



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Antti Korolainen

Erilliselementeillä toteutetun jousituksen simulaatiomallin suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

20.5.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Antti Korolainen Erilliselementeillä toteutetun jousituksen simulaatiomallin suunnittelu 29 sivua 20.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli suunnitella alustavasti erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutettu jousitus Formula Student -autoon ja rakentaa siitä simulaatiomalli Adams/Car-nimiseen ajodynamiikan simulointiohjelmaan. Työ tehtiin yhteistyössä Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula Student -tiimin, Metropolia Motorsportin, kanssa. Työ oli osa jousituksen kehitykseen liittyvää vaihtoehtoisten jousitusten vertailua.</p> <p>Työ sai alkunsa erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutetun jousituksen käytön yleistymisestä Formula Student -autoissa. Yleistymisestä heräsi kiinnostus tutkia jousituksen hyviä puolia, sillä Metropolia Motorsportilla ei ollut aiempaa kokemusta tämäntyyppisestä jousituksesta. Tämä työ rajautui teoriatarkasteluun ja simulaatiomallin rakennukseen, jotka ovat ensimmäiset vaiheet jousitustyyppin tutkimisessa. Myöhemmin Metropolia Motorsport voi jatkaa jousituksen tutkimista vertailemalla sitä nykyiseen jousitukseen erilaisilla simuloinneilla.</p> <p>Työssä tarkastellaan ajodynamiikan perusteita, muutamia erilaisia jousitusvaihtoehtoja ja jousituksen valintaa sekä kuvataan simulaatiomallin rakentamisen vaiheet. Tietolähteinä käytettiin alan tunnettuja kirjallisuuslähteitä, mutta tieto perustuu osin myös kolmen vuoden Formula Student -uran aikana karttuneeseen kokemukseen.</p> <p>Työn lopputuloksena valmistui toimivat simulaatiomallit sekä erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutetusta jousituksesta sekä HPF019:n nykyisestä jousituksesta.</p>	
Avainsanat	Formula Student, jousitus, ajodynamiikka

Author Title Number of Pages Date	Antti Korolainen Suspension Design of separate Roll and Heave Elements with a Simulation Model 29 pages 20 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Senior Lecturer
<p>The objective of this thesis was to design a suspension system with separate roll and heave elements for the Formula Student car of Metropolia Motorsport and build a simulation model by using the simulation program Adams/Car as part of the system design. The work was carried out in cooperation with Metropolia University of Applied Sciences Formula Student team.</p> <p>A starting point for this thesis was that the type of this suspension has become more popular in Formula Student cars. Metropolia Motorsport did not have previous experience of this suspension type, and therefore, it found to be useful to study it in detail. The main idea of this thesis was theoretical research and building a simulation model which were the first steps of getting familiar with the suspension system. This thesis offers basics for possible future examinations of Metropolia Motorsport.</p> <p>This study includes basic theory of vehicle dynamics, introduction of suspension types that are used in the Formula Student cars and the steps for creating a simulation model. As the main sources of the study some famous literature and the writer's own experience of the Formula Student project work during three years were used.</p> <p>As a result, this thesis offers simulation models with both separated roll and heave elements and HPF019 current suspension.</p>	
Keywords	Formula Student, Suspension, Vehicle dynamics

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Insinööriyön rajaus ja rakenne	1
1.2	Formula Student	2
1.3	Metropolia Motorsport	3
2	Teoreettinen tarkastelu	3
2.1	Ajodynamiikka	3
2.1.1	Pyöräkuorman muutos	4
2.1.2	Korin liike	6
2.1.3	Jousto	8
2.2	Auton jousitus (komponentit)	9
2.2.1	Jousi	10
2.2.2	Iskunvaimennin	11
2.3	Formula Studentissa käytetyt jousitustyytit	14
2.3.1	Jousitustyytin valinta	14
2.3.2	Perinteinen	15
2.3.3	Kolmella elementillä toteutettu jousitus	16
2.3.4	Erillisillä roll- ja heave -elementeillä toteutettu jousitus	17
3	Simulaatiomallit	19
3.1	Suunnittelun aloitus	19
3.1.1	Lähtökohdat	19
3.1.2	Tavoitteet	19
3.1.3	Adams/Car-ohjelmiston käyttöönotto	20
3.2	Suunnittelu ja mallinnus	21
3.2.1	Viivamalli	21
3.2.2	Mallipohjan rakennus	23
3.2.3	Simulaatiomalli	25
3.3	Simuloinnit	26
4	Yhteenveto	28

Lyhenteet

HPF019 Metropolia Motorsportin kauden 2019 Formula Student -kilpa-auto.

SAE The society of Automotive Engineers.

VKK Vapaakappalekuvaaja.

TKI-projekti Tutkimus-, kehittämis- ja innovaatioprojekti.

1 Johdanto

Insinööritö tehtiin yhteistyössä Metropolia Motorsportin kanssa. Tavoitteena oli Formula Student -auton jousituksen ymmärtäminen, kehittäminen sekä tiedon dokumentointi tuleville tiimin jäsenille. Formula Student -urani aikana olen päässyt opiskelemaan ja toteuttamaan erilaisia projekteja, niin autoon kuin sen ympärillä tapahtuvaan projektitoimintaan ja johtamiseen liittyen. Tässä insinööritössä halusin keskittyä oman tietotason kehittämiseen jousituksen teoriassa ja Adams/Car-mallinnusohjelman käytössä. Dokumentoidusta insinööritöistä ja simulaatiomalleista uskon olevan hyötyä myöskin Metropolia Motorsportille ja sen jäsenille.

1.1 Insinööritön rajausta ja rakenne

Vakoilu ja toisten ideoista oppiminen ovat iso osa Formula Student -kilpailua. Kilpailuissa toisia autoja pääsee tarkastelemaan aivan lähietäisyydeltä; kaikki myös kertovat toisilleen avoimesti suunnittelemistaan ratkaisuksista. Todelliseen ymmärtämiseen vaaditaan kuitenkin tarkkaa itsenäistä tutkimusta. Jotta konseptia voisi kopioida ja käyttää omassa autossa, täytyy myös varmistaa konseptin sopivuus juuri kyseiseen autoon. Kilpailuissa on selvästi voinut huomata erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutetun jousituksen käytön yleistyneen. Tästä syntyi kiinnostus lähteä tutkimaan jousitustyyppien toimivuutta ja mahdollisia hyötyjä Metropolia Motorsportin autossa, sillä tiimillä ei ollut aiempaa kokemusta tämäntyyppisestä jousituksesta.

Työ rajautuu jousituksen suunnitteluun tarvittavan teorian tarkasteluun ja kahden simulaatiomallin luontiin Adams/Car-simulaatio-ohjelmalla. Teorian tarkastelu keskittyy jousiin ja vaimentimisiin, sillä vaihtoehtoisista jousituskonseptista verrattessa on tarkoitus pitää tukivarsigeometriat samana kuin HPF019-autossa.

Ensin esitellään hieman teoriaa, miksi jousitusta ja vaimennusta yleisesti käytetään sekä pääkomponentit. Tämän jälkeen tutustutaan HPF019-auton jousitukseen ja muutama vaihtoehtoiseen ratkaisuun. Lisäksi työssä kuvataan simulaatiomallien rakennus Adams Car -simulaatio-ohjelmaan. Lopuksi kootaan työn tulokset, arvioidaan työssä onnistumista ja esitetään jatkosuunnitelmat.

1.2 Formula Student

Formula Student on kansainvälinen korkeakouluopiskelijoiden suunnittelu-, rakennus- ja ajokilpailu. Sen perusti The society of Automotive Engineers Yhdysvalloissa vuonna 1981. Sarjan perustamisen tavoitteena oli kehittää autoinsinöörien osaamista ja valmistaa heitä olemaan valmiimpia siirtymään koulusta työelämään. Nykyään lähes jokaisella autoalaa kouluttavalla teknillisellä korkeakoululla on vähintään yksi auto mukana kilpailussa. Kilpailuita järjestetään ympäri maailman, Yhdysvalloissa, Euroopassa, Australiassa ja Aasiassa. /1./ Alueittain saattaa olla pieniä eroja säännöissä, mutta pääpiirteittäin kaikki kilpailut ovat samankaltaisia.

Sääntökirja, jonka mukaan autot pitää rakentaa kilpailuihin, on hyvin kattava. Erityisesti turvallisuusasiat on huomioitu tarkasti. Säännöt päivittyvät joka vuosi hieman, sillä täten sarja kehittyy. Säännöissä vaaditaan uusia asioita, niin turvallisuuteen kuin teknisiin ratkaisuihin liittyen. Sääntöjen vuosittainen uudistuminen ei aiheuta ongelmaa, sillä vuosittain täytyy kuitenkin rakentaa uusi auto. Säännöt siis määrittävät, että tietyllä autolla kilpaillessa ensimmäisen ja viimeisen kilpailun väli saa olla enintään vuosi /1/.

Itse kilpailu koostuu tiukasta katsastuksesta sekä staattisista ja dynaamisista osuuksista. Katsastuksessa tarkastetaan auton sääntömääräisyys hyvin tarkasti. Dynaamisiin osuuksiin ei voi osallistua ilman hyväksytyä katsastusta. Staattiset osuudet koostuvat Design Event -osuudesta eli auton suunnittelun ja toteutuksen arvostelusta, Cost reportista, jossa käydään läpi valmistuskustannuksiin liittyviä asioita, sekä Business Plan -presentaatiosta, jossa esitellään auton ympärille kehitelty liikeidea. Staattisista osuuksista voi saada noin kolmasosan kilpailun kokonaispisteistä. /1./

Dynaamisia osuuksia on neljä erilaista: Acceleration, joka on 75 metrin kiihdytys, Skid pad eli vakioympyrä, Autocross, jossa ajetaan kilometrin pituinen sprintti, ja pääosuutena 22 kilometriä pitkä Endurance. Endurance-matkasta arvostellaan myös Efficiency-osuus eli taloudellisuus. /1./ Kilpailu on siis erittäin monipuolinen ja vaatii osaamista monelta eri osaamisalueelta.

1.3 Metropolia Motorsport

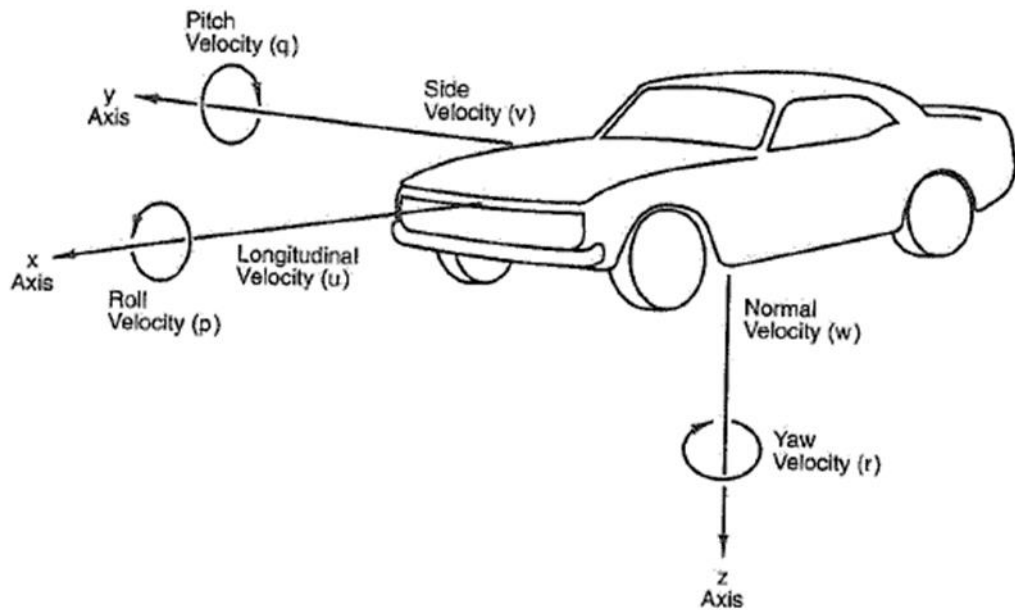
Metropolia Motorsport on Metropolia ammattikorkeakoulun Formula Student -tiimi. Tiimi on Metropolian TKI-projekti, mutta pyörii käytännössä täysin opiskelijavetoisesti. Tiimissä on jäseniä vuosittain noin 30 henkilöä. Ensimmäinen polttomoottorikäyttöinen formula valmistui 2002, jonka jälkeen formuloita on valmistunut lähes joka vuosi. Vuonna 2013 valmistui Metropolian ensimmäinen sähkötoiminen formula, ja Metropolia Motorsport on edelleen ainut sähkötiimi Suomessa. Kilpailuissa on keskiarvoisesti menestytty hyvin. Historian varrella on otettu useita palkintosijoja, mutta epäonnistumisiakin mahtuu mukaan. Harmillinen tapaus sattui esimerkiksi viime kesänä, kun akku vikaantui Endurancen viimeisellä kierroksella FS Spainissä ja osuus päättyi keskeytykseen. Osuudesta ei siis tullut ollenkaan pisteitä, mikä vaikutti merkittävästi loppusijoitukseen kilpailussa. Tällä hetkellä World Rankingissa sijoitus on sähkötiimien 52:s. Mukana yhteensä noin 650 tiimiä.

2 Teoreettinen tarkastelu

2.1 Ajodynamiikka

Liikkuvaan ajoneuvoon vaikuttaa jatkuvasti jokin voima johonkin kohtaan ja johonkin suuntaan. Voima saa aikaan kiihtyvyyden ja liikkeen. Ajoneuvoon kohdistuu voimaa, niin renkaiden kautta, aerodynamiikasta kuin liikkuvien massojen hitautta. Jotta nämä kaikki voimat, kiihtyvyydet, liikkeet pystyttäisiin määrittämään ja vertailemaan niitä keskenään, tarvitaan yhtenäinen koordinaatisto. /2, s. 113./

Maailmaa kuvataan yleensä kolmiulotteisesti eli on kolme akselia (x , y , z), jotka ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa. Akseleita yhdistävää pistettä kutsutaan origoksi. Suureiden vertailua hankaloittaa se, että eri yhteyksissä akseleiden suunnat vaihtelevat. Ajoneuvodynamiikassa käytetään yleisesti SAE:n määrittämää koordinaatistoa /2, s. 114/. Kun on yhtenäinen koordinaatisto, johon on määritetty akseleiden ja momenttien positiiviset suunnat, on voimien ja momenttien vertailu mahdollista. Kuvassa 1 on esitetty hahmotelma SAE-koordinaatiston sijoittamisesta ajoneuvoon.



Kuva 1. SAE, ajoneuvon koordinaatisto/2, s.115/.

Ajodynamiikka käsitellään yleisesti kolmessa osassa, pitkittäisdynamiikka, sivuttaisdynamiikka ja pystysuuntainen dynamiikka. Pitkittäisdynamiikasta puhutaan, kun kyseessä on x-akselin suunnassa tapahtuvasta liikkeestä, mikä liitetään usein suorituskykyyn. Suorat kiihdytykset ja jarrutukset ovat tätä selkeimmillään. Sivuttaisdynamiikasta puhuttaessa sen mielletään usein liittyvän auton käsiteltävyyteen ja kaarrekäyttäytymiseen. /12, s. 57./ Pystysuuntaisen dynamiikan ajatellaan monesti olevan vain mukavuutta käsittelevä jousien liike, mutta pystysuuntaista liikettä tapahtuu ajoneuvon dynamiikassa jatkuvasti pitkittäis- ja sivuttaisdynamiikan osana.

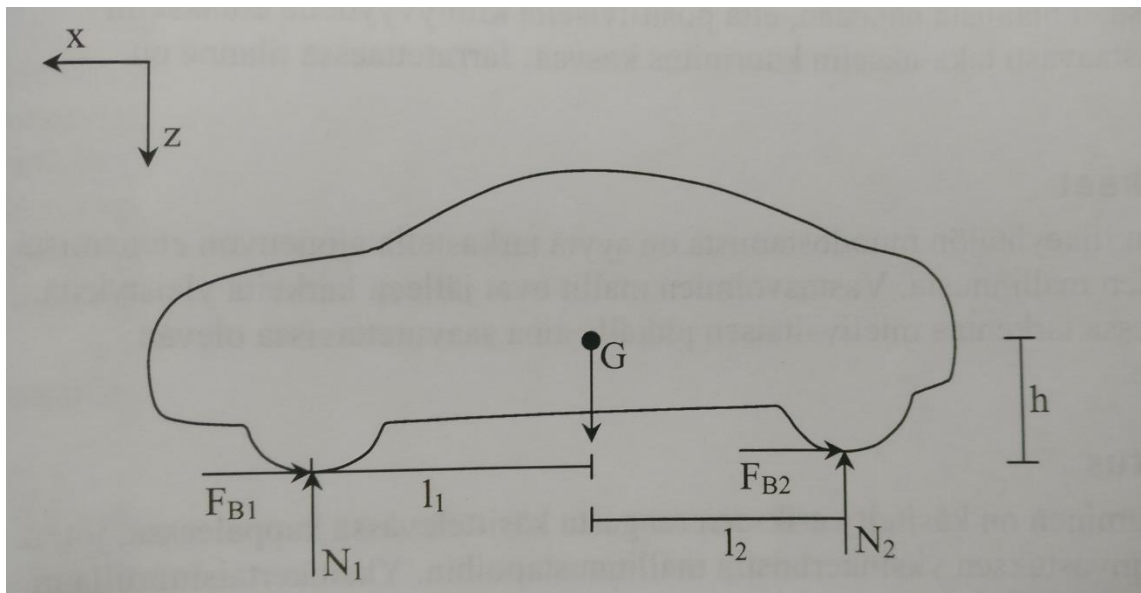
Tässä työssä on tarve keskittyä ajodynamiikan osalta pääasiassa pyöräkuorman muutokseen ja joustoon, joten emme käy läpi muita ajodynamiikan käsitteitä, kuten ajovastukset, pyörän kulmat tai tukivarsigeometriat.

2.1.1 Pyöräkuorman muutos

Pyöräkuorman muutokseen ensisijainen vaikuttaja on sen aiheuttaja eli massan hitaus. Hitaus tarkoittaa kappaleen kykyä vastustaa liiketilän muutosta. Suoraviivaisessa liikkeessä mittana käytetään massaa ja pyörivässä liikkeessä hitausmomenttia. Ajoneuvoja

tarkasteltaessa nämä molemmat täytyy ottaa huomioon, sillä ajoneuvossa on sekä pyöriviä, että suoraviivaisesti liikkuvia komponentteja. Laskennassa yhteisvaikutus redusoidaan vaikuttamaan samaan koordinaatistoon yhtenä suureena, tarkastelun helpottamiseksi tavallisimmin suoraviivaisen liikkeen massaksi. /12, s. 57./

Pitkittäisessä pyöräkuorman muutoksessa tarkastellaan painon siirtymistä etu- ja taka-akselin välillä dynaamisissa tilanteissa. Tarkastelun yksinkertaistamiseksi käytetään kaksipyörämallia. /12, s. 59./ Tarkastelu on paras aloittaa vapaakappalekuvaajan avulla, sillä siinä näkyy pyöräkuorman muutoksen aiheuttavat komponentit ja mistä mihin kuorma siirtyy. Tilanteen kuvaus on helppo toteuttaa VKK:n avulla (kuva 2). Vapaakappalekuvaajasta muodostetaan tasapainoyhtälöt x- ja y-suuntiin sekä momenttiyhtälö jonkin pisteen ympäri (1,2,3). Näillä yhtälöillä voidaan laskea esimerkiksi akselikuormat jarrutustilanteessa.



Kuva 2. Vapaakappalekuvaaja /12, s. 59/.

$$ma_x = -(F_{B1} + F_{B2}) \quad (1)$$

$$G - N_1 - N_2 = 0 \quad (2)$$

$$h(F_{B1} + F_{B2}) + l_2 N_2 - l_1 N_1 = 0 \quad (3)$$

Kuljettajan muuttaessa ohjauskulmaa se antaa herätteen, mistä seuraa sivuttaisdynamiikan alle lukeutuvia tapahtumia. Ohjausliikkeestä seuraa ohjauslaitteiden, pyöräntuennan ja renkaiden kautta voima, jonka aiheuttama momentti pyrkii kääntämään ajoneuvon kulkusuuntaa. Koska ajoneuvo ei ole äärettömän kevyt vaan sillä on massaa ja massalla hitautta, pyrkii massa jatkamaan aiempaan menosuuntaan. Massalla on siis ajoneuvoon nähden sivuttaissuuntainen kiihtyvyys. Tämä kiihtyvyys aiheuttaa voiman, joka vastustaa auton suunnanmuutosta ja saa aikaan pyöräkuorman siirtymistä ulommille pyörille. Sivuttaiseen pyöräkuorman muutokseen pätevät samat lait kuin pitkittäissuuntaisena, eli se voidaan laskea samoja oppeja käyttäen. /12, s. 79./

Asia, johon voidaan vaikuttaa ajoneuvoa suunniteltaessa, on kuinka herkästi se reagoi ohjaus herätteisiin. Äkkiseltään voisi ajatella, että sitä parempi, mitä herkemmin ajoneuvo reagoi herätteisiin eli vasteaika kuljettajan käskyihin on lyhyt. Kuitenkin jos herkkyys on liian suuri, tulee ajamisesta todella rauhatonta ja epästabiliia, sillä jokainen pienikin liike ja heilahdus vaikuttavat heti. Toisaalta vasteeltaan hitaampi on mukavampi ja vakaampi, mutta äkillisessä tilanteessa se ei välttämättä pysty suoriutumaan. Kuljettaja ei pysty esimerkiksi pujottelussa tekemään tarpeeksi nopeasti suurta ohjausliikettä ehtiäkseen kääntämään tiukkaan kaarteeseen. Tässä huomataan, ettei ole yhtä oikeaa ratkaisua, vaan joudutaan tekemään kompromisseja ja suunnittelemaan käyttöön parhaiten sopiva. Tämä esimerkki oli sivuttaispainonsiirrosta, mutta sama pätee pitkittäiseen painonsiirtoon. Todellisissa tilanteissa on harvoin kyse puhtaasti vain pitkittäis- tai sivuttaispainonsiirrosta, vaan se on niiden yhdistelmä.

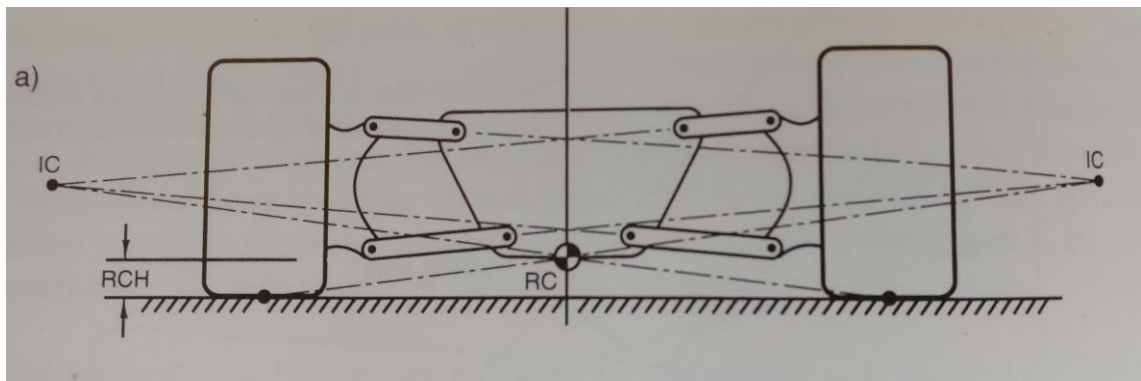
2.1.2 Korin liike

Pyöräkuorman muutoksen lisäksi jousitetun auton kori kallistelee kiihtyvyyksien takia. Koordinaatistossa määritetyn y-akselin ympäri tapahtuvaa kallistelua sanotaan nyökkäämiseksi. Tällaista liikettä syntyy jarrutuksissa ja kiihdytyksissä. Kuinka suuri liike tapahtuu, riippuu kiihtyvyyksistä, auton alustageometrioista, jousituksen/vaimennuksen jäykkyyksistä, massoista sekä niiden sijainnista. /12, s. 57./ Todella moni asia siis vaikuttaa auton käyttäytymiseen. Edellä mainitut asiat vaikuttavat myös x-akselin ympäri tapahtuvaan liikkeeseen. X-akselin ympäri tapahtuvaa liikettä kutsutaan kallisteluksi. Kallistelua tapahtuu, kun autoon kohdistuu sivuttaiskiihtyvyyttä.

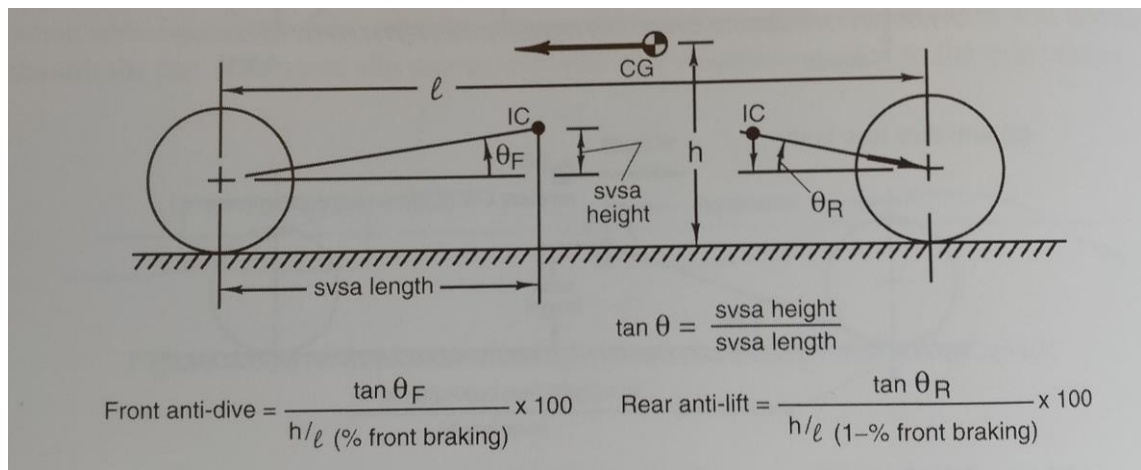
Säätämällä yhtä suuretta tiettyä tilannetta varten muuttuu auton käyttäytyminen myös toisessa tilanteessa, eli täytyy osata nähdä kokonaisuus. Poikkeuksetta käyttäytyminen huononee muissa tilanteissa, jos tietyssä tilanteessa käyttäytymistä parannetaan. Tämä sen takia, että ääriarvoja ja fysiikan lakeja ei voi ylittää, mutta balanssia voidaan jakaa halutulla tavalla.

X-akselin ympäri tapahtuvaa kallistelua säädetään usein kallistuksenvakaajalla, jolla voidaan puuttua vain kallisteluun vaikuttamatta juuri muuhun käyttäytymiseen. Nyökkäyksenvakautukseenkin on kehitetty vakaajia, mutta niitä ei ole kovin yleisesti käytössä hankalan ja kalliin toteutuksen vuoksi.

Radalla ajoneuvosta voidaan säätää monesti vain jousia, vaimentimia ja kallistuksenvakaajia. Kilpa-ajoneuvoissa voi olla säädettäviä tukivarsia, ja näin ollen pystytään tekemään pieniä muutoksia myös geometrioihin. Geometriat ja painopisteen sijainti täytyy kuitenkin pääsääntöisesti määrittää täysin jo suunnitteluvaiheessa. Kuvassa 3 on edestäpäin viivoilla hahmoteltu piirros kallistuskeskiön (RC) sijainnista. Kallistuskeskiön korkeus ja etäisyys painopisteeseen ovat yksi merkittävimmistä tekijöistä korin liikkeeseen. Sivusta kuvatussa projektiossa (kuva 4) puolestaan näkyy nyökkäykseen vaikuttavat anti-geometriat.



Kuva 3. Kallistuskeskiö /2, s. 614/.



Kuva 4. Antigeometriat /2, s. 618/.

Pystysuuntaisesta dynamiikasta harvemmin puhutaan omana käsitteenään; yleisemmin puhutaan vain joustosta. Termin jousto alle sisältyy kaikki joustoliike, kuten yksipyöräjousto, joka ei ole korin pystysuuntaista dynamiikkaa. Pystysuuntaisesta dynamiikasta on kyse silloin, kun tapahtuu vain korin pysty eli z-akselin suuntaista liikettä. Selkein esimerkki pystysuuntaisesta dynamiikasta on aerodynamiikan tuottaman normaalivoiman johdosta aiheutuva ajokorkeuden muutos, jouset painuvat kasaan voiman kasvaessa. Korin z-suuntaista liikehdintää voi tapahtua myös esimerkiksi kaarreajossa, jolloin tukivarsigeometrioiden takia auton kori nousee ylöspäin tai laskee alaspäin kaarteeseen kallistuessa.

2.1.3 Jousto

Jousto on pyörän pystysuuntaista liikettä koriin nähden. Jousto erotellaan sen liikesuunnan mukaan sisäänjoustoksi, kun pyörän liike on korin suuntaan, ja ulosjoustoksi, jos liike on pois päin. Lisäksi joustosta jaetaan yksipyörä- ja tasapyöräjoustoksi. Kun ajoneuvon yksittäinen pyörä ylittää epätasaisuuden ja tämän seurauksena jousitus joustaa, on kyseessä yksipyöräjousto. Kun taas akselin molemmat pyörät joustavat samanaikaisesti, ilman että kyse on korin kallistumisesta, on kyseessä tasapyöräjousto. /4, s.226./

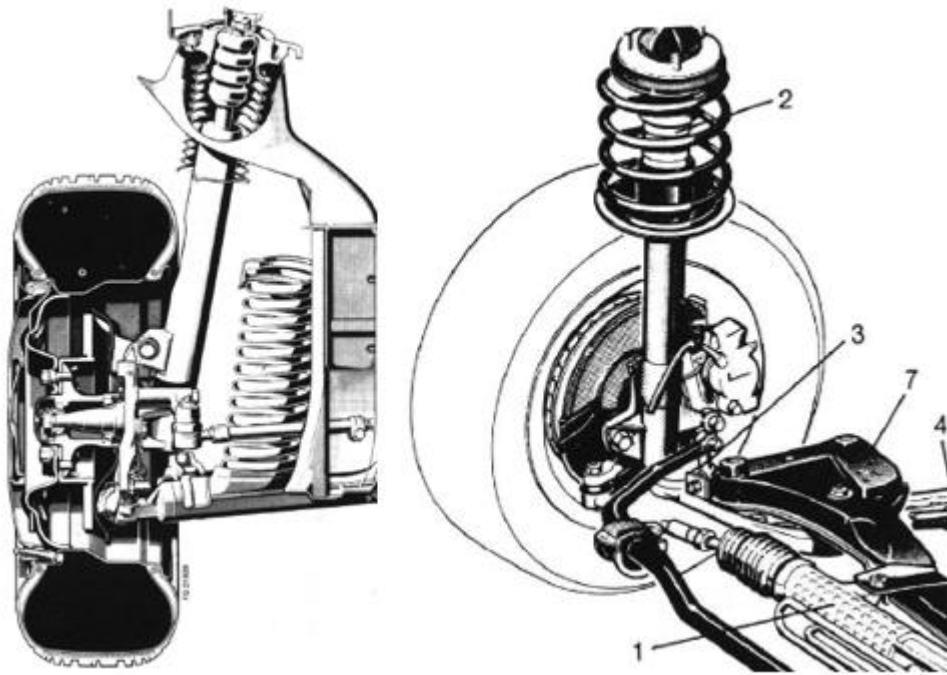
2.2 Auton jousitus (komponentit)

Jousituksen tehtävä on parantaa ajoneuvon hallittavuutta, ajomukavuutta sekä suojella auton rakenteita ja tiestöä /3, s. 125/. Ajoradan pinta on aina epätasainen, mikä tuntuu jousittamattomassa ajoneuvossa hyvin epämukavalta ja aiheuttaa pyöränkuorman muutoksia. Jouset ja vaimentimet vaimentavat värähtelyitä ja tekevät näin ollen ajamisesta mukavampaa. Jousitus tasaa myöskin pyöräkuorman muutoksia ja näin parantaa hallittavuutta, sillä pyöräkuorman muutokset huonontavat kokonaispitoa. On aina pidon kannalta parempi, mitä tasaisemmin kuorma on jakaantunut pyörille. /3, s. 130./

Kun puhutaan yleiskielessä auton jousituksesta, tarkoitetaan yleensä vain jousia ja iskunvaimentimia, sillä niiden ajatellaan olevan sen, mikä liikeisiin vaikuttaa. Todellisuudessa auton joustoon ja käyttäytymiseen vaikuttavat suuresti myös tukivarsigeometria ja lukuisat muut asiat. Tässäkin työssä tutkimus on rajattu jousiin, vaimentimiin sekä niihin suoranaisesti liikettä ja voimaa välittäviin komponentteihin. Tarkastelussa ovat siis mukana jousien ja vaimentimien lisäksi linkut, koska niiden kautta vaikutetaan liikenopeuksiin ja voimiin.

Yleisin toteutustapa on yksi jousi/vaimennin per kulma, mutta vaihtoehtoisiakin toteutustapoja on kuten kolmella elementillä per akseli tai erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutettu. Yleisesti näitä vaihtoehtoisia ratkaisuita löytyy kuitenkin vain kilpa-autoista, koska ne ovat kalliita ja monimutkaisia toteuttaa.

Jousi ja vaimennin voivat olla rakennettuna yhdeksi paketiksi, joka kiinnitetään auton koriin, tai ne voivat olla erillisinä komponentteina (kuva 5). Yleensä ne ovat yhtenä pakeettina. Henkilöautoissa taka-akselilla käytetään usein erillisinä, mutta edessä poikkeuksetta yhtenä pakeettina. /3, s. 89–94./ Formula Student -autoissakin on muutamia erikoisia yksilöitä, joissa jousi ja vaimennin ovat erillään. Näissä sen takia, koska jousena on käytetty lehtijousta. Lehtijousta ja vaimenninta ei pystytä rakentamaan samalla tavoin sisäkkäin, kuin kierrejousen tapauksessa.



Kuva 5. Jousi ja vaimennin erikseen sekä yhtenäisenä pakettina toteutettuna /3, s. 91–92/.

2.2.1 Jousi

Jousi on jousituksen voimaelementti, joka kantaa kuormaa ja tuottaa voimaa ajoneuvon massan liikettä vastaan joustossa. Jousen jäykkyydellä säädetään ajoneuvon ominaisuuksia eli miten se reagoi ajoradan epätasaisuuksiin ja erisuuntaisiin korin liikkeisiin. Jousi siis tuottaa voimaa, kun sitä puristetaan kasaan. Se tuottaa tietyn voiman tiettyä siirtymää kohden. /4, s. 204/. Jousen jäykkyyttä kuvataankin jousivakiolla, joka on sen tuottama voima mittayksikköä kohden, esimerkiksi N/mm.

Yleisin käytetty jousi on teräksinen kierrejousi, jonka ominaisuuksiin vaikutetaan materiaalin poikkipinta-alalla, kierteiden tiheydellä ja halkaisijalla /3, s. 151/. Trendinä viime vuosina on ollut kaasujousi, jossa jousena toimii kaasu (yleensä ilma). Jousivakioon vaikutetaan kaasun paineella ja kammion tilavuudella. Etuina kaasujousessa ovat nopea ja vaivaton säädettävyys. Kuvassa 6 on esitetty esimerkit molemmista vaihtoehdoista. Vasemmalla on Metropolia Motorsportilla käytössä ollut Öhlinsin vaimennin, jonka ympärillä on perinteinen kierrejousi ja vieressä Cane Creekin valmistama kaasujousi/vaimennin eli siinä on molemmat yhtenäisenä rakenteena.



Kuva 6. Formula Studentissa käytetty perinteinen kierrejousi ja kaasujousi.

Käytössä olevia jousityyppejä ovat myös vääntösauvajousi, lehtijousi ja kaasunestejousi /3, s. 141./ Nämä siis yleisimpiä. Ääriolosuhteissa joustavana elementtinä voidaan käyttää mitä vain esimerkiksi kumi- tai metallikomponenttia, sillä teoriassa kaikki materiaalit ovat joustavia.

Metropolia Motorsportilla on perinteisesti ollut käytössä teräksiset kierrejouset, mutta 2018 vuoden autossa kokeiltiin ilmajousia juuri niiden helpon säädettävyyden ja kevyen painon vuoksi. Ilmajousiin vaihdon yhteydessä kohdattiin kuitenkin ongelmia jousen säädössä. Ilmajousessa voidaan vaikuttaa jousivakioon paineella ja jousen progressiivisuuden ilmatilan tilavuudella, mutta siinä ei voida säätää erikseen esijännitystä. Tämän vuoksi jouduttiin tekemään kompromisseja staattisen paineen suhteen, jotta auto täytti vaaditut säännöt joustoliikkeen osalta.

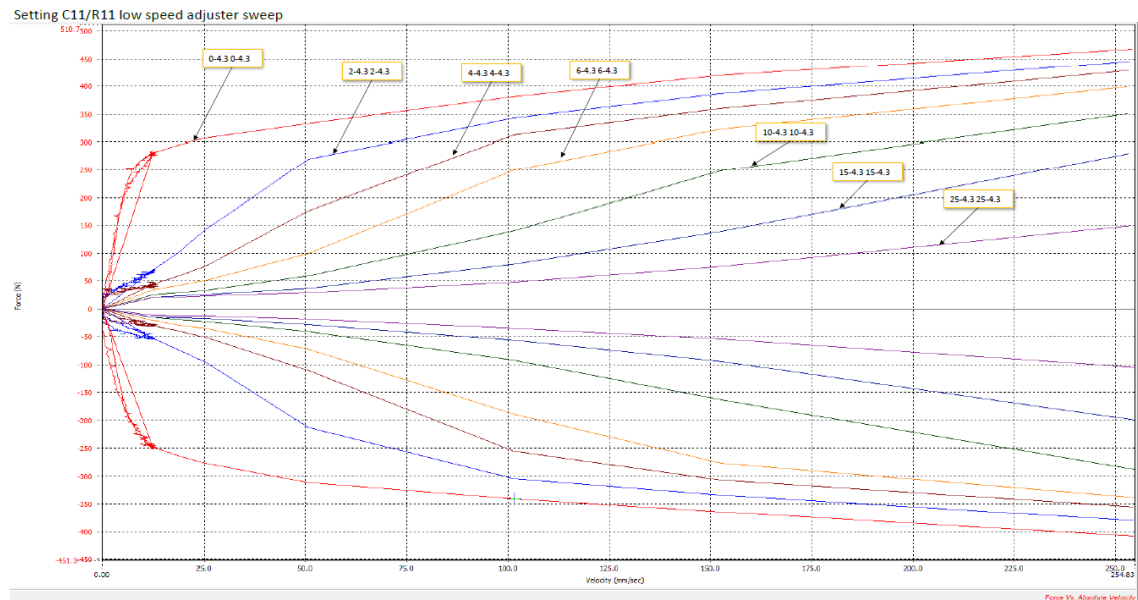
2.2.2 Iskunvaimennin

Jousituksen toisena pääkomponenttina iskunvaimennin, jonka tehtävä on värähtelyiden ja liikkeiden vaimentaminen. Värähtelyitä syntyy epätasaisilla pinnoilla ajettaessa, kun

taas massojen liikettä erilaisissa suunnan muutoksissa, kuten jarrutuksissa, kiihdytyksissä tai kaarreajossa. Iskunvaimennin vaimentaa sekä jousitetun että jousittamattoman massan liikettä. Jousitettu massa tarkoittaa auton koria ja kaikkia muita osia, joiden kuormaa jouset kantavat. Jousittamatonta massaa puolestaan ovat kaikki muut osat eli ne, jotka ovat jousen ja kontaktipinnan välissä. Tällaisia komponentteja ovat olkavarret, jarrut, vanteet ja renkaat. /5, s. 49./

Monissa osissa ja liitoksissa itsessään tapahtuu sisäistä vaimennusta, mutta vaimennuksen osuus on todella pientä siihen nähden mitä iskunvaimennin vaimentaa. Sisäinen vaimennus johtuu sisäisestä kitkasta. Tällaista vaimennusta tapahtuu esimerkiksi jousissa ja renkaissa. Renkaat vaimentavat komponenteista eniten, mutta niidenkin osuus on suuruudeltaan vain muutaman prosentin kokonaisvaimennuksesta. /5, s. 49./

Voimantuotto jousissa ja vääntösauvoissa on riippuvainen siirtymästä tai vääntymästä. On helppoa ajatella, että kun jouta puristetaan enemmän kasaan, se vastustaa sitä suuremmalla voimalla. Vaimentimien tuottaman voima puolestaan riippuu liikenopeudesta. Iskunvaimennin on tavallaan dynaaminen jousi, ja se tuottaa voimaa vain, kun se liikkuu. Mitä nopeampaa liikettä vaimentimeen kohdistuu, sitä suuremman vastustavan voiman se tuottaa (kuva 7). /5, s. 49./ Kuvasta näkyy myös, kuinka säätöventtiilien eri säädöt vaikuttavat vaimennukseen. Tässä on esimerkki vain yhdestä vaimentimesta, mutta erilaiset vaimentimet voivat tuottaa hyvin erilaisia, niin lineaarisia, progressiivisiä kuin degressiivisiäkin vaimennuskäyriä.



Kuva 7. Öhlins ttx25 -vaimennuskäyrä /6/.

Karkeasti autoissa käytössä olevat iskunvaimentimet ovat rakenteeltaan putken muotoisia säiliöitä, jonka sisällä oleva mäntä puristaa liikkeen seurauksena nestettä venttiileiden ja kanavien läpi. Vaimennusta tapahtuu, kun nesteen virtausta rajoitetaan ja liikeenergia muuttuu lämmöksi. Lämpö johdetaan nesteen kautta vaimentimen ulkokuoreen, josta se haihtuu ilmaan. Vaimennuksen voimakkuuteen vaikutetaan säätämällä tai muuttamalla öljyn virtausta rajoittavia venttiileitä ja muita komponentteja, jotka vaikuttavat nesteen virtaukseen. /4, s. 216-218./

Vaimentimissa on erikseen sisään- ja ulosjouston vaimennus, ja ne voivat olla jaettuna lisäksi hitaaseen ja nopeaan alueeseen. Näiden eri alueiden vaimennus on toteutettu erillisillä komponenteilla vaimentimen sisällä. Perusvaimentimessa ei ole välttämättä mitään ulkopuolisia säätöjä, mutta hyvässä kilpakäyttöön tarkoitettu vaimentimessa voi olla säädöt näille kaikille neljälle alueelle erikseen. Eri vaimennusalueita käytetään eri liiketilojen vaimennuksen säätöön. Karkeasti voidaan yleistää, että sisäänvaimennus kontrolloi jousittamatonta massaa ja ulosvaimennus jousitettua massaa. Nopeudessa puolestaan hitaan alueen voi ajatella vaikuttavan korin liikkeisiin ja nopean alueen tien epätasaisuuksiin. Todellisuudessa kaikki säädöt vaikuttavat kaikkiin edellä mainittuihin liiketiloihin ja yhtä säätöä muuttamalla toisenkin alueen vaimennus muuttuu. /5, s. 59-60/.

Vaimennus on laaja aihe, jonka tuntemus Formula Studentissa jää usein matalalle tasolle, sillä sitä ei opeteta syvällisesti ja itseopiskeluun kuluva aika ei nähdä tarpeelliseksi. Vaimennuksella on suuri vaikutus ajo-ominaisuuksiin, mutta näitä yritetään usein kompensoida muita komponentteja säätämällä, vaimennuksesta tietämättöminä.

2.3 Formula Studentissa käytetyt jousitustyyppit

2.3.1 Jousitustyyppin valinta

Kilpailuissa nähdään hyvin erilaisia ratkaisuja Formula Studentin ollessa nuorten innovatiivisten opiskelijoiden suunnittelukilpailu. Monelle nuorelle Formula Student -autoon suunniteltu osa on ensimmäinen oikeasti ammattimaisesti suunniteltu osa. Taitotaso ei lähtötilanteessa monellakaan ole vielä kovinkaan korkea, vaan suunnittelu- ja rakennusprosessi on nimenomaan oppimista.

Suunnittelu alkaa aiempia ratkaisuja kartoittamalla yrittäen ymmärtää eri ratkaisujen toimintaa. Monesti ajan puutteen takia on valittava aiemmin käytössä ollut ratkaisu, jotta kaikkea ei tarvitse suunnitella uudestaan alusta alkaen vaan pystytään keskittymään pieneenpiin yksityiskohtaisiin parannuksiin. Tämä on hyvä tapa, sillä tarpeeksi yksinkertaisiin ja pieniin muutoksiin keskittyessä pystyy paremmin syventymään asiaan ja näin ollen oppimaan siitä paremmin. Vaihtoehtoisesti on myös hyvä, että ihmisiltä löytyy rohkeutta lähteä aivan uusille teille, ja näin syntyy uusia innovatiivisia ratkaisuja. Nuorilla opiskelijoilla on se etu, että tietämättömyys ei heti tyrmää ratkaisua teoreettisten epäkohtien vuoksi ja innokkaana ei välitä tai osaa ennakoida tulevia haasteita. Kehitystä ei synny, jos välillä ei uskalleta yrittää ”mahdotonta” ja kohdata ongelmia. Yleensä onnistuminen vaatii muutaman epäonnistumisen.

Formula Studentissa kaiken suunnittelun lähtökohtana on karkeasti kuvattuna keveys ja matala painopisteen sijainti, koska säännöt rajoittavat tehoa. Sähköautossa on määrätty maksimiteho, jonka akuilta saa ottaa, ja polttomoottorillisissa on määritetty sylinterin maksimitilavuus sekä imuilmakanavan halkaisija. /1/. Kun siis tehoa on rajoitettu, voidaan suorituskykyä parantaa pienentämällä massa, sillä pienempi massa liikkuu paremmin samalla voimalla. Painopisteen madaltaminen puolestaan vaikuttaa positiivisesti pyöräkuorman muutoksiin, ja mitä vähemmän pyöräkuormat muuttuvat, sitä parempi on

kokonaispito. Todetaan vielä, että poikkeus on kuitenkin takavetoisella autolla kiihdytyksessä, sillä siinä kuorman siirtymisestä vetäville pyörille olisi hyötyä. Matala painopiste kuitenkin hyödyttää jarrutuksissa ja kaarteissa, joten kokonaishyöty on suurempi.

Niin jousituksen, massan kuin painopisteenkin suhteen joudutaan tekemään kompromisseja. Auton rakentaminen on parhaiden kompromissien etsimistä. Autoon sijoittamisesta joutuu neuvotteleman muiden osa-alueiden kanssa. Täytyy yrittää perustella, miksi juuri alustan osien olisi tärkeä olla tietyssä optimaalisessa paikassa. Näissä kiistatilanteissa joudutaan aina tekemään kompromissi jommankumman osa-alueen suhteen. Ennen kuin joudutaan edes toisten osa-alueiden kanssa neuvottelemaan, täytyy alustan sisällä miettiä erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. On pohdittava esimerkiksi, onko komponenttien tärkeämpi olla matalalla painopisteen vuoksi vai vähän ylempänä helpottamaan säädettävyyttä.

Näistä ja lukuisista muista asioista seuraa lopullisen jousitustyyppiin valikoituminen. Vaikka jokaisessa autossa on hieman eri tavalla toteutettuja yksityiskohtia, noudattavat ne pääpiirtein muutamaa tiettyä menetelmää. Työtä rajatessa tarkasteluun valikoitui kolme yleisimmin käytössä olevaa menetelmää. Seuraavaksi käydään läpi ne pääpiirteittäin.

2.3.2 Perinteinen

Formula Studentissa jokaisella tiimillä on poikkeuksetta käytössä päällekkäisillä kolmiotukivarsilla toteutettu pyöräntuenta. Päällekkäiset kolmiotukivarret antavat jo suunnittelussa laajat mahdollisuudet erilaisten geometrioiden toteutukseen, mutta ne mahdollistavat myös laajat pyöräntuenteiden säätömahdollisuudet valmiiseen jousitukseen/2, s. 643/. Lisäksi hyvinä puolina ovat kompakti tilantarve, rakenteen keveys sekä helppous valmistaa yksinkertaisilla menetelmillä.

Perinteisellä tyylillä toteutetussa jousi ja iskunvaimennin ovat sijoitettuna joko tukivarsien väliin tai vaihtoehtoisesti viety työntö- tai vetotangoilla kanteiden sisäpuolelle. Jos jousi ja vaimennin ovat tukivarsien välissä, ovat ne kiinnitettynä jompaankumpaan tukivarteeseen. Tällainen kiinnitystapa ei anna juuri mahdollisuutta vaikuttaa renkaan pystyliikkeen ja jousi-vaimennin yhdistelmän puristuman suhteeseen. Siihen voidaan vaikuttaa vain kiinnityspisteillä eli kulmaa muuttamalla. Puolestaan työntö- tai vetotangoilla toteutetussa

voidaan suhteeseen vaikuttaa linkulla. Katteiden sisään viedyssä ratkaisussa on hyvää myös jousittamattoman massan vähentyminen, mahdollisuus viedä komponentit alas sekä aerodynaamisuus. Näistä syistä johtuen yleisin käytössä oleva onkin työntö- ja vetotangoilla toteutettu versio.

Tällaisella perinteisellä tavalla toteutetussa on yksi jousi-vaimennin yhdistelmä per pyörä ja se ohjaa kulman pyörän pystyliikettä suhteessa koriin kaikissa tilanteissa. Sama elementti siis toimii, olipa kyseessä yksipyöräjousto, tasajousto tai kallistus. Yksipyöräjoustopossa toimii vain yksi, joka hallitsee pyörän sisään- sekä ulosjoustoja. Puolestaan tasajoustopossa ja kallistuksessa akselin molemmat jousi-vaimennin yhdistelmät tekevät työtä.

Joudutaan siis miettimään kompromissi jousien sekä vaimennuksen suhteen, sillä samat säädöt eivät ole optimaaliset kaikkiin tilanteisiin. Kallistuksen säätöön käytetäänkin monesti lisäksi kallistuksenvakaaja ja näin ollen voidaan käyttää joustotilanteissa niihin sopivampia säätöjä.

2.3.3 Kolmella elementillä toteutettu jousitus

Vaihtoehtoisesti jousitus voidaan toteuttaa kolmella elementillä per akseli, eli perinteisen tavan lisäksi on kolmas elementti lisäämään tasajoustopon jäykkyyttä. Tämä ratkaisua on yleistynyt lisääntyneen aerodynamiikan vuoksi. Kolmas elementti auttaa pitämään auton aerodynamiikan toiminnan kannalta sopivassa asennossa. Se mahdollistaa ajokorkeuden säilymisen ja nyökkäyksen minimoinnin, mutta kaarteissa saadaan kuitenkin sopiva kallistusjäykkyys. Tällainen on mahdollista, koska kolmas elementti vaikuttaa vain tasajoustopon, mutta ei osallistu kallistustilanteessa.

Kolmas elementti on sijoitettu oikean ja vasemman puolen linkkujen väliin. Tasajoustopotilanteessa se puristuu kasaan, mutta kallistustilanteessa se pysyy mitassaan ja liikkuu linkkujen mukana, sillä linkut liikkuvat samaan suuntaan. Pidemmälle jalostetuissa versioissa on lisäksi yhteys etu- ja takapäin kolmansien elementtien välillä hydraulisesti. Tällä yhteydellä säädetään joustopon suhdetta eli nyökkäystä.

Tällainen kolmansilla elementeillä toteutettu jousitus on käytössä kaikilla Formula 1 tiimeillä/8/. Formula Studentissa on nähty vain muutamia, mihin päällimmäisenä syynä

suuri massan lisäys suhteessa hyötyyn. Formula Studentissakin aerodynamiikasta saatavat voimat ovat merkittäviä, mutta niillä ei ole niin suuri merkitys auton käyttäytymiseen kuin esimerkiksi Formula 1 -kilpailuissa.

Rakenteellinen toteutus voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Kuvassa 8 näkyy Koenigsegg Agera R:n takajousituksen ratkaisu. Formula Studentissa toteutustapa on myös juuri näin, että kaikki elementit ovat samassa linjassa ja kolmas elementti on suoraan linkkujen välissä. Monissa kilpa-autossa komponentit on sijoitettu niin, että kaksi elementtiä on vierekkäin auton suuntaisesti ja kolmas edempänä tai taaempana. Kaikki elementit ovat auton pituussuuntaan. Tällaisessa ratkaisussa kolmas elementti ei ole suoraan linkkujen välissä, vaan voima sille kulkee vielä erillisen linkun kautta ja sen toinen pää on runkoon kiinnitettynä.



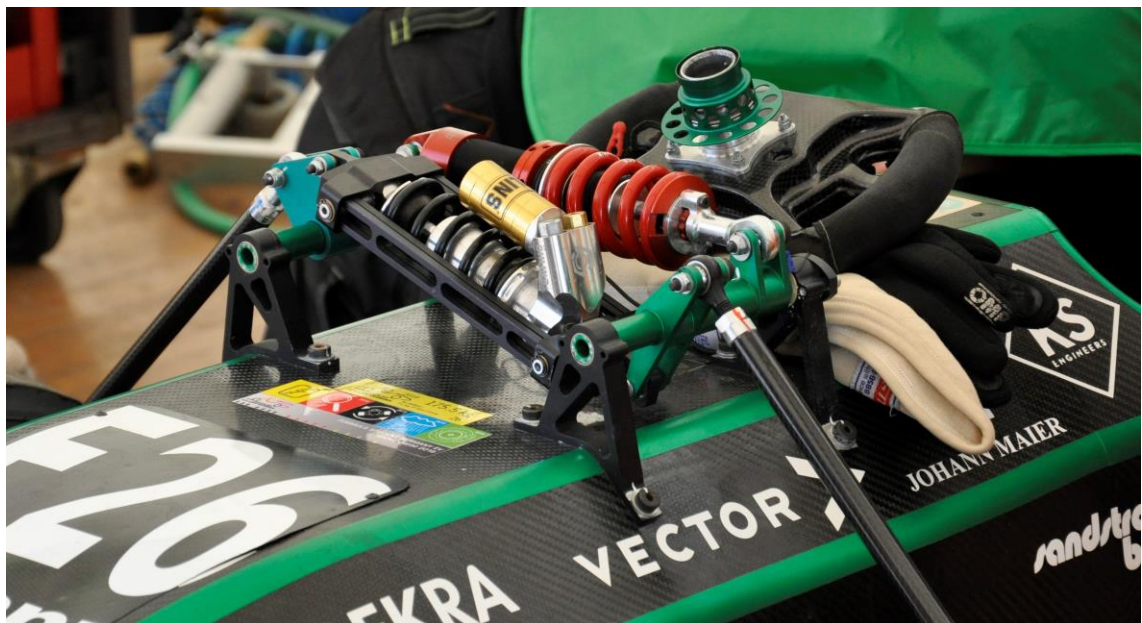
Kuva 8. Koenigsegg Agera R Triple x suspension /9/.

2.3.4 Erillisillä roll- ja heave -elementeillä toteutettu jousitus

Erilliselementeillä toteutetussa jousituksessa ei ole molemmille pyörille omia elementtejä, jotka toimivat kaikissa liiketiloissa, niin kuin perinteisessä vaan päinvastoin. Siinä elementit ovat linkkujen välissä ja ovat vaikutuksissa molempiin pyöriin. Molemmat elementin eivät myöskään vaikuta kaikissa liiketiloissa, vaan toinen vaikuttaa pelkästään kallistukseen ja toinen tasajoustoon. Säättöjen kannalta tämä on ihanteellista, sillä molempiin tilanteisiin voidaan säätää ihanteelliset vaimennuksen säädöt ja jouset. /10/.

Tasajoustossa heave-elementti toimii aivan samoin kuin kolmella elementillä toteutetussa ratkaisussa. Se on siis linkkujen välissä ja puristuu kasaan, kun molemmat pyörät joustavat sisään, mutta liikkuu linkkujen mukana kallistuksessa. /10/. Kuten kuvasta 9 näkyy, roll-elementti on kiinnitetty ristikkäin linkkuihin, jotta se liikkuu mukana tasajoustossa mutta puristuu tai venyy kallistuksessa. Roll- eli kallistuselementin täytyy siis tuottaa voimaa kahteen suuntaan. Yhtenäinen voimantuotto molempiin suuntiin toteutetaan mekanismilla, joka muuttaa vedon puristukseksi. Tällainen mekanismi näkyy kuvassa 9. Toteutustapoja on muitakin, mutta tällainen tapa on ollut käytössä Formula Student -autoissa.

Tämäntyyppisessä jousituksessa huonoina puolina ovat monimutkaisen mekanismin toteutus, mekanismin komponenteista aiheutuva paino sekä suuri tilan tarve. Mekanismi vie paljon tilaa, koska se pitää rakentaa yhtenäiseksi auton poikki meneväksi paketiksi. Myös linkuston pitkät akselit ja vierekkäiset elementit vievät paljon tilaa pituussuunnassa.



Kuva 9. Formula Student -auton etujousitus erilliselementeillä toteutettuna.

3 Simulaatiomallit

Seuraavana vaiheena oli työn konkreettisin osuus eli simulaatiomallien rakennus. Mallien rakennus koostui; mallien suunnittelusta, simulointiohjelman käytön opettelusta, mallien rakentamisesta sekä simuloinneista mallien toiminnan varmistamiseksi. Osiossa käydään siis läpi mallien rakentaminen vaiheittain.

3.1 Suunnittelun aloitus

3.1.1 Lähtökohdat

Metropolia Motorsport halusi autoa kehittääkseen verrata nykyisen HPF019-auton jousitusta erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutettuun jousitusratkaisuun. Teoriassa vertailun lisäksi haluttiin jatkaa vertailua simulaatiomalleilla, sillä hyvin tehdyllä simulaatiomallilla saadut tulokset ovat hyvin lähellä todellisuutta. Vertailu päätettiin toteuttaa MSC Softwaren Adams/Car- nimisellä ajodynamiikan simulaatio-ohjelmistolla.

Adams valikoitui vertailualustaksi, koska Metropolialla oli valmiiksi lisenssit tämän käyttöön ja Adams on arvostettu työkalu juuri tällaiseen ajodynamiikan simulointiin. Hyvänä puolena oli lisäksi, että ohjelman käytöstä oli jonkin verran kokemusta. Sitä oli käytetty aiemmin hieman oppitunneilla sekä vanhojen tiimiläisten ohjeistuksella. Ohjelman käyttö onnistui pintapuolisesti, vaikka kokemusta oli todella vähän. Valmiin mallin tuominen ja aivan yksinkertaisimmat simulaatiot onnistuivat, mutta mallin rakennuksesta ei ollut minäänlaista kokemusta.

3.1.2 Tavoitteet

Ensisijaiseksi tavoitteeksi asetettiin simulaatiomallit sekä nykyisen auton jousituksesta että karkeasti suunniteltuna erillisillä roll- ja heave-elementeillä toteutetusta. Nykyisen auton jousituksen mallin luonti arvioitiin yksinkertaiseksi, koska siihen löytyi valmiiksi ”template” eli mallipohja ja osien koordinaatit/pisteet olivat saatavissa Catiassa olevasta mallista. Puolestaan aikaa vieväksi ja haasteelliseksi arvioitiin erilliselementeillä toteutetun mallin luonti, sillä siihen ei ollut valmista mallipohjaa saatavilla. Täytyi siis rakentaa täysin uusi mallipohja, johon piti hahmotella kaikki mitat, geometria sekä liitokset

ja osien keskinäiset suhteet. Haastetta lisäsi myös se, että ohjelmiston käyttö ei ollut tuttua, joten ennen toteutusta oli opeteltava Adams/Car-ohjelmiston käyttö ja mallin rakentamisen perusteet.

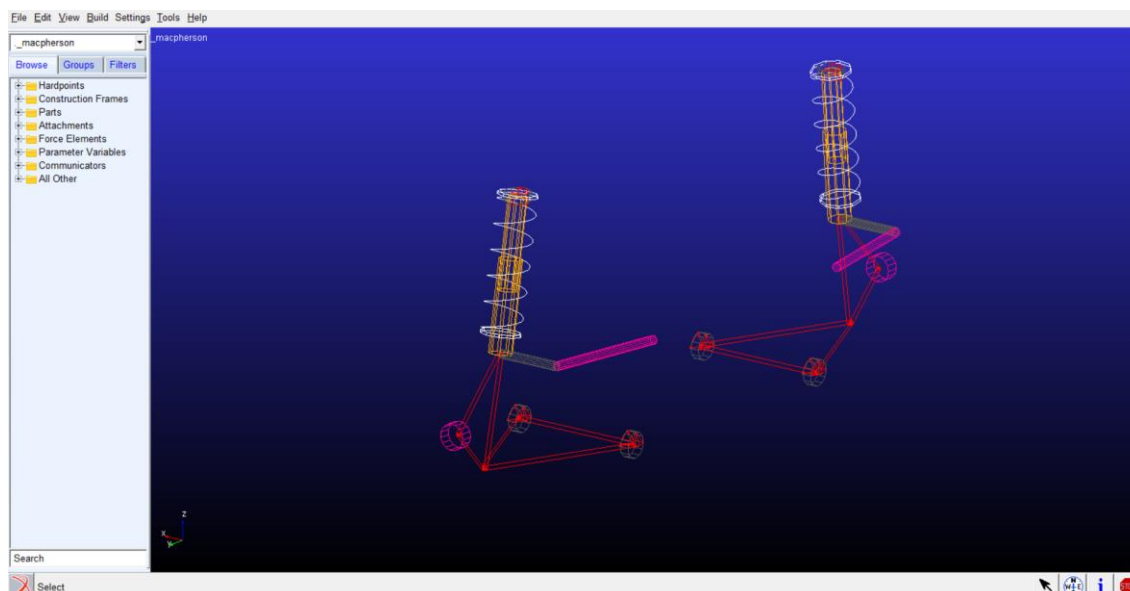
Työn etenemistä oli vaikea arvioida etukäteen, joten asetettiin aikaraja. Aikataulun salissa sovittiin, että työhön sisällytetään myös erilliselementeillä toteutetun mallin hionta mahdollisimman hyväksi ja jousitusten vertailu simuloimalla.

3.1.3 Adams/Car-ohjelmiston käyttöönotto

Adams/Car-ohjelmiston käytöstä oli siis hieman kokemusta valmiiden mallien simulointitulosten tarkastelussa. Nyt edessä oli tarve rakentaa simulaatiomalli alusta alkaen. Adamsin käyttöön löytyi pienien selvittelyiden jälkeen kuitenkin hyvää materiaalia. Adamsilla oli ohjelmaan kattava "help-toiminto". Missä tahansa täytettävässä kohdassa painamalla pikanäppäintä "F1", ohjautui automaattisesti verkkosivustolle, josta löytyi selitys, mitä kohtaan kuuluu täyttää. Adams help -verkkosivulta oli saatavissa myös ohjeistusta ohjelman käyttöön sekä harjoitustehtäviä.

Vaikka Adams-sivuilta oli helppo saada apua moniin kysymyksiin, haasteelliseksi osoitautui löytää juuri oleelliset asiat käytön aloittamiseen. Asiat lähtivät etenemään, kun löytyi "Getting Started Using ADAMS/Car" -dokumentti /11/. Sen perusteella pääsi hyvin alkuun mallipohjan rakentamisessa. Siinä käytiin läpi harjoitusten kautta jousitusmallin rakentaminen valmiille mallipohjalle ja muutamia simulointeja, mikä oli siis hyvä esimerkki juuri siitä, mitä tarvittiin HPF019-auton mallin luomiseen. Ohjeessa oli myös perusteet mallipohjan rakentamiseen alusta alkaen, eli siihen, mitä tarvittiin erilliselementeillä toteutetun mallin luontiin.

Mallipohjan rakentamisharjoituksessa rakennettiin malli piste kerrallaan (kuva 10), ääripisteillä ja nivelten paikoilla osien geometriat sekä massoilla ja niiden sijainneilla inertiat. Tämän jälkeen luotiin osien väliset nivelet ja määritettiin niille vapausasteet sekä suhteet. Muutamille komponenteille, kuten jousille ja vaimentimille, täytyi luoda myös voimaelementit.



Kuva 10. Valmis mallipohjan rakennusharjoitus.

Itse rakentaminen ei ollut kovin haastavaa, koska ohjeessa oli jokainen vaihe hyvin ohjeistettu. Harjoitusta tehdessä sai perusteet, miten Adams/Car toimii, ja esimerkin, miten malli rakennetaan. Selkeitä syitä tiettyjen toimintojen luomiselle ohjeessa ei ollut, joten oman mallipohjan luomisessa tarvittiin paljon tutkimusta muista lähteistä ja oppimista kokeilun kautta.

3.2 Suunnittelu ja mallinnus

3.2.1 Viivamalli

Teoriatarkastelusta seuraava askel suunnittelussa on jonkinlaisen konkreettisen mallin luonti, sillä siinä pystyy todellisesti hahmottelemaan mittoja, näkemään ja kokeilemaan toimintaa. Monesti viivamalli on yksinkertainen ja toimiva ratkaisu tähän. Viivamallin voi toteuttaa perinteisesti paperilla, mutta teknologian niin salliessa työssä päädyttiin käyttämään Catia V5 -mallinnusohjelman Sketcher-työtilaa. Sketcherin hyötynä on se, että tasopiirustuksessa voidaan määrittää komponenttien mitat, paikat ja suhteet toisiinsa, joten ne liikkuvat totuudenmukaisesti. Tämä mahdollistaa sen, että jo viivamallilla voidaan simuloida jousituksen liikkeitä, kylläkin vain yhdessä tasossa ja täysin manuaalisesti.

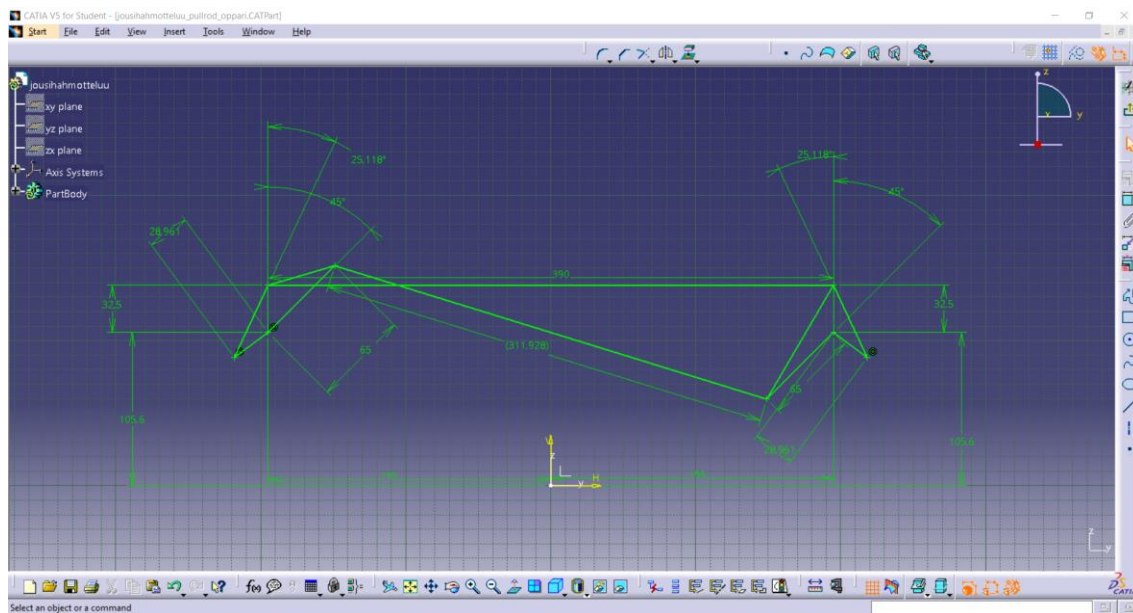
HPF019-autosta oli 3D-malli, josta saatiin suoraan mitat Adamsin mallia varten. Erilliselementeillä toteutettuun jousitusratkaisuun puolestaan täytyi suunnitella mitoitus vaimentimien, jousien ja linkkujen suhteen. Vertailua haluttiin tehdä nimenomaan näiden komponenttien osalta, joten tukivarsien ja muiden pyöräntuennan osien osalta käytettiin samoja mittoja vertailun mahdollistamiseksi.

Kuvassa 11 olevan erilliselementeillä toteutetun jousituksen viivamallin luominen aloitettiin siis pisteistä, joiden haluttiin pysyvän samoilla paikoilla kuin nykyisessä jousituksessa. Tällaisia pisteitä olivat linkkujen keskiakseleiden ja vetotankojen sisäpäiden pisteet. Linkkustossa jousien kiinnityspisteiden geometriat sen sijaan muuttuivat, koska jousien ja vaimentimien tehtävät sekä sijoittelu oli niin erilainen tällä toteutustavalla.

Pisteiden paikkoja lähdettiin hakemaan asiaa opiskellessa ja vastaavia jousitustyyppejä tarkastellessa oivallettujen asioiden perusteella. Linkkusuhteet vaikuttivat jokaisessa vastaavassa jousituksessa olevan siten, että heave-elementille rengas-jousiliikesuhde oli lähellä yhtä. Tämä tarkoittaa, että renkaan pystysuuntainenliike ja jousen puristuma ovat yhtä suuret. Tässä tapauksessa myös jouselle ja renkaalle kohdistuva voima on sama. Puolestaan roll-elementille linkkusuhteet vaikuttivat olevan noin 1,5–2-kertaiset, eli renkaan liikuessa 10 mm, jousi/vaimennin puristuu 15 mm - 20 mm. Voima puolestaan muuttuu linkkusuhteen neliön kertoimella, joten roll-elementin jousi tuottaa renkaalle huomattavasti suuremman voiman samalla jousivakiolla kuin heave-elementissä oleva jousi. Tämä ihmetytti, sillä vastoin linkkusuhdetta on toiminnan kannalta välttämättömyyttä heave-elementin olla selvästi jäykempi kuin roll, sillä kallistustilanteessa heave-elementti vastustaa kevenevän pyörän sisään joustoa (sisäkaarten pyörän) ja mahdollistaa roll-elementin toiminnan. Linkkusuhteen aiheuttama haitta pystytään kuitenkin kompensoimaan jousien jäykkyyksillä.

Syy linkkusuhteelle on se, että kallistuksessa pyörän liike on huomattavasti pienempää kuin joustossa, joten isolla linkkusuhteella roll-elementtiin saadaan liikettä ja nopeutta, vaikka pyörä liikkuisi vain vähän. Vaimennuksen kannalta on sitä parempi, mitä suurempia liikkeet ovat, sillä kun vaimennin liikkuu paljon, liikkuu myös vaimentimen sisällä enemmän nestettä. /4, s. 216–218./ Suurempaa määrää nesteen virtausta on helpompi hallita ja näin ollen vaimennus saadaan toimimaan sekä säädetyksi paremmin. Myös nopeudesta on hyötyä, sillä Formula Studentissa -jouston liikkeet ovat niin hitaita, että on vaikea löytää niin matalille nopeuksilla toimivia iskunvaimentimia.

Kun saatiin hahmoteltua etäisyydet linkun akselin keskipisteestä, haettiin pisteille optimaaliset paikat kehältä. Huomiota kiinnitettiin linkkusuhteiden muutokseen minimointiin joustoliikkeiden aikana ja että mekanismi pystyy varmuudella liikkumaan äärijoustosta toiseen. Tässä vaiheessa tehtiin kuitenkin vasta mallin hahmottelua eikä valittu vielä tarkkoja lopullisia pisteitä. Mallin valmistuttua pisteet hiotaan ihannepaikoilleen simulointien avulla.



Kuva 11. Erilliselementeillä toteutetun jousituksen viivamalli.

3.2.2 Mallipohjan rakennus

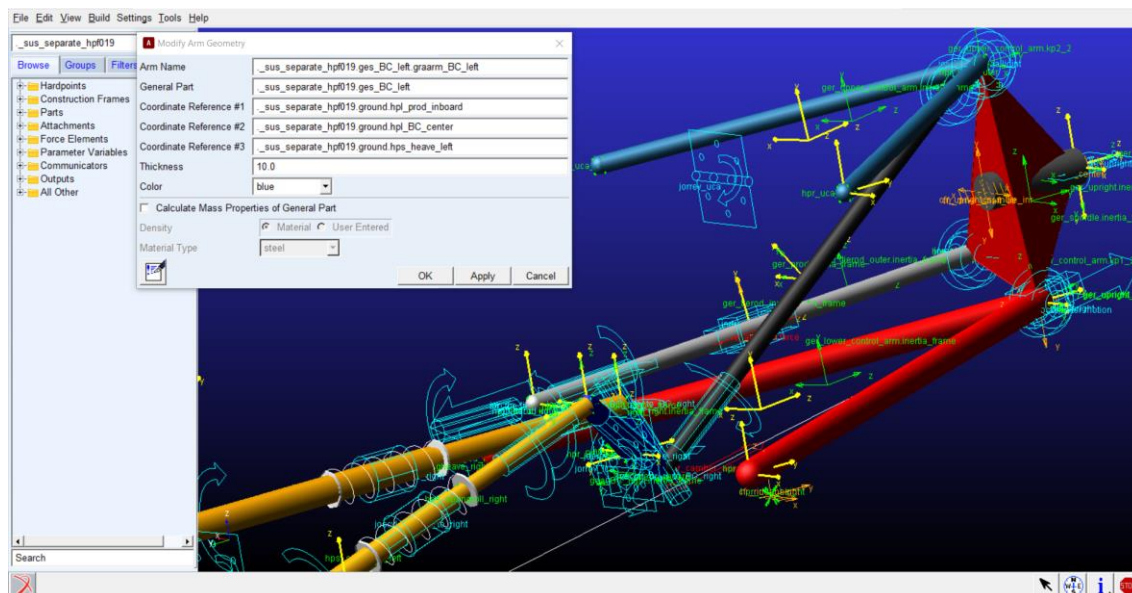
Viivamallin jälkeen alkoi itse simulaatiomallin rakennus. Mallipohjaa lähdettiin rakentamaan harjoitustehtävässä opituilla opeilla. Harjoitustehtävästä pystyi katsomaan perusteita, mutta harjoitus oli niin yksinkertainen, ettei siinä ollut paljon yhteistä tähän malliin. Mallin rakennus ei pääosin kuitenkaan ollut kovin haastavaa, sillä jokaisen osan rakennus koostui samoista piirteistä. Hankaluuksia tuottivat monesta merkittävästä pisteestä rakentuvat osat sekä eri osien liitosten ja suhteiden määrittäminen. Mallin rakentaminen vei paljon aikaa, sillä siinä oli paljon yksityiskohtia ja uusien asioiden selvittely oli työlästä eikä mistään voinut tarkistaa tekevänsä oikein. Epävarmoissa kohdissa oli vain kokeiltava mallin toimintaa.

Ensimmäiseksi mallin rakentamisessa määritetään koordinaatiston origo ja akseleiden suunnat. Sitten alkoi mallin rakennus koordinaatistoon luomalla ”hardpointit” eli pisteet. Ennen kuin voitiin luoda mitään osaa, geometriaa tai liitosta, täytyi koordinaatistossa olla piste, johon se voidaan luoda. Luotiin siis pisteet jokaisen osan rakennusta ja liitoksia varten.

Seuraavana vaiheena oli ”partien” eli osien koordinaatistojen luonti. Yleensä koordinaatisto kannattaa luoda samaan paikkaan kuin 3D-mallinnusohjelmassa, sillä silloin massat ja muut ominaisuudet on helppo sijoittaa Adams/Car-malliin. Koordinaatisto luodaan ”hardpointiin” ja puolestaan koordinaatistolle voidaan luoda geometria, jolloin osa valmistuu näkyväksi ja toimivaksi kokonaisuudeksi pisteiden väliin. Jos ei voi tuoda osan tarkkoja tietoja 3D-mallista, Adams laskee massat ja painopisteen sijainnin materiaalin sekä geometriapisteen perusteella. Adamsissa on myös toisenlaisia osia, ”Mount parts”. Nämä ovat painottomia osia, joita luodaan vain toisten osien kiinnittämiseen. Työssä tällaiset ”Mount partit” luotiin esimerkiksi tukivarren päätyihin sijaistamaan auton rungossa oleva kiinnikettä.

Viimeisenä vaiheena oli liitosten luonti. Liitoksissa määritetään osien keskinäiset vapausasteet sekä se, kuinka ne reagoivat toisiinsa. Vaihtoehtoina ovat äärettömän jäykät tai elastiset liitokset, joiden jäykkyys voidaan määrittää. Formula Studentissa voidaan simuloida pääsääntöisesti jäykillä liitoksilla, sillä autoissa ei ole merkittävän joustavia liitoksia. Liitosten määrittäminen jäykiksi, myös yksinkertaistaa mallia hieman.

Mallipohjan (kuva 12) rakennus meni muuten hyvin, mutta vaikeuksia tuotti linkkujen rakennus, sillä niissä oli neljä pistettä, jotka piti saada saman osan geometrian alle. Tämä tuotti hankaluuksia, koska vaihtoehtoina rakennusvalikossa oli vain kolme pistettä tai vähemmän. Ratkaisu löytyi lopulta rakentamalla linkustoille kaksi erillistä geometriaa. Linkuissa myös osien välinen yhteys oli haaste saada toimimaan, sillä kahdesta eri osasta täytyi saada linkun kautta kulkemaan yhteys yhdelle osalle. Yleensä osien välinen yhteys on yksinkertainen, kun kaksi osaa ovat vaikutuksissa vain toistensa kanssa. Toimiva ratkaisu oli tehdä erilliset nivelet osien suhteet, vaikka todellisuudessa molemmilta jousi/vaimenninelementeiltä välittyvät voimat ja liikkeet saman linkun kautta.



Kuva 12. Erilliselementeillä toteutetun jousituksen linkun geometria luonti mallipohjaan.

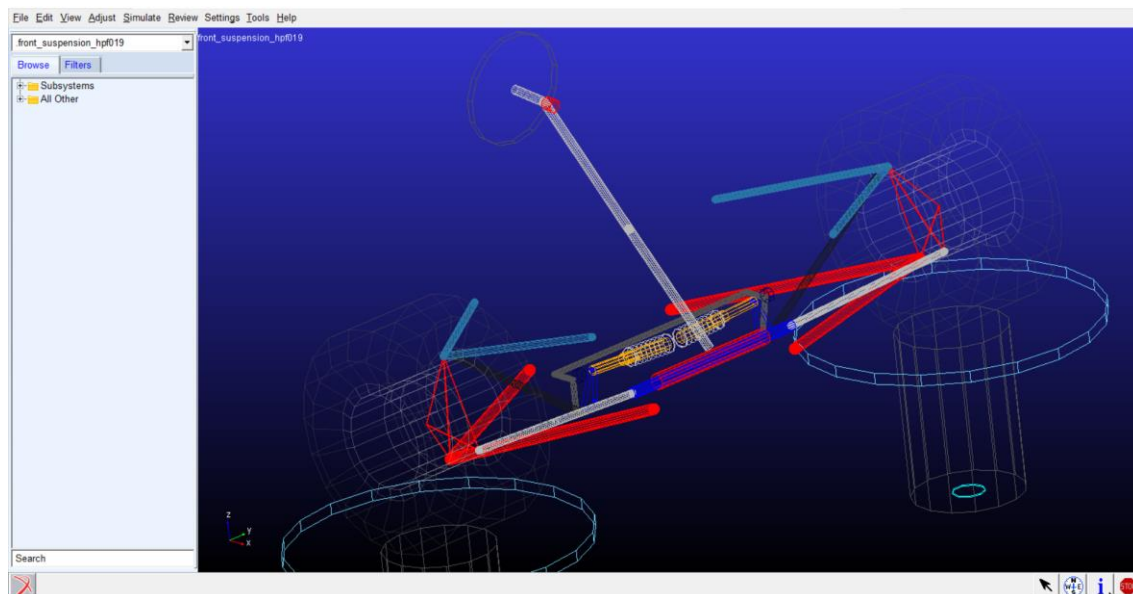
Kuvassa 12 auki olevassa ikkunassa oli meneillään linkun ensimmäisen puolikkaan geometrian luonti. Taustalla puolestaan näkyy oikeapuoli erilliselementeillä toteutetusta jousituksesta. Eriväriset osat ovat geometrioilla luotu näkyviksi kappaleiksi, mutta liitoksien symbolit näkyvät kuvassa vaalean sinisinä viivamalleina. Keltaiset koordinaatitot ovat eri osien koordinaatistoja.

3.2.3 Simulaatiomalli

Mallipohjien valmistuttua simulaatiomallien luonti oli todella yksikertaista. HPF019-simulaatiomallille oli aiemmilta vuosilta valmiina mallipohja, sillä samantyyppistä jousitusta on käytetty aiemminkin. Mallipohjasta vain luotiin "Subsystem" eli osa-alue, joka oli tässä tapauksessa etujousitus, ja muutettiin pisteet oikeille paikolleen. Erilliselementeillä toteutetun mallipohja täytyi vain luoda osa-alueeksi, koska mallipohja oli jo rakennettu oikeilla pisteillä.

Jotta voidaan tehdä simuloiteja, täytyy luoda kokoonpano eli "Assembly". Kokoonpano luodaan osa-alueista. Kokoonpano voi olla yksittäinen akseli, joka sisältää muutamia osa-alueita tai koko ajoneuvon. Esimerkiksi etuakselia voi olla yksittäinen simuloitava kokoonpano, johon sisältyy etujousitus, ohjaus ja kallistuksenvakaaja osa-alueet. Ku-

vassa 13 näkyvän HPF019:n etuakselin koostuu juuri näistä osa-alueista. Erilliselementeillä toteutettuun jousitukseen puolestaan tarvitsi vain jousituksen lisäksi ohjauksen, sillä siinä kallistukseen vaikutetaan roll-elementillä eikä erillistä vakaajaa tarvita.



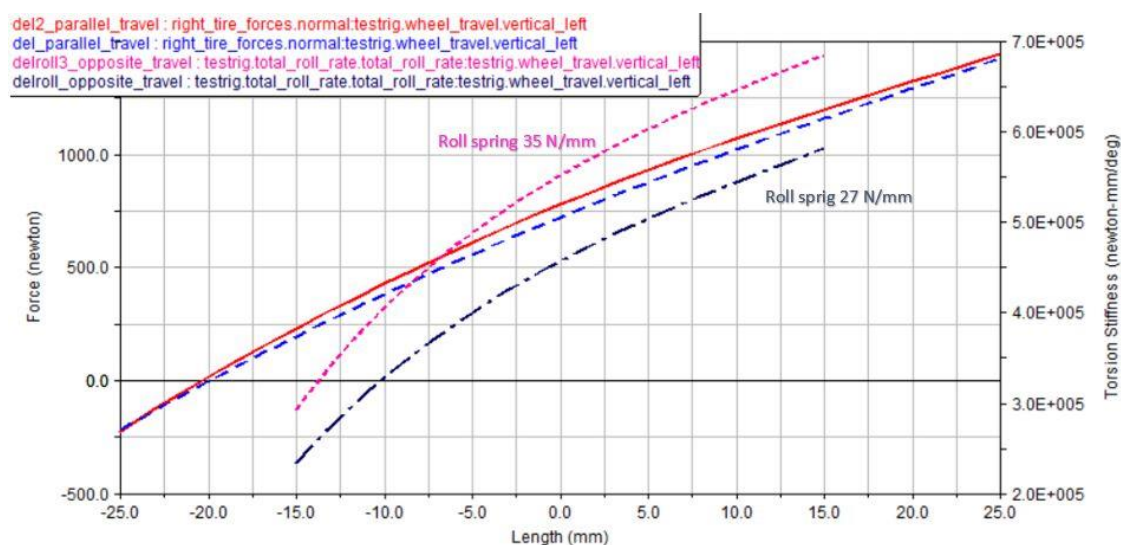
Kuva 13. HPF019:n jousituksen assembly, Adams/Car.

Valmiille malleille voidaan tehdä erilaisia simuloitteja, joissa tutkitaan auton käyttäytymistä ja jousituksen toimintaa. Vaikka malli on valmis ja sillä voidaan tehdä simuloitteja, voidaan sen pisteitä ja voimaelementtien voimia muokata. Juuri tällä tavoin haetaan optimaaliset pisteet, niin että simulointien välissä vaihdetaan pisteiden paikkoja ja tutkitaan, millä saadaan sopivimmat tulokset. Mallissa ei voi muokata niveliä tai osien suhteita. Jos niitä haluaa muokata, täytyy siirtyä muokkaamaan mallipohjaa.

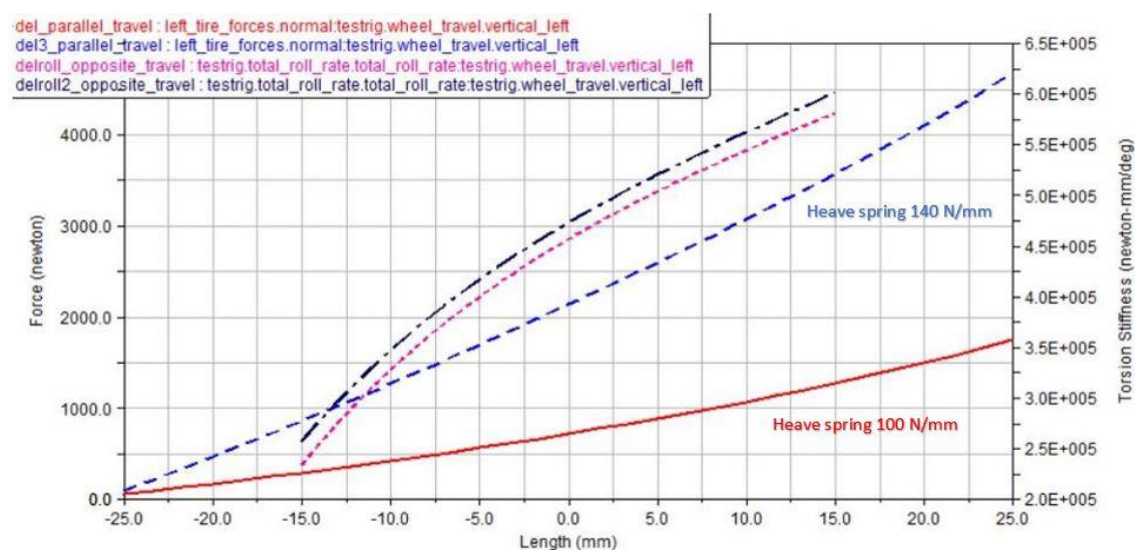
3.3 Simuloinnit

Tässä työssä rajallisen ajan vuoksi pääpaino jäi simulaatiomallien luontiin, mutta mallien toiminta varmistettiin muutamilla simuloinneilla. Erityisesti haluttiin varmistaa erilliselementeillä toteutetun jousituksen malli, niin että kaikki osat liikkuvat oikein suhteessa toisiinsa ja voimaelementit tuottavat voimaa oikeaan paikkaan. HPF019-mallin toiminta oli varmempaa, sillä samaa mallipohjaa oli käytetty jo aiempien vuosien autoja simuloita-

essa. Kuvassa 14 simuloitiin erilliselementeillä toteutetun jousituksen, roll-elementin jousen jäykkyyden muutoksen vaikutusta tasajoustoneen ja kuvassa 15 puolestaan heave-elementin jousen jäykkyyden muutoksen vaikutusta kallistusjäykkyyteen.



Kuva 14. Roll -elementin jousen jäykkyyden vaikutus tasajoustoneen jäykkyyteen.



Kuva 15. Heave-elementin jousen jäykkyyden vaikutus kallistusjäykkyyteen.

Simulaatiotuloksissa näkyy, että mallissa voidaan muuttaa kallistusjäykkyyttä vaikuttamatta tasajoustoneen jäykkyyteen sekä päinvastoin, tasajoustoneen jäykkyys ei vaikuttanut kal-

listusjäykkyyteen. Juuri tätä pidetään hyvänä ominaisuutena tämän tyyppisessä jousituksessa. Malli vaikutti muutenkin toimivan oikein, joten sillä voidaan tulevaisuudessa jatkaa jousituksen kehitystyötä.

Erilliselementeillä toteutetun jousituksen kehitystyötä tullaan jatkamaan tämän työn jälkeen kartoittamalla ihanteelliset pisteet eri komponenteille sekä mitoittamaan voimaelementit sopivan suuruiseksi erilaisten simulaatioiden avulla. Tämän jälkeen päästään vertailemaan perinteistä ja erilliselementeillä toteutettua jousitusta simulaatioissa, jossa voidaan todeta molempien jousitusten hyvät ja huonot puolet.

4 Yhteenveto

Työtä alettiin tekemään hyvin niukalla aikataululla, mikä hankaloitti prosessia. Aihe oli mielenkiintoinen, ja siitä olisi saanut tehtyä laajemman, kuin nyt aikataulun puitteissa voitiin. Ensisijainen tavoite kuitenkin saavutettiin, sillä molemmat simulaatiomallit valmistuivat ja teoritarkastelussa tietotaso syventyi. Valmistuneet simulaatiomallit ovat hyvä pohja Metropolia Motorsportille erilliselementeillä toteutetun jousituksen hyvien ja huonojen puolien kartoituksen jatkamiseen. Uskon, että työ on muutenkin hyvä runko uusille alusta osa-alueen jäsenille auton suunnittelun aloittamiseen. Työn avulla tiimi saa kuvan siitä, minkälaisia asioita on syytä kartoittaa aluksi, mistä tietoa löytyy sekä mitä vaiheita prosessiin kuuluu niin alustan suunnittelun, kuin Adams/Car-ohjelmiston käyttöön liittyen.

Lähteet

- 1 Formula SAE Rules. 2019. Verkkodokumentti. Society of Automotive Engineers <<https://www.formulastudent.de/>>. Luettu 18.5.2019.
- 2 Milliken, William F. & Milliken, Douglas L. 1994. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE.
- 3 Tuononen, Ari & Koisaari, Tapio. 2010. Ajoneuvojen dynamiikka. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy.
- 4 Dixon, John. 1991. Tyre, Suspension and Handling. Cambridge: Cambridge University.
- 5 Kytö, Petri. 2018. Alustarakenteet 1 & 2. Helsinki: Autotekniikan opetusmateriaali.
- 6 Michael & Suzanne Royce. 2012. Learn & Compete. London: Racecar Graphic Limited.
- 7 TTX25 MkII damper dynamometer response. 2019. Öhlins USA.
- 8 Ferrari's suspicions on rivals' suspensions: the story. 2019. Verkkodokumentti. F1.com/magazine. <<https://f1i.com/magazine/85749-ferraris-suspicion-rivals-suspensions.html>>. Luettu 18.5.2019.
- 9 Koenigsegg Agera R – Car and Driver Abroad. 2013. Verkkoblogi. Fluxauto. <<http://www.fluxauto.com/?p=5227>>. Luettu 18.5.2019.
- 10 Ortiz, Mark. 2019. Decoupling Roll and Heave in a Suspension System. Racecar Engineering, May 2019, s. 45.
- 11 Getting Started Using ADAMS/Car. 2019. Verkkodokumentti. MSC Software. <https://www.me.ua.edu/me364/Student_Version/Digital_Appendix/Getting_Started_Usings_ADAMS-Car.pdf>. Luettu 5.5.2019.