

Aapo Lassila

Formula SAE -kilpa-auton aerodynamiikkapaketin suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

9.10.2017

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Aapo Lassila Formula SAE -kilpa-auton aerodynamiikkapaketin suunnittelu ja valmistus 73 sivua + 1 liite 9.10.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Tuntiopettaja Pasi Oikarinen
<p>Insinööriyössä käsitellään Formula SAE -kilpa-auton aerodynamiikkapaketin suunnittelua ja valmistusta vaihe vaiheelta.</p> <p>Työn tavoitteena oli valmistaa ensimmäinen täysi aerodynamiikkapaketti parantamaan Metropolia Motorsport Formula SAE -kilpa-auton suorituskykyä. Aerodynamiikkapaketti sisältää etu- ja takasiiven sekä aerodynaamisen pohjalevyn. Työn toinen tavoite oli tehdä hyvä pohjatyö tulevaisuutta varten, jotta auton aerodynamiikan kehitystyö olisi jatkossa helpompaa. Työtä käsittelevästä kilpa-autosta käytetään nimitystä HPF014E.</p> <p>Sopivan aerodynamiikkapaketin määrittämiseen käytettiin Ansys-simulointiohjelmistoa, jonka avulla tehdään tietokoneavusteista virtauslaskentaa yleisesti autoteollisuudessa. Osien mekaanisessa suunnittelussa apuna käytettiin Catia V5 -3D-mallinnusohjelmistoa. Aerodynamiikkapaketin valmisprosessissa apuna oli oma kokemuseräinen tietotaito sekä tiimin aikaisempi kokemus komposiittiosien valmistuksesta.</p> <p>Insinööriyön tavoitteet saavutettiin hyvin ottaen huomioon käytettävissä ollut aika, resurssit sekä projektin lähtökohdat. Aerodynamiikkapaketti saatiin valmistettua aikataulussa, mutta tarkempi testaaminen ja parantuneen suorituskyvyn todentaminen jäivät kesken.</p>	
Avainsanat	Formula SAE, Formula Student, CFD, aerodynamiikka, siivet, pohjalevy, komposiitit

Author(s) Title Number of Pages Date	Aapo Lassila Design and Manufacturing an Aero Package for a Formula Student Race Car 73 pages + 1 appendix 9 October 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>This thesis describes the design and manufacturing process of an aerodynamic package for a Formula SAE race car.</p> <p>The objective was to manufacture the first complete aerodynamic package to improve the performance of a Formula SAE race car manufactured by Metropolia Motorsport. The aerodynamic package includes front and rear wing and an aerodynamic underbody. Another objective was to make a good baseline work, so that development of aerodynamics would be easier in the future. The name of the race car in this work is HPF014E.</p> <p>Ansys simulation software, which is generally used in the automotive industry, was used to determine the appropriate aerodynamic package for the car. Catia V5 3-D modelling software was used in the mechanical design of the parts. The author's own knowledge and the Metropolia Motorsport team's experience of working with composite parts helped in the manufacturing process.</p> <p>The objectives of this thesis were obtained well considering the timetable, resources and the starting points of the project. The aerodynamic package was manufactured in time but further testing and verifying the performance gains were not finished.</p>	
Keywords	Formula SAE, Formula Student, CFD, aerodynamics, wings, underbody, composites

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aerodynamiikan teoriaa	2
2.1	Peruskaavat	2
2.1.1	Newtonin lait	2
2.1.2	Bernoullin yhtälö ja venturiputki	3
2.1.3	Coanda-ilmiö	6
2.2	Rajakerrosvyöhyke (eng. boundary layer)	7
2.3	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	8
2.4	Painekertoimet	10
2.4.1	Yleiset painekertoimet	10
2.4.2	Nostekerroin ja -voima	12
2.4.3	Ilmanvastuskerroin ja -voima	13
2.5	Reynoldsin luku	15
3	Suunnittelun lähtökohdat	17
3.1	Aerodynamiikan hyödyntäminen kilpa-autoilussa	18
3.2	Siivet	19
3.2.1	Toimintaperiaate	19
3.2.2	Siipiprofiili	20
3.2.3	Siipiprofiilin mitoittaminen	22
3.2.4	Siiven lisäosat sekä sovellukset kilpa-autoissa	26
3.3	Pohjalevy	29
3.3.1	Toimintaperiaate	30
3.3.2	Mitoittaminen	31
4	Sopivan aerodynamiikkapaketin määrittäminen	33
4.1	CFD:n toimintaperiaate	33
4.2	CFD-mallin rakentaminen	35
4.2.1	Siivet	38
4.2.2	Pohjalevy	42
4.2.3	Lopullisen aerodynamiikkapaketin määrittäminen	43

5	Siiptien sekä pohjalevyn rakenteen suunnittelu	49
5.1	Siivet	50
5.2	Pohjalevy	55
6	Valmistus	57
6.1	Muotit	57
6.2	Laminointi ja alipaineinjektio	60
6.3	Kokoonpano ja asennus	66
6.4	Viimeistely	70
7	Yhteenveto	71
	Lähteet	73
	Liitteet	
	Liite 1. Siiptien sekä pohjalevyn räjäytyskuvat	

Lyhenteet

Ansys	Simulointiohjelma virtausten mallintamiseen
C_D	Drag coefficient. ilmanvastuskerroin
C_L	Lift coefficient. Nostekerroin
C_P	Pressure coefficient. Paineekerroin
Catia	Computer Aided Three Dimensional Application, Dassault Systemesin 3D-mallinnusohjelmisto
CFD	Computitional Fluid Dynamics. Tietokoneavusteinen virtauslaskenta
Coanda ilmiö	Nesteen ominaisuus seurata kappaleen kaarevaa pintaa
Coast down -testi	Menetelmä auton ilmanvastuksen määrittämiseen
Downforce	Negatiivinen noste
Drag	Ilmanvastus
Gurney flap	Siiven takaosassa pieni, 90°:n kulmassa oleva lippa
Foot plate	Etusiiven päätylevyn alaosassa oleva vaakasuora levy
Lift	Noste
NACA-työkalu	NACA 4 digit airfoil generator, työkalu erilaisten siipiprofiilien hakemiseen sekä muokkaamiseen
Pyöränkuorma	Pyörän tien pintaan aiheuttama pystysuora voima

1 Johdanto

Formula SAE on kansainvälinen suunnittelukilpailu, jossa korkeakouluopiskelijat suunnittelevat ja valmistavat pienen, formulatyypisen kilpa-auton. Kilpasarja on saanut alkunsa Yhdysvalloissa 1970-luvulla, mutta nykyään kilpailuita järjestetään maailmanlaajuisesti. Euroopassa arvostetuin kilpailu on Formula Student Germany Saksassa, mutta myös Itävalta ja Unkari ovat viime vuosina nostaneet suosiotaan. Kilpasarja on yksi autoteollisuuden suurimpia rekrytointikanavia eri autovalmistajille sekä tekniikan alan yrityksille.

Käytännössä kilpailut jaetaan kahteen osaan: staattisiin ja dynaamisiin osioihin. Staattisissa osioissa arvioidaan auton suunnittelutyötä sekä rakentamisessa käytettyjä ratkaisuita. Suunnittelutyön arvioinnin lisäksi staattisiin osioihin kuuluvat ”Cost”, jossa arvioidaan auton taloudellista kannattavuutta sekä ”Presentation”, jossa taas arvostellaan auton markkinointia. Dynaamisissa osioissa mitataan auton kiihtyvyyttä, sivuttaispitoa, ajettavuutta sekä luotettavuutta ja polttoainetaloutta.

Formula SAE -tiimi on toiminut Metropolia Ammattikorkeakoulussa (aik. Stadia) vuodesta 2002 lähtien. Nykyään Metropolia Motorsport -nimeä kantava formulatiimi on suunnitellut ja valmistanut lähes vuosittain uuden auton ja ottanut osaa kansainvälisiin kilpailuihin. Tiimin menestyneimmät kaudet olivat 2011 sekä 2012, jolloin tiimi voitti mm. Unkarin osakilpailun ja sijoittui muissakin kilpailuissa hyvin. Kautena 2012 - 2013 tiimi siirtyi täysin sähkökäyttöiseen autoon, mikä aiheutti omat haasteensa suunnitteluun sekä valmistukseen. Uudella sähkökäyttöisellä autolla päästiin kuitenkin kisaamaan Itävallassa ja Unkarissa. Vaikka sijoitukset eivät olleet parhaimmasta päästä, niin kilpailuista saatiin arvokasta tietoa ja kokemusta jatkoa ajatellen.

Kaudelle 2013 - 2014 tiimin oli tarkoitus siirtyä uudenlaiseen voimalinjaan auton kanssa sekä valmistaa aerodynamiikkapaketti parantamaan auton suorituskykyä. Tämä insinöörityö käsittelee kyseisen aerodynamiikkapaketin suunnittelua ja valmistusta. Auton korimuodot oli tarkoitus pitää ennallaan, joten siipiä voitaisiin hyödyntää myös edeltävän kauden autossa. Projekti alkoi syyskuussa 2013 ja valmistumisen takaraja oli huhtikuussa 2014 järjestettävä American Car Show, missä auto oli tarkoitus julkaista yhteistyökumppaneille.

Käytännössä koko aerodynamiikkapaketin suunnittelu oli minun vastuullani, mutta osien valmistusvaiheessa, kuten esimerkiksi muottien koneistuksissa ja maalauksissa, oli mukana muita tiimiläisiä. Projektin ohella suoritettujen teknisten päällikön tehtävät tiimissä sekä koulunkäynti veivät oman aikansa projektilta. Suuri kiitos kuuluukin kaikille samaan aikaan Metropolia Motorsportissa toimineille henkilöille sekä lukuisille yhteistyökumppaneille, jotka tarjosivat erinomaiset edellytyksen projektin onnistumiselle.

Työssä sivutaan myös tuulitunnelitestaamista ja siihen liittyvää termistöä, kuten painekertoimet ja Reynoldsin luku. Nämä eivät olleet keskeisessä osassa työtä, mutta ovat kuitenkin hyvin tärkeitä termejä ymmärtää aerodynamiikasta puhuttaessa.

2 Aerodynamiikan teoriaa

2.1 Peruskaavat

Kuten muussakin elämässä, myös kilpa-autoilussa ja aerodynamiikassa kaikki vuorovaikeuttavat voimat perustuvat fysiikan lakeihin. Tässä osiossa käydään läpi työn kannalta oleellimmat fysiikan lait ja kaavat, jotka auttavat ymmärtämään sekä toimivat hyvänä pohjatietona työssä käsiteltäville asioille.

2.1.1 Newtonin lait

Newtonin lakeihin kuuluvat kolme mekaniikan peruslakia. Nämä ovat *jatkuvuuden laki*, *dynamiikan peruslaki* sekä *voiman ja vastavoiman laki*.

Newtonin ensimmäisen lain, jatkuvuuden lain mukaa kappale jatkaa liikettään tai pysyy levossa niin kauan, kun siihen ei vaikuta ulkopuolisia voimia. Toisin sanoen, jos kappale halutaan saada liikkeelle, tai liikkeen nopeutta ja suuntaa halutaan muuttaa, pitää siihen kohdistaa ulkopuolisia voimia. [1, s. 99.]

Newtonin toinen laki, dynamiikan peruslaki kuuluu: kappaleen kiihdyttämiseen tai suunnan muuttamiseen vaadittava voima on suoraan verrannollinen kappaleen massaan. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä painavampi kappale on kyseessä, sitä suurempi voima

vaaditaan muuttamaan liikkeen suuntaa. [1, s. 104.], eli soveltaen autoihin, mitä painavampi auto on kyseessä, sitä suurempi voima vaaditaan kiihdyttämään, hidastamaan tai kääntämään autoa. Dynamiikan peruslaki on esitetty kaavassa 1.

$$F = m * a \quad (1)$$

m on kappaleen massa

a on kiihtyvyys

Newtonin kolmas laki on voiman ja vastavoiman laki. Tämä tarkoittaa, että kappaleeseen vaikuttavalla voimalla on aina yhtä suuri, vastakkaiseen suuntaan vaikuttava voima. Esimerkiksi kun maan vetovoima vetää autoa tien pintaa kohti, niin tien pinta kannattelee autoa täsmälleen samalla voimalla. [1, s. 117.] Muuten auto vajoaisi tiehen tai jos tie jostain syytä nostaisi autoa suuremmalla voimalla, niin auto lähtisi leijumaan. Toinen hyvä käytännön esimerkki autojen suhteen on seuraava; kun auto kulkee tasaista nopeutta, niin ovat kaikki liikettä vastustavat voimat (ilmanvastus, kitkavoimat jne.) täsmälleen yhtä suuret, kuin nopeuden ylläpitämiseen vaadittava voima. [2, s. 21.]

2.1.2 Bernoullin yhtälö ja venturiputki

Bernoullin yhtälö on yksi virtausmekaniikan peruskaavoja ja perustuu *energian säilymisen lakiin*, joka kuuluu seuraavasti:

”Energiaa ei voi luoda tyhjästä eikä hävittää, vaan sen kokonaismäärä pysyy vakiona”
[1, s. 154].

Tämä on fysiikan keskeisin periaate ja se sisältyy kaikkiin fysikaalisiin teorioihin. Hyvin usein energia on määritelty kyvyksi tehdä työtä. Systemin kokonaisenergia koostuu liike-energiasta sekä potentiaalienergiasta ja näiden kahden suhde säilyy koko ajan vakiona:

$$mgh + \frac{1}{2}mV^2 = ' kokonaisenergia' = vakio \quad (2)$$

mgh on potentiaalienergia

m on kappaleen massa

g on maan vetovoiman kiihtyvyys (9,81 m/s²)

h on kappaleen etäisyys maan pinnasta

$\frac{1}{2}mV^2$ on liike-energia

V on kappaleen nopeus

Potentiaalienergian osuutta voidaan ajatella esim. siten, että mitä korkeammalla mäkihyppääjä on lähtiessään laskeutumaan hyppyriä kohden, sitä suuremman nopeuden se voi saavuttaa hyppyrin nokalla.

Liike-energian esimerkkinä voidaan käyttää henkilöautoa. Mitä suurempi nopeus autolla on, sitä enemmän energiaa vaaditaan sen pysäyttämiseen. Jarrutuksessa energia muuttuu jarrujen ja renkaiden kautta lämmöksi ja tällä tavoin auton liike-energia pienenee. Voidaan myös ajatella, että mitä suurempi nopeus autolla on, sitä enemmän energiaa vapautuu törmäystilanteessa auton rakenteisiin sekä törmäyksen kohteeseen ja saa siten aikaan suuremmat vauriot.

Potentiaalienergiaa voidaan kasvattaa esimerkiksi viemällä auto korkean mäen päälle, kun taas liike-energiaa voidaan kasvattaa lisäämällä auton nopeutta moottorista saadulla energialla. Molemmista voidaan myös poistaa energiaa esim. pienentämällä auton massaa tai hidastamalla auton nopeutta jarruilla, missä energia muuttuu lämmöksi. Potentiaalienergian ja liike-energian suhde säilyy kuitenkin aina vakiona. [1, s. 154.]

Bernoullin yhtälö on virtausmekaniikkaan sovellus edellisestä kaavasta. Yhtälössä oletetaan, että neste on kokoon puristumatonta eikä siihen kohdistu virtausvastuksia. Bernoullin yhtälö kuuluu seuraavasti:

$$P_s + \frac{1}{2}\rho V^2 = ' \textit{kokonais paine}' = \textit{vakio} \quad (3)$$

P_s on staattinen paine

$\frac{1}{2}\rho V^2$ on dynaaminen paine

ρ on nesteen tiheys

V on nesteen virtausnopeus

Bernoullin yhtälössä staattinen paine voidaan ajatella ikään kuin nesteen potentiaalienergiaksi tehdä työtä. Aerodynaamisissa sovelluksissa tätä voidaan ajatella ilman potentiaalienergiana kohdistaa voimia auton pinnalle.

Dynaaminen paine taas kuvastaa nesteen liike-energiaa, eli mitä nopeammin ilma virtaa, sitä suurempia voimia se aiheuttaa autoon.

Koska staattisen ja dynaamisen paineen suhde on vakio, tarkoittaa tämä sitä, että siellä missä virtausnopeus on suurin, niin paine on vastaavasti pienin. Toisin sanoen, jos virtausnopeus pakotetaan kasvamaan, niin staattisen paineen täytyy vastaavasti pienentyä. [2, s. 26.]

Tästä hyvä esimerkki on ns. venturiputki (kuva1). Venturiputkessa neste pakotetaan virtaamaan poikkileikkaukseltaan kapeamman osuuden läpi, jolloin nesteen nopeuden täytyy kasvaa. Tämä perustuu *jatkuvuusyhtälöön*, mikä tarkoittaa, että suljetussa systeemissä ainetta ei synny eikä häviä. Tällöin nesteen massavirtauksen täytyy olla sama kuvan kohdissa 1 ja 2. Massavirta voidaan kirjoittaa muotoon

$$q_{m1} = q_{m2} \leftrightarrow \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (4)$$

q_m on massavirta

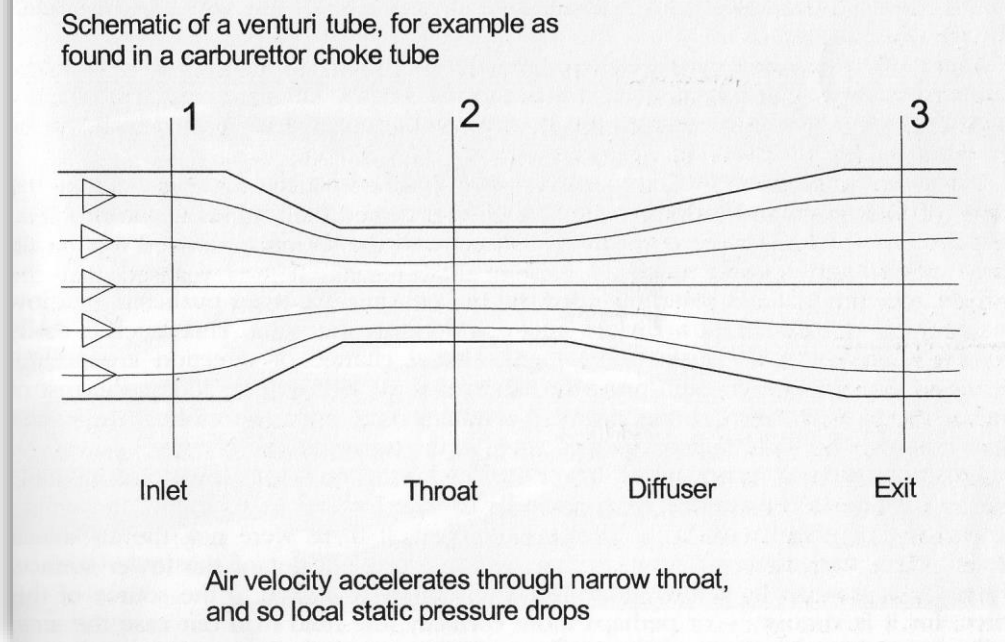
ρ on nesteen tiheys

A on putken poikkileikkauksen ala

V on virtausnopeus

Oletetaan, että neste on kokoon puristumatonta, eikä sen tiheys muutu. Edeltävästä kaavasta voidaan päätellä, että kun virtauksen poikkipinta-ala pienenee, niin nopeus vastaavasti kasvaa. Bernoullin yhtälön mukaan staattinen paine on pienempi kohdassa 2 kuin kohdassa 1, jossa virtausnopeus on suurempi.

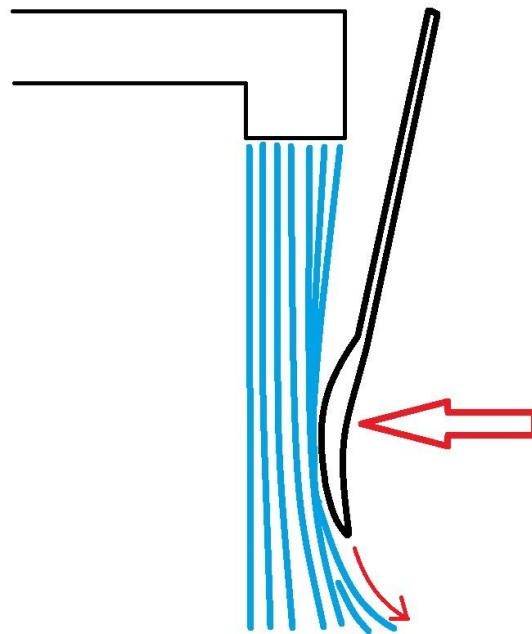
Figure 2-6 A schematic diagram of a venturi tube.



Kuva 1. Venturiputki [2, s. 27].

2.1.3 Coanda-ilmiö

Coanda-ilmiö tarkoittaa virtaavan nesteen ominaisuutta seurata kappaleen kaarevaa pintaa. Ilmiötä kuvaamaan käytetään hyvin usein esimerkkiä, missä lusikan kupera puoli asetetaan hanasta virtaavaan veteen (kuva 2). Coanda-ilmiö on seurausta adheesiovoimista, ja Newtonin 3. lain mukaan jokaisella voimalla on olemassa vastavoima. Jotta vesi pysyisi kiinnittyneenä lusikan pintaan, täytyy sen kohdistaa lusikkaan sen pintaa kohti-suora voima ja tämän voiman vastavoima vetää vastaavasti lusikkaa virtausta kohden. Toiseksi vesi virtaa pidemmän matkan lusikan kuperalla pinnalla verrattuna vapaaseen virtaukseen ja nopeammin virtaava vesi aiheuttaa Bernoullin lain mukaan pienemmän paineen. Tämä on toinen tekijä, joka vetää lusikkaa virtausta kohden. Kun virtaus saavuttaa lusikan reunan, se jatkaa matkaansa tangentin suuntaisesti. [3; 2, s. 28.]

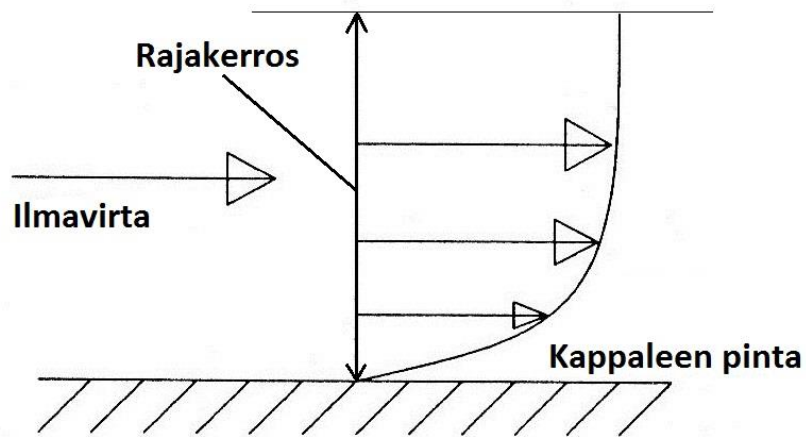


Kuva 2. Coanda-ilmiö.

Coanda-ilmiöllä on suuri merkitys siiven aiheuttamassa nosteessa. Nosteen suuruus on verrannollinen siihen, kuinka suuressa kulmassa ilmapirta saadaan virtaamaan siiven pintaa pitkin vapaaseen ilmapirtaukseen nähden. Mitä suurempi kulma virtaukselle saadaan aikaan, sitä enemmän vaaditaan voimaa pitämään virtaus kiinni ja vastaavasti sitä enemmän siipi aiheuttaa nostetta. [4.]

2.2 Rajakerrosvyöhyke (eng. boundary layer)

Rajakerros on merkittävä tekijä aerodynamiikassa, erityisesti ilmanvastuksesta puhuttaessa. Ilman voidaan ajatella virtaavan kappaleen ympärillä ohuina ”kerroksina”. Kitkan ja ilman viskositeetin ansiosta kappaleen välittömässä läheisyydessä oleva kerros on kiinnittynyt kappaleen pintaan. Kun lähdetään tarkastelemaan virtaavia ilmakerroksia kappaleen pinnasta poispäin, niin kerroksien välisen kitkan ansiosta jokaisen kerroksen virtausnopeus hidastuu hiukan alempana hitaammin virtaavan kerroksen ansiosta. Tällä tavoin kerroksien välille muodostuu nopeuseroja. Kun mennään tarpeeksi kauas kappaleen pinnasta, ei kerrosten välillä ole enää havaittavissa nopeuseroja ja ilmakerrokset virtaavat keskenään samaa nopeutta. Rajakerrokseksi kutsutaan aluetta kappaleen pinnan, ja ilmapirtauksen välillä, missä kerrosten välisiä nopeuseroja esiintyy (kuva 3).



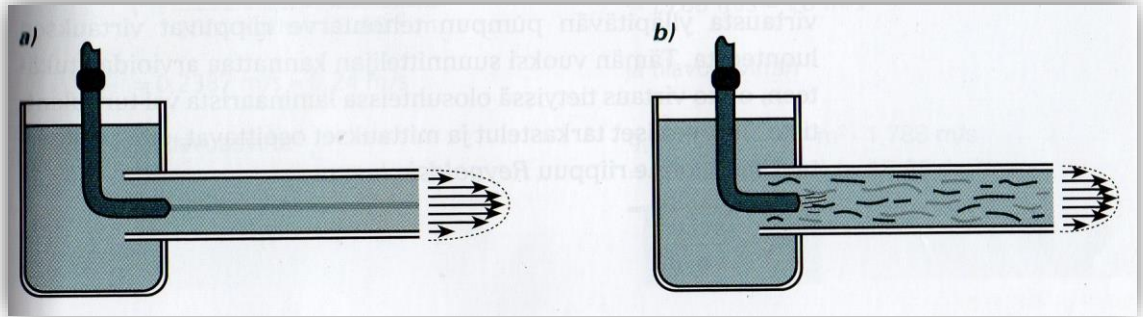
Kuva 3. Rajakerrosvyöhyke [2, s. 24].

Kuten edellä mainittiin, rajakerroksessa virtaavien ilmakerrosten välillä esiintyy kitkavoimia, mitkä ovat seurausta ilman viskositeetistä. Kerrosten väliset kitkavoimat aiheuttavat lämpöhäviöitä ja vähentävät sitä kautta virtauksen kineettistä energiaa. Lämpöhäviöt eivät ole sinänsä oleellisia, mutta virtauksen pienentyneellä energialla on suuri merkitys aerodynamiikassa.

2.3 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen eroa voidaan havainnollistaa väriaineen sekoittumisella virtaukseen (kuva 4). Kohdassa a väriaine etenee tasaisesti putken pituussuunnassa kerroksittain, eikä sekoitu muun nesteen kanssa. Kaikki nesteen partikkelit kulkevat siis tasaisesti virtauksen suuntaan.

Jos väriaineen ja muun nesteen keskinäistä virtausnopeutta tai viskositeettia muutetaan, väriaine sekoittuu nesteeseen ja tällöin virtauksen sanotaan olevan turbulenttista. Nesteen partikkeleiden nopeus vaihtelee ja ne kulkevat osittain virtauksen kokonaisuuntaa vastakkaiseen suuntaan. [1, s. 377.]

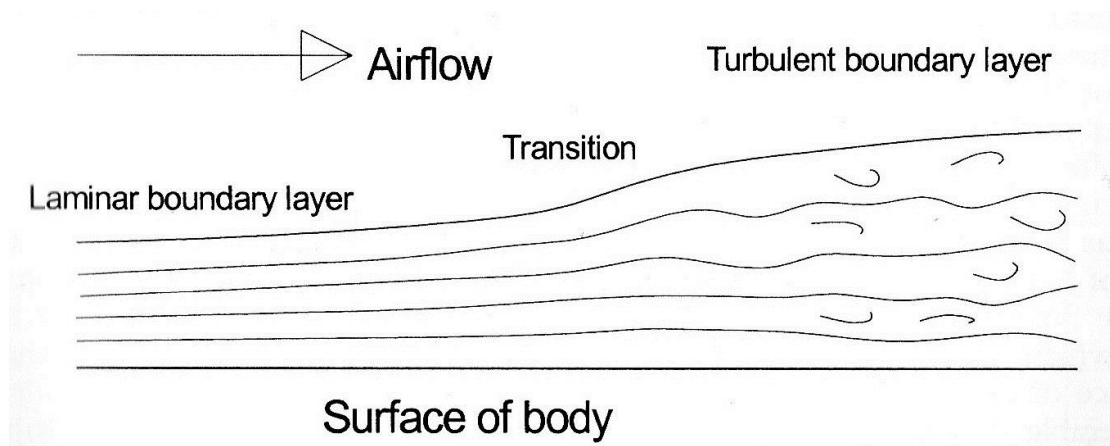


Kuva 4. Laminaarinen ja turbulenti virtaus [1, s. 377].

Laminaarisen ja turbulentin virtauksen eroa voidaan havainnollistaa hyvin myös kynttilän sammuttamisella. Savu, joka nousee sammuneen kynttilän läheisyydestä, on tasaista ja kuvaa laminaarista virtausta. Mitä korkeammalle savu nousee, sitä enemmän se alkaa sekoittua ilman kanssa ja virtauksesta tulee turbulenti. Virtaus muuttuu laminaarisesta turbulentiksi, koska viskoosiset voimat vievät energiaa virtauksesta sen edetessä. [2, s. 24.]

Turbulenti virtaus rajakerroksessa

Rajakerroksesta puhuttaessa virtaus muuttuu turbulentiksi sen edetessä kappaleen pinnalla. Kuten edellä mainittiin, viskoosiset voimat vievät virtauksesta energiaa ja tästä johtuen virtaus muuttuu epämääräiseksi sen edetessä kappaleen pinnalla ja muuttuu lopulta turbulentiksi (kuva 5).



Kuva 5. Rajakerroksen muuttuminen laminaarisesta turbulentiksi [2, s. 25].

Kun virtaus muuttuu turbulenttiseksi, myös rajakerroksesta tulee paksumpi ja tämä saa aikaan suuremman ilmanvastuksen. Myös muut seikat, kuten terävät kulmat, äkkinäiset muutokset pinnan kaarevuudessa tai pinnankarheus voivat irrottaa laminaarisen virtauksen kappaleen pinnasta ja muuttaa virtauksen turbulenttiseksi.

2.4 Paine kertoimet

2.4.1 Yleiset paine kertoimet

Autoista puhuttaessa käytetään yleisimmin termejä ilmanvastuskerroin (eng. drag coefficient) ja negatiivinen noste (eng. negative lift / downforce). Suomen puhekielessä käytetään yleisesti termiä *downforce*, kun puhutaan negatiivisesta nosteesta. Tästä syystä kyseistä termiä negatiiviselle nosteelle tullaan käyttämään myös tässä työssä.

Nämä molemmat voidaan ilmaista yksinkertaisesti voimina (N), mutta vertailua helpottamaan käytetään yleensä paine kertoimina, C_D , mitkä ovat dimensiottomia suureita. Nämä paine kertoimet ovat nosteelle C_L ja ilmanvastukselle C_D . Paine kertoimia käytettäessä kappaleen koolla ei ole merkitystä, mikä helpottaa voimien vertailua esim. 50 % tuulitunnelimallin ja täysikokoisen auton välillä. Paine kerrointa käytetään myös paikallisen staattisen paineen mittarina, kun tarkastellaan aerodynaamisia voimia. [2, s. 34.]

Paine kertoimet voidaan johtaa Bernoullin yhtälöstä. Tarkastellaan koko systeemin virtausnopeutta ja staattista painetta kahdessa eri pisteessä: kaukana auton pinnasta eli vapaassa virtauksessa sekä mielivaltaisesta pisteestä auton läheisyydessä, missä virtausnopeus ja paine poikkeavat vapaasta virtauksesta. Koska tiedetään, että staattisen paineen ja dynaamisen paineen summa on vakio ja oletetaan, että systeemistä ei katoa eikä siihen tuoda lisää energiaa, voidaan yhtälö kirjoittaa muotoon

$$P_{S_\infty} + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 = P_S + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (5)$$

P_{S_∞} on staattinen paine vapaassa virtauksessa

$\frac{1}{2}\rho V_\infty^2$ on dynaaminen paine vapaassa virtauksessa

P_S on staattinen paine tarkastelupisteessä

$\frac{1}{2}\rho V^2$ on dynaaminen paine tarkastelupisteessä

Korvataan $\frac{1}{2}\rho V^2$ kirjaimella q ja saadaan:

$$P_{S_{\infty}} + q_{\infty} = P_S + q \leftrightarrow P_S - P_{S_{\infty}} = q_{\infty} - q \leftrightarrow \frac{P_S - P_{S_{\infty}}}{q_{\infty}} = 1 - \frac{q}{q_{\infty}} \quad (6)$$

Yhtälön vasen puoli voidaan kirjoittaa myös muotoon $\frac{\Delta P}{q_{\infty}}$, joka on tässä tapauksessa varsinainen painekerroin C_p . Tässä ΔP on staattisen paineen muutos tarkastelupisteessä (P_S) suhteessa staattiseen paineeseen vapaassa virtauksessa ($P_{S_{\infty}}$).

Korvataan q yhtälön oikealla puolella takaisin muotoon $\frac{1}{2}\rho V^2$, jolloin yhtälön oikea puoli tulee muotoon $1 - \left(\frac{V}{V_{\infty}}\right)^2$ ja saadaan

$$C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_{\infty}}\right)^2 \quad (7)$$

Toisin sanoen, kun tiedetään ilman virtausnopeus kappaleen läheisyydessä sekä virtausnopeus vapaassa virtauksessa, voidaan painekerroin C_p määrittellä näiden avulla. C_p voidaan laskea myös staattisen paineen avulla. Yhtälöstä voidaan nähdä, että painekerroin kasvaa nopeuden neliöön. Tämä tarkoittaa, että nopeudella on todella suuri merkitys aerodynaamisissa voimissa. [1, s. 393, 396.]

Seuraavaksi tarkastellaan pistettä, jossa virtausnopeus on täysin pysähtynyt, eli toisin sanoen pistettä esim. auton etupuskurin pystysuoralla osuudella tai keskellä siiven etureunaa. Tässä pisteessä virtausnopeus on 0, joten yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$C_p = 1 - \left(\frac{0}{V_{\infty}}\right)^2 \rightarrow C_p = 1 - 0 \rightarrow C_p = 1 \quad (8)$$

Tämä on käytännössä korkein C_p -arvo, mihin voidaan päästä, jos oletetaan, että ilma on kokoon puristumatonta.

Tietyn etäisyyden päässä kappaleen pinnasta, missä virtausnopeus on yhtä suuri vapaan virtauksen kanssa, eli $V = V_{\infty}$, saadaan

$$C_p = 1 - \left(\frac{1}{1}\right)^2 \rightarrow C_p = 1 - 1 \rightarrow C_p = 0 \quad (9)$$

Tästä voidaan päätellä, että kun virtausnopeus on hitaampi kuin vapaa virtaus, niin C_p -arvo on välillä 0 ja 1.

Kun virtausnopeus on nopeampi kuin vapaa virtaus, niin C_p :stä tulee negatiivinen. Oletetaan esimerkiksi auto, joka kulkee tasaista nopeutta 40 m/s. Oletetaan, että ilman nopeus kasvaa 80 m:iin /s auton alla sopivan pohjalevyn avustuksella. Tällöin C_p -arvoksi auton alla saadaan

$$C_p = 1 - \left(\frac{80}{40}\right)^2 \rightarrow C_p = 1 - 4 \rightarrow C_p = -3 \quad (10)$$

Painekertoimien toimintaperiaate on erittäin tärkeää ymmärtää aerodynamiikasta puhuttaessa sekä aerodynamiikkaa suunniteltaessa, vaikka tässä työssä painekertoimia sivutaan loppujen lopuksi hyvin vähän.

2.4.2 Nostekerroin ja -voima

Nostekerroin voidaan määrittää edeltävien kaavojen mukaan, mutta näiden avulla voidaan laskea myös varsinainen nostovoima. Kaava nostovoimalle voidaan johtaa painekertoimen kaavasta.

$$C_p = \frac{P_s - P_{s\infty}}{q_\infty} \leftrightarrow C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \leftrightarrow \Delta P = C_p * \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (11)$$

Fysiikan kaavoista [1, s. 309} tiedetään, että

$$P = \frac{F}{A} \leftrightarrow F = P * A \quad (12)$$

F on voima

P on paine

A on pinta-ala

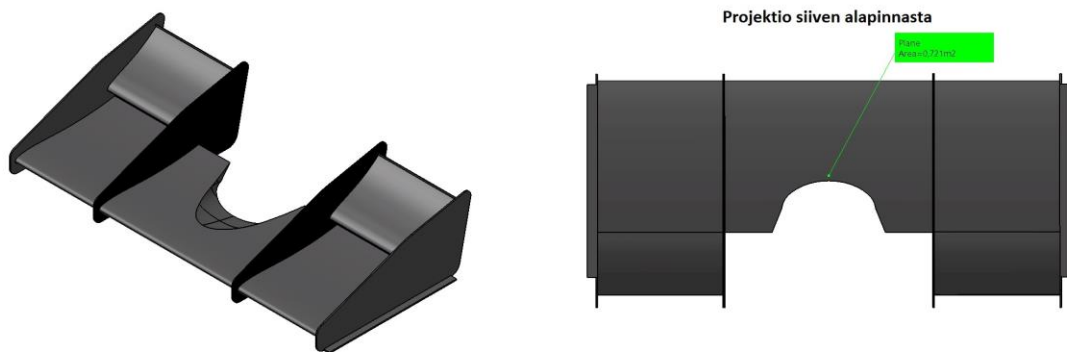
sijoitetaan ΔP edeltävään kaavaan ja saadaan

$$F = C_p * \frac{1}{2} \rho V^2 * A \quad (13)$$

Siis kun C_p ja vaikuttava pinta-ala tiedetään, voidaan voima F laskea edeltävästä kaavasta. Vastaavasti jos vaikuttava voima tiedetään, voidaan kaavan avulla määrittää myös C_p -arvo. Nostovoimalle kaava tulee siis muotoon

$$\text{nostovoima } F = C_L * \frac{1}{2} \rho V^2 * A \quad (14)$$

Kuten aiemmin jo mainittiin, kilpa-autoista puhuttaessa nostovoimalle käytetään yleisimmin termejä negatiivinen noste tai downforce, koska nostovoima pyritään saamana autoissa maata kohti toisin kuin lentokoneissa, joissa voima pyritään saaman ylöspäin. Edeltävästä kaavasta voidaan myös päätellä, että pinta-alalla on suuri merkitys voiman suuruudelle. Tässä tapauksessa pinta-alalla tarkoitetaan esim. siiven projektiopinta-alaa suoraan siiven alapuolelta tarkasteltuna (kuva 6). Toisin sanoen, mitä suurempi siipi, sitä suurempi nostovoimaa tai downforce. Samasta syystä auton pohja on suuren pinta-alansa ansiosta tehokas negatiivisen nosteen lähde.



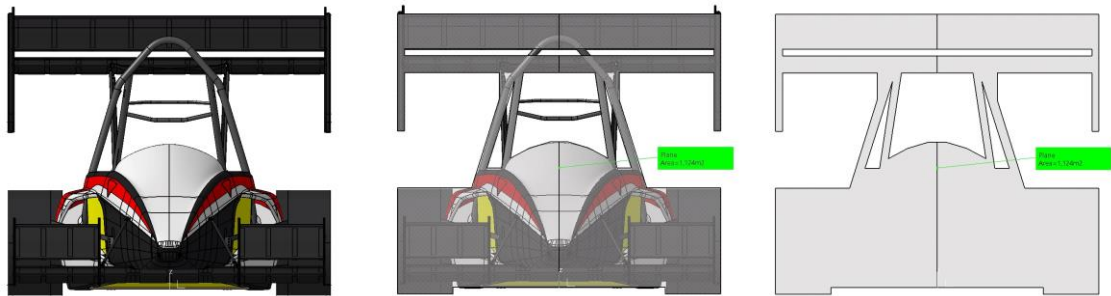
Kuva 6. Projektiokuva siiven alapinnasta.

2.4.3 Ilmanvastuskerroin ja -voima

Ilmanvastukselle pätee täsmälleen samat kaavat kuin nostekertoimelle. Ilmanvastuksesta puhuttaessa ollaan yleensä kiinnostuneita ilmanvastuskertoimesta C_D , ja se on

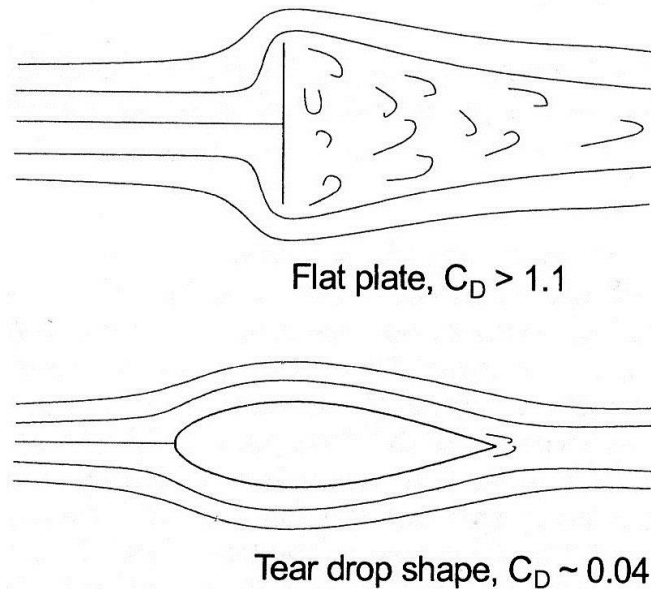
yleisin suure vertailtaessa eri autojen ilmanvastuksia. Ilmanvastuskertoimen määrittämiseksi tulee tietää ilmanvastusvoima, mikä voidaan selvittää monella eri tapaa.

Yksi tapa on arvioida ilmanvastuskerroin käytettävissä olevan tehon ja maksiminopeuden perusteella. Toinen yleisesti käytetty tapa on ns. Coast down -testi, jossa auto kiihdytetään kovaan nopeuteen, minkä jälkeen sen annetaan rullata vapaasti pysähdyksiin asti. Kun tiedetään muut autoa hidastavat voimat (voimansiirto, renkaiden pyörimiskitkat jne.) sekä auton projektiopinta-ala edestäpäin (kuva 7), voidaan ilmanvastusvoima laskea näiden tietojen avulla. [2, s. 206–207.]



Kuva 7. HPF014E-kilpa-auton projektiopinta-ala edestä.

Kuva 8 havainnollistaa ilmanvastuskertoimen suuruutta eri muotoisille kappaleille. Kuvasta voi havaita, että ilmanvastuskerroin suoralle levyllä on n. 27 kertaa suurempi, mitä pisanan muotoiselle kappaleelle. Henkilöautojen ilmanvastuskertoimet asettuvat yleensä välille 0,3 ja 0,4, kun taas kilpa-autojen ilmanvastuskertoimet ovat luokkaa 0,4–1,4, riippuen millainen kilpa-auto on kyseessä. [1, s. 394; 2, s. 37–38.]



Kuva 8. Ilmanvastuskerroin suoralle levyille sekä pisaran muotoiselle kappaleelle [2, s. 37].

Tässä työssä ei jäänyt aikaa määrittää HPF014E-auton ilmanvastuskerrointa Coast down -testiä hyödyntäen, joten ilmanvastuskerroin arvioitiin CFD:stä (Computational Fluid Dynamics) saatujen tulosten perusteella.

2.5 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku Re kuvaa virtauksen sisäisten voimien vuorovaikutusten suhdetta virtauksen viskoosisiin voimiin (kaava 15). Virtauksen sisäisillä voimilla tarkoitetaan nestettä liikuttavia voimia. Nämä ovat nesteen viskositeetti ja nopeus, ja ne ovat vastaavasti vuorovaikutuksessa jonkin pinnan, esim. siiven tai putken kanssa. Viskoosisilla voimilla tarkoitetaan nesteen sisäistä viskositeettiä, joka vastaavasti yrittää hidastaa nesteen virtausta.

$$Re = \frac{\text{virtauksen sisäiset voimat}}{\text{virtauksen viskoosiset voimat}} = \frac{\text{virtausta liikuttavat voimat}}{\text{virtausta hidastavat voimat}} \quad (15)$$

Yksiköiden kanssa Reynoldsin luku kirjoitetaan muotoon:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (16)$$

ρ on nesteen tiheys

V on nesteen virtausnopeus

L on =kappaleen pituus (voi olla myös putken halkaisija ym.)

μ on =nesteen viskositeetti

Reynoldsin luku on dimensioton luku, mikä tarkoittaa, että yhtälössä lukujen yksiköt kumoavat toisensa ja jäljelle jää pelkkä luku. Luvun suuruus ilmaisee, onko virtaus laminaarista vai turbulენტtista, ja on määritetty seuraavalla tavalla:

$Re < 2000 \rightarrow$ laminaarinen virtaus

$2000 < Re < 4000 \rightarrow$ siirtymäalue, laminaarisia sekä turbulენტtisia piirteitä

$Re > 4000 \rightarrow$ turbulენტtinen virtaus

Tuulitunnelitesteissä Reynoldsin lukua käytetään mallintamaan virtauksen viskoosisia ominaisuuksia kahden eri mallin välillä. Toisin sanoen, kun Reynoldsin luvut mallien välillä ovat samat, voidaan virtauksen ajatella käyttäytyvän samoin samassa, suhteellisessa tarkastelupisteessä. Autoissa tärkein sovelluksen kohde on rajakerrosvyöhykkeen kehittymisen mallintaminen eri kokoisten mallien välillä.

Esimerkkinä voidaan käyttää auton tuulitunnelimallia, joka on kooltaan esimerkiksi 50 % täysikokoisesta mallista. Jotta virtauksen ja rajakerrosvyöhykkeen voitaisiin olettaa käyttäytyvän samalla tapaa kahden eri mallin välillä, on niiden Reynoldsin lukujen vastattava toisiaan. Ilman tiheys ja viskositeetti ovat suureita, mihin ei pystytä paljoa vaikuttamaan, joten ainoat suureet mihin voidaan vaikuttaa, ovat nopeus ja mallin koko. Yhtälöstä voidaan nähdä, että jos mallin koko L puoliintuu, niin nopeuden täytyy vastaavasti tuplaantua, että Reynoldsin luku olisi sama 50 % ja täysikokoisen mallin välillä. [1, s. 378–379; 2, s. 32–33; 5; 6.]

Tuulitunneleissa käytetään useimmiten skaalattuja malleja kustannussyistä, ja sen takia Reynoldsin luku on tärkeä ottaa huomioon erikokoisia malleja testattaessa.

3 Suunnittelun lähtökohdat

Kilpa-autoissa on paljon erilaisia aerodynaamisia sovelluksia, mutta yleisimmät näistä ovat siivet sekä pohjalevy. Kilpa-autot voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään; yksipaikkaisiin, formulatyypisiin (eng. open wheel) kilpa-autoihin, sekä umpikorisiin (eng. saloon) kilpa-autoihin (kuva 9). Näiden kahden eri autotyypin aerodynaamiset komponentit eroavat toisistaan suhteellisen paljon, minkä takia tässä työssä perehdytään ainoastaan formulatyypisiin kilpa-autoihin, jollainen myös HPF014E on.



Kuva 9. Umpikorinen 1996 McLaren F1 GTR ja 1996 McLaren Formula 1 -auto [2, s. 38].

Siipien ja pohjalevyn lisäksi kilpa-autoissa on kymmenittäin erilaisia aerodynaamisia komponentteja, kuten ilmaohjaimia sekä -kanavia erilaisiin käyttötarkoituksiin, mutta

tässä työssä ei perehdytä niihin sen enempää. Tämän työn lähteet 2 ja 7 ovat esimerkiksi hyviä opuksia kilpa-autojen aerodynamiikasta, mikäli näistä haluaa saada lisää tietoa.

3.1 Aerodynamiikan hyödyntäminen kilpa-autoilussa

Kaikessa yksinkertaisuudessaan kilpa-auton nopeus radalla riippuu siitä, kuinka paljon voimaa saadaan välitettyä renkaiden välityksellä tien pintaan. Mitä enemmän pitoa tien ja renkaan välillä on, sitä nopeammin autolla voidaan kiihdyttää, jarruttaa ja ajaa kaarteisiin. Tässä työssä ei perehdytä sen tarkemmin pitoon liittyvään teoriaan, mutta peruseriaate käydään kuitenkin läpi.

Newtonin toisen lain mukaan staattinen paino on kilpa-autojen tapauksessa huono, sillä suuremman massan omaava auto vaatii enemmän voimaa kiihdyttämiseen, jarruttamiseen sekä se vaatii enemmän pitoa mutkissa pysyäkseen tiellä. Lähtökohtaisesti kilpa-autoista halutaan siis suunnitella mahdollisimman kevyitä paremman kiihtyvyyden sekä parempien mutkanopeuksien saavuttamiseksi. [2, s. 21.]

Käytettävissä oleva pito on verrannollinen siihen, kuinka suurella voimalla rengas painautuu tietä vasten. Suuremmalla voimalla saavutetaan suurempi pito, mutta kuten edellä mainittiin, staattinen paino ei ole tässä tapauksessa hyvä asia. Aerodynamiikkaa voidaan hyödyntää kasvattamalla pitoa renkaan ja tien välillä ilman, että auton staattinen paino nousee.

Tämä tarkoittaa sitä, että enemmän downforcea tuottava auto pystyy ajamaan kaarteen nopeammin, jolloin taas kaarteen ulostulonopeus on suurempi. Autolla on siis suurempi lähtönopeus seuraavalle suoralle, ja se pystyy tällä tavoin saavuttamaan suuremman nopeuden ennen seuraavaa kaarretta. Downforcen ansiosta myös jarrutuksen voi jättää myöhemmäksi, koska pitoa on käytettävissä enemmän. Kun otetaan huomioon kokonainen rata kierros, vaikutus kertaantuu ja downforcea tuottavalla autolla voidaan saavuttaa huomattavasti nopeampia kierrosaikoja. [2, s. 42–45; 7, s. 147–177.]

3.2 Siivet

Siivet ovat yksi tehokkaimmista tavoista tuottaa downforcea kilpa-autoissa. Siinä missä lentokoneen siipi nostaa lentokoneen ilmaan, on kilpa-autoissa siipiprofiili käännetty ylösalaisin ja siivet vetävät autoa maata kohden.

Siipiä käytetään yleensä umpikorisisissa kilpa-autoissa ainoastaan auton takaosassa, takaluukun päällä. Siipi sekoitetaan usein spoileriin, mutta spoilerilla tarkoitetaan yleensä takaluukun jatkeeksi asennettavaa lippaa ja sen alta ei virtaa ilmaa (kuva 10). Formula-tyyppisissä kilpa-autoissa on lähes poikkeuksetta myös etusiipi tuottamassa downforcea. Seuraavassa osiossa käydään läpi formula-tyylisen kilpa-auton siipien toimintaperiaatteet sekä erilaiset sovellukset.

Siipi



Spoileri

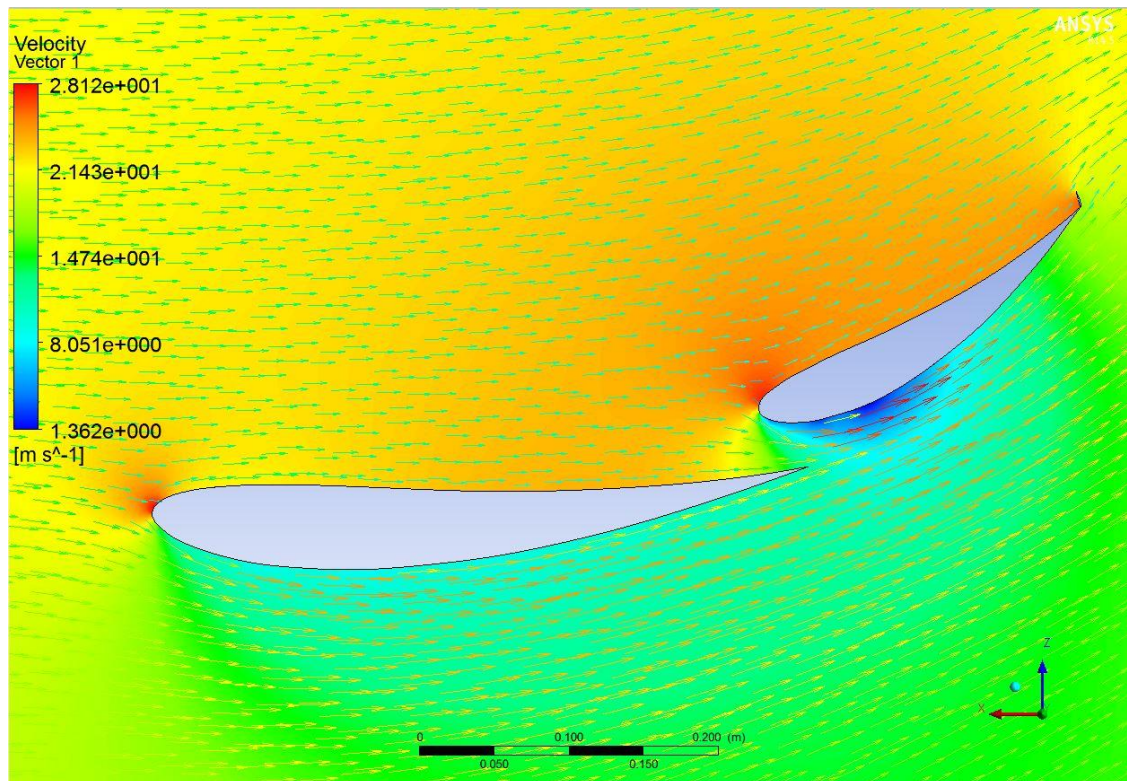


Kuva 10. Siiven ja spoilerin ero [8; 9].

3.2.1 Toimintaperiaate

Siipien tuottama noste perustuu paine-eroihin siiven ylä- ja alapuolella sekä ilman virtaussuunnan muutosten aiheuttamiin voimiin. Siiven etureunan kohdalla ilma jakautuu siiven ylä- ja alapuolelle ja ilmavirta pysyy kiinnittyneenä siiven pintaan Coanda-ilmiön ansiosta. Coanda-ilmiö aiheuttaa siipeä alaspäin vetävän voiman Newtonin 3. lain mukaan. Ilman nopeus kiihtyy siiven alapinnalla (lentokoneissa siiven yläpinnalla) enemmän ja Bernoullin lain mukaan, kun nesteen virtausnopeus kasvaa, niin staattinen paine pienenee ja tämä paine-ero siiven ylä- ja alapinnan välillä aiheuttaa myös siipeä alaspäin vetävää voimaa.

Kuva 11 havainnollistaa edellä mainittua ilmiötä. Kuvassa vektorinuolet esittävät virtauksen suuntaa ja nopeutta, kun taas värikuvaaja esittää staattista painetta siiven ympärillä. Kuvasta voidaan havaita, että siellä, missä virtausnopeus on suurin, niin staattinen paine on vastaavasti pienin. Kuvasta voidaan myös havaita, että staattisen paineen aleneminen vaikuttaa myös kauempana siiven pinnasta ja tätä ominaisuutta voidaan osaltaan hyödyntää muissa aerodynaamisissa sovelluksissa. [1, s. 390; 2, s. 28; 10.]



Kuva 11. Virtausvektorit ja staattinen paine siiven ympärillä.

3.2.2 Siipiprofiili

Kuvassa 12 on esitetty siipiprofiilin mitat ja niiden englanninkieliset vastineet.

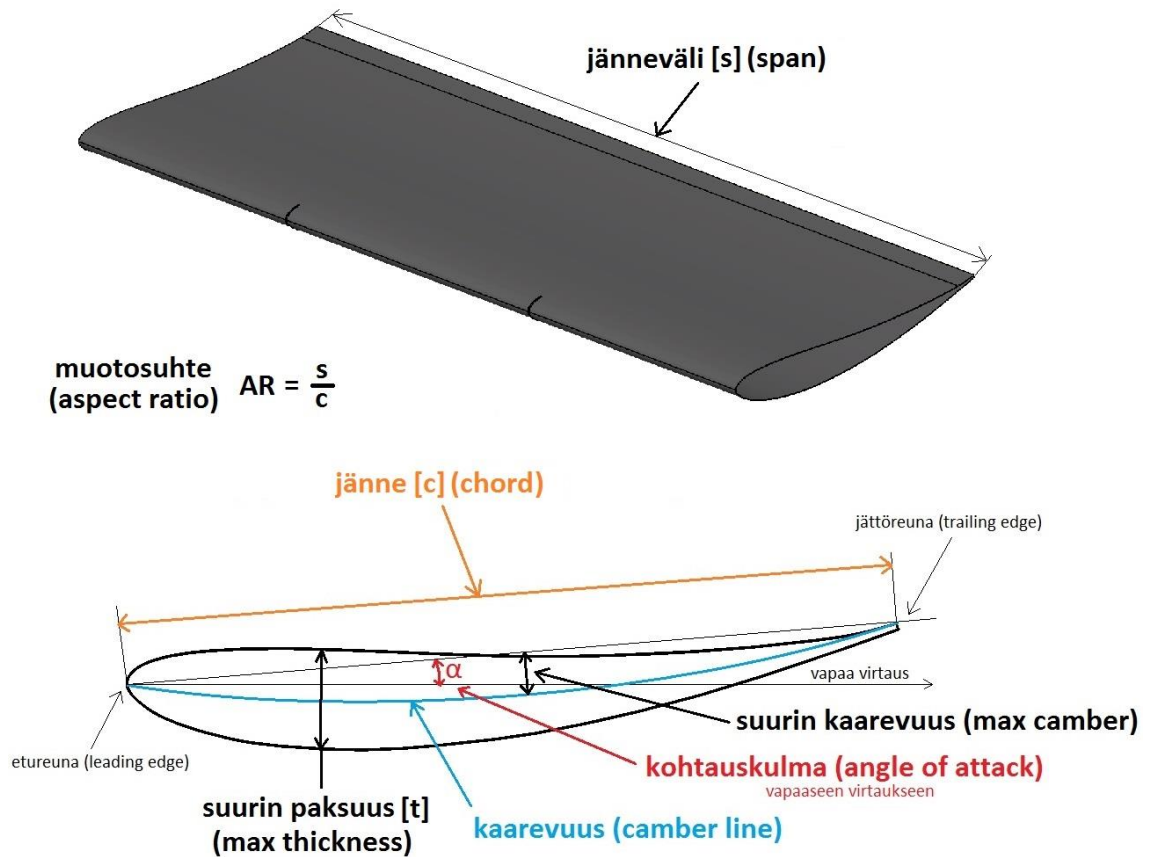
Jänne tarkoittaa siiven etureunan ja jättöreunan välistä etäisyyttä ja jänneväli on siipiprofiilin leveys. Muotosuhde tarkoittaa näiden kahden suhdetta. Lentokoneen siivissä muotosuhde on yleensä korkea, kun taas esimerkiksi F1-auton takasiiven muotosuhde on hyvin pieni.

Suurin paksuus t ilmaistaan kertoimena jänteen pituudesta. Jos jänteen pituus on 300 mm ja $t = 0,15$, on siiven paksuin kohta silloin $0,15 \times 300 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$. Paksuimman kohdan sijainti ilmaistaan arvolla t_{\max} ja tarkoittaa kerrointa jänteen pituudesta mitattuna iiven etureunasta, esim. $t_{\max} = 0,4$, niin paksuin kohta on silloin $0,4 \times 300 \text{ mm} = 120 \text{ mm}$ siiven etureunasta.

Kaarevuus tarkoittaa viivaa, joka on piirretty siiven ylä- ja alapinnan välisten keskipisteiden lävitse. Suurin kaarevuus mitoitetaan samalla tapaa kuin siiven paksuus eli suhdelukuna jänteen pituudesta ja mitta otetaan suurimmasta etäisyydestä jänteeeseen. Kaarevuuden sijainti ilmaistaan myös samalla tapaa kuin siiven paksuudessa eli suhdeluku jänteen pituuteen siiven etureunasta mitattuna.

Kohtauskulma on kulma siiven jänteen ja vapaan ilmavirran välillä. Ilmavirta, jonka siiven etureuna kohtaa, ei välttämättä aina ole samansuuntainen maatasen kanssa. Esimerkiksi umpikorisisissa autoissa takasiivelle tuleva ilmavirta saattaa tulla yläviistosta johtuen auton katon kaarevuudesta, mitä ilmavirta seuraa. Yleensä kohtauskulma käsittää kuitenkin kulman maatasen (vapaan ilmavirran) ja jänteen välillä.

Siiven projektiopinta-ala A saadaan kertomalla jänneväli jännteellä; $A = s * c$. Tämä on sama pinta-ala, mitä käytetään laskettaessa siiven painekerrointa C_L . [2, s. 86–88; 11.]



Kuva 12. Siipiprofiilin mitat.

3.2.3 Siipiprofiilin mitoittaminen

Siiven mitoittaminen riippuu pitkälti siitä, mitä kyseisen kilpaluokan säännöt sallivat ja mitä ominaisuuksia siiveltä haetaan. Jotkin kilpaluokat sallivat ainoastaan yksielementtisiä siipiä, kun taas toisissa kilpaluokissa siivessä voi olla useampi elementti. Kuvassa 13 on esitetty HPF014E-auton 1-, 2- ja 3-elementtiset etusiipihahmotelmat. Erilaisia siipiprofiileita on olemassa sadoittain, ja se, mikä sopii parhaiten mihinkin autoon, voidaan selvittää ainoastaan testaamalla. Käytännössä kannattaa kuitenkin ottaa lähtökohdaksi jokin hyväksi havaittu siipiprofiili, mistä lähteä soveltamaan ja hakemaan erilaisia vaihtoehtoja.



Kuva 13. HPF014E-auton 1-, 2- ja 3-elementtiset etusiipihahmotelmat.

Se, millainen mitoitus siivelle on paras missäkin kokoonpanossa, riippuu hyvin monesta tekijästä. Kun kyseessä on yksielementtinen siipi, voidaan mitoittaminen rajoittaa esimerkiksi seuraaviin arvoihin siipiprofiilin valinnan jälkeen [2, s. 90–99.]:

Kohtauskulma: pieni kohtauskulma alhaiselle downforcelle ja ilmanvastukselle, suurempi kohtauskulma, aina 14° – 16° :seen asti suuremmalle downforcelle ilman suurempaa ilmanvastuksen kasvamista.

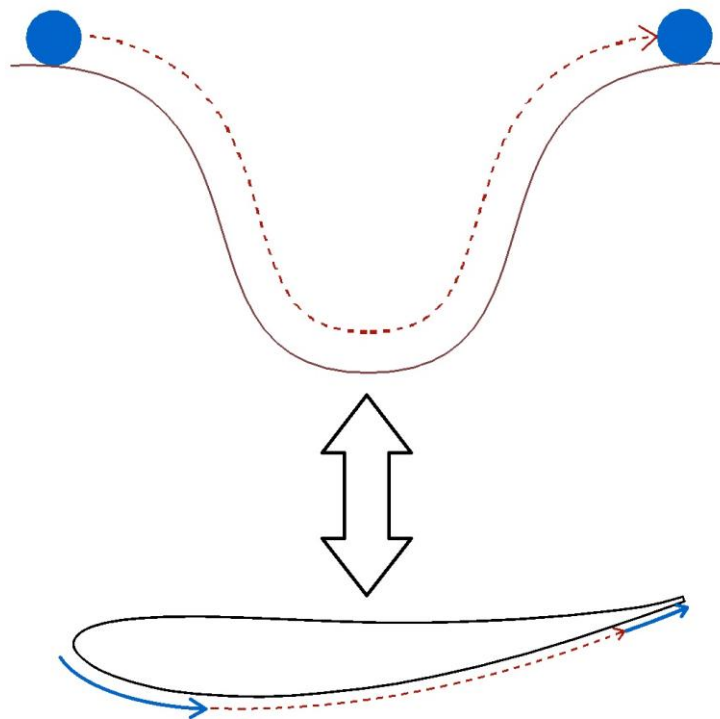
Kaarevuus: noin 4 % – 6 % pienelle ilmanvastukselle, alhaisemmalle downforcelle ja hyvälle hyötysuhteelle. Suurin downforce saavutetaan noin 9 %:n kaarevuudella, mutta tällöin ilmanvastus kasvaa ja siiven hyötysuhde pienenee.

Paksuus: noin 14 % – 16 % pienelle ilmanvastukselle, alhaisemmalle downforcelle ja hyvälle hyötysuhteelle. Suurin downforce saavutetaan noin 18 % – 20 %:n paksuudella ja suuremmalla kohtauskulmalla, jolla voidaan edelleen saavuttaa hyvä hyötysuhde.

Siiven kaarevuutta ja kohtauskulmaa määrittäessä on hyvä ymmärtää periaate, miten ilma pysyy kiinnittyneenä siiven pintaan ja mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Työn alkupuolella käytiin läpi energian säilymlaki ja kuinka sitä voidaan soveltaa virtausmekaniikassa. Siiven alapinnan ilmapirtausta voidaan verrata esimerkiksi pallon vierimisliikkeen-

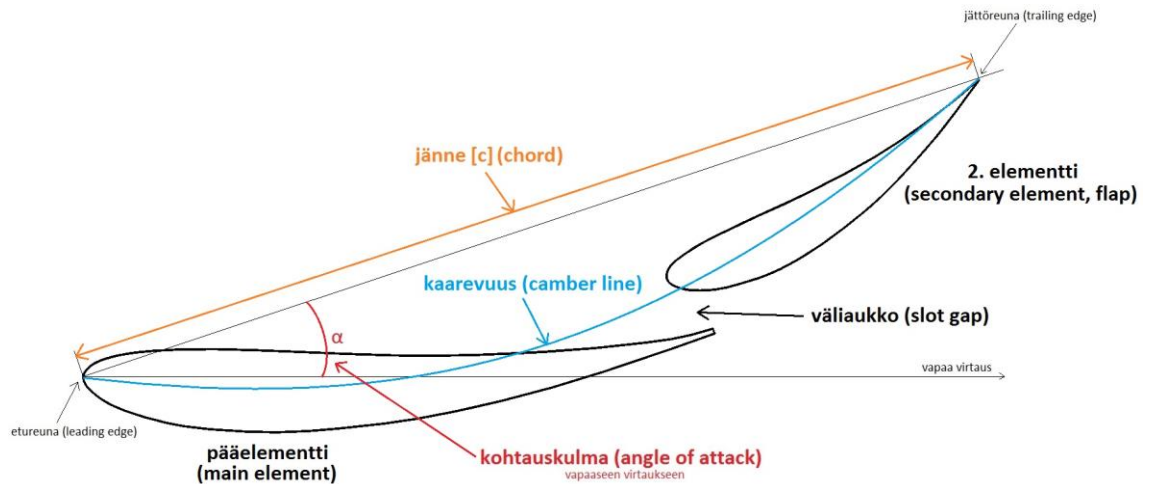
seen. Jos pallo asetetaan korkean rinteen päälle, on sillä tietty määrä potentiaalienergiaa. Kun pallo lähtee vierimään mäkeä alas, potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi. Pallolla on oltava tarpeeksi liike-energiaa saavuttaakseen seuraavan mäen huippu. Vierimisvastus sekä ilmanvastus syövät osan pallon liike-energiasta, ja toisaalta, jos seuraava mäki on liian jyrkkä, ei pallon liike-energia riitä kapuamaan sen päälle.

Sama periaatetta voidaan soveltaa myös siiven ympärillä tapahtuvaan virtaukseen. Jos virtauksessa on liian vähän energiaa, tai siiven kohtauskulma tai kaarevuus ovat liian suuria (vrt. mäen jyrkkyys), niin ilmavirta ei pysy enää kiinnittyneenä siiven pintaan. Kuten aiemmin mainittiin, viskoosiset voimat syövät virtauksesta energiaa sen edetessä kappaleen pinnalla (vrt. ilmanvastus ja vierimisvastus pallolla). Tietyn pisteen jälkeen adheesivoimat eivät enää riitä pitämään virtausta kiinni siiven pinnalla ja virtaus irtoaa. Kohtauskulmaa ja kaarevuutta voidaan siis verrata mäen jyrkkyyteen ja pallon liike-energiaa ilman virtausenergiaan (kuva 14). [2, s. 31.]



Kuva 14. Vertauskuva pallon liike-energian ja ilman liike-energian välillä.

Kaksi- tai monielementtisten siiven mitoitus poikkeaa hiukan yksielementtisen siiven mitoituksesta. Kohtauskulman, jänteen ja kaarevuuden arvot on määritetty eri tavalla kuin yksielementtisessä siivessä (kuva 15).



Kuva 15. Kaksielementtisen siiven mitoitus.

Kaksielementtisessä siivessä 2. elementin pituus on yleensä n. 25 % – 40 % koko siipiyhdistelmän jänteen pituudesta, riippuen millaisia ominaisuuksia siiveltä haetaan. 2. elementti on yleensä myös paksumpi suhteessa oman jänteensä pituuteen, kuin mitä pääelementti. Kaarevuus on yleensä suurempi, noin 30 %, ja sijainti hiukan edempänä, noin $0.20c$.

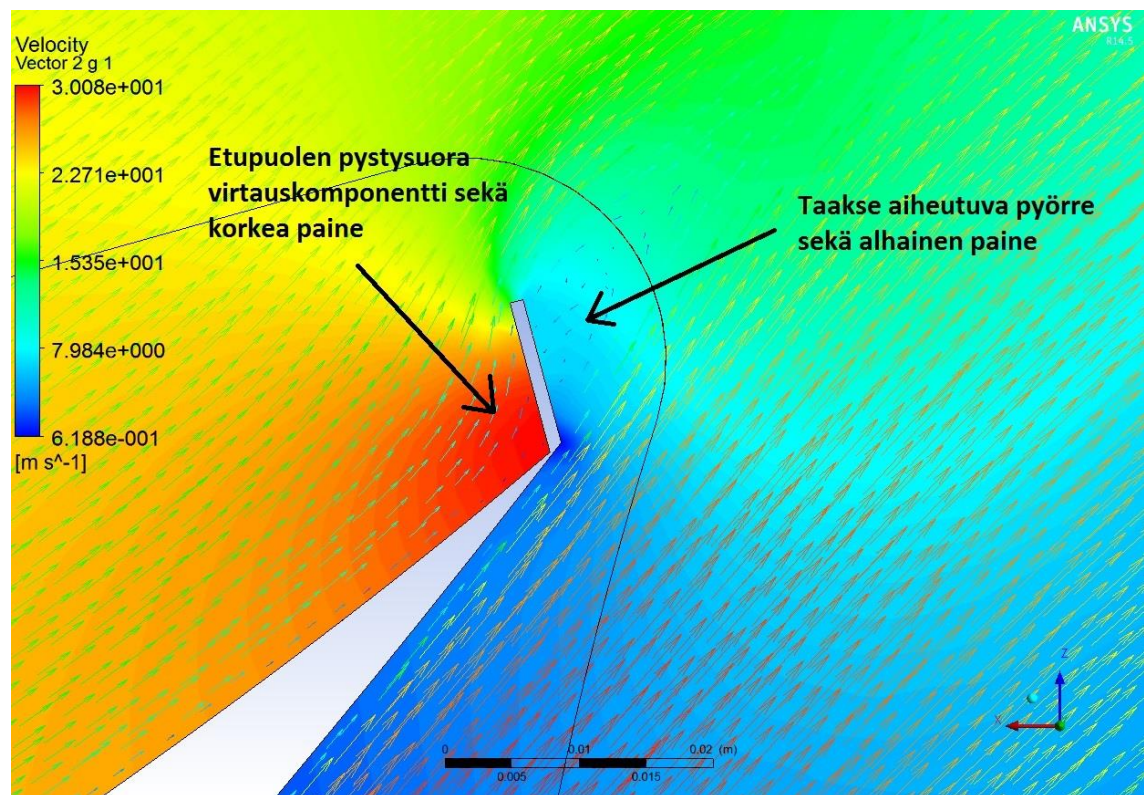
2. elementin sijainti suhteessa pääelementtiin voidaan määrittää seuraavasti: väliaukon suuruus korkeussuunnassa noin 1 % – 2 % jänteen pituudesta. 2. elementin ylitys pituussuunnassa, eli paljonko 2. elementin etureuna tulee pääelementin jättöreunan päälle, 1 % – 4 % siipiyhdistelmän jänteen pituudesta. Kohtauskulma suhteessa pääelementin kohtauskulmaan on yleensä maksimissaan 40° .

Huomioitavaa on myös, että monielementtisten siipien tapauksessa elementtien välinen aukko muodostaa ”kuilun”, joka käyttäytyy kuin venturiputki. Ilmavirta kiihtyy elementtien välissä, joten 2. elementin alapuolelle menevässä virtauksessa on jo valmiiksi enemmän energiaa. Tällä tavoin koko siipiyhdistelmän sekä pääelementin kaarevuutta ja kohtauskulmaa voidaan kasvattaa, koska kiihtyneen virtauksen aiheuttama alentunut paine auttaa virtausta pysymään kiinnittyneenä pääelementin alapintaan sen takaosassa. Tästä

johtuen pääelementin kaarevuus voi olla hiukan suurempi kuin yksielementtisellä siivellä, eli noin 5–20 %. [2, s. 101–106.]

3.2.4 Siiven lisäosat sekä sovellukset kilpa-autoissa

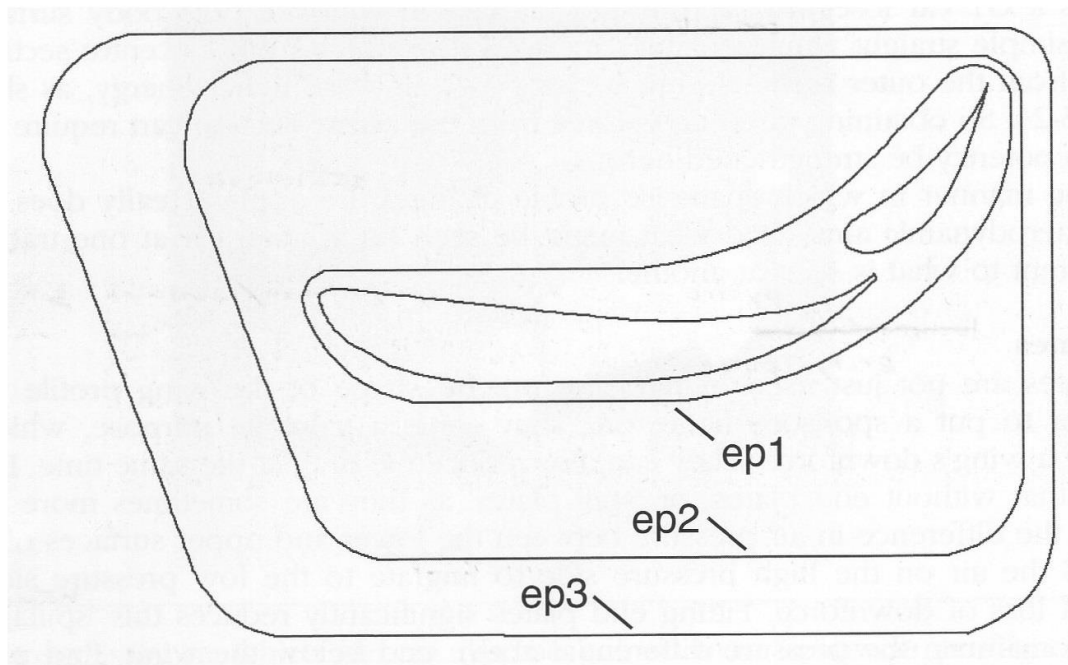
Gurney flap tarkoittaa siiven takaosassa olevaa pientä lippaa, joka on yleensä noin 90°:n kulmassa siiven jänteeseen nähden. Gurney flap saa aikaan pystysuoran virtauksen siiven takaosaan sekä hidastaa virtausta sen etupuolella kasvattaen staattista painetta siiven yläpinnalla. Tämä saa aikaan siipeä alaspäin painavan voiman. Gurney flap aiheuttaa myös ilman pyörteilyä sen takapuolella, ja pyörteessä oleva matalampi staattinen paine auttaa osaltaan ilmavirtausta pysymään kiinnittyneenä siiven alapintaan siiven takaosassa (kuva 16). Tällä tavoin siiven kohtauskulmaa ja kaarevuutta voidaan kasvattaa, mikä lisää itsessään downforcea. Gurney flapin pituus on yleensä alle 5 % jänteen pituudesta, mikäli kilpaluokka ei erikseen rajoita sen mittaa. [2, s. 212–222; 7, s. 133–134.]



Kuva 16. Gurney flapin toimintaperiaate.

Päätylevyt ovat toinen merkittävä lisäosa siiven tehokkuuden parantamiseksi. Siiven päädyissä ilma pyrkii siirtymään siiven yläpinnalta siiven alapinnalle paine-erojen vuoksi. Päätylevyjen tehtävä on estää ilmaa ”vuotamasta” yläpinnalta alapinnalle ja parantaa tällä tavoin siiven tehokkuutta. Päätylevyt vähentävät myös ilmanvastusta, koska ne hillitsevät siiven päätyjen aiheuttamia pyörteitä. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että mitä suurempi päätylevy, sitä vähemmän ilmanvastusta ja sitä enemmän downforcea. Kuva 17 ja taulukko 1 esittävät eri muotoisten päätylevyjen vaikutusta siiven tuottamiin voimiin. [2, s. 114.]

Yleensä päätylevyjä pyritään ulottamaan enemmän alaspäin kuin ylöspäin. Tämä johtuu siitä, että yleensä kilpaluokat rajoittavat, kuinka korkealle siiven pystyy asentamaan. Mitä korkeammalla siipi on, sitä paremman ilmavirtauksen se saavuttaa ja sitä tehokkaammin se toimii. Toinen syy, miksi päätylevyt ulottuvat yleensä alaspäin on, että paineen kasvaminen siiven yläpinnalla on suhteessa pienempi paineen alenemiseen sen alapinnalla, sekä myös se, että alhaisempi paine vaikuttaa kauemmas siiven pinnasta siiven alapuolella.

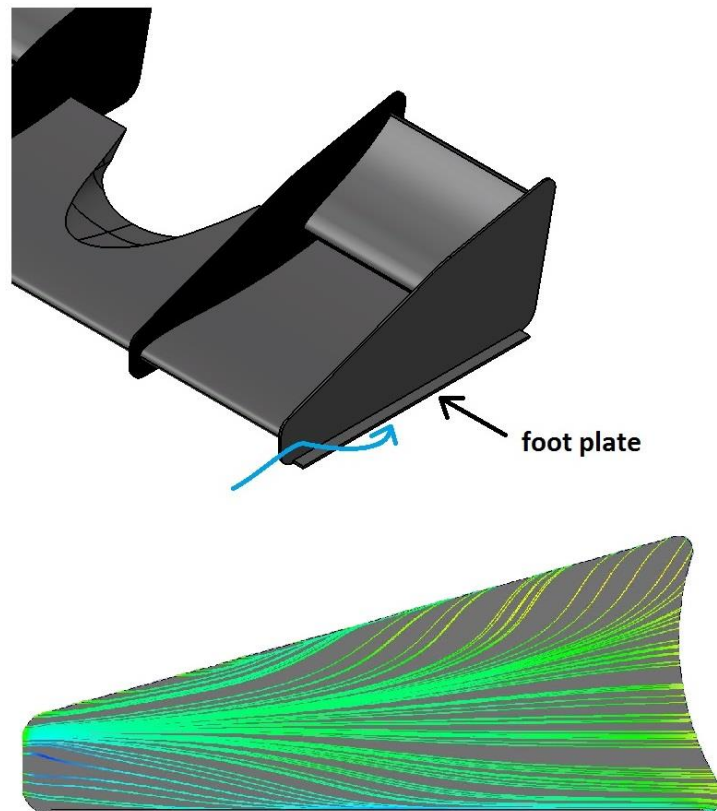


Kuva 17. Eri muotoisia päätylevyvaihtoehtoja [2, s. 114].

Taulukko 1. Päätylevyjen vaikutus siiven aiheuttamiin voimiin [2, s. 114].

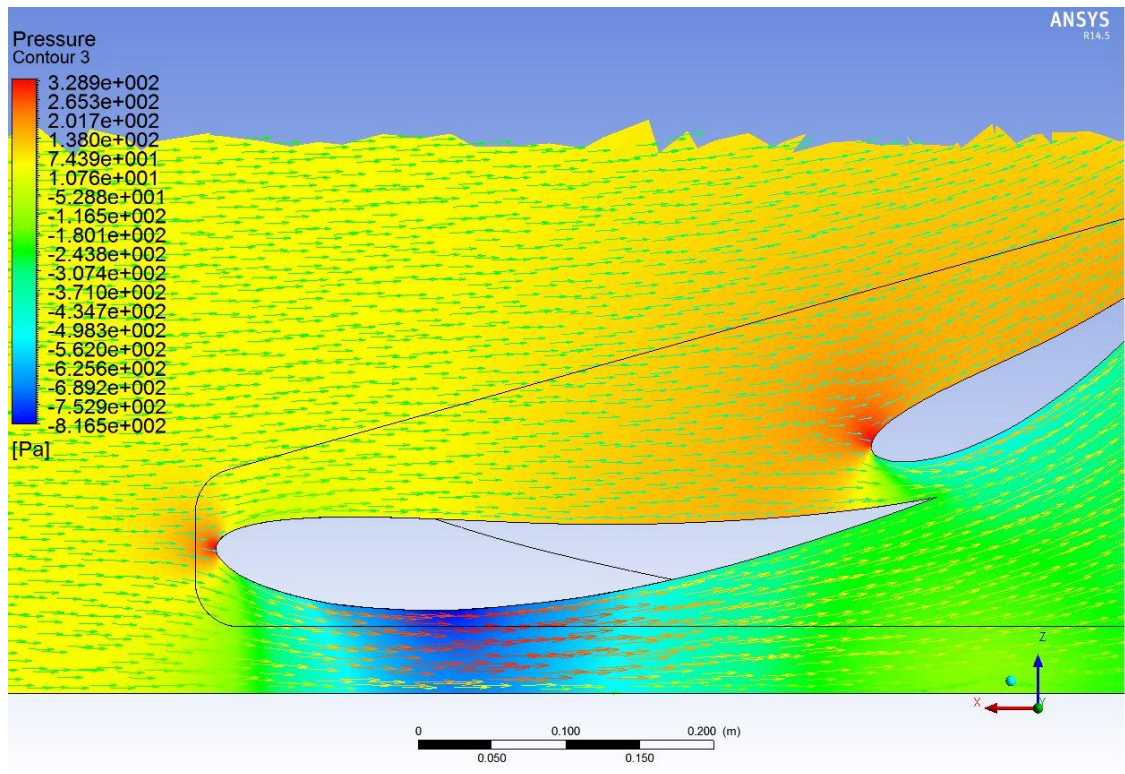
Case	Downforce (N)	Drag (N)
ep0	769,2	194,8
ep1	786,7	188,3
ep2	873,4	183,8
ep3	900,1	178,1

Formulatyyppisen kilpa-auton etusiiven kohdalla päätylevyjä ei pysty tuomaan kovin paljoa alaspäin, koska siipi sijaitsee hyvin lähellä tien pintaa. Etusiiven päätylevyissä käytetään erilaisia komponentteja parantamaan siiven suorituskykyä, kuten ns. *foot plate*, joka on vaakasuora levy päätylevyn alaosaan. Foot platen tehtävä on estää ilmaa kiertämästä päätylevyn alareunan ympäri siiven alaosaan (kuva 18). F1-autojen etusiivet ovat nykyään hyvin monimutkaisia, ja päätylevyjen geometrialla on paljon muitakin tehtäviä, mutta tässä työssä niitä ei ole kuitenkaan tarpeellista käydä läpi.



Kuva 18. Foot plate ja sen vaikutus ilman virtaukseen päätylevyn pinnalla.

Etusiiven maaefekti on toinen huomioitava seikka etusiiven suunnittelussa. Käytännössä mitä lähemmäs etusiipeä tuodaan maata kohden, sitä enemmän downforcea se tuottaa. Tämä johtuu siitä, että etusiipi muodostaa maatasen kanssa ikään kuin venturiputken ja ilmavirtaus kiihtyy huomattavasti siihen nähden, että siipi toimisi vapaassa virtauksessa (kuva 19). Maaefekti toimii kuitenkin vain tiettyyn pisteeseen saakka, sillä kun siipi tuodaan liian lähelle maata, alkaa siiven ja maan välinen rako kuristamaan ilman massavirtausta. Tietyn pisteen jälkeen siipi sakkaa ja ilmavirta irtaosa siiven pinnasta.



Kuva 19. Etusiiven maaefekti.

3.3 Pohjalevy

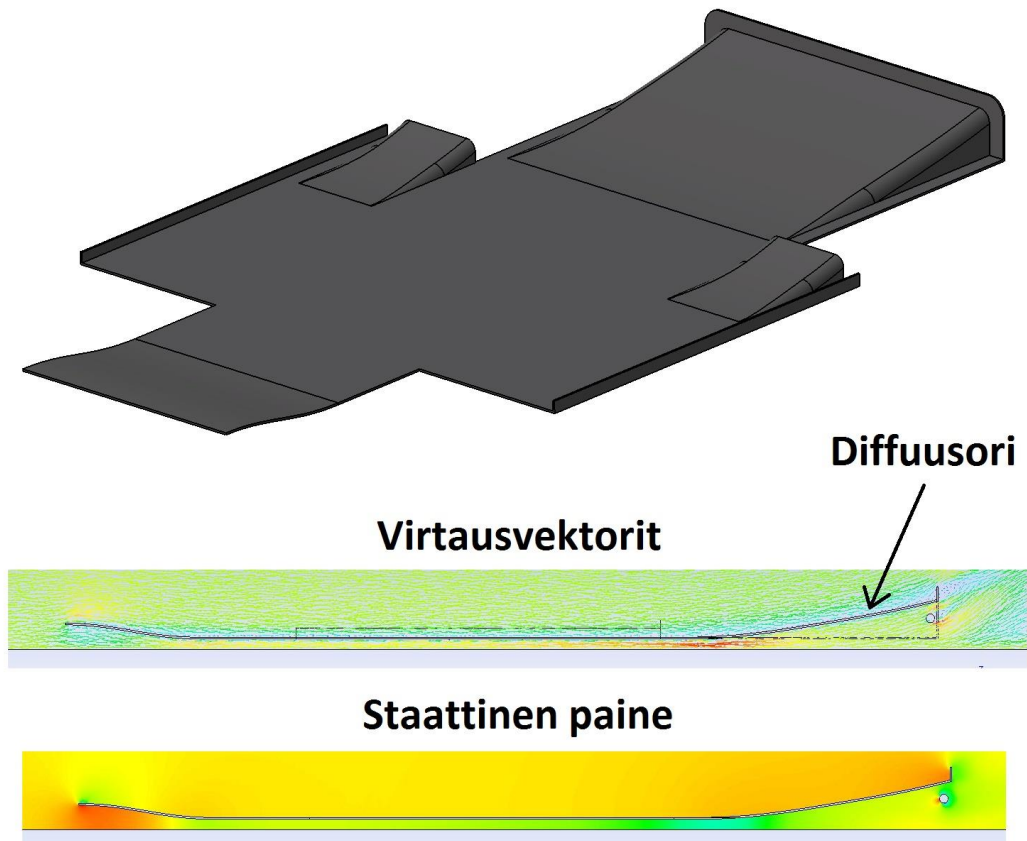
Pohjalevy on erittäin tehokas tapa tuottaa downforcea kilpa-autoissa. Se, minkälaisista pohjalevyistä voidaan käyttää missäkin tapauksessa, riippuu täysin auton geometriasta ja kyseisen kilpaluokan säännöistä, mutta toimintaperiaate pohjalevyillä on kuitenkin sama.

3.3.1 Toimintaperiaate

Pohjalevyn toiminta perustuu venturiputken toimintaperiaatteeseen sekä Bernoullin yhtälöön. Tässä tapauksessa auton pohjaa voidaan verrata venturiputken yläpuoleen ja maatasoa venturiputken alapuoleen. Ilman nopeus kiihtyy sen mennessä auton alle ja kiihtynyt ilmavirta aiheuttaa paineen alenemisen auton alla. Koska auton pohjan pinta-ala on suuri, voidaan pohjalevyn avulla saada aikaan merkittäviä voimia.

Jo pelkästään yksinkertainen, tasainen pohjalevy auttaa vähentämään ilmanvastusta ja tuottamaan downforcea, koska se poistaa auton pohjan epätasaisuuksista aiheutuvat pyörteilyt ja saa ilman virtaamaan nopeammin auton alitse. Itse pohjalevyn toimintaan vaikuttavat pohjalevyn muoto ja sen etäisyys maasta. Mikäli säännöt sallivat, pohjalevyn sivuille voidaan asentaa helmat, jotka toimivat samalla periaatteella kuin siiven päätylevyt tai foot platet eli estävät ilmaa virtaamasta matalan paineen alueelle ja saavat tällä tavoin pohjalevyn toimimaan paremmin.

Pohjalevyn etuosa pyritään muotoilemaan siten, että ilma kiihtyy kontrolloidusti auton alle, samalla tavoin kuten venturiputkessa. Pohjalevyn nousevaa takaosaa kutsutaan diffuusoriksi (kuva 20). Diffuusorin tehtävä on hidastaa auton alle kiihtynyt ilmavirta sekä ja alentunut paine takaisin ympärillä vallitsevaan ilman virtausnopeuteen ja paineeseen. Tämän pitää kuitenkin tapahtua kontrolloidusti ja siten, että ilmavirta pysyy kiinnittyneenä pohjalevyn ja diffuusorin pintaan. Jos diffuusorin kulma on liian jyrkkä, virtaus irtoaa ja pohjalevy ei toimi kuten pitäisi.



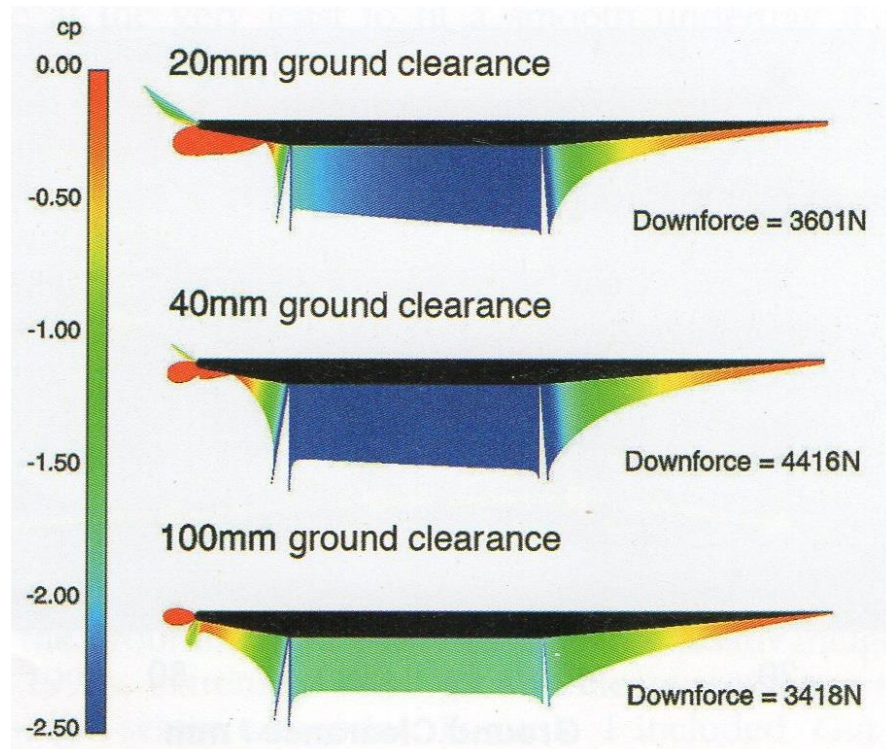
Kuva 20. HPF014E-kilpa-auton pohjalevyhahmotelma.

Mikäli pohjalevyn mitoittaminen on erityisen rajallista, eikä etuosan tai diffuusoriosan muotoilulle ole paljoa tilaa, niin yksi tehokas vaihtoehto downforcen kasvattamiselle on kasvattaa koko auton nyökkäyskulmaa (eng. pitch). Tällä tavoin koko auton pohja saadaan toimimaan ikään kuin diffuusorina ja tällä tavoin voidaan saavuttaa huomattava määrä downforcea. Downforcea ajatellen nyökkäyskulman kasvattaminen on lähestulkoon aina hyvä asia tiettyyn pisteeseen asti, mutta yleensä auton alustageometria rajoittaa nyökkäyskulman kasvattamista.

3.3.2 Mitoittaminen

Pohjalevyn mitoittaminen riippuu pitkälti auton muusta geometriasta sekä kilpaluokan asettamista rajoitteista. Lähtökohtaisesti pohjalevy pyritään saamaan niin lähelle maata kuin mahdollista, jotta ilman virtausnopeus saataisiin kasvatettua mahdollisimman suureksi auton alla ja vastaavasti staattinen paine mahdollisimman pieneksi. Tämän pitää tapahtua kuitenkin niin, että auton ja tien pinnan väli ei ala kuristamaan ilmavirtausta ja

saa siten aikaan virtauksen irtoamista pohjalevystä. Kuvasta 21 voidaan havaita, että 20 mm:n maavara on liian pieni kyseiselle kokoonpanolle. Tässä tapauksessa 20 mm:n etäisyys auton pohjan ja tien pinnan välillä on liian ahdas ilman massavirtaukselle ja pohjalevy ei toimi oikein.



Kuva 21. Ajokorkeuden vaikutus pohjalevyn toimivuuteen.

Pohjalevyn etuosan sekä diffusorin kulmat pyritään saamaan niin jyrkiksi kuin mahdollista. Tämän pitää tapahtua kuitenkin niin, että ilma pysyy vielä kiinnittyneenä pohjalevyn pintaan. Tällä tavoin voidaan saavuttaa mahdollisimman suuri matalan paineen alue auton alla ja suurin mahdollinen downforce. Pohjalevyn toimintaa voidaan tehostaa hyödyntämällä pakokaasujen virtauksia sekä takasiiven aiheuttamaan matalan paineen aluetta, mutta näihin sovelluksiin ei perehdytä tässä työssä enempää. Se, mikä on sopiva etuosan ja diffusoriosan pituus sekä kulma missäkin kokoonpanossa, selviää ainoastaan testaamalla, mutta lähtökohdiksi voidaan asettaa 5–20° geometrisista rajoitteista riippuen. [2, s. 140–155.]

Niin pohjalevyä kuin siipiäkin mitoitettaessa on otettava huomioon, että auton ajaessa radalla sen ajokorkeus ja kallistuskulmat muuttuvat jatkuvasti kiihdytyksien, jarrutuksien, kaarteiden ja aerodynaamisten voimien seurauksena. Tästä syystä lopullinen toimivuus

voidaan todeta vasta radalla, mutta tuulitunnelit, missä auto voidaan asettaa useaan eri kulmaan ja ajokorkeuteen, auttavat suunnittelussa huomattavasti.

4 Sopivan aerodynamiikkapaketin määrittäminen

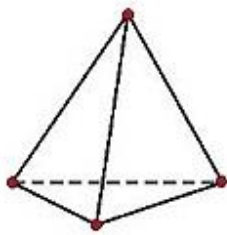
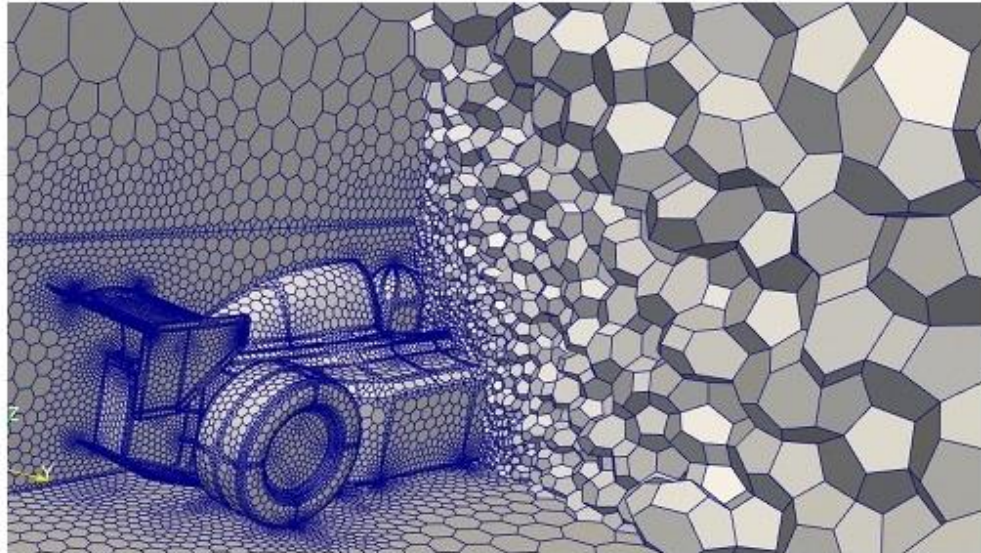
HPF014E-auton aerodynamiikkapaketin määrittämiseksi käytettiin CFD-simulointimenetelmää, joka tarkoittaa tietokoneavusteista virtauslaskentaa. Toinen vaihtoehto olisi ollut testata autoa tuulitunnelissa, mutta Suomessa ei tällaista mahdollisuutta ollut käytettävissä. Käytännössä testaaminen olisi pitänyt suorittaa ulkomailla ja lisäksi tuulitunnelin käyttökustannukset ovat hyvin korkeat. Lisäksi aerodynamiikkapaketin määrittämistä varten olisi pitänyt rakentaa autosta erillinen pienoismalli, johon testattavia osia olisi ollut helppo valmistaa ja vaihtaa.

CFD:tä käytetään nykyään enenevässä määrin aerodynamiikan kehittämiseen. Esimerkiksi monet F1-tiimit, kuten Red Bull, tekevät aerodynamiikkasuunnittelunsa nykyään pääosin CFD:n avulla [12]. Tästä voidaan päätellä, että tarpeeksi pitkälle vietyä myös CFD:llä on mahdollista saada luotettavia ja hyviä tuloksia. Tuulitunneleihin ei perehdytä tässä työssä sen enempää, mutta tässä osiossa käydään lyhyesti läpi CFD:n periaatteet ja kuinka lopulliset geometriat saatiin määritettyä sen avulla.

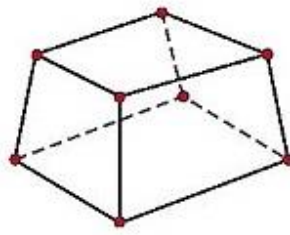
4.1 CFD:n toimintaperiaate

CFD-simulointia varten on ensin luotava simuloitava 3D-geometria CAD (Computer-Aided Design) -mallinnusohjelman avulla. Tämän jälkeen luotu geometria tuodaan CFD-simulointiohjelmaan, missä sille määritetään ns. reunaehdot. Reunaehdoilla voidaan määrittää, mitkä osat mallista ovat kiinteitä ja mitkä ovat liikkuvia, kuinka neste virtaa ja millä nopeudella, nesteen ominaisuudet ja turbulenssimallit jne.

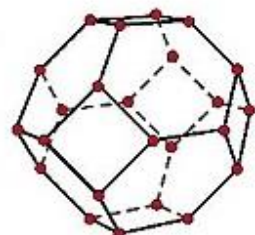
Kun reunaehdot on määritetty, malli "verkotetaan", mikä tarkoittaa, että koko simuloitavan mallin tilavuus täytetään kolmiulotteisella verkolla. Verkko koostuu ns. hiloista, jotka voivat olla eri muotoisia. Yksinkertainen hilamuoto on perinteinen kuusikulmainen hila (hexahedral), mutta käytännössä esimerkiksi autoja simuloitaessa käytetään pääosin nelikulmaisia (tetrahedral) tai monikulmaisia (polyhedral) hilamuotoja (kuva 22).



tetrahedral



hexahedral



polyhedral

Kuva 22. Esimerkki verkotetusta geometriasta ja erilaisista hilamuodoista [13].

Verkotettu malli viedään sen jälkeen *ratkaisijaan*, missä varsinainen laskenta suoritetaan. Käytännössä ratkaisija tekee toistuvia laskentoja, yrittäen löytää massan-, liikemäärän-, ja energian säilymislakiin perustuvan tasapainon hilojen välille. Kun ratkaisu on saavutettu, malli viedä ns. jälkikäsitteijään, missä saavutettuja tuloksia voidaan tarkastella ja visualisoida.

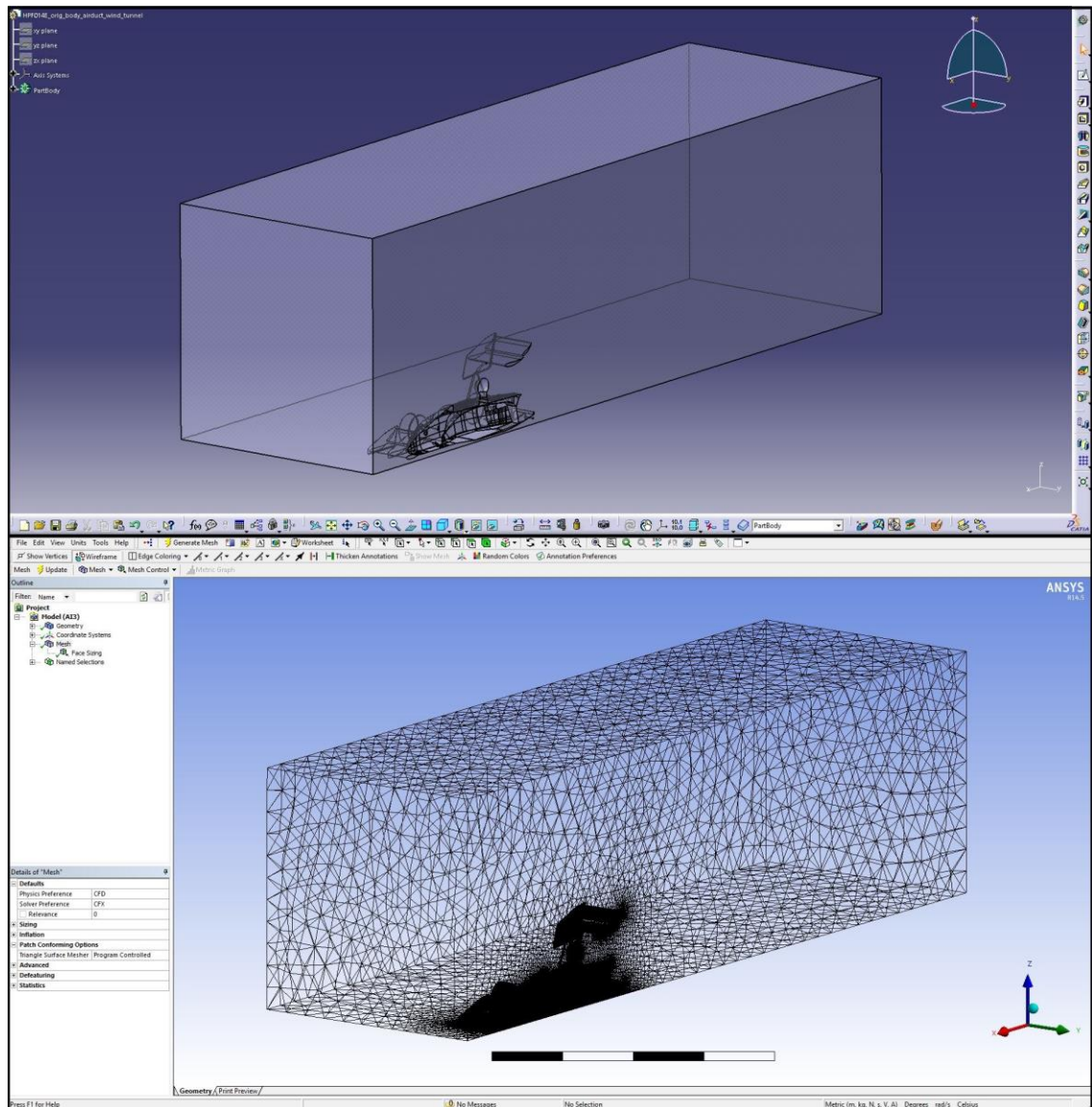
Simuloinnin tarkkuus riippuu verkon tiheydestä ja hilan muodosta. Mitä tiheämpi hila, sitä tarkempi malli, mutta myös laskenta aika kasvaa huomattavasti, kun verkkoa tihennetään. Kokonaisen auton simulointimallin hilamäärä saattaa olla esim. 100 milj., ja tällaisen mallin ratkaisemiseen menee tehokkaammillakin tietokoneilla useita tunteja.

4.2 CFD-mallin rakentaminen

Simulointeja varten hankittiin Ansys 14.5 -ohjelmisto, joka on laajalti käytössä autoteollisuudessa sekä moottoriurheilussa. Ansys on käyttäjäystävällinen ohjelmisto, johon on saatavilla hyvin ohjeita, joten ohjelman opiskelu on suhteellisen helppoa. CSC Finland tarjoaa ilmaista opiskelija- ja tutkimuslisenssiä kyseiseen ohjelmistoon ja lisenssi hankittiin heidän kauttaan. CSC Finland on suomalainen, IT-palveluita tarjoava yritys ja siltä saatiin myös tekninen tuki sekä mahdollisuus laskentapalvelimen etäkäyttöön. Ohjelmiston käyttö opiskeltiin aluksi yksinkertaisten mallien ja ohjeiden avulla, minkä jälkeen siirryttiin aluksi hiukan haastavampiin malleihin ja loppujen lopuksi varsinaisiin tutkittaviin malleihin.

3D-mallin rakentamiseen käytettiin Catia V5R20 -ohjelmistoa. Catia on yksi autoteollisuuden suosituimmista mallinnusohjelmista ja on käytössä myös Metropolia Ammattikorkeakoulussa. Ohjelmisto oli siis entuudestaan tuttu, joten se oli luonnollinen valinta 3D-geometrian luomiseen.

CFD ja 3D-mallinnus kulkivat projektin edetessä rinnakkain. Simuloitavat geometriat mallinnettiin aluksi Catialla, minkä jälkeen mallit siirrettiin Ansyskseen, jossa varsinainen simulointi suoritettiin (kuva 23).



Kuva 23. Ylhäällä HPF014E 3D-geometria Catiassa ja alhaalla malli verkotettuna Ansyskessä.

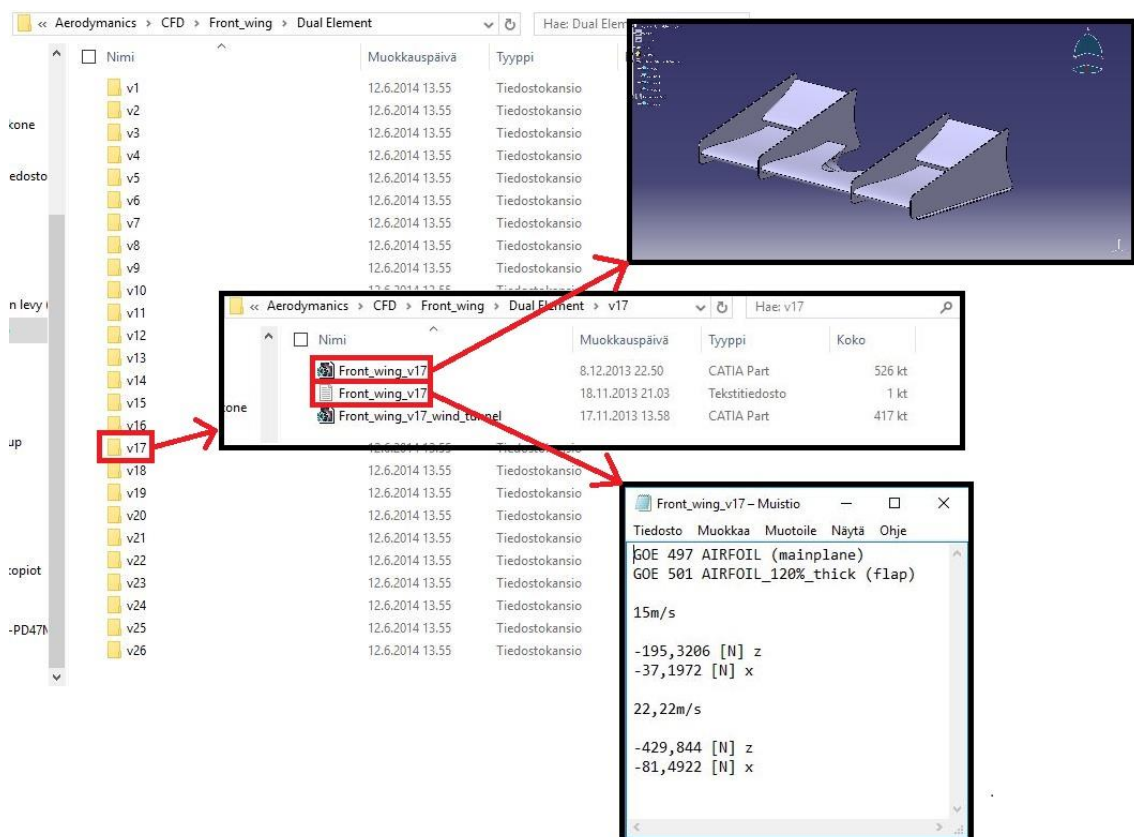
Lähestymistapa aerodynamiikkapaketin määrittämiseen oli hakea ensin parhaat vaihtoehdot siivistä sekä pohjalevystä yksittäisinä simuloimalleina, ilman koko auton geometriaa. Tämän jälkeen siivistä sekä pohjalevystä valittiin parhaat vaihtoehdot, joita testattiin yhdessä koko auton 3D-mallin kanssa. Erilaisia siipivaihtoehtoja simuloitiin yhteensä 49 kpl, pohjalevyyvaihtoehtoja 39 kpl ja näiden eri yhdistelmiä koko auton mallin kanssa simuloitiin yhteensä 18 kpl.

Simuloinnit suoritettiin kaikille malleille kahdella eri nopeudella; 15 m/s sekä 22 m/s. 15 m/s on arvioitu keskinopeus Formula Student -kilpailuiden dynaamisissa osioissa. Tie-tyillä radoilla keskinopeus on korkeampi, joten toiseksi simuloitinopeudeksi otettiin 22

m/s. Muut reunaehdot, kuten turbulenssimalli ja ilman muut ominaisuudet otettiin suoraan Ansysksen omista ohjeista, jossa oli simuloitu vastaavia tapauksia. Myös mallin verkottamiseen käytettiin näissä ohjeissa olleita suosituksia. Kaikissa simuloinneissa maa-asetettiin liikkumaan samaa nopeutta ilman virtauksen kanssa, mikä vastaa oikeaa ajotilannetta paljon tarkemmin ja tekee tuloksista huomattavasti realistisempia.

Kaikki simuloinnit on suoritettu siten, että auto kulkee kohtisuoraan ajosuuntaa kohden, jolloin simuloinnit voitiin suorittaa ainoastaan toiselle puolelle autoa ja määrittää poikkeileikkaustaso ns. symmetriatasoksi. Tällä menetelmällä verkottamis- ja laskenta-aika voitiin käytännössä puolittaa, mikä nopeutti projektin etenemistä huomattavasti.

Kaikki siipi- ja pohjalevyvaihtoehdot kansioitiin tarkasti ja jokaiseen kansioon sisällytettiin kyseisen simuloinnin 3D-geometria sekä tekstitiedosto, mikä kertoi, mitä siipiprofiilia mallissa on käytetty, tai jos kyseisessä mallissa oli jotain muuta huomioitavaa. Lisäksi tekstitiedostoon merkittiin simuloinneista saadut tulokset. (Kuva 24.)



Kuva 24. Simulointimallien kansiointi.

Kaikki simuloinneista saatu data koottiin yhteen Excel-tiedostoon, jonka avulla tuloksia oli helppo vertailla keskenään (kuva 25).

Dual element wing forces & efficiency												
15m/s						22m/s						
		Lift [N]	Drag [N]	Cl/Cd		Lift [N]	Drag [N]	Cl/Cd				
v1		199,07	56,57	3,52	v1	443,63	122,79	3,61				
v2		182,54	47,93	3,81	v2	398,80	104,35	3,82				
v3		183,87	47,79	3,85	v3	406,11	104,36	3,89				
v4		175,22	43,30	4,05	v4	400,63	97,07	4,13				
v5 (1)		186,22	48,97	3,80	v5 (1)	409,79	119,84	3,42				
v5 (2)		189,57	41,50	4,57	v5 (2)	416,98	90,93	4,59				
v5 (3)		198,00	41,70	4,75	v5 (3)	435,50	91,46	4,76				
v5 (4)		196,73	41,00	4,80	v5 (4)	432,73	89,73	4,82				
v6 (1)		207,00	52,00	3,98	v6 (1)	455,21	113,92	4,00				
v6 (2)		190,40	46,80	4,07	v6 (2)	418,86	102,58	4,08				
v6 (3)		185,40	43,10	4,30	v6 (3)	407,61	94,48	4,31				
v7		183,40	37,60	4,88	v7	403,38	82,42	4,89				
v7 (2)		185,38	38,83	4,77	v7 (2)	409,41	85,14	4,81				
v8		192,02	41,50	4,63	v8	422,25	90,90	4,65				

Kuva 25. Excel-tiedosto tuloksien vertailua varten.

Työn alkaessa käytössä oli rajallinen laskentakapasiteetti ja tästä syystä siipi- ja pohjalevyvaihtoehdot simuloitiin erikseen, eikä koko auton geometrian kanssa, mikä olisi ollut tulosten kannalta realistisempaa. Tällä tavoin säästettiin kuitenkin paljon laskenta-aikaa ja tulokset olivat hyvin suuntaa-antavia. Projektin edetessä CSC Finland tarjosi etäkäyttömahdollisuuden laskentapalvelimeen, missä simuloiteja voitiin suorittaa 64 ytimellä. Tämä nopeutti laskenta-aikaa huomattavasti ja erilaisia siipi- ja pohjalevyvaihtoehtoja voitiin simuloida yhdessä koko auton kanssa.

4.2.1 Siivet

Formula Studentin säännöt rajoittavat siipien suunnittelua lähinnä siipien sijainnin suhteen. Etusiiven etäisyys pituussuunnassa eturenkaan etureunasta sai olla maksimissaan 762 mm ja takasiiven sekä pohjalevyn etäisyys takarenkaan takareunasta maksimissaan 305 mm. Takasiiven korkeuden rajoitti TSAL (Tractive System Active Light)

-valonnäkyvyssäntö, joka määräsi, että kyseisen valon pitää näkyä 1,6 m:n korkeudelta ja 3 m:n säteellä valosta. Sekä siipien että pohjalevyn leveys oli rajoitettu samalle tasolle renkaiden leveyden kanssa. Siipien profiili ja rakenne olivat kuitenkin vapaat, eli suunnittelu oli kokonaisuudessaan suhteellisen vapaata.

Suunnittelun lähtökohdaksi otettiin *Competition Car Aerodynamics* -kirjassa suositellut siipiprofiilit sekä tässä työssä aiemmin mainitut suositukset siipien suunnitteluun. Internetistä löytyi työkalu nimeltä *NACA 4 digit airfoil generator*, mikä on suuri tietokanta eri siipiprofiileille, ja suositellut profiilit löytyivät helposti tästä tietokannasta. NACA-työkalun avulla pystyi myös säätämään siipiprofiilien kaarevuutta, pituutta, paksuutta jne. (kuva 26)

Airfoil Tools You have 0 airfoils loaded. Your Reynold number range is 50,000 to 1,000,000. (info)

Search 1629 airfoils

Applications

- Airfoil database search
- My airfoils
- Airfoil plotter
- Airfoil comparison
- Reynolds number calc
- NACA 4 digit generator
- NACA 5 digit generator

Information

- Airfoil data
- Lift/drag polars
- Generated airfoil shapes

Searches

- Symmetrical airfoils
- NACA 4 digit airfoils
- NACA 5 digit airfoils
- NACA 6 series airfoils

Airfoils A to Z

- A a18 to avistar (88)
- B b29root to bw3 (22)
- C c141a to curtisc72 (40)
- D dae11 to du861372 (28)
- E e1098 to esa40 (209)
- F falcon to fxs21158 (121)
- G geminism to gu255118 (419)
- H hh02 to ht23 (63)
- I isa571 to isa962 (4)
- J j5012 to joukowsk0021 (7)
- K k11 to kenmar (11)
- L l1003 to lwk80150k25 (24)
- M m1 to mue139 (95)
- N n0009sm to nplx (174)
- O oa206 to oaf139 (9)
- P p51droot to pt40 (9)
- R r1046 to rhodesg36 (63)
- S s1010 to supermarine37iii (174)
- T tempest1 to tsagi8 (8)
- U ua2 to usnp4 (36)
- V v13006 to vr9 (17)
- W waspsm to whitcomb (4)
- Y ys900 to ysg30 (3)

NACA 4 digit airfoil generator (NACA 9312 AIRFOIL)

Siipiprofiili

Max Camber (%) First digit. 0 to 9.5%

Max camber position (%) Second digit. 0 to 90%

Thickness (%) Third & fourth digit. 1 to 40%

Number of points 20 to 200

Cosine spacing Cosine or linear spacing

Close Trailing edge Open or closed TE

[Send to airfoil plotter](#) [Add to comparison](#) [Add to My airfoils](#)

Dat file

```
NACA 9312 Airfoil M=9.0% P=30.0% T=12.0%
1.000314 0.001220
0.976646 0.010689
0.907525 0.036464
0.798696 0.071670
0.659792 0.107491
0.503879 0.135451
0.346487 0.149186
0.195456 0.137907
```

Säätömahdollisuudet

NACA 0006	NACA 0008
NACA 0009	NACA 0010
NACA 0012	NACA 0015
NACA 0018	NACA 0021
NACA 0024	NACA 1408
NACA 1410	NACA 1412
NACA 2408	NACA 2410
NACA 2411	NACA 2412
NACA 2414	NACA 2415
NACA 2418	NACA 2421
NACA 2424	NACA 4412
NACA 4415	NACA 4418
NACA 4421	NACA 4424
NACA 6409	NACA 6412

Koordinaattitiedot

Kuva 26. NACA 4 digit airfoil generator.

Valittuihin siipiprofiileihin kokeiltiin muutamia erilaisia suosituksia siipiprofiilin muokkamiseen, kuten jyrkempää kaarevuutta ja paksumpaa profiilia. NACA-työkalun avulla pystyi myös hakemaan profiileja, jotka muistuttivat geometrialtaan lähtökohdaksi valittuja profiileja, joten simuloiteihin otettiin mukaan muutama vaihtoehtoinen siipiprofiili. Kun sopiva siipiprofiili oli määritetty NACA-työkalulla, sai kyseisestä profiilista ulos Excel-tiedoston, joka sisälsi siipiprofiilin koordinaattipisteet.

Catian asennuskansioista löytyi Excel-tiedosto, jossa oli valmis makro koordinaattipisteiden siirtämiseksi Catiaan. NACA-työkalusta saadut koordinaatit oli helppo kopioida suoraan tähän tiedostoon ja ajaa makro läpi, jolloin pistepilvi sekä siipiprofiili ilmaantuivat suoraan Catiaan (kuva 27).

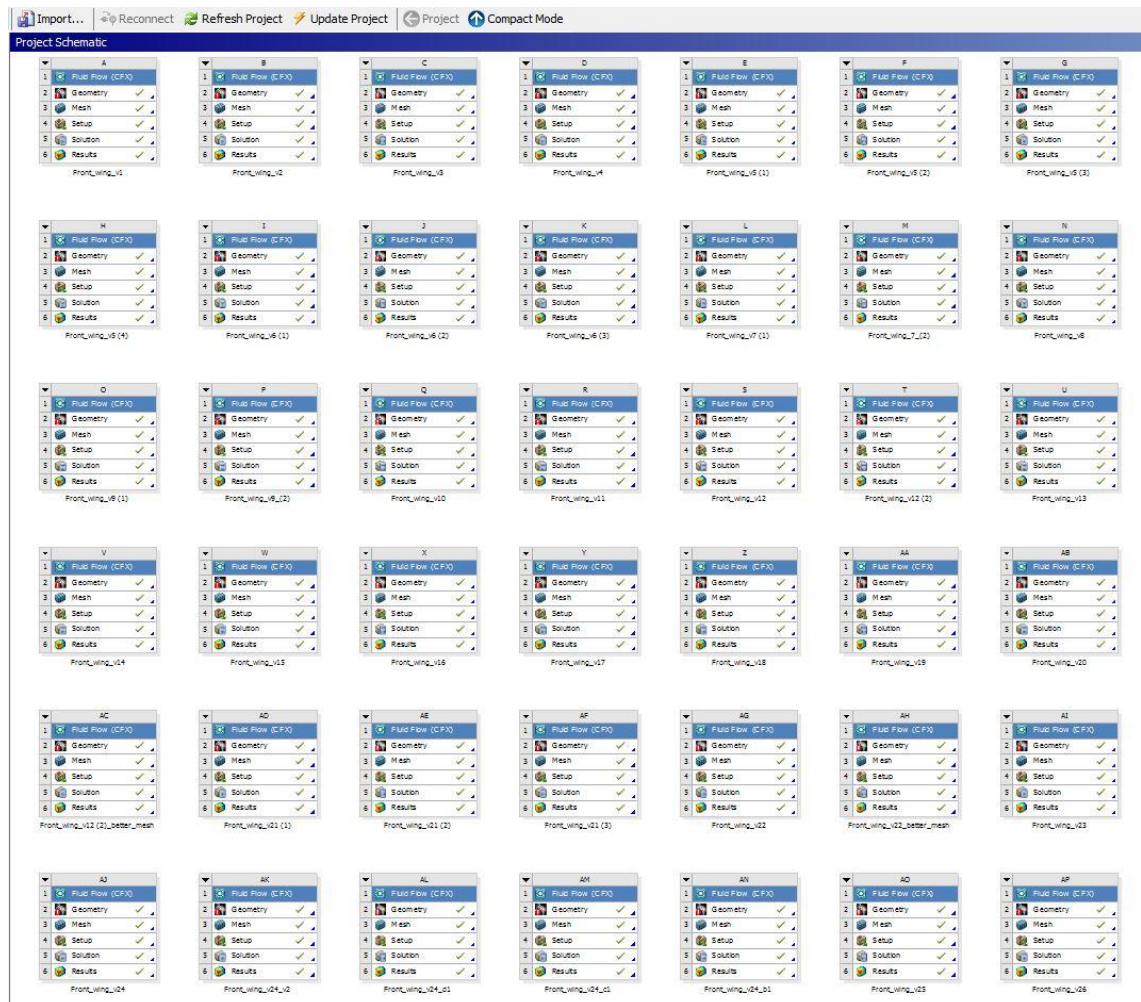
The image shows the process of importing airfoil coordinates into Catia. It consists of three main parts:

- Excel Spreadsheet:** A table with columns A, B, and C. Column A contains x-coordinates, B contains y-coordinates, and C contains a constant value of 0. The data points are:

Row	A	B	C
1	StartLoft		
2	StartCurve		
3	-551,363866	0	51,362017
4	-524,433795	0	41,943772
5	-497,544402	0	32,088846
6	-443,581124	0	14,359494
7	-389,412397	0	-1,164403
8	-335,058768	0	-14,70339
9	-280,376422	0	-24,713649
10	-225,488627	0	-32,518452
11	-170,292661	0	-37,015071
12	-114,603619	0	-36,218598
13	-66,543172	0	-33,502427
14	-58,380412	0	-29,68794
15	-44,155013	0	-26,234672
16	-29,847845	0	-21,903633
17	-15,396453	0	-16,024364
18	-8,016671	0	-11,430638
19	0	0	0
20	-6,290907	0	7,095188
21	-12,951621	0	10,220556
22	-26,560265	0	13,388065
23	-40,296998	0	15,183781
24	-54,045457	0	16,84717
25	-81,715142	0	18,325776
26	-109,446872	0	19,138334
27	-165,03319	0	19,444589
28	-220,660597	0	19,309752
29	-276,164736	0	20,498188
30	-331,586696	0	22,568807
31	-386,823752	0	26,624336
32	-441,85536	0	32,88532
33	-496,702065	0	41,131214
34	-524,063577	0	45,918003
35	-551,363866	0	51,362017
36	EndCurve		
37	EndLoft		
38	End		
39			
- Macro Dialog Box:** A window titled 'Makro' showing a list of macros. The selected macro is 'Makro' from the source 'GOE 501 AIRFOIL.xls'. A red arrow points from this dialog to the Catia window.
- Catia Software Window:** A screenshot of the Catia interface showing a 3D model of an airfoil profile. A text box at the bottom of the window reads 'Koordinaattipisteet ja siipiprofiili Catiaassa'.

Kuva 27. Siipiprofiilin tuominen Catiaan.

Catiaan luotiin kokoonpanotiedosto, mihin edellä esitellyn makron avulla saatu siipiprofiili päivitettiin. Kokoonpanotiedosto luotiin siten, että profiiliin päivittämisen jälkeen uusi siipiprofiili päivittyi automaattisesti CFD-geometriaan. Ansykseen luotiin oma projekti-tiedosto, mihin kaikki simuloitavat mallit kerättiin. Reunaehdot täytyi määrittää vain ensimmäiseen tapaukseen, minkä jälkeen tapauksen pystyi kopioida, nimetä uudelleen ja liittää siihen uuden, päivitetyn geometrian (kuva 28). Mikäli geometria ei muuttunut paljoa tapausten välillä, esimerkiksi jos ainoastaan siiven kohtauskulma muuttui, niin uuden geometrian pystyi verkottamaan ja simuloimaan suoraan. Mikäli geometria muuttui enemmän, täytyi joitain pintoja nimetä uudelleen, mutta tämä oli suhteellisen pieni työ. Parhaimmillaan uuden siipiprofiilin vieminen NACA-työkalusta simulointivalmiuteen Ansykseen vei ainoastaan 5–10 minuuttia.



Kuva 28. Ansyksen projektitiedosto etusiiven simulaatioille.

Siipien kohdalla testattiin useita eri profiileja sekä yksi-, kaksi-, että kolme-elementtisinä vaihtoehtoina. Eri kokoisia ja muotoisia päätylevyvaihtoehtoja, erilaisia Gurney flap vaihtoehtoja sekä eri kohtauskulmia testattiin myös useita. Kaiken kaikkiaan erilaisia etusiipivariaatioita simuloitiin yhteensä 32 kpl. Sopivan siipivaihtoehdon hakemisessa käytettiin luvuissa 3.2.3 sekä 3.2.4 esiteltyjä suosituksia.

Kustannussyistä takasiivessä päädyttiin käyttämään samaa siipiprofiilia etusiiven kanssa. Tästä syystä etusiiven parhaat siipiprofiilivaihtoehdot otettiin simuloitavaksi myös takasiipiin. Näiden profiilien kanssa simuloitiin erilaisia päätylevyjen, Gurney flapien sekä siiven kohtauskulmien yhdistelmiä. Takasiipisimulointeja tehtiin yhteensä 17 kpl.

4.2.2 Pohjalevy

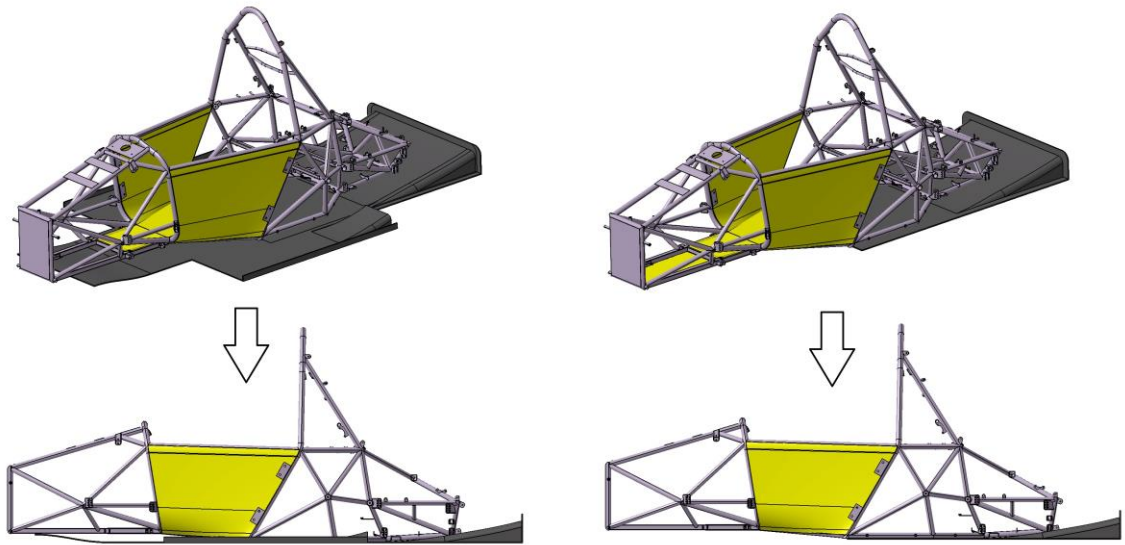
Myös pohjalevyt päädyttiin simuloimaan aluksi erillään autosta, vaikka auton geometrialla onkin suuri vaikutus pohjalevyn toimintaan. Etenkin etusiivellä on suuri vaikutus pohjalevyn toimintaan. Simuloinnit suoritettiin käytännössä samalla tavalla kuin etusiipien simuloinnit, mutta pohjalevyjen tapauksessa geometria piti muuttaa manuaalisesti jokaiseen tapaukseen. Myös pohjalevyille luotiin kokoonpanotiedosto Catiaan, mihin pohjalevygeometria oli helppo päivittää, ja mikä päivitti automaattisesti myös CFD-geometrian simuloitavalle mallille.

Siipien tapaan myös pohjalevyille luotiin projekti-tiedosto Ansyskseen, jossa reunaehdot täytyi määrittää vain ensimmäiseen tapaukseen. Tämän jälkeen tapaus kopioitiin, nimettiin uudelleen, päivitettiin uusi geometria sekä verkotettiin ja lopuksi ajettiin simulointi läpi.

Auton geometria asetti omat rajoitteensa pohjalevyn suunnittelulle. Erilaisia pohjalevyvaihtoehtoja simuloitiin yhteensä 39 kpl ja näiden suunnittelussa käytettiin luvussa 3.3.2 esiteltyjä suosituksia.

Lopullinen pohjalevygeometria haettiin koko auton mallin kanssa. Simulointien mukaan koko auton pohjan kattavan pohjalevyn vaikutus verrattuna pelkästään osan auton pohjasta kattavaan pohjalevyyn oli sen verran pieni, että painonsäästösyistä lopullisesta

pohjalevystä päädyttiin tekemään pienempi versio. Tämä sisälsi käytännössä ainoastaan diffuusoriosan, ja tässä versiossa auton rakenteellinen pohja toimi itsessään pohjalevyn etuosana, kiihdyttäen ilman auton alle (kuva 29).



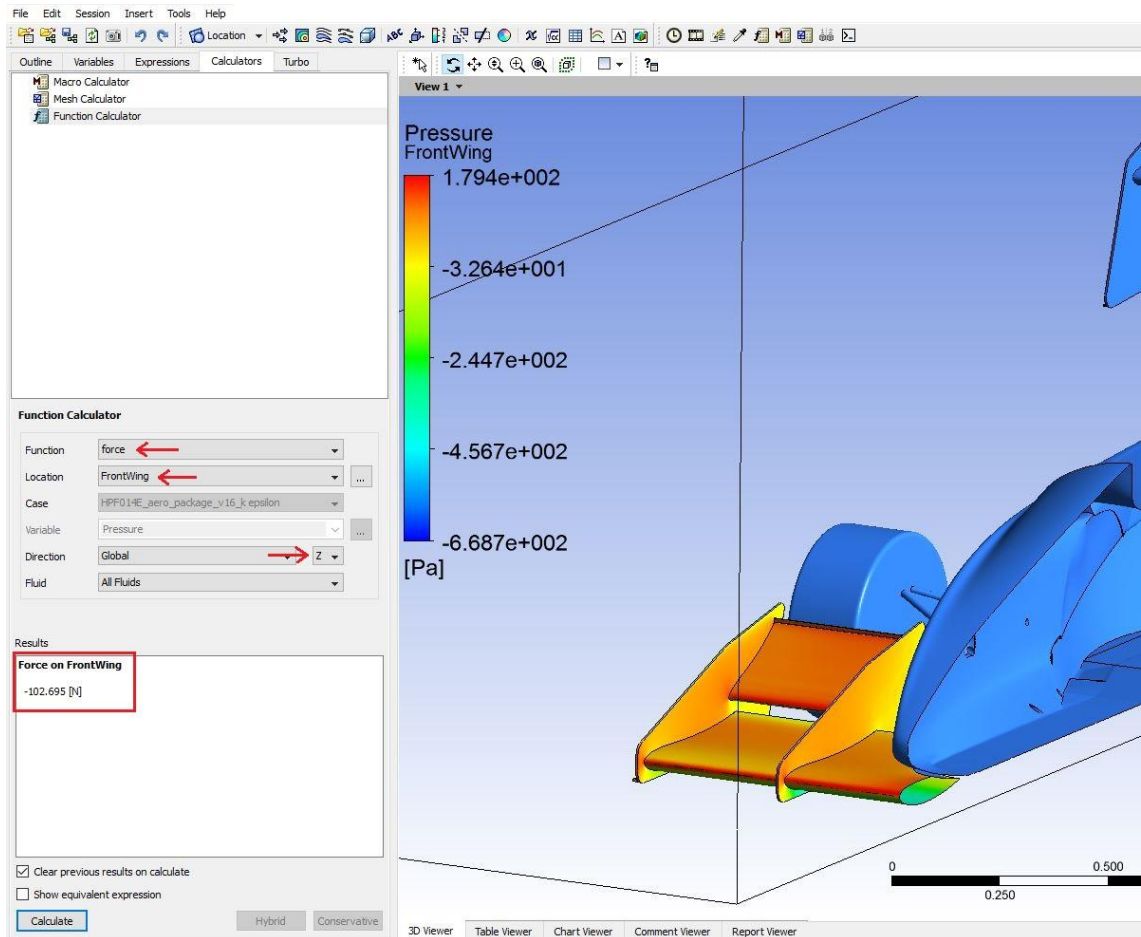
Kuva 29. HPF014E-auton pohjalevygeometria.

4.2.3 Lopullisen aerodynamiikkapaketin määrittäminen

Kun riittävä määrä, toisin sanoen aikataulun sallima määrä, eri siipi- ja pohjalevyvaihtoehtoja oli simuloitu, valittiin näistä parhaat vaihtoehdot simuloitavaksi koko auton mallin kanssa. Tässä vaiheessa käyttöön saatiin CSC Finlandin tarjoama etäkäyttö laskenta-palvelimeen, joten simuloinnit olivat huomattavasti nopeampia suorittaa. Periaate simulointien etenemisessä oli edelleen sama kuin siipi- sekä pohjalevyysimulointien kanssa, eli koko auton mallia varten luotiin oma, päivittyvä kokoonpanotiedosto Catiaan sekä projekti-tiedosto Ansykseen. Koko auton simulointeja eri siipi- pohjalevy-yhdistelmillä simuloitiin yhteensä 18 kpl.

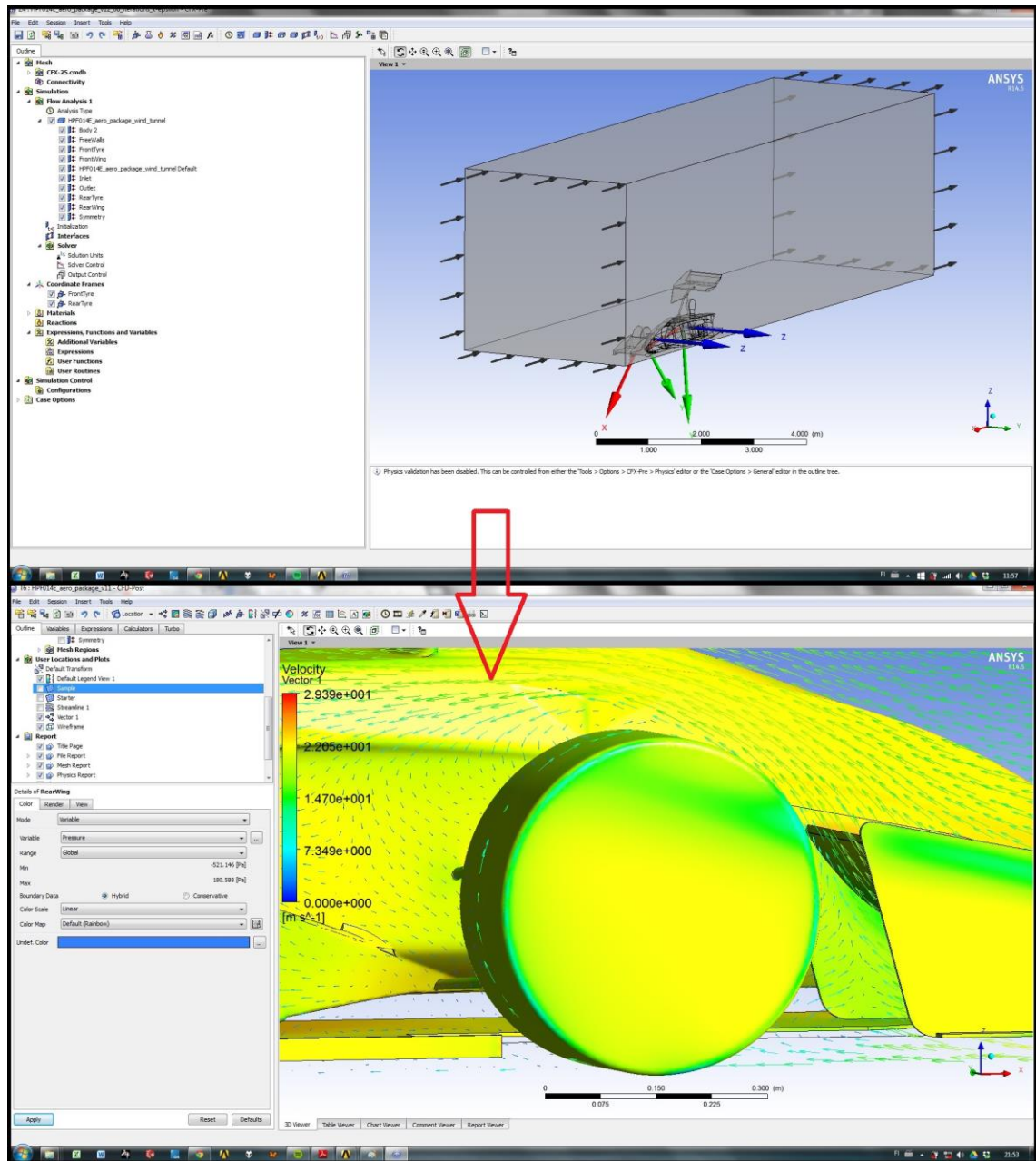
Siipien, auton korin sekä renkaiden pinnat voitiin eritellä jo mallinnusvaiheessa toisistaan, minkä ansiosta näistä kustakin saatiin määritettyä simulointivaiheessa voimat erikseen, yksittäisinä osina. (kuva 30) Menetelmän toimivuus testattiin tekemällä yksi simulointi, missä kaikki auton pinnat olivat nimetty yhdeksi, yhtenäiseksi pinnaksi, ja tästä pinnasta otettiin x-, y- ja z -suuntaiset voimat. Tämän jälkeen sama malli simuloitiin siten,

että osien pinnat oli nimetty erikseen, minkä jälkeen kaikkien pintojen x-, y- ja z-suuntaiset voimat laskettiin yhteen. Molemmissa menetelmissä päädyttiin samaan tulokseen, joten tätä menetelmää voitiin pitää luotettavana.



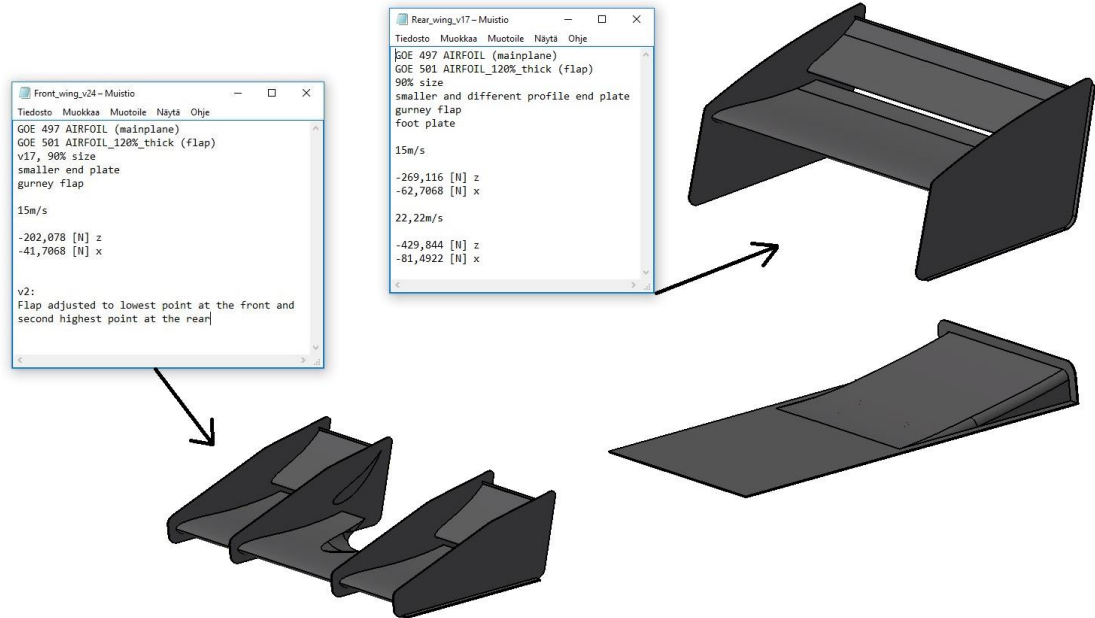
Kuva 30. Ansyksellä määritetty etusiiven tuottama voima.

Koko auton simuloineissa maaston liikkumisen lisäksi myös renkaat asetettiin pyörimään vastaavaa nopeutta, mikä teki simuloineista vieläkin realistisempia (kuva 31).



Kuva 31. Renkaiden pyörimisliike simulointimallissa.

Lopullinen aerodynamiikkapaketti päädyttiin tekemään simulointien mukaan parhaasta siipi- pohjalevy-yhdistelmästä. Lopulliseksi etusiiveksi valittiin simulointimalli nro 24, ta-
kasiiveksi simulointimalli nro 17 ja pohjalevyksi simulointimalli nro 39. Siipien päaele-
mentin profiilina päädyttiin käyttämään GOE 407 -nimistä profiilia ja 2. elementin profii-
liksi valittiin GOE 501 -profiili 20 % oletusta paksumpana (kuva 32).



Kuva 32. Lopulliset siipi- ja pohjalevygeometriat

Simulointien mukaan etusiipi tuotti downforcea 202 N ja takasiipi 290 N 15 m/s nopeudella, kun ne simuloitiin erillään koko auton geometriasta. Lopullinen pohjalevygeometria viimeisteltiin koko auton mallin kanssa, joten kyseisestä pohjalevystä ei ole yksittäin mitattua voimaa, mutta se ei ollut kokonaisuuden kannalta merkittävä tieto. Koko auton mallissa etusiipi tuotti downforcea 200 N ja takasiipi 282 N, joten voimat vastasivat suhteellisen hyvin yksittäin simuloituja malleja. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että sekä etu-, että takasiipi ovat suhteellisen vapaassa virtauksessa myös koko auton mallissa, eivätkä hirveästi eroa yksittäisistä simuloinneista.

Koko auton geometria, sisältäen siivet, pohjalevyn ja ajonopeuden mukaan pyörivät renkaat ja maatasen, tuotti kaikkiaan 470 N downforcea ja 205 N ilmanvastusta 15 m/s nopeudella. 22 m/s nopeudella auto tuotti simulointien mukaan 2182 N downforcea ja 927 N ilmanvastusta (kuva 33).

The image shows a text editor window titled "HPF014E_aero_package_v16_k-epsilon_final ...". The window contains the following text:

```

HPF014E_aero_package_v16_k-epsilon

Underbody v39
Dual Element Front Wing v24
Rear wing v17

15m/s

Body&Underbody z = -2,24504 x = -62,376
Front tyre z = 8,03298 x = -7,71724
Rear tyre z = 7,5267 x = -19,07284
Front wing z = -200,544 x = -34,6492
Rear wing z = -282,806 x = -81,2466

Total z = -470,03536 x = -205,06188

22m/s

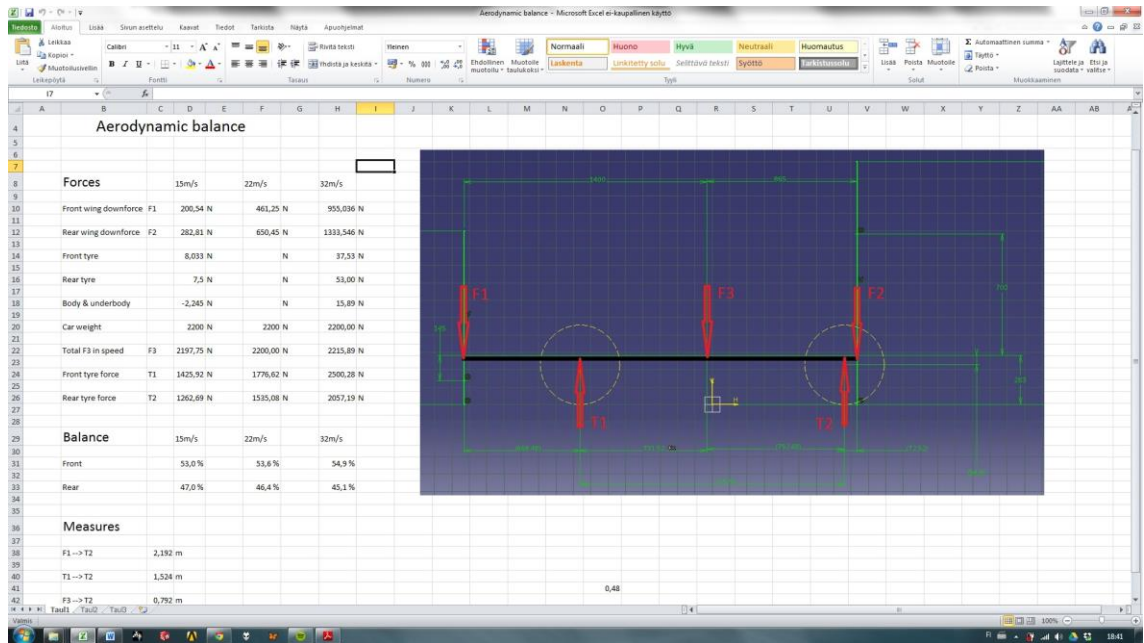
Body&Underbody z = 15,88614 x = -276,712
Front tyre z = 37,5272 x = -37,11
Rear tyre z = 53,0002 x = -82,5985
Front wing z = -955,036 x = -157,6974
Rear wing z = -1333,546 x = -373,312

Total z = -2182,18846 x = -927,4299

```

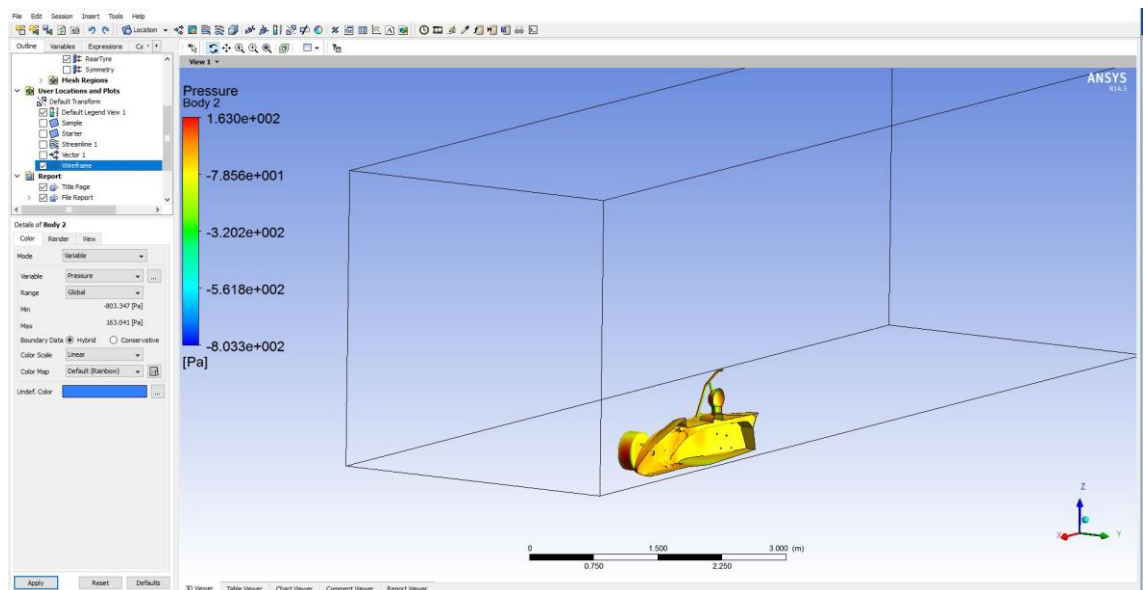
Kuva 33. CFD:stä saadut voimat koko autolle aerodynamiikkapaketin kanssa.

Saatujen tulosten perusteella laskettiin myös auton teoreettinen pyöränkuorman jakauma suoraan ajettaessa, aerodynaamiset voimat huomioon ottaen. Kun auton painopiste, pyörien kosketuskohdat tien pintaan sekä etu- ja takasiiven voimien vaikutusetasyydet tiedettiin, voitiin yksinkertaisen vapaakappalekuvan perusteella laskea auton pyöriin vaikuttavat kuormat (kuva 34). Pyöräkuorman jakaumaksi nopeudella 15 m/s saatiin 53 % eteen ja 47 % taakse.

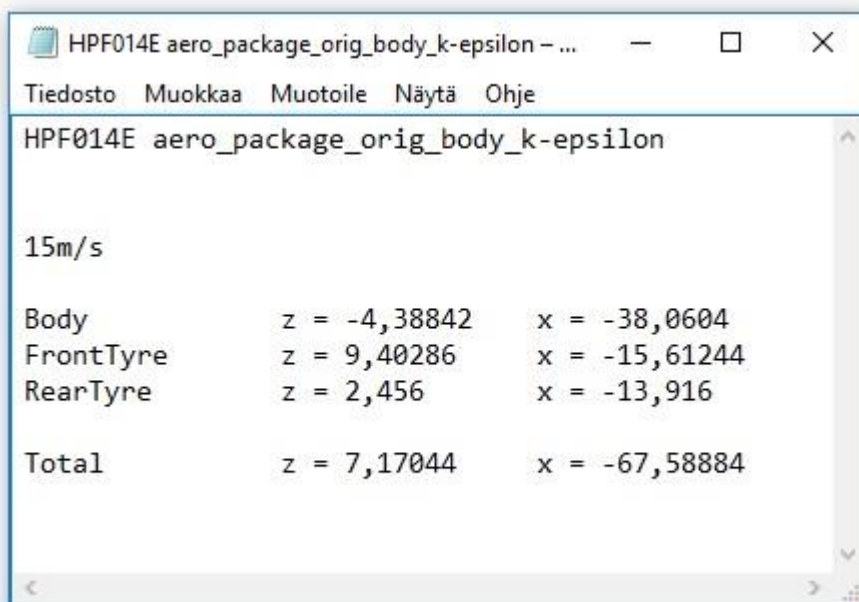


Kuva 34. Painojakauman laskeminen.

Aerodynamiikkapaketin vertailukohdaksi suoritettiin yksi simulointi ilman siipiä ja pohja-levyä (kuva 35). Kuvasta 36 voidaan havaita, että vaikka simuloinnit eivät välttämättä vastaa täysin todellisuutta, on aerodynamiikkapaketista varmasti hyötyä auton suorituskykyä ajatellen.



Kuva 35. Koko auton simulointi ilman aerodynamiikkapakettia.



Kuva 36. HPF014E-auton simuloinneista saadut voima ilman aerodynamiikkapakettia.

Edellä esitettyihin tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska vähäinen kokemus simuloinneista ja tiukka aikataulu eivät mahdollistaneet tarkan simulointimallin tekemistä. Tästä syystä voimat eivät välttämättä vastaa todellisuutta, mutta ovat keskenään vertailukelpoisia ja täten itse kehitystyötä ajatellen riittävän tarkkoja.

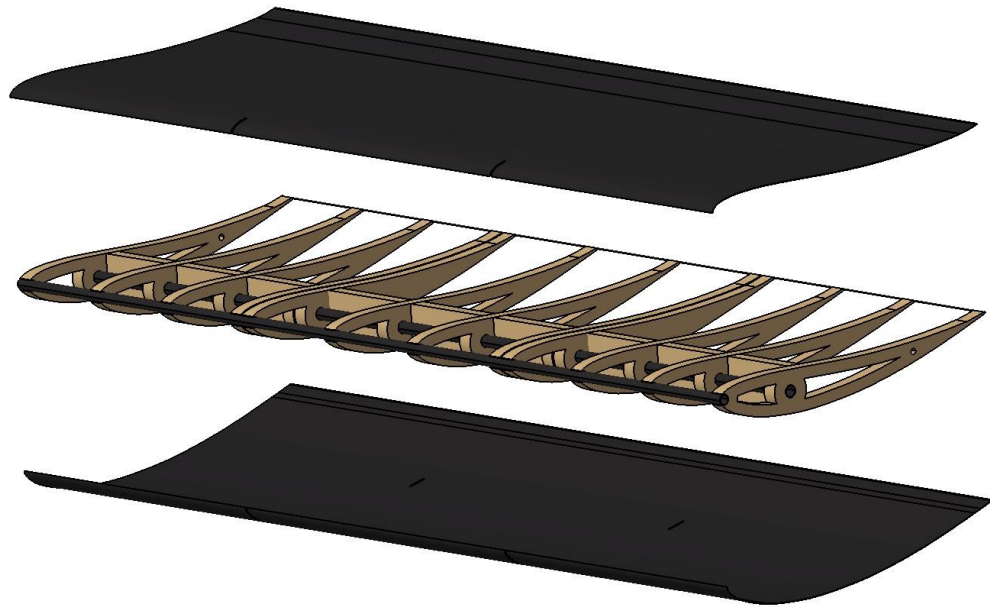
5 Siipien sekä pohjalevyn rakenteen suunnittelu

Kun lopulliset geometriat siiville sekä pohjalevylle oli määritetty simulointien avulla, voitiin aloittaa osien varsinainen suunnittelu.

Suunnittelun lähtökohtina olivat osien keveys, helppo valmistettavuus sekä valmistuskustannukset. Resurssit osien valmistukseen olivat rajalliset, eikä käytössä ollut viimeisintä teknologiaa. Tämän lisäksi osat täytyi valmistaa itse ja nämä kaksi asiaa piti huomioida myös suunnittelussa. Budjetti oli myös rajallinen, mikä osaltaan rajasi materiaali- ja valmistusmenetelmiä.

5.1 Siivet

Siipien kohdalla päätettiin käyttää kotelorakennetta sen keveyden ja jäykkyyden takia. Kotelorakennetta varten suunniteltiin ns. luuranko, mikä koostui vesileikatuista siipiprofiileista sekä erikseen muotoonsa laminoituista siiven ylä- ja alapinnoista (kuva 37).



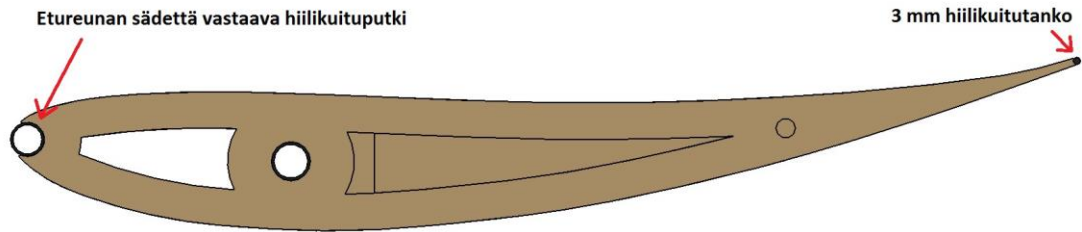
Kuva 37. Etusiiven rakenne.

Jotta siipiprofiilit pysyisivät keskenään linjassa, suunniteltiin niiden läpi kulkemaan hiilikuituputket koko siiven leveydeltä (kuva 38).



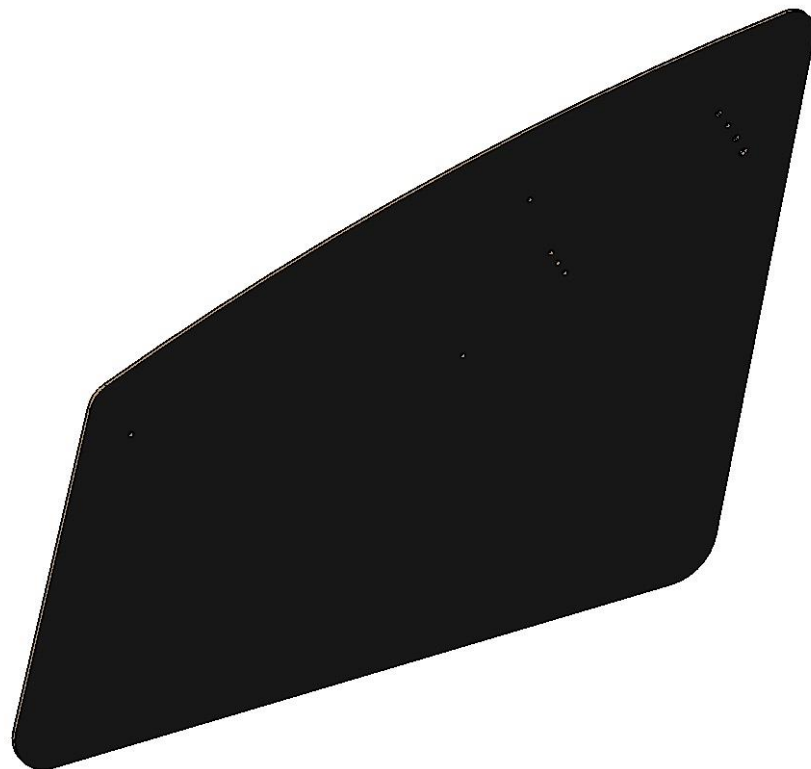
Kuva 38. Etusiiven rungossa kulkevat hiilikuituputket.

Siiven etureunan putken säde suunniteltiin vastaamaan siipiprofiilin etureunan sädettä. Profiilin takareunaan suunniteltiin kulkemaan 3 mm:n hiilikuitutanko koko matkalta, koska säännöt vaativat, että siiven jokaisen terävän reunan säteen tulee ylittää 1,5 mm:n raja (kuva 39).



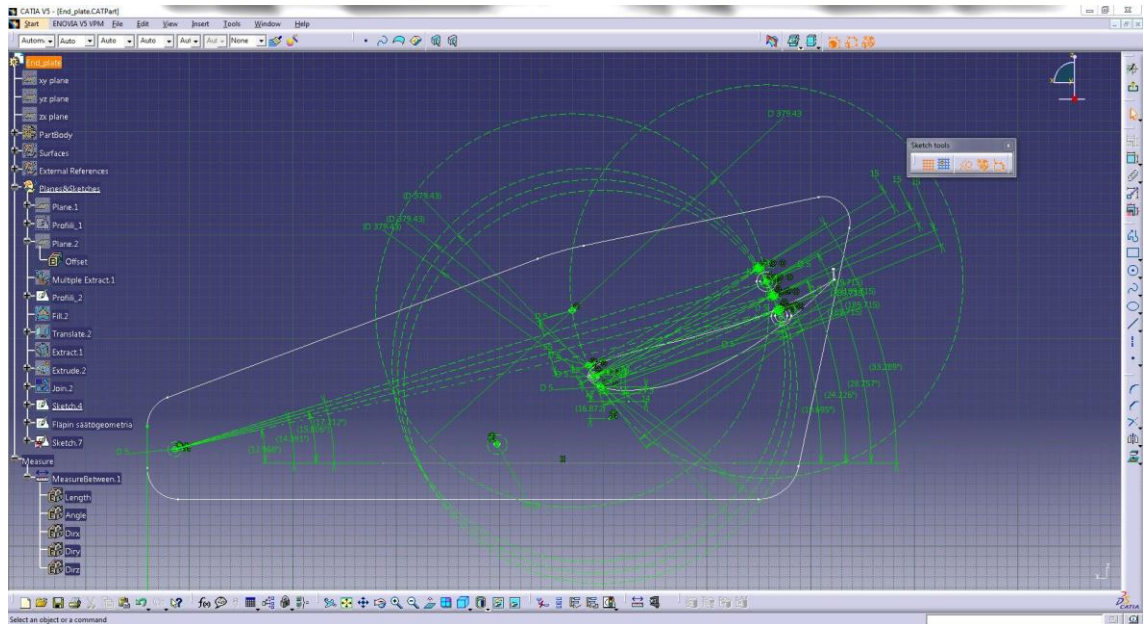
Kuva 39. Etureunan sädettä vastaava hiilikuituputki sekä takareunaan asennettava hiilikuitutanko.

Siipien päätylevyt suunniteltiin vesileikattavaksi 5 mm:n kerroslevyrakenteesta. Kerroslevyrakenteen avulla päätylevyistä saataisiin kevyet, mutta samalla jäykät (kuva 40).



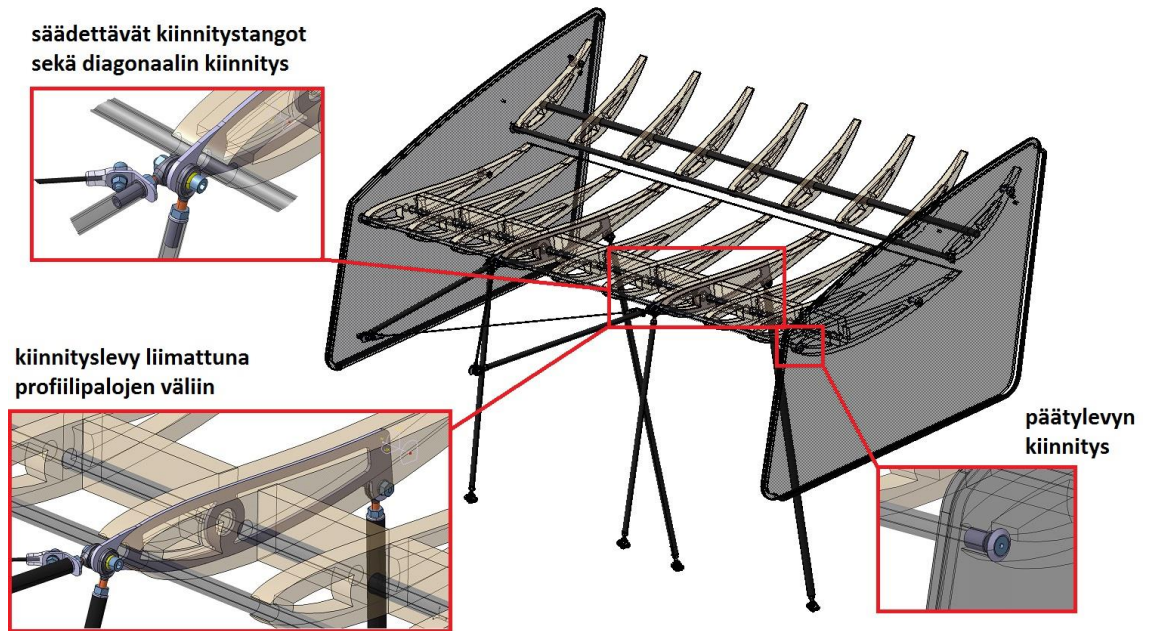
Kuva 40. Takasiiven päätylevy.

Sekä etu- että takasiiven perusrakenne suunniteltiin valmistettavaksi samalla tavalla, mutta kiinnitysten takia molempiin joutui tehdä omat muokkauksensa. Molempiin siipiin suunniteltiin säätömahdollisuus 2. elementille, millä downforcea pystyisi tarvittaessa hienosäätämään. 2. elementti suunniteltiin asennettavaksi yhteensä 13 eri asentoon (kuva 41).



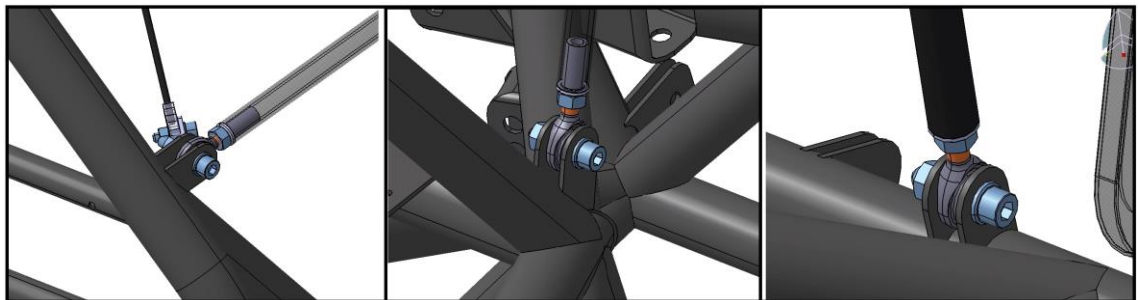
Kuva 41. 2. elementin säätögeometria.

Takasiiven kiinnitystä varten suunniteltiin vesileikattu alumiininen kiinnityslevy liimattavaksi vesileikattujen siipiprofiilien väliin kasausvaiheessa. Kiinnitystankojen päihin sekä päätylevyn kiinnitystä varten suunniteltiin erilliset kierreinsertit. Kiinnitystankojen päihin ruuvattiin kuulanievet, ja toisiin päihin kiinnitystankoja suunniteltiin vasenkätiset insertit, jolloin kiinnitystankojen pituutta pystyi säätämään pelkästään tankoa pyörittämällä. Päätylevyjen kiinnitystä varten suunniteltiin erilliset kiinnitysprikat senkkikantaisten ruuvien asentamista varten, mitkä tekivät asennuksesta viimeistellymmän näköisen. Diagonaalitueksi suunniteltiin 3 mm:n hiilikuitutanko liimattuna polykarbonaatista vesileikattuihin kiinnikkeisiin. Diagonaalituet suunniteltiin kiinnitettäväksi kuulanievelten päihin. (Kuva 42.)



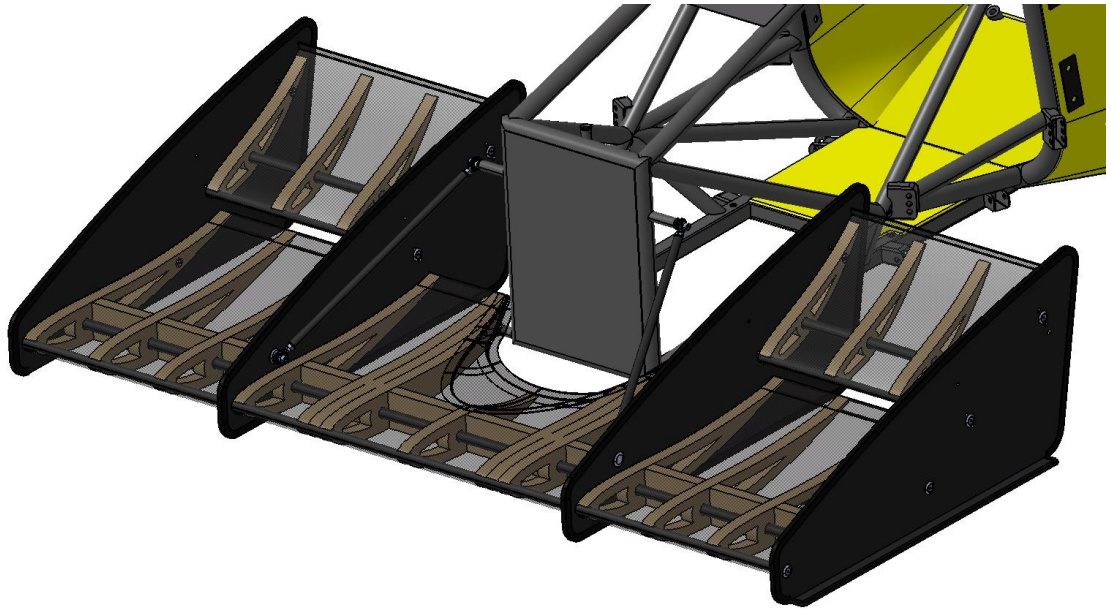
Kuva 42. Takasiiven kiinnikkeet.

Rungon puolen kiinnikkeiksi suunniteltiin yksinkertaiset hitsattavat peltilevyt, joihin kiinnitystangot asennettiin (kuva 43).



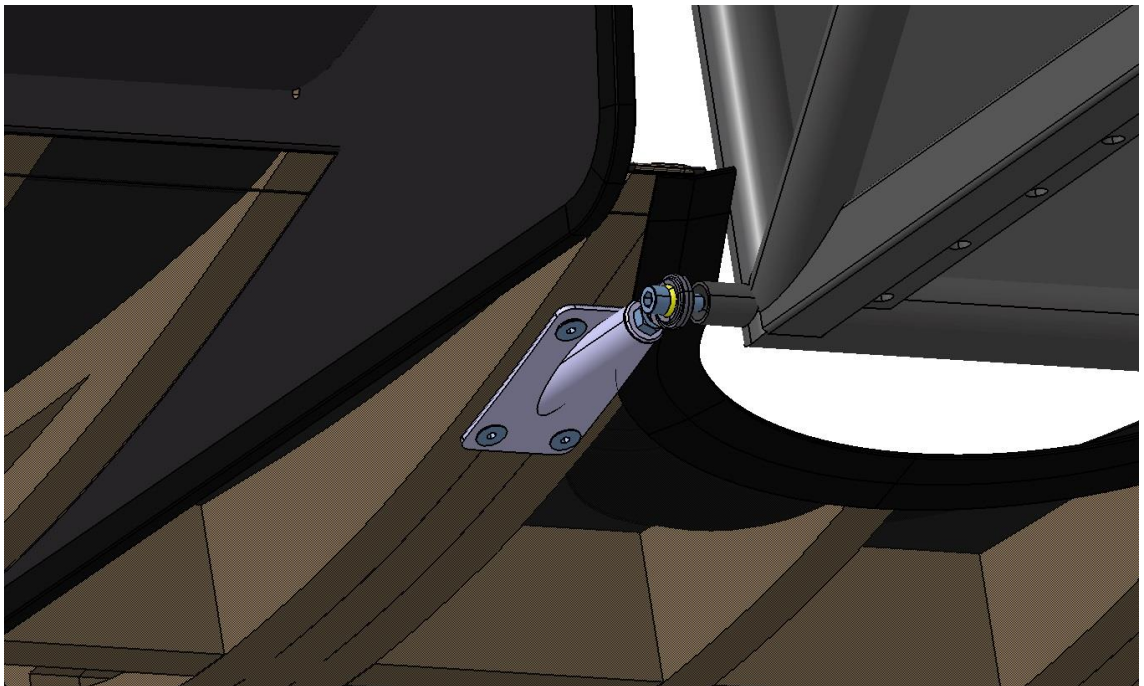
Kuva 43. Rungon puolen kiinnikkeet.

Etusiiven päätylevyjen kiinnitys toteutettiin samalla tavalla kuin takasiivessä ja myös siiven etureunan kiinnitys toteutettiin käyttäen samankaltaisia kiinnitystankoja kuin takasiivessä (kuva 44).



Kuva 44 Etusiiven rakenne ja kiinnitys.

Etusiiven takareunan kiinnitystä varten suunniteltiin erilliset alumiiniset kiinnityslevyt, jotka pultattiin kiinni siipeen upotettuihin kierreinsertteihin neljällä pultilla. Levystä lähtevään putkeen suunniteltiin kierreinsertti, mihin asennettiin kuulanivel, jotta myös tästä kiinnityksestä saataisiin säädettävä (kuva 45).



Kuva 45. Etusiiven alakiinnike.

Liitteessä 1 on esitetty etu- sekä takasiiven räjäytyskuvat osanumeroineen.

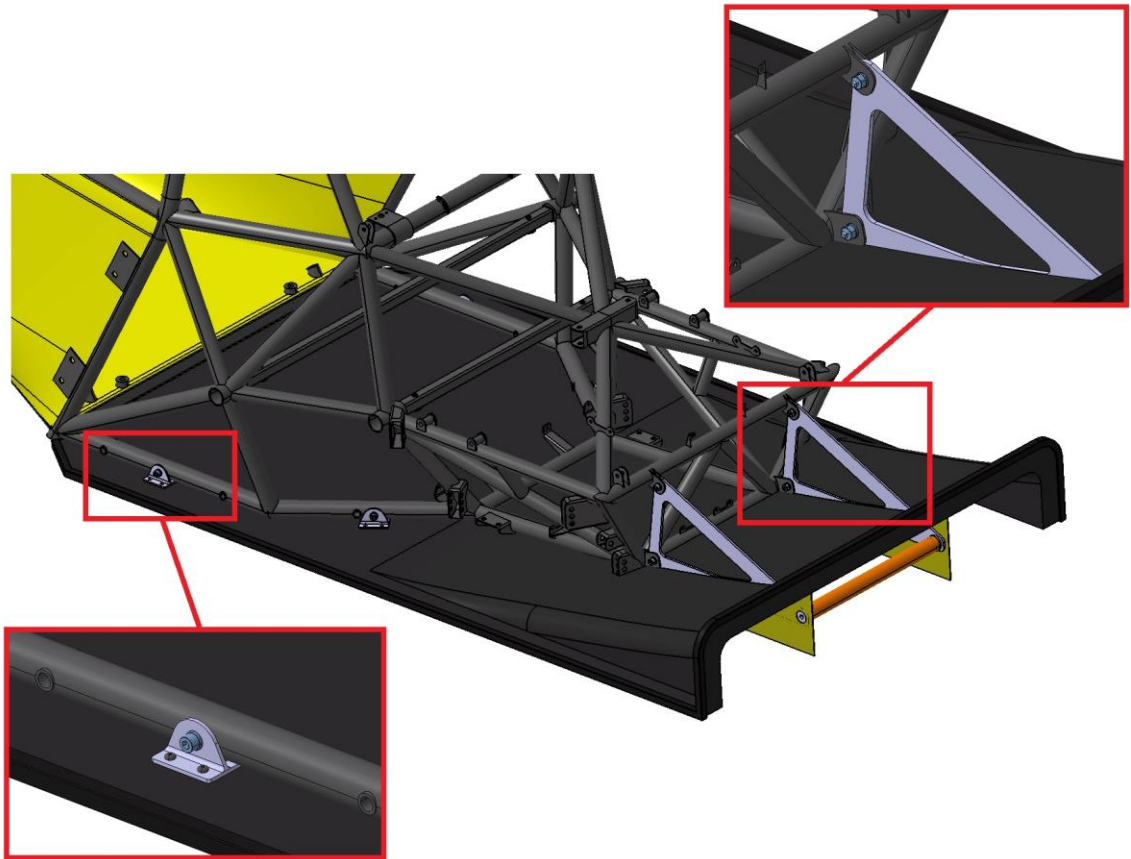
5.2 Pohjalevy

Pohjalevy itsessään on suhteellisen yksinkertainen osa, ja se päädyttiin tekemään samankaltaisena kerroslevyrakenteena, kuin siipien päätylevyt (kuva 46).



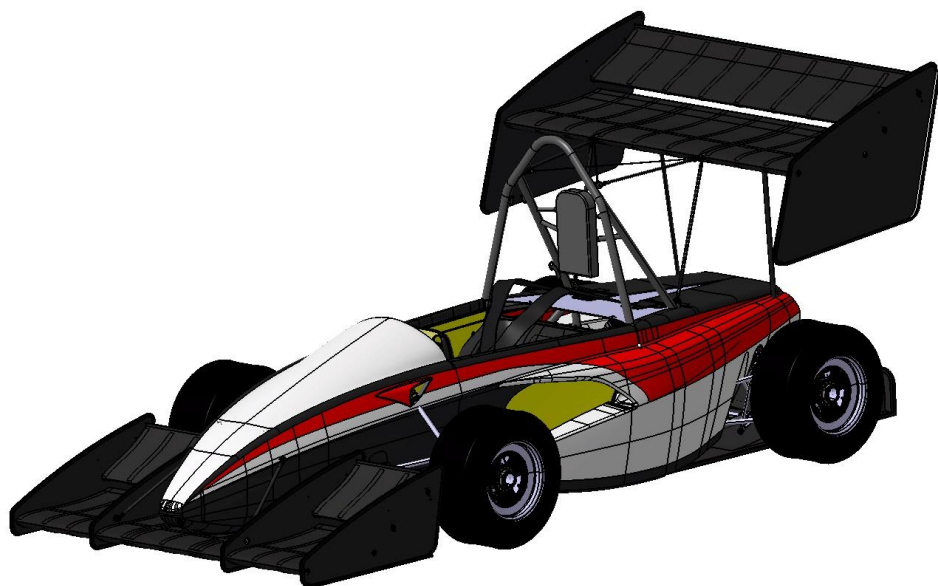
Kuva 46. Pohjalevyn 3D-malli.

Kiinnikkeiksi suunniteltiin alumiiniset kulmaraudat, jotka nitattaisiin sekä liimattaisiin pohjalevyyn. Rungon puolelle suunniteltiin hitsattavat kierreinserit, joihin pohjalevy pulattaisiin kiinni. Auton takapäähän suunniteltiin kolmion malliset alumiiniset tuet, jotka toimivat samalla auton nostoputken kiinnitysrautoina ja pohjalevyn takareuna nojasi näitä kiinnitysrautoja vasten, estäen pohjalevyä tippumasta alaspäin (kuva 47).



Kuva 47. Pohjalevyn kiinnitys.

Kuvassa 48 siivet sekä pohjalevy valmiiksi suunniteltuna koko auton 3D-mallin kanssa.



Kuva 48. Valmiiksi suunniteltu aerodynamiikkapaketti yhdessä koko auton 3D-mallin kanssa.

6 Valmistus

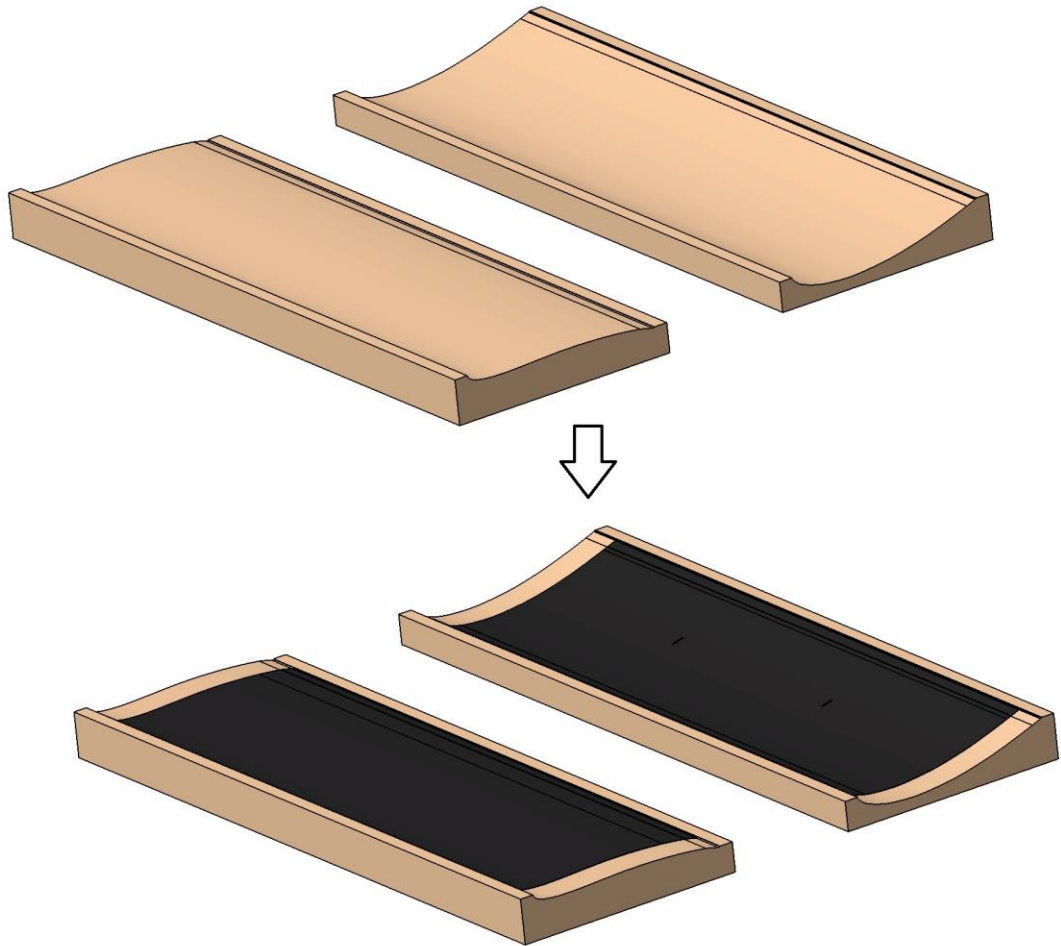
Kun 3D-malli oli valmis, voitiin osien valmistus aloittaa. Pohjalevy sekä siipien pinnat ovat komposiittiosia, missä hiili- sekä aramidikuitu toimivat lujitteena ja epoksi toimii matriisina. Kaikki komposiittiosat valmistettiin alipaineinjektiomenetelmällä. Siipien rungot sekä pintalevyt liimattiin kasaan erillisillä kokoonpanomuoteilla.

Koko valmistusprosessin ajan työskennellessä käytettiin asianmukaisia suojavälineitä, koska epoksipohjaiset aineet ovat terveysriski joutuessaan iholle ja ovat myrkyllisiä myös hengitysteitse. Kaikki maalaukset ja alipaineinjektiot suoritettiin maalausammiossa, missä oli asianmukainen ilmanvaihto. Tämän lisäksi alipaineinjektoinneissa käytettiin moottoroituja hengityssuojaimia sekä nitrilikäsineitä.

Komposiittiosien valmistuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota siisteyteen, koska kaikenlaiset epäpuhtaudet vaikuttavat lopullisen osan laatuun. Tästä syystä ympäristön siisteyteen kiinnitettiin erityistä huomiota koko valmistusprosessin ajan, etenkin osien lamiointi- ja maalausvaiheissa.

6.1 Muotit

Siipien muoteista tehtiin aluksi 3D-mallit, joiden pohjalta varsinaiset muotit koneistettiin. Lopullisissa muoteissa siiven ylä- sekä alapinta päädyttiin koneistamaan samaan muotiin, mutta kuvassa 49 olevia malleja pystyttiin hyödyntämään koneistusratojen määrittämiseen.



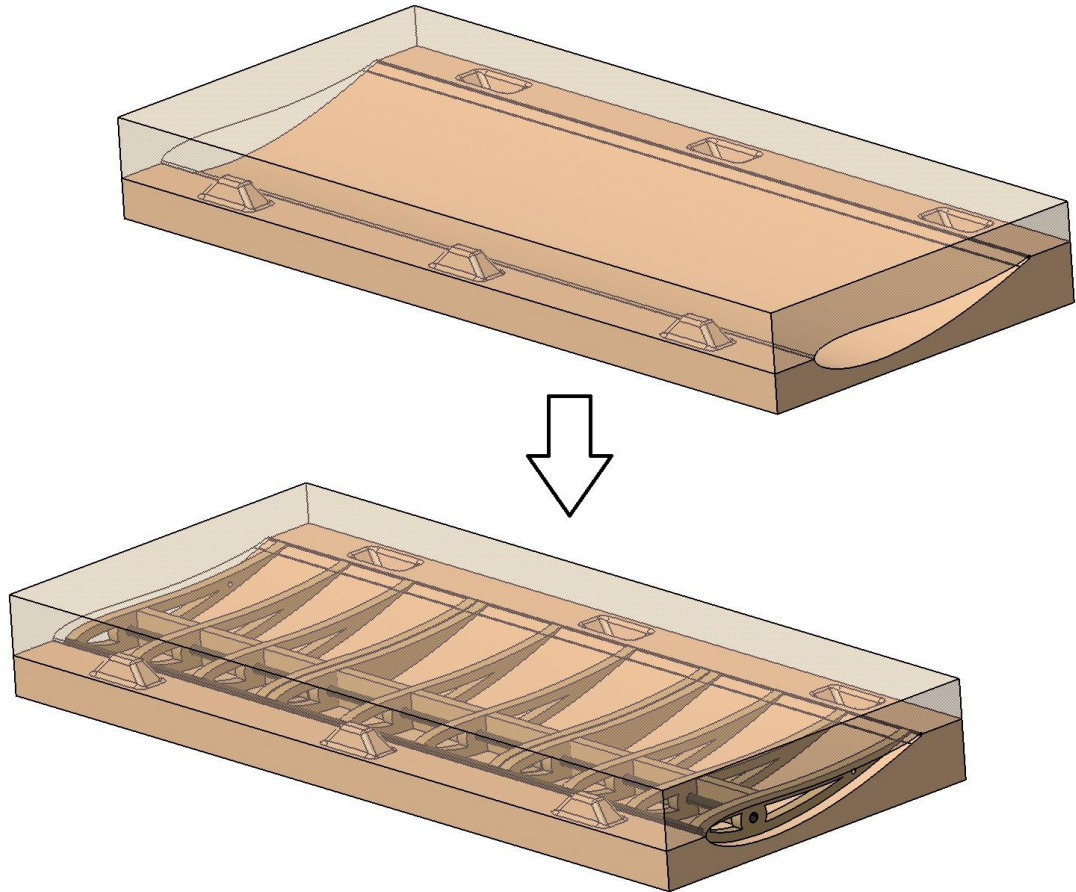
Kuva 49. Siipien ylä- sekä alapinnan muottien 3D-mallit.

Siipien muotit koneistettiin Sikablock M650 -materiaalista, mikä on tarkoitettu juuri tähän tarkoitukseen. Koneisuuden jälkeen muotit hiottiin ja maalattiin raskaan kaluston maalaukseen tarkoitettulla epoksipohjaisella maalilla, joka kestäisi alipaineinjektointin (kuva 50).



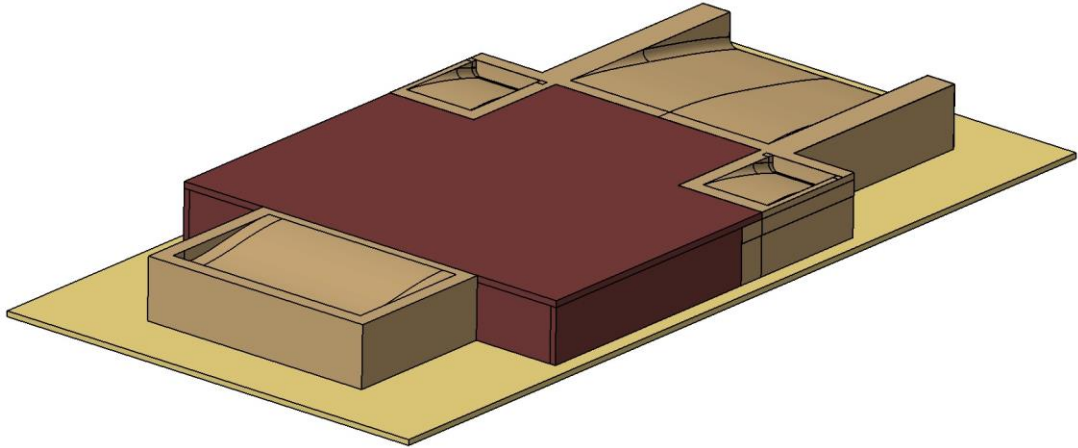
Kuva 50. Siipien muotit.

Kokoamisen helpottamiseksi etusiipiä varten suunniteltiin erilliset kokoonpanomuotit, mitkä koneistettiin Finfoamista. Muotteihin suunniteltiin kohdistuskartiot, jotka keskittäisivät vesileikatut siipiprofiilit ja siiven ylä- sekä alapinnat asennusvaiheessa (kuva 51).



Kuva 51. Siiven kokoonpanomuotin 3D-malli.

Myös pohjalevyn muotista tehtiin aluksi 3D-malli ja varsinainen muotti valmistettiin tämän pohjalta (kuva 52). Muotti suunniteltiin siten, että tasainen osa tehtäisiin vanerista ja ainoastaan päätyosat koneistettaisiin epoksipastasta. Pohjalevyn muotti jouduttiin tilaamaan hyvissä ajoin tiukan aikataulun ja pitkän toimitusajan vuoksi. Kuten aiemmin työssä mainittiin, pohjalevy päädyttiin tekemään loppujen lopuksi hyödyntäen ainoastaan pohjalevyn diffuusoriosaa, joten osa alkuperäisen suunnitelman mukaisesta muotista jäi käyttämättä.



Kuva 52. Pohjalevyn muotin 3D-malli.

Pohjalevyn muotille tehtiin sama käsittely kuin siipien muoteille, eli hiottiin ja maalattiin epoksipohjaisella maalilla (kuva 53).



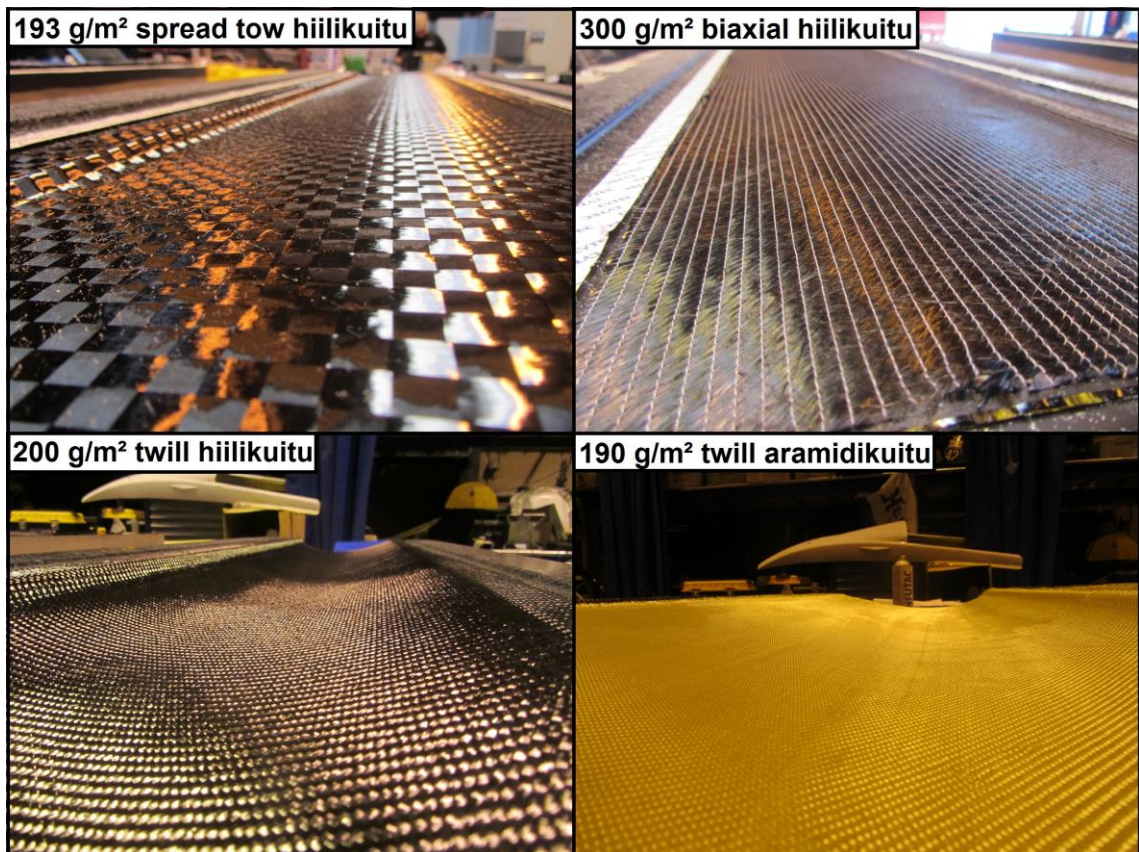
Kuva 53. Pohjalevyn muotti.

6.2 Laminointi ja alipaineinjektio

Siipien pintojen laminointi aloitettiin viimeistelemällä muotit laminointia varten. Ensin muotit puhdistettiin huolella ylimääräisestä liasta ChemTrend Chemlease Mold Cleaner -aineella, joka on suunniteltu erityisesti tähän tarkoitukseen. Tämän jälkeen muotit käsiteltiin saman valmistajan Chemlease Sealer 15 -aineella, minkä tarkoitus on täyttää pienet huokoiset muotin pinnasta. Lopuksi muottien päälle laitettiin Chemlease PMR EZ -

irroitusaine. Irroitusaine muodostaa muottipinnalle kovan kerroksen, jonka tehtävä on estää valmistettavan kappaleen tarttuminen muottiin.

Muottien viimeistelyn jälkeen aloitettiin varsinainen laminointi. Siipiä valmistettiin kaksi sarjaa, joista ensimmäiseen sarjaan laitettiin kaksi kerrosta 200 g/m² twill-kudostyyppistä hiilikuitua ja etusiiven alapintaan laitettiin lisäksi yksi kerros 190 g/m² twill-kudostyyppistä aramidikuitua vahvistamaan rakennetta, koska etusiipi tulisi ottamaan jonkin verran iskuja vastaan. Toiseen siipisarjaan laitettiin päällimmäiseksi kerrokseksi 193 g/m² spread tow -tyyppistä hiilikuitua ja toiseksi kerrokseksi 300 g/m² biaxial-tyyppistä hiilikuitua (kuva 54). Myös toiseen sarjaan laitettiin etusiiven alapintaan yksi kerros aramidikuitua vahvikkeeksi. Alun perin molemmat sarjat suunniteltiin valmistettavaksi ainoastaan spread tow- ja biaxial-tyyppisillä kuiduilla, mutta näiden toimitusajat venyivät liian pitkiksi ja ensimmäistä siipisarjaa täytyi alkaa jo valmistaa, jotta se saatiin ajoissa valmiiksi.



Kuva 54. Siivissä käytetyt kuitumateriaalit.

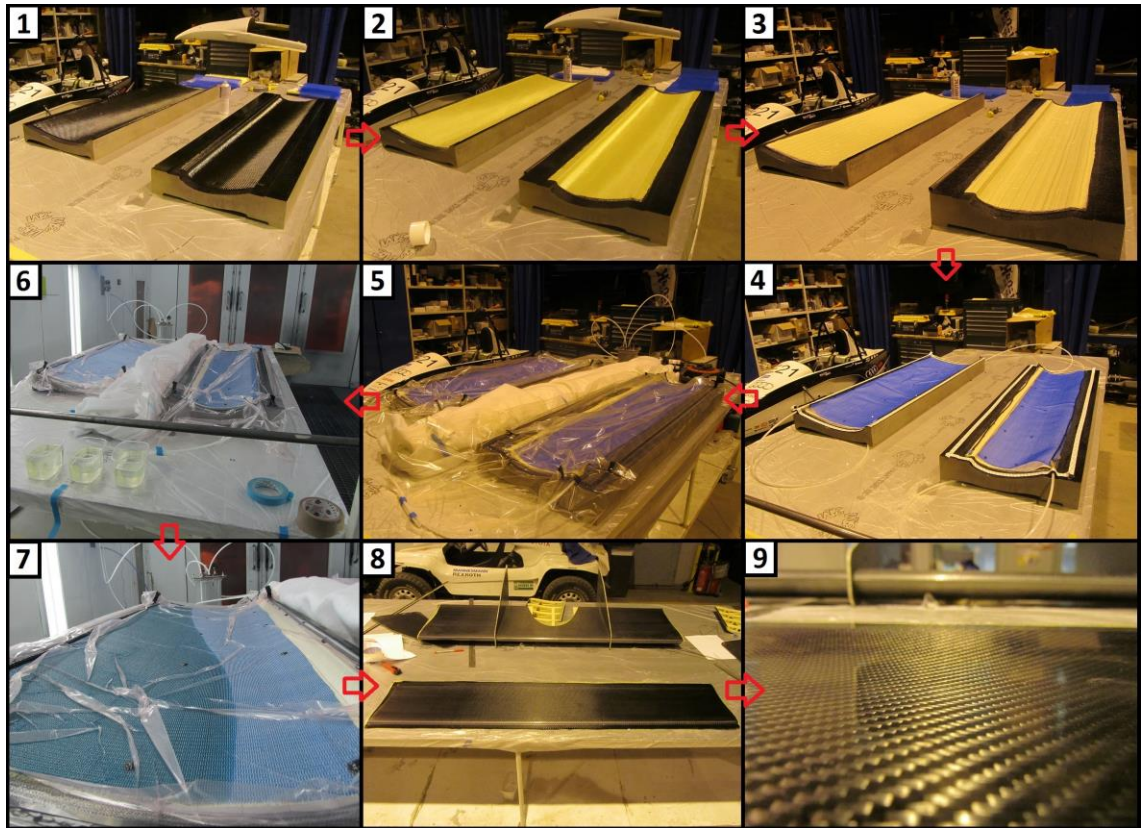
Kuvassa 55 on esitetty siiven pintakerrosten laminointi vaihe vaiheelta.

Kohdassa 1 ja 2 kuitukerrokset asetetaan muottiin ja kohdassa 3 näiden päälle asetetaan karhennuskangas. Karhennuskankaan tehtävä on estää johdeverkkoa kiinnittymästä osaan, auttaa epoksia virtaamaan muottiin ja jättää osan pinnalle liimaamiseen soveltuva pinta. Kohdissa 1, 2 ja 3 asennuksen helpottamiseksi käytettiin Infutac-merkkistä sparyliimaa, joka on suunniteltu juuri tähän tarkoitukseen.

Kohdassa 4 karhennuskankaan päälle asetetaan johdeverkko ja spiraaliputki kulkemaan johdeverkon reunaan, muotin reunoille asennetaan tiivistenauha ja asennetaan imu- sekä poistoputki injektointia varten. Injektointivaiheessa epoksi pääsee virtaamaan kaikkialle osaan johdeverkkoa ja spiraalia pitkin.

Kohdassa 5 muotin päälle on asennettu alipainepussi tiivistenauhan avulla. Tässä vaiheessa on huomioitava, että pussia on osan päällä tarpeeksi, jotta se pääsee taittumaan muotin jokaiseen kulmaan, kun pussiin vedetään alipaine. 6. kohdassa muotteihin on vedetty alipaine välisäiliön kautta muotin toisesta päästä ja toisen pään imuputki on suljettu. Kohdassa 7 imuputki on asetettu epoksiastian ja alipaine imee epoksin muottiin.

Kun osa on täytynyt epoksilla, voidaan imupuoli sulkea ja jättää osa vielä hetkeksi alipaineeseen, kunnes myös alipainepuoli voidaan sulkea ja jättää osa kovettumaan. Osan on hyvä antaa kovettua noin vuorokausi ennen kuin se voidaan irrottaa muotista. Kohdissa 8 ja 9 on valmis osa muotista irrotettuna.



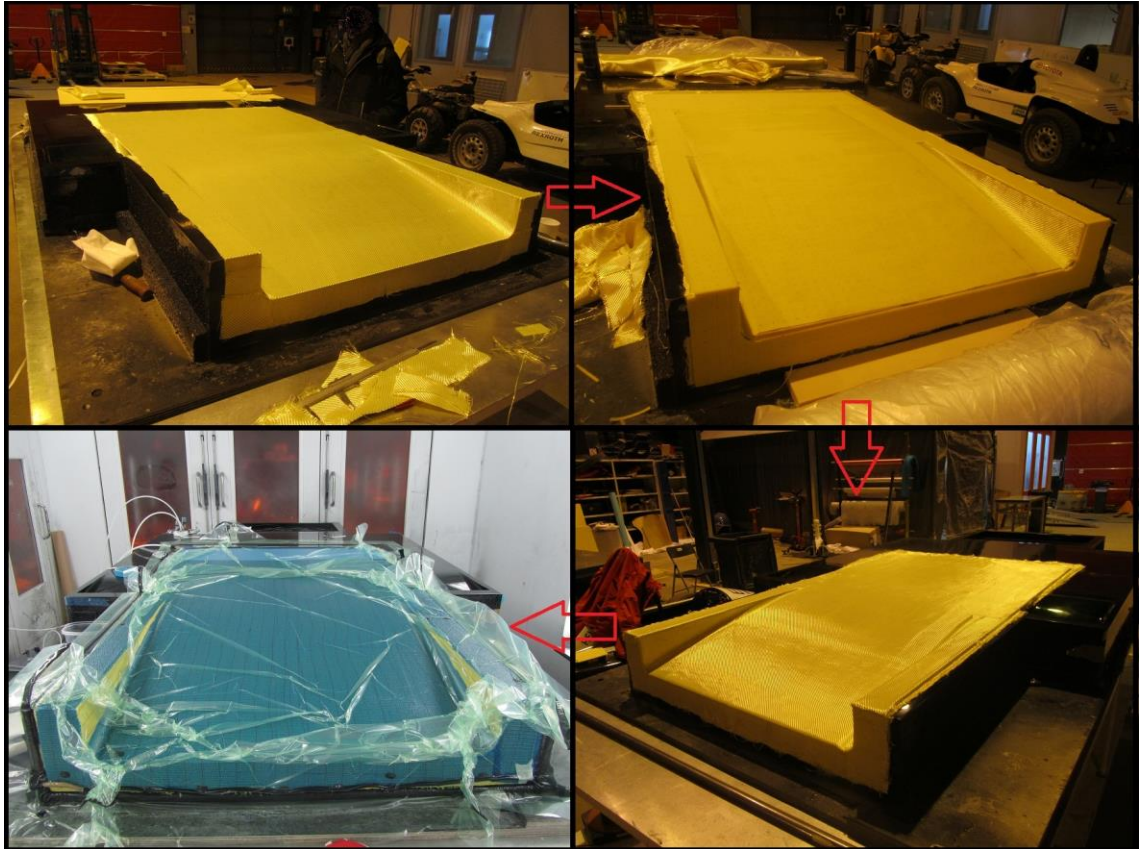
Kuva 55. Siiven pintakerroksen laminointi vaihe vaiheelta.

Gurney flapia varten tehtiin yksinkertainen muotti peltilevystä taivuttamalla, mikä puhdistettiin ja käsiteltiin irroitusaineella injektointia varten (kuva 56). Gurney flapin valmistus suoritettiin muilta osin samalla tekniikalla kuin siiven pintojen valmistus.



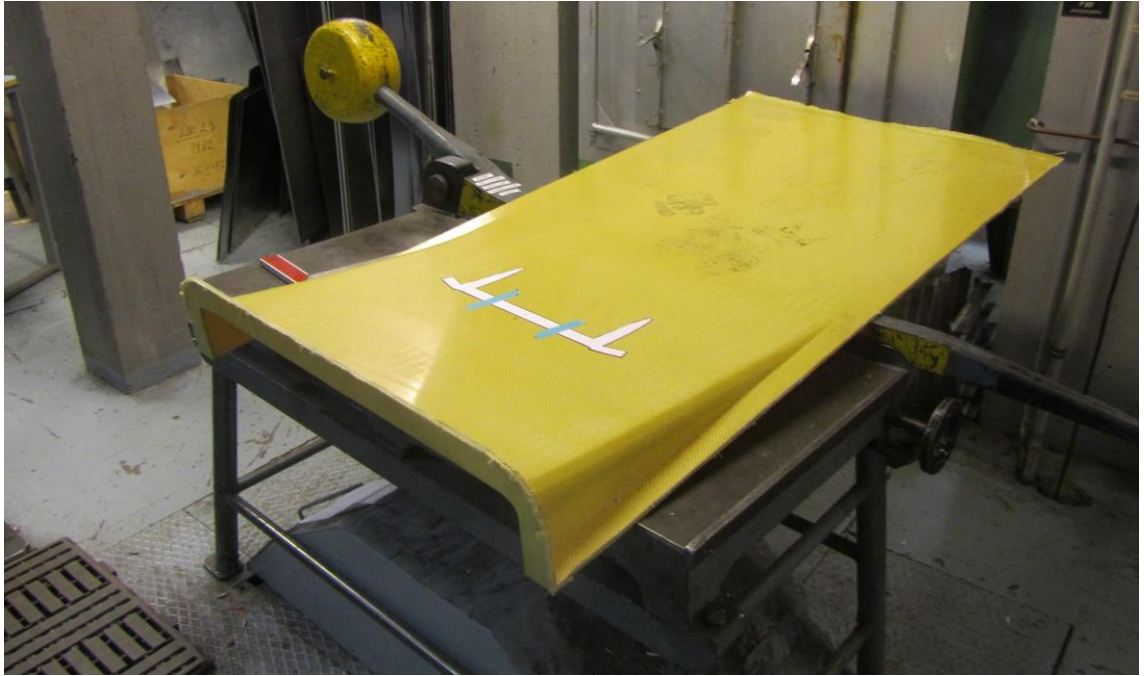
Kuva 56. Gurney flapin muotti.

Pohjalevyn valmistus oli muuten samankaltainen prosessi, mutta pohjalevystä tehtiin kerroslevyrakenne käyttäen täyteaineena 5 mm paksua Corecell M60 -levyä. Levy asetettiin kuitukerrosten väliin ja rei'itettiin, jotta epoksi pääsisi virtaamaan myös pintapuolen kuitukerroksiin. Muuten pohjalevy valmistettiin samalla menetelmällä, kuin siipien pinta-levyt (kuva 57).



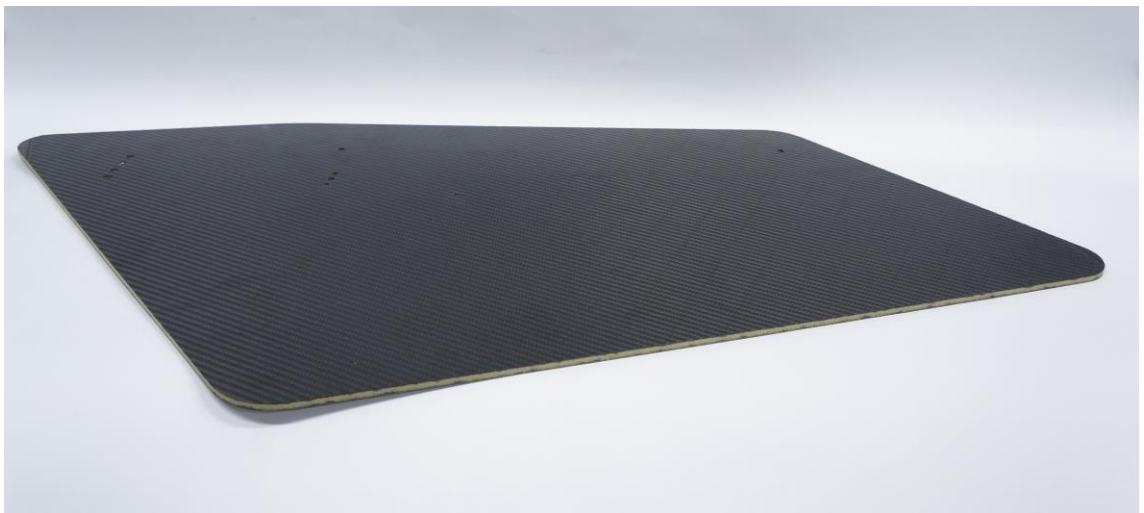
Kuva 57. Pohjalevyn valmistusprosessi.

Kuvassa 58 pohjalevy muotista irrotettuna.



Kuva 58. Muotista irrotettu pohjalevy.

Siipien päätylevyt tehtiin myös kerroslevyksi käyttäen samaa 5 mm Corecell-täyteainetta. Injektointi suoritettiin lasilevyn päällä, mikä ei vaatinut erillistä käsittelyä, vaan ainoastaan huolellisen putsauksen. Tämän jälkeen kerroslevyn vesileikattiin muotoonsa (kuva 59).



Kuva 59. Muotoonsa vesileikattu siiven päätylevy.

6.3 Kokoonpano ja asennus

Kun siipien pinnat olivat valmiit, oli seuraava tehtävä kasata siivet ja asentaa ne autoon. Siipien kasaaminen suoritettiin aiemmin mainittuja kokoonpanomuotteja hyödyntäen. Aluksi valmistettiin siipien rungot liimaamalla 20 mm paksusta Corecell M60 -levystä vesileikatut siipiprofiilit kiinni hiilikuituputkiin. Tämän jälkeen siiven alapinta liimattiin kiinni runkoihin ja annettiin kuivua. Viimeisenä liimattiin yläpinnat (kuva 60). Kierreinsertit päätylevyjen kiinnitystä varten liimattiin myös tässä vaiheessa.



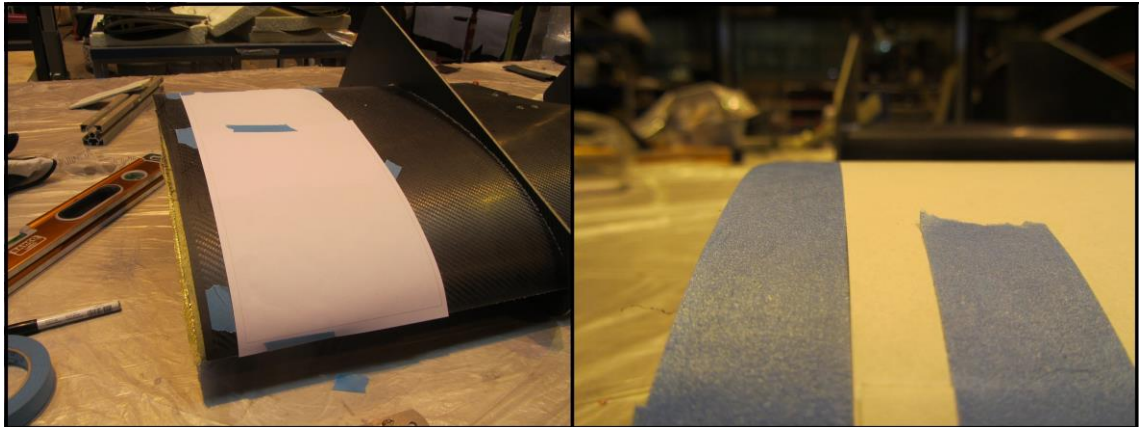
Kuva 60. Siiven kokoonpanoprosessi.

Siipien etureunat viimeisteltiin Sikaflex-liimalla (kuva 61) ja pääelementin takareunaan liimattiin 3 mm hiilikuitutanko. Myös Gurney flapit liimattiin kiinni 2. elementteihin tässä vaiheessa.



Kuva 61. Siiven etureunan viimeistely.

Tämän jälkeen siipien päädyt trimmattiin tarkasti, jotta päätylevyt asettuisivat hyvin paikoilleen (kuva 62).



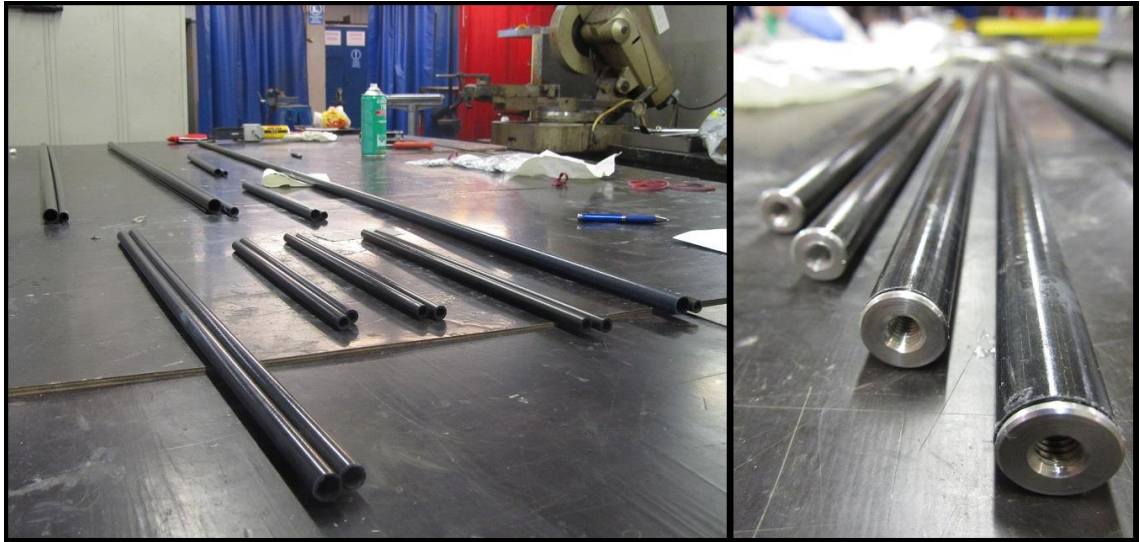
Kuva 62. Siiven päädyn trimmaus päätylevyn asennusta varten.

Kun siipien päädyt oli trimmattu, voitiin päätylevyt asentaa paikoilleen (kuva 63).



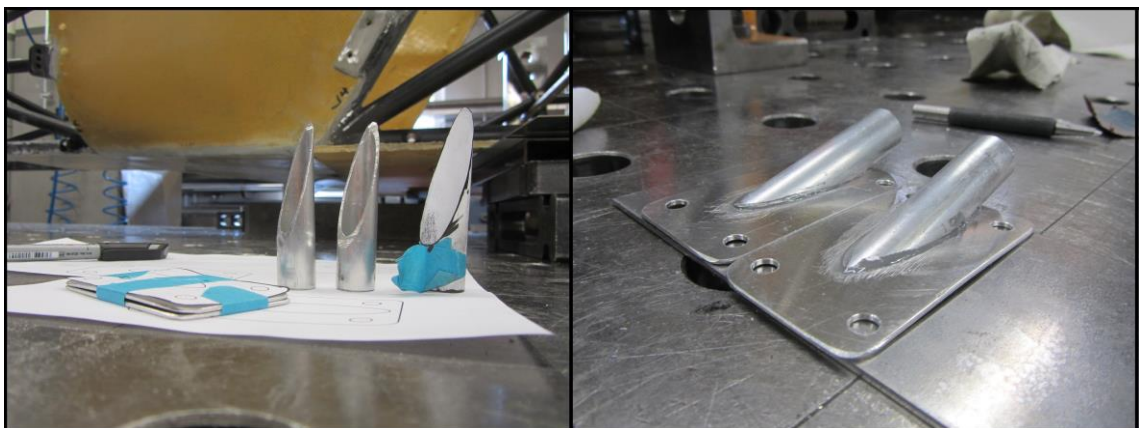
Kuva 63. Päätylevyn asennettuna paikoilleen.

Seuraava tehtävä oli valmistaa kiinnitystangot siipien kiinnittämistä varten. Tangot katkaistiin 3D-mallin mukaisiin mittoihin ja tankojen päihin liimattiin kierreinserit (kuva 64).



Kuva 64. Kiinnitystankojen valmistus.

Etusiiven alakiinnikkeet tehtiin käsityönä suorasta alumiinilevystä sekä alumiiniputkesta. Putki liimattiin kiinnityslevyyn Loctite 9514 -liimalla, jonka lujuus kyseisessä liitoksessa vastaa lähes hitsattua liitosta (kuva 65).



Kuva 65. Etusiiven alakiinnikkeen valmistus.

Tämän jälkeen oli vuorossa siipien asennus auton runkoon. Tätä varten runko kiinnitettiin tukevaan *jigipöytään*, jonka avulla siivet oli helppo kohdistaa oikeille paikoille. Pöydän tasosta otettiin referenssimitat 3D-malliin ja tämän tason avulla siivet pystyttiin paikoittamaan sekä pöytään, että runkoon nähden (kuva 66). Kun siivet oli asetettu oikeille paikoille, säätötangot asetettiin oikeisiin mittoihin ja kiinnikkeet hitsattiin auton runkoon.



Kuva 66. Takasiiven paikoitus autoon.

Lopuksi takasiipeen asennettiin 3 mm:n hiilikuitutangosta valmistetut diagonaalituet (kuva 67).



Kuva 67. Takasiiven diagonaalituet.

Pohjalevyn paikoitus suoritettiin samalla menetelmällä. Takapään kolmiotukien kiinnityslevyt hitsattiin runkoon sekä sivuilla olevat kiinnikkeet liimattiin ja niitattiin kiinni pohjalevyn oikeille paikoille (kuva 68).



Kuva 68. Pohjalevyn paikoitus autoon.

6.4 Viimeistely

Kun siivet sekä pohjalevy oli paikoitettu autoon ja kiinnikkeet olivat valmiina, voitiin aloittaa osien viimeistely. Käytännössä tämä tarkoitti kaikkien terävien reunojen hiomista sekä kumisen reunasuojan asentamista päätylevyjen sekä pohjalevyn ympärille. Lopuksi siivet sekä pohjalevy vahattiin ja sponsoritarrat liimattiin paikoilleen, minkä jälkeen ne olivat valmiit autoon asennettavaksi. Kuvassa 69 valmis arodynamiikkapaketti asennettuna HPF014E-kilpa-autoon.



Kuva 69. Aerodynamiikkapaketti asennettuna HPF014E-kilpa-autoon.

7 Yhteenveto

Työssä käytiin läpin HPF014E-kilpa-auton aerodynamiikkapaketin suunnittelu ja valmistus vaihe vaiheelta auton suorituskyvyn parantamiseksi. Tavoitteessa onnistuttiin hyvin käytettävissä olleeseen aikaan ja resursseihin nähden. Siivet sekä pohjalevy saatiin valmistettua suunnitellun aikataulun mukaan.

Valitettavasti aerodynamiikkapakettia ei päästy koskaan testaamaan kyseisessä HPF014E-autossa, sillä muiden teknisten ongelmien vuoksi autolla ei päästy koskaan kisaamaan. Tämä on ainut tavoite, joka alkuperäisestä suunnitelmasta jäi toteuttamatta. Sen sijaan edellisvuoden, HPF013E-auto oli korimuodoiltaan identtinen, joten aerodynamiikkapaketti päädyttiin asentamaan tähän autoon sen toiminnan testaamiseksi. Toiset, varalle valmistetut siivet, asennettiin tiimin viimeisimpään polttomoottorikäyttöiseen HPF011/20-kilpa-autoon. (Kuva 70.)



Kuva 70. Siivet asennettuna HPF013E- sekä HPF011/20-kilpa-autoihin.

Näissäkään autoissa tarkkoja mittauksia siipien tuottamalle downforcelle ei ehditty tehdä, mutta kuskiensa palautteen mukaan auton suorituskyky parani huomattavasti siipien asennuksen myötä. Parantuneen suorituskyvyn huomasi erityisesti kasvaneista kaarrenopeuksista. Myös CFD:stä saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että aerodynaamiikkapaketti on varmasti vaikutusta auton suorituskykyyn.

Tästä syystä insinööritö jättää jälkeensä ainakin yhden hyvän insinööritöön aiheen, eli kuinka aerodynaamiikkapaketti tarkalleen ottaen vaikuttaa suorituskykyyn. Myös tarkempien aerodynaamisten voimien mittaaminen esimerkiksi venymäliuskoilla ja Coast down -testillä ja niiden vertaaminen CFD:stä saatuihin tuloksiin olisi toinen hyvä insinööritöön aihe. Lisäksi CFD:n tarkkuudelle jäi varmasti kehittämisen varaa, vaikka työssä saadut tulokset ovatkin keskenään vertailukelpoisia.

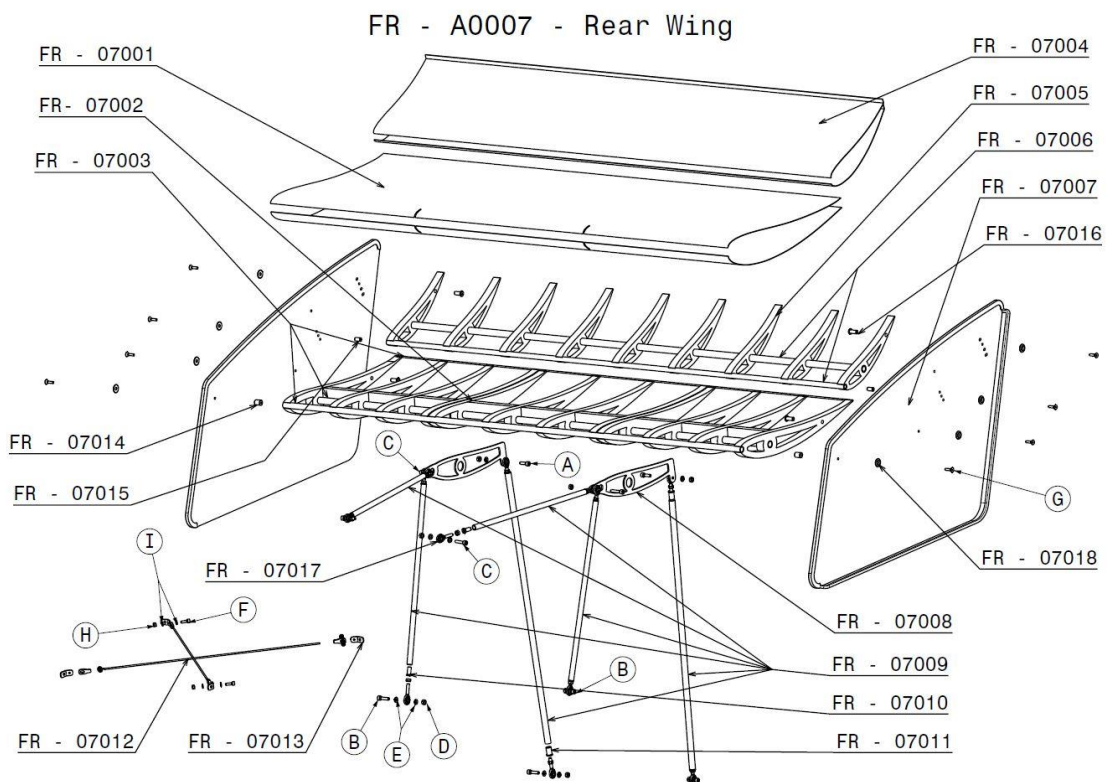
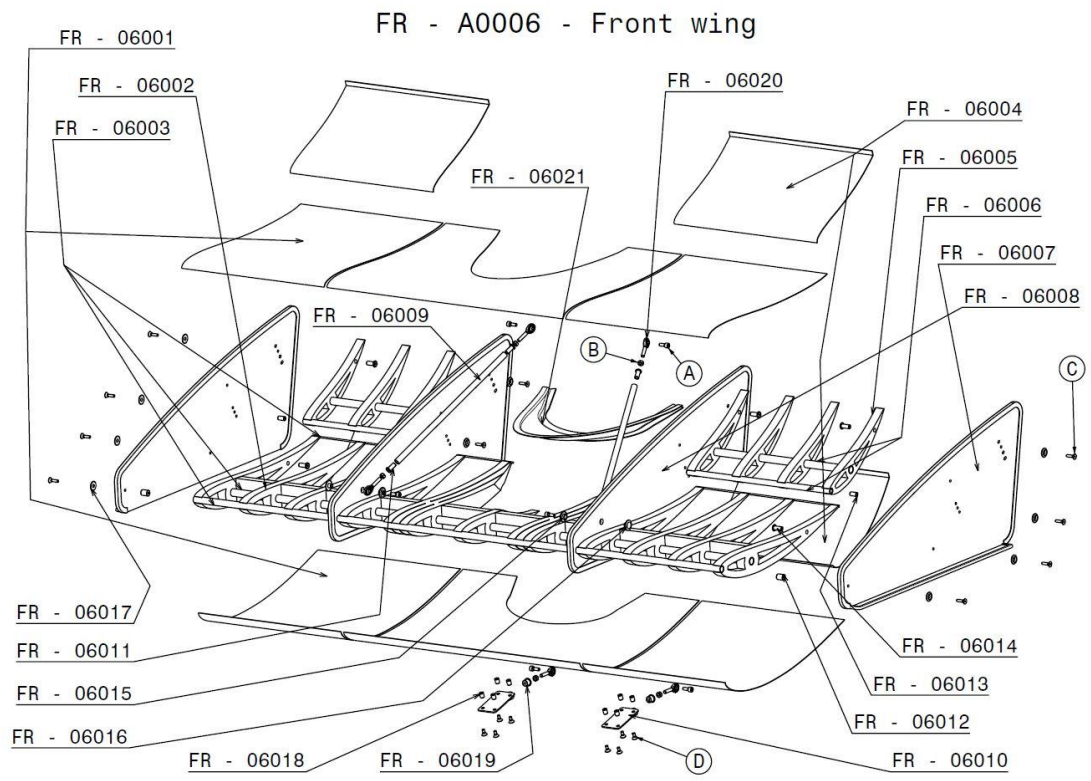
Tämä insinööritö antaa kuitenkin hyvän pohjatiedon tiimin tulevien kilpa-autojen aerodynaamiikan suunnittelua ja kehittämistä varten.

Lähteet

- 1 Suvanto, Kari. 2010. Tekniikan Fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 2 McBeath, Simon. 2012. Competition Car Aerodynamics. Sparkford UK: Haynes Publishing.
- 3 Momentum effects on aerodynamic forces. 2015. NASA. Verkkoaineisto. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/momntm.html>>. Luettu 17.8.2017.
- 4 Coanda effect. 2012. Technical F1 dictionary. Verkkoaineisto. <http://www.formula1-dictionary.net/coanda_effect.html>. Luettu 25.8.2017.
- 5 Reynolds number. 2014. NASA. Verkkoaineisto. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/BGH/reynolds.html>>. Luettu 26.8.2017.
- 6 Physics - Fluid Dynamics (3 of 25) Viscosity & Fluid Flow: Reynolds Number (Re). 2014. Verkkoaineisto. <https://www.youtube.com/watch?v=Yv0RB71BQ_4#t=2.100542>. Katsottu 26.8.2017.
- 7 Katz, Joseph. 1995. Race Car Aerodynamics, Designing for Speed. Cambridge, USA: Bentley Publishers.
- 8 High Downforce Rear Spoiler. 2014. Saleen. Verkkoaineisto. <https://shop.saleen.com/Saleen_620_Camaro_Rear_Spoiler_2014_p/03-003-00196-01.htm>. Luettu 28.8.2017.
- 9 Hamann Volcano Mercedes-Benz SLR - Carbon Fiber Rear Wing Extensions. 2009. Hamann Verkkoaineisto. <<http://www.seriouswheels.com/2009/ghij/2009-Hamann-Volcano-Mercedes-Benz-SLR-Carbon-Fiber-Rear-Wing-Extensions-1920x1440.htm>>. Luettu 28.8.2017.
- 10 Bernoulli and Newton. 2015. NASA. Verkkoaineisto. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bernnew.html>>. Luettu 30.8.2017.
- 11 Wing geometry definitions. 2015. NASA. Verkkojulkaisu. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/geom.html>>. Luettu 30.8.017.

- 12 For The Second Year In A Row, ANSYS Simulation Drives Four Out Of The Top Six F1 Racing Teams To Victory. 2013. Ansys. Verkkojulkaisu. <<http://investors.ansys.com/press-releases/2013/03-Dec-13-014526215>>. Luettu 2.9.2017.
- 13 Polymesh. 2017. Sympscape. Verkkoaineisto. <<http://www.symscape.com/files/pictures/polymesh/f1-poly-vol.png>>. Luettu 28.8.2017.

Siipien sekä pohjalevyn räjäytyskuvat



FR - A0008 - Underbody

