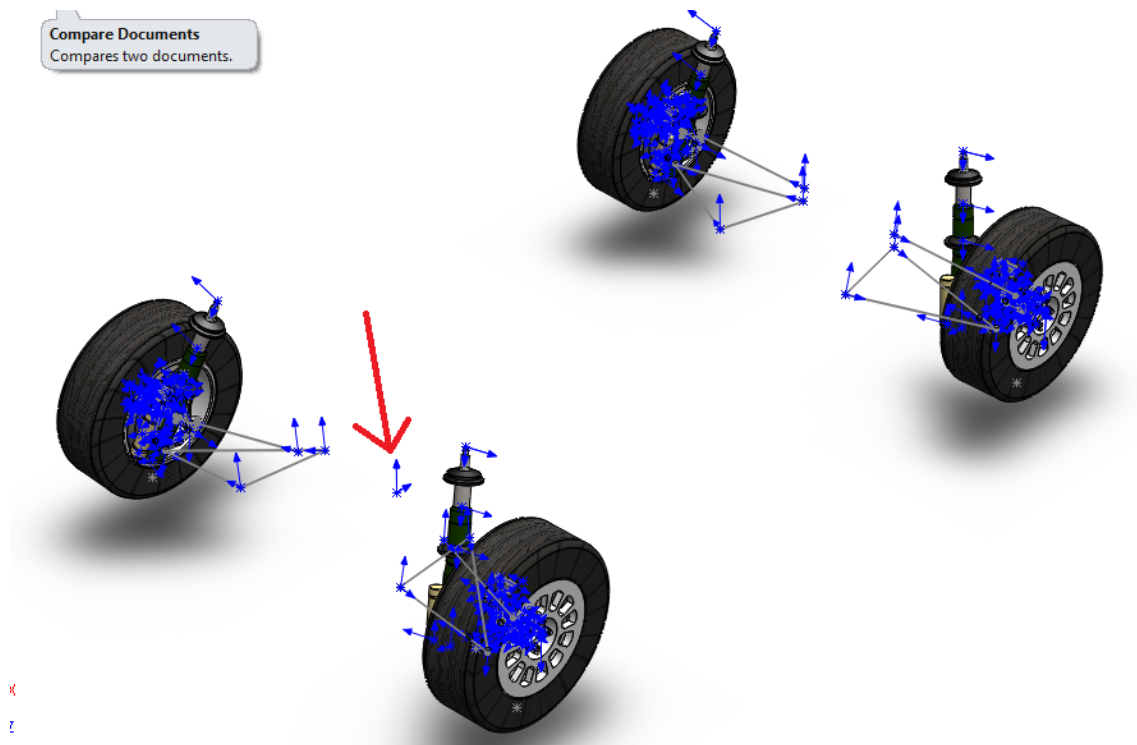
Renkaiden aurasikulmien välinen suhde kaartoharituksessa on helppo huomata kuvasta 34. Kulmat pysyvät käytännössä samana 30 mm siirtymään asti, minkä jälkeen sisäkaarteessa oleva vasen rengas alkaa harittaa enemmän. Kuvaan 34 on laskettu vielä teoreettinen Ackerman-kaartoharitus kaavalla 3 siten, että ulkokaarten pyörän on oletettu olevan oikeassa kulmassa. Kuvasta 34 huomataan, että teoreettinen kaartoharitus ei toteudu NRC-auton osalta käytännössä, sillä sisäkaarteessa oleva rengas ei käänny tarpeeksi suhteessa ulkokaarten renkaaseen.



KUVA 34. Kaartokulmat

## 7 KIINNITYSPISTEIDEN SIJAINNIT

Työn tavoitteena oli suunnitella pyöränkulmien ja ennalta päätettyjen mitoitusperusteella pyöränripustuksen komponenttien kiinnityspisteiden sijainnit. Kiinnityspisteiden on suunniteltu olevan pisteitä koordinaatistossa, missä muodossa myös Solidworks-ohjelma ne tarvittaessa ilmoittaa. Koordinaatiston pisteet sijaitsevat kaikki suhteessa samaan origoon, joka sijaitsee mallissa, ja tätä kautta myös työn tuloksissa auton keskilinjan ja edessä olevien takimmaisten alatukivarsien kuvitteellisten akseleiden risteytymäkohdassa. Origin paikka on osoitettu punaisella nuolella kuvassa 35.



*KUVA 35. Origin paikka mallin koordinaatistossa.*

Kiinnityspisteiden koordinaatit ovat ilmoitettu niin, että pisteet voidaan syöttää 3D-mallinnusohjelmaan ja kiinnittää pyöräntuennan komponentit niihin. Näin tehtäessä pyöränkulmat ovat joustoliikkeen aikana kappaleessa 6 selvitetyt mukaiset. Etupään kiinnityspisteiden koordinaatit ja komponenttien mitat ovat esitetty taulukossa 12.

*TAULUKKO 12. Etupään kiinnityspisteiden koordinaatit ja komponenttien mitat*

<b>ETU</b>	<b>Pi- tuus[mm]</b>	<b>X[mm]</b>	<b>Y[mm]</b>	<b>Z[mm]</b>
Raidetanko vasen	416,30	-112,50	61,50	330,75
Raidetanko oikea	416,30	-112,50	61,50	-330,75
Takimmainen tukivarsi oikea	540,00	0,00	0,00	-330,75
Etummainen tukivarsi oikea	385,00	-350,00	5,00	-365,75
Takimmainen tukivarsi vasen	540,00	0,00	0,00	330,75
Etummainen tukivarsi vasen	385,00	-350,00	5,00	365,75
Iskunvaimentimen yläpää vasen		-298,00	550,00	574,25
Iskunvaimentimen yläpää oikea		-298,00	550,00	-574,25

Takapään kiinnityspisteiden koordinaatit ja komponenttien mitat on esitetty taulukossa 13.

*TAULUKKO 13. Takapään kiinnityspisteiden koordinaatit ja komponenttien mitat*

<b>TAKA</b>	<b>Pi- tuus[mm]</b>	<b>X[mm]</b>	<b>Y[mm]</b>	<b>Z[mm]</b>
Reaktiotanko vasen	530,90	2127,41	66,00	203,57
Reaktiotanko oikea	530,90	2127,41	66,00	-203,57
Takimmainen tukivarsi oikea	550,00	2127,41	0,00	203,57
Takimmainen tukivarsi vasen	550,00	2127,41	0,00	-203,57
Etummainen tukivarsi oikea	535,00	1767,41	5,00	-301,07
Etummainen tukivarsi vasen	535,00	1767,41	5,00	301,07
Iskunvaimentimen yläpää oikea		2024,41	550,00	-573,57
Iskunvaimentimen yläpää vasen		2024,41	550,00	573,57

## 8 POHDINTA

Työn tavoitteena oli suunnitella NRC-autoon sopivat pyöränkulmat koko joustomatkalle. Pyöränkulmien arvojen suunnittelussa käytettiin verrokkina Citroen DS3 R5 -autosta mitattuja pyöränkulmia. Koska Citroen DS3 R5 -autosta mitatut kulmat joustoliikkeen aikana olivat osin epäselviä ja epäjohdonmukaisia, tavoitearvot eivät olleet suoraan mittauksista. Mittausten epäselvyys aiheutuu todennäköisesti jonkin pyöräntuennan komponentin jumittamisesta, mikä aiheuttaa sen, ettei joustoliikkeen aikana rengas välttämättä liiku niin kuin pitäisi tai on suunniteltu. Mittaustulosten epäselvyyksien takia jouduttiin tekemään suuria muutoksia tavoitearvoihin, sillä alun perin oli tarkoitus saada tavoitteelliset pyöränkulmien arvot suoraan mittaustuloksista.

Tavoitteena oli myös hakea NRC-auton Solidworks-mallissa pyöräntuennan komponenttien kiinnityspisteet siten, että suunnitellut pyöränkulmat toteutuisivat. Kiinnityspisteiden sijainneista koordinaatistossa oli tavoitteena tehdä taulukko, jota voitaisiin käyttää prototyyppiä rakentaessa. Pian työn aloituksen jälkeen huomattiin, että Solidworks-ohjelma ei ollut paras mahdollinen työkalu työn tekemiseen. Suurin ongelma oli työn tekovaiheessa pyöränkulmien hidas mittaaminen: kun pyöränkulmiin tehtiin muutoksia, kulman mittaaminen oli kömpelöä ja hidasta. Tosin voidaan myös olettaa, että kokenut henkilö olisi voinut saada ohjelman toimimaan siten, että käyttö olisi ollut sujuvampaa ja tarkoitukseen sopivampaa. Mallin kanssa oli jonkin verran ongelmia esimerkiksi kokoonpanon osien relaatioiden toimimattomuuksien kanssa, sillä mallia tehtiin monen tekijän toimesta pitkällä aikavälillä, mistä seurasi se, ettei viimeinen malli ollut tarpeeksi toimiva sujuvaan työskentelyyn. Työ saatiin kuitenkin tehtyä, eikä tuloksista tarvinnut tinkiä mallin takia.

Lähdekirjallisuutta teoriaan löytyy hyvin rata-autoille, mutta rallikäyttöön niukasti. Tämän lisäksi lähdekirjallisuudessa käsitellään huomattavasti enemmän päällekkäistä kolmiotukivarsituentaa kuin McPherson-tuentaa. Työn tuloksien kannalta lähdekirjallisuuden niukkuus ei kuitenkaan suuremmin vaikuttanut, sillä tavoitearvot otettiin Citroen DS3:n mittaustuloksista tai niitä hieman muuttamalla.

Roll centerin eli pyörintäkeskiön paikka autossa olisi saatu mitattua, mutta tieto ei ole hyödynnettävissä ilman massakeskipisteen paikkaa. Massakeskipistettä ei ollut mahdollista selvittää, sillä autoa ei ollut vielä suunniteltu tarpeeksi pitkälle. Pyörintäkeskiön paikka olisi hyvä olla muutettavissa ja säädettävissä. Helppo ja tehokkain ratkaisu pyörintäkeskiön säätämiseen olisi navan ja alatukivarren kiinnityspisteen väliin laitettava säätölevy. Kuvassa 6 esitetyn NRC-auton navassa voidaan säätölevy asentaa kuvassa näkyvän uniball-niveleen kiinnityslentyn ja navan väliin. Varsinkin kun siirrytään ajamaan soralta asfaltille ja autoa madalletaan, pyörintäkeskiön paikkaa olisi hyvä saada säädettyä. Kuvasta 5 voidaan huomata, että alatukivarren kulma vaikuttaa pyörintäkeskiön paikkaan yksittäisistä komponenteista eniten.



## LÄHTEET

1. Adams, Herb 1992. Chassis Desing, Building & Tuning For High Performance Handling. New York: Penguin Group.
2. 1-Traction Basics. 2009. Tom Mackie Racing. Saatavissa: <http://www.tom-mackieracing.com/tech/technical-articles/tires-and-traction/>. Hakupäivä 8.6.2016.
3. Siddhart, Sharma 2015. 3 Major Components of Wheel Alignment. Tyre Decho. Saatavissa: <http://tyres.cardekho.com/news/3-major-components-of-wheel-alignment/>. Hakupäivä 8.6.2016
4. Vilela, Daniel 2011. Analytical models correlation for vehicle dynamic handling properties. Scielo. Saatavissa: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-58782011000400007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782011000400007). Hakupäivä 14.6.2016.
5. Autoteknillinen taskukirja. 2002. Stuttgart: Bosch.
6. Aorauskulma. Wikiwand. Saatavissa: <http://www.wikiwand.com/fi/Aorauskulma>. Hakupäivä 16.6.2016.
7. Automotive Handbook. 2014. Karlsruhe: Robert Bosch.
8. Balance Motorsport 2004-2016. Suspension Geometry. Saatavissa: <https://balancemotorsport.co.uk/suspension-geometry>. Hakupäivä 22.6.2016
9. Unique Car Sand Parts 1999-2016. How To Repair Suspension. Saatavissa: [http://www.uniquecarsandparts.com.au/how\\_to\\_repair\\_suspension.php](http://www.uniquecarsandparts.com.au/how_to_repair_suspension.php). Hakupäivä 16.8.2016.
10. Puhn, Fred 1981. How To Make Your Car Handle. New York: Berkley Publishing Group.
11. Smith, Carroll 2004. Racing Chassis and Suspension Desing. Warrendale: Society of Automotive Engineering.

12. Does wider tyres equals more grip? 2013. Caterham CSR Trackday toy. A blog about my experiences with a Caterham CSR trackday toy. Saatavissa: <http://csr200.blogspot.fi/2013/04/does-wider-tyres-equals-more-grip.html>.  
Hakupäivä 22.8.2016.

13. Niskanen, Perttu 2015. T331106 Autotekniikka 1 6 op. Opintojakson luennot keväällä 2015. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.