



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Juho Salminen

# Formula Student -kilpa-auton aerody- namiikan kehitystyö

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

11.3.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juho Salminen Formula Student -kilpa-auton aerodynamiikan kehitystyö 86 sivua + 10 liitettä 11.3.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja(t)	Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Tämän lopputyön tarkoitus oli suunnitella Metropolia Motorsport Formula Student -tiimille HPF019-kilpa-autoon uusi aerodynamiikkapaketti sekä tarkastella aerodynamiikkaa ja CFD-laskentaa. Uuden aerodynamiikkapaketin suunnittelun tavoite on tehostaa HPF019-kilpa-auton aerodynamiikkaa ja kaarreajo-ominaisuuksia HPF018-autoon verrattuna korkeamman downforcen tuoton ja optimoidun aerodynaamisen balanssin avulla. Suunnittelun tavoitteena oli myös tuoda formulatiimille lisää tietoa siitä, mihin kannattaa pohjata aerodynamiikkasuunnittelua seuraavien autojen kehitystyössä.</p> <p>Tavoitteiden saavuttamiseksi on suunniteltu noin sata erilaista aerodynaamista komponenttia ja tehty yli sata erilaista CFD-laskentaa, jotta on voitu vertailla eri komponentteja keskenään sekä tarkastella erilaisten ajotilanteiden muutosta aerodynamiikkaan.</p> <p>Työn tuloksena HPF019-auton aerodynamiikkapaketin tuottama downforce on CFD-laskennoissa lähes 50 % korkeampi kuin HPF018-autolla ja aerodynaaminen balanssi on siirtynyt hiukan enemmän taka-akselia kohti. Rata-ajossa HFP019 on kierrosajoissa testiradalla lähes kaksi sekuntia nopeampi ja saavuttaa hiukan korkeampia sivuttaiskiivyyksiä kuin HPF018.</p> <p>Työ osoitti myös parannuskohteita, joita voidaan korjata Metropolia Motorsportin tulevien autojen aerodynamiikkapakettien suunnittelussa. Samoin CFD-laskentaa ja CFD-laskennasta saatujen tulosten validointia voidaan tulevaisuudessa vielä kehittää.</p>	
Avainsanat	Aerodynamiikka, aerodynamiikkasuunnittelu, downforce, Formula student, Metropolia Motorsport, CFD-laskenta

Author Title	Juho Salminen Aerodynamic Design and Development of a Formula Student Race Car
Number of Pages Date	86 pages + 10 appendices 11 March 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to design a new aerodynamic package for the Metropolia Motorsport HPF019 Formula Student Race Car and do research related to aerodynamics and CFD. The aim in the design of the new aerodynamic package was to make it more effective to achieve higher cornering speeds compared to HPF018 by increasing the amount of downforce and optimizing aerodynamic balance. Another aim was to find out which features in the aerodynamic design will be worth focusing on when designing the Metropolia Motorsport Formula Student cars in the future.</p> <p>About a hundred different aerodynamic components were designed and more than one hundred CFD-analyses were carried out to be able to compare the components and find out how different driving set-ups affect the aerodynamics of the complete vehicle.</p> <p>As a result of this thesis, based on CFD-analyses, downforce produced by the aerodynamic package of HPF019 increased almost 50 % compared to HPF018 and aerodynamic balance shifted slightly more towards the rear axle. On the track HPF019 was almost two seconds faster in lap times and achieved also higher lateral accelerations than HPF018.</p> <p>This thesis also gives recommendations which will improve the new aerodynamic packages in the future cars designed by Metropolia Motorsport. In addition, this thesis also indicates areas for improvement in the CFD-analyses and in validation of the CFD-results so that they could be more accurate in the future.</p>	
Keywords	Aerodynamics, Aerodynamic design, Downforce, Formula Student, Metropolia Motorsport, CFD

## Esipuhe

Tämä insinööriyö ei olisi onnistunut ilman Metropolia Motorsport -formulatiimiä, ja haluan kiittää Metropolia Motorsport -tiimin jäseniä ja alumneja, jotka ovat mahdollistaneet projektin olemassaolon sekä jatkuvuuden ja täten insinööriosaamiseni kehittymisen. Eri-tyiskiitoksen ansaitsee aerodynamiikka-osa-aluevetäjän roolissa minua edeltänyt, kaudella 2018 aerodynamiikkapäällikkönä toiminut Onni Humalajoki, jonka antama apu ja oppi aerodynamiikan sekä CFD-laskennan saralla on ollut arvokasta ja kartuttanut omaa osaamistani merkittävästi.

Tämän lisäksi haluan kiittää Henry Fordin säätiötä, jonka apurahan turvin pääsin kesällä 2019 keskittymään HPF019-formulan parissa työskentelyyn ja sen ansioista keräämään lisää tietoa myös tätä insinööriyötä varten.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni ja lähisukulaisiani, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua opintojeni ajan sekä erityisesti tätä insinööriyötä tehdessä.

Vantaalla 11.3.2020

Juho Salminen

# Sisällys

## Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
1.1	Formula Student	1
1.2	Aerodynamiikkapaketti Formula Student -autoissa	1
1.3	Työn tavoitteet	2
2	Aerodynamiikka	3
2.1	Tausta	3
2.2	Bernoullin laki	3
2.2.1	Ilman kokoonpuristumattomuus	3
2.2.2	Bernoullin yhtälö	4
2.2.3	Kineettinen energia	6
2.3	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	7
2.4	Rajakerros	8
2.4.1	Viskoositon ja viskoosinen virtaus	9
2.4.2	Rajakerroksen muodostuminen ja merkitys	9
2.5	Aerodynamiikan vaikutus kilpa-autoon	10
2.5.1	Painekerroin	11
2.5.2	Downforce	12
2.5.3	Ilmanvastus	13
2.5.4	Lift/drag ratio	15
2.5.5	Aerodynaaminen balanssi	15
2.5.6	Maaefekti	17
2.6	Aerodynaamiset komponentit kilpa-autoissa.	18
2.6.1	Siipiprofiili	18
2.6.2	Päätylevyt	22
2.6.3	Diffuusori	24
2.6.4	Gurneyn flap	26
3	CFD-laskenta	27
3.1	CFD-laskennan taustaa	27
3.2	Laskentaverkko	29

3.3	Käytetty turbulenssimalli	31
4	Suunnitteluprosessin aloitus	32
4.1	Aerodynamiikkasuunnittelun tavoitteet	32
4.2	Suunnittelussa käytetyt työkalut	34
4.3	Aikataulutus	36
4.4	Formula Student Germanyn aerodynamiikkasäännöt	37
4.5	Resurssit ja suunnitteluprosessin järjestely	40
5	Aerodynamiikkapaketin suunnittelu	41
5.1	Etusiipi	41
5.1.1	Etusiiven eri versioiden suunnittelu	41
5.1.2	Valitun version yksityiskohtien muokkaaminen	44
5.1.3	Etusiiven lopullinen design	44
5.2	Sivusiivet	47
5.2.1	Sivusiipien ideointi	47
5.2.2	Sivusiipien designin valinta ja viimeistely	51
5.3	Diffuusori	54
5.4	Takasiipi	55
5.4.1	Uuden takasiiven lähtökohdat ja suunnittelu	55
5.4.2	Takasiiven lopullinen design	57
5.5	Nose cone -siivekkeet	59
5.6	Lopullinen aerodynamiikkapaketti	62
6	Mekaaninen suunnittelu	66
6.1	Siipirakenteet	66
6.2	Siipien kiinnitykset	68
7	Aerodynamiikkapaketin rakentaminen	70
7.1	Valmistus- ja kokoonpanoprosessi	70
7.2	Valmistuskauden aikataulu ja onnistuminen	72
8	Aerodynamiikkapaketin testaaminen	73
8.1	Testikaudella tulleiden ongelmien korjaus	73
8.2	Alustan vaikutus aerodynamiikkaan	75
8.3	Vertailut HPF018:n ja HPF019:n välillä	78

8.4	Siipikonfiguraatioiden testaus	79
9	CFD-laskentamenetelmien kehittäminen ja testaaminen	81
9.1	CFD-Laskennan tarkkuuden parantaminen	81
9.2	Turbulenssimallien testaus	81
9.3	Laskentamenetelmien jatkokehittäminen	82
10	Loppupäätelmät	82
10.1	Aerodynamiikkapaketin onnistuminen ja aikataulussa pysyminen	82
10.2	Parannuskohteet	83
	Lähteet	85
	Liitteet	
	Liite 1. Aerodynamiikka-osa-alueen edistymistaulukko	
	Liite 2. Kuvia HPF019-auton CFD-laskennan jälkikäsitteystä	
	Liite 3. Laskentatulokset HPF019 varustettuna nose cone -siivekkeillä	
	Liite 4. Laskentatulokset HPF019 low-drag-asetus	
	Liite 5. Laskentatulokset HPF019 30 mm:n ajokorkeudella	
	Liite 6. Laskentatulokset HPF019 rungon 2 asteen kallistumalla 45 mm:n ajokorkeudessa	
	Liite 7. Laskentatulokset HPF019/30-versiosta K-Epsilon-turbulenssimallilla	
	Liite 8. Laskentatulokset HPF019/30-versiosta K-Omega-turbulenssimallilla	
	Liite 9. Pyörähtäneen HPF019-auton laskentatulokset ja virtauslinjat	
	Liite 10. Sivuttais- ja pitkittäiskiivyyden kuvaaja, HPF018 ilman siipiä ja HPF019	

## Lyhenteet ja käsitteet

TKI	Tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminta
HPF0XX	Metropolia Motorsportin formulan mallinimi
Mach	Äänennopeus, standardiolosuhteissa 340,3 m/s
Downforce	Negatiivinen noste
Drag	Ilmanvastus
CFD	Computational Fluid Dynamics, laskennallinen virtausdynamikka
CSC	Tieteen ja tietotekniikan keskus
CAD	Computer Aided Design
Desing freeze	Määritelty päivämäärä suunnittelun deadlineille
TSAL	Tractive System Active Light
Nose cone	Formula Student -autoissa komponentti, jonka tarkoitus tuoda muotoa auton keulalle.
Rake	Auton lattiatason kulma maatasoon nähden
MoTeC	Auton ajodataa keräävä komponentti



# 1 Johdanto

## 1.1 Formula Student

Formula Student on suunnittelukilpailu, jossa yliopistot ja ammattikorkeakoulut kilpailevat keskenään kansainvälisessä moottoriurheilusarjassa. Sarja on alun perin lähtöisin Yhdysvalloista, mutta nykyään sarjan kovatasoisimmat kilpailut ovat useimmiten olleet Saksan Formula Student Germany sekä Unkarissa pidetty Formula Student East. Kilpailut koostuvat business-, design-, dokumentointi- sekä kilvanajo-osuuksista. Eri osuuksissa suoriutuminen pisteutetään ja kokonaiskilpailussa järjestys määräytyy kerättyjen kokonaispisteiden perusteella. Metropolia Motorsport on Metropolia ammattikorkeakoulussa toimiva TKI-projekti, jossa suunnitellaan ja rakennetaan vuosittain prototyyppi-kilpa-auto Formula Student -sarjaan.

Formula Student on erinomainen väylä kerätä kokemusta ja osaamista ajoneuvon sekä koneiden suunnittelusta, valmistamisesta ja testauksesta. Erityisesti Keski-Euroopassa työelämä arvostaa sarjan opiskelijoille tuomaa tietotaitoa ja monet moottoriurheilutiimit palkkaavatkin usein Formula Studentissa opiskeluaikoinaan kokemusta keränneitä insinöörejä.

Metropolia Ammattikorkeakoululla on pitkät perinteet Formula Student -sarjaan osallistumisesta, sillä Metropolia Motorsport formulatiimi on perustettu jo vuonna 2000. Tiimi on rakentanut 15 kilpa-autoa ja tässä insinööriytyössä on keskitytty tiimin kuudennentoista auton aerodynamiikkapakettien suunnitteluun ja kehitystyöhön.

## 1.2 Aerodynamiikkapaketti Formula Student -autoissa

Vuoteen 2010 mennessä Formula Student -autoissa ei pääsääntöisesti ollut siipiä eikä aerodynamiikkaa pidetty suunnittelussa kovinkaan tärkeänä tekijänä. Aerodynamiikan ymmärryksen kasvettua, sääntöjen muututtua 2010-luvun taitteessa ja CFD-ohjelmien tultua insinööriopiskelijoiden ulottuville on Formula Student -autoihin alettu suunnitella ja

rakentaa aerodynamiikkapaketteja enenevässä määrin. Aerodynamiikkapakettien hyödyistä on kiistelty, mutta esimerkiksi kaikki kilpailukykyiset tiimit ovat päätyneet käyttämään aerodynamiikkapaketteja autoissaan. Metropolia Motorsport suunnitteli ja rakensi ensimmäisen aerodynamiikkapakettinsa vuonna 2014 HPF014-autoon, ja tämän jälkeen siivet ja diffuusori ovat olleet jokaisessa tiimin rakentamassa kilpa-autossa.

Syksyllä 2017 tiimi testasi aerodynamiikkapaketin hyötyjä konkreettisesti ratatesteillä ja tällöin kosteissa olosuhteissa aerodynamiikkapaketin kanssa saavutetut kierrosajat osoittautuivat keskimäärin noin 3 sekuntia nopeammiksi kuin ilman aerodynamiikkapakettia. Myös kesällä 2018 ajettiin testikierroksia ilman siipiä, ja tällöin kierrosajat olivat kuivissa ja aurinkoisissa olosuhteissa noin 2–3 sekuntia nopeampia siipien kanssa. Näistä testeistä voitiin todeta aerodynamiikkapaketilla olevan suurta merkitystä ja parannusta auton suorituskykyyn. Tämän vuoksi aerodynamiikkakehityksen ja uusien aerodynamiikkapakettien suunnittelun on katsottu olevan tiimin jatkuvuuden sekä kilpailukykyyn kannalta erittäin tärkeää.

### 1.3 Työn tavoitteet

Työn tavoite on suunnitella 2019 vuoden HPF019-autoon aerodynamiikkapaketti, valmistaa se sekä testata ja tutkia aerodynamiikkapaketin toimintaa. Aerodynamiikkapaketista on tarkoitus tehdä tehokkaampi kuin edeltävien autojen aerodynamiikkapaketeista korkeampien kaarreajonopeuksien saavuttamiseksi. Sen lisäksi tarkoitus on tutkia hienan CFD-laskentaa ja kehittää aerodynamiikkasuunnittelun metodeita, jotta aerodynamiikkasuunnittelu on tulevilla kausilla helpompaa ja toimivat suunnitteluperusteet paremmin tiedossa.

## 2 Aerodynamiikka

### 2.1 Tausta

Kilpa-autoissa aerodynamiikkaan on kiinnitetty huomiota lähes heti sen jälkeen, kun autokilpailut ovat yleistyneet, mutta kilpa-autoilun ensimmäisinä vuosikymmeninä keskityttiin aerodynamiikan suhteen lähinnä muotoilemaan kilpa-autoista virtaviivaisempia ja vähentämään siten ilman aiheuttamaa vastusta. Vasta 60-luvun lopussa alettiin käyttää aerodynamiikkaa tuottamaan negatiivista nostetta kasvattamaan kaarreajonopeuksia. Tämä käynnisti nopean aerodynaamisen kehityksen ja jo vuosikymmen myöhemmin käytettiin maaefektitunneleita ja monielementtisiipiä. Nykyään aerodynamiikka ja downforcen maksimointi on eräs tärkeimpiä osa-alueita huippuluokan kilpa-auton suunnittelussa.

### 2.2 Bernoullin laki

Bernoullin lain perusteella voidaan selittää, miksi virtausnopeuden muutos luo paineroa. Vaikka Bernoullin yhtälö on suljetun tilan virtauksista, on se silti hyödyllinen väline selittämään osaa aerodynamiikan ilmiöistä. Bernoullin laki on nimetty 1700-luvulla eläneen sveitsiläishollantilaisen fyysikon Daniel Bernoullin mukaan.

#### 2.2.1 Ilman kokoonpuristumattomuus

Virtaus, jossa fluidin tiheys ei muutu, on kokoonpuristumatonta, ja virtaus, jossa fluidin tiheys muuttuu, kokoonpuristuvaa. Kaikki luonnossa tapahtuvat virtaukset ovat kokoonpuristuvia virtauksia, mutta on kuitenkin tilanteita, joihin on mahdollista tehdä kokoonpuristumattoman fluidin oletus. Tällaisia tapauksia on esimerkiksi hydrodynamiikka, jossa homogeenisten nesteiden voidaan olettaa olevan kokoonpuristumattomia sekä usein myös maa-ajoneuvojen aerodynamiikka, jossa ilman virtaus matalan Mach-nopeuden virtauksissa (Mach alle 0,3) ei tee merkittävää muutosta ilman tiheyteen. Lentokoneaerodynamiikassa korkeilla nopeuksilla (lähellä Mach 1:tä ja siitä ylöspäin) sen sijaan ei voida tehdä kokoonpuristumattoman virtauksen oletusta. [1, s. 64.]

### 2.2.2 Bernoullin yhtälö

Koska ainetta ei synny eikä häviä ja edellisessä alaluvussa todettiin mahdolliseksi käyttää kokoon puristumattoman ilman oletusta, tilavuusvirta putkivirtauksessa on kaikissa putken poikkileikkauksissa sama. Jos siis putken pinta-ala muuttuu, on tällöin myös virtauksen nopeuden muututtava (kaava 1). [2, s. 359.]

$$q_{v_1} = q_{v_2} = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1)$$

*$q_{v_1}$  ja  $q_{v_2}$  ovat tilavuusvirta*

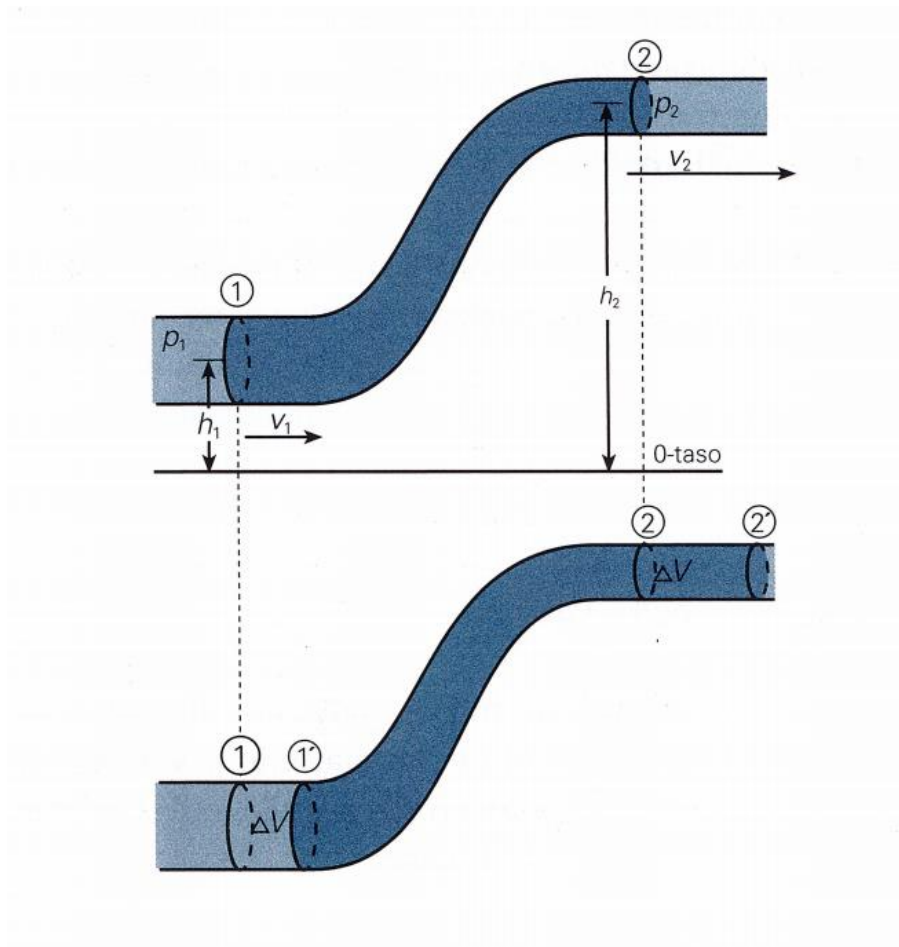
*$A_1$  on pinta-ala 1*

*$A_2$  on pinta-ala 2*

*$v_1$  on virtausnopeus 1*

*$v_2$  on virtausnopeus 2*

Erotetaan putkesta kaksi aine-erää eri kohdista putkea (kuva 1). Aine-erillä massat ja tilavuudet ovat yhtä suuria ja energiahäviöitä ei ole. Tällöin voimassa on Bernoullin laki (kaava 2). [2, s. 364.]



Kuva 1. Saman tilavuusvirran virtausnopeus putken eri osissa [1. s. 363]

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2)$$

$p_1$  on paine putken osassa 1

$p_2$  on paine putken osassa 2

$\rho$  on kaasun tai nesteen tiheys

$v_1$  on nopeus putken osassa 1

$v_2$  on nopeus putken osassa 2

$g$  on putoamiskiihtyvyys

$h_1$  on korkeus vertailukohdasta putken osassa 1

$h_2$  on korkeus vertailukohdasta putken osassa 2

Yhtälöstä nähdään, että mikäli virtausviivalla liikutaan siten, että nopeus kasvaa, on paineen vastaavasti pakko laskea. Bernoullin lain avulla voidaan siis perustella, miksi suuret virtausnopeudet luovat alipainetta. [2, s. 360–364.]

### 2.2.3 Kineettinen energia

Kun esine kulkee eteenpäin, sen liikkeeseen sitoutuu energiaa. Kun kappaleella on tietty nopeus, on sillä myös tietty määrä liike-energiaa eli kineettistä energiaa. Kineettinen energia (kaava 3) on riippuvainen sekä kappaleen nopeudesta että massasta, joten mitä kovempaa vauhtia kappale liikkuu tai mitä korkeampi kappaleen massa on, sitä enemmän kappaleella on kineettistä-energiaa. [2, s.160.]

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Bernoullin yhtälö voidaan myös määritellä yksinkertaistetumpana (kaava 4), jossa tuloksena on kokonaispaine systemissä [3, s. 25].

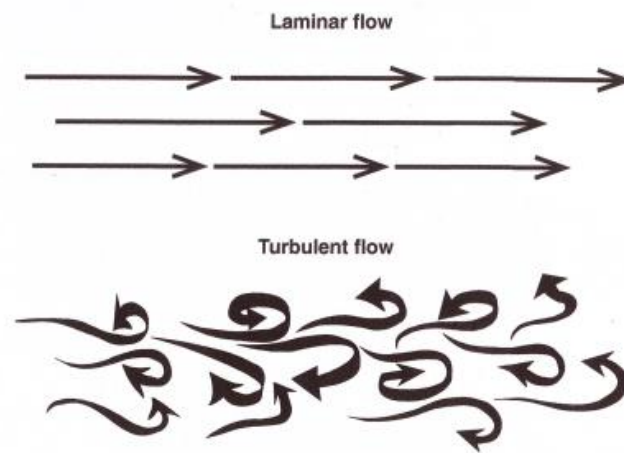
$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{vakio} \quad (4)$$

Koska energiaa ei synny eikä häviä, voidaan yksinkertaistetusta Bernoullin yhtälöstä ottaa kummatkin komponentit ja jakaa ne kahdeksi eri paineeksi. Staattista painetta, jota kutsutaan paine-energiaksi, pidetään ilman potentiaalienergiana tehdä työtä. Tässä tapauksessa työ on kohdistaa voimia kappaleen pintaan. Toinen osa yhtälöä näyttää huomattavan paljon samanlaiselta, kuin kineettisen energian kaava. Tietyn ilmamäärän suhteen, jossa tiheys ja massa ovat samoja, ovat yhtälötkin samoja. Tämä osa kaavasta on dynaamisen paineen komponentti, joka edustaa kaavassa ilman kineettistä energiaa. [3, s. 25.]

Koska kokonaisenergian virtauksessa täytyy olla sama, olettaen että energiahäviöitä ei ole, täytyy tällöin staattisen paineen muuttuessa myös dynaamisen paineen muuttua. Siis kun ilma virtaa auton ohi, siihen tulee nopeusmuutoksia ja kun virtausnopeus kasvaa, staattisen paineen täytyy laskea. [3, s. 25.]

### 2.3 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Kun virtauspartikkelit noudattavat tasaista linjaa toisiinsa nähden, ovat yhdensuuntaisia ja virtauksen liike näyttää järjestelmälliseltä, on virtaus laminaarista. Jos virtauspartikkelit kulkevat epämääräisesti toisiinsa nähden ja väliaikaisesti liikkuvat myös muihin suuntiin, on virtaus turbulenttista (kuva 2). Virtausten keskimääräinen nopeus voi kuitenkin olla kummassakin tapauksessa sama. [4, s. 28.] Se, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista, on hyvin tärkeä osa kilpa-auton aerodynamiikkaa. Virtauksen irtoaminen kappaleesta ja esimerkiksi ajoneuvon ilmanvastus sekä noste voivat riippua suuresti virtauksen laadusta.



Kuva 2. Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen virtauslinjat [4, s. 29]

Virtauksen laminaarisuuden tai turbulenttisuuden laskemisen on kehitetty Reynoldsin luku (kaava 5), joka on dimensioton numero, jonka laskentakaavan kehitti Osborne Reynolds 1800-luvulla. Reynoldsin luku on tärkeä osa aerodynamiikan testaamista, sillä sen avulla voidaan myös verrata testituloksia saman mallin eri nopeuksilla tai skaalattujen tuulitunnelimallien tuloksia täysikokoiseen malliin verrattuna, koska samalla mallilla eri mittakaavassa olevia virtauksia voidaan pitää samanlaisina, jos niiden Reynoldsin luvut ovat samoja. [4, s. 31.]

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (5)$$

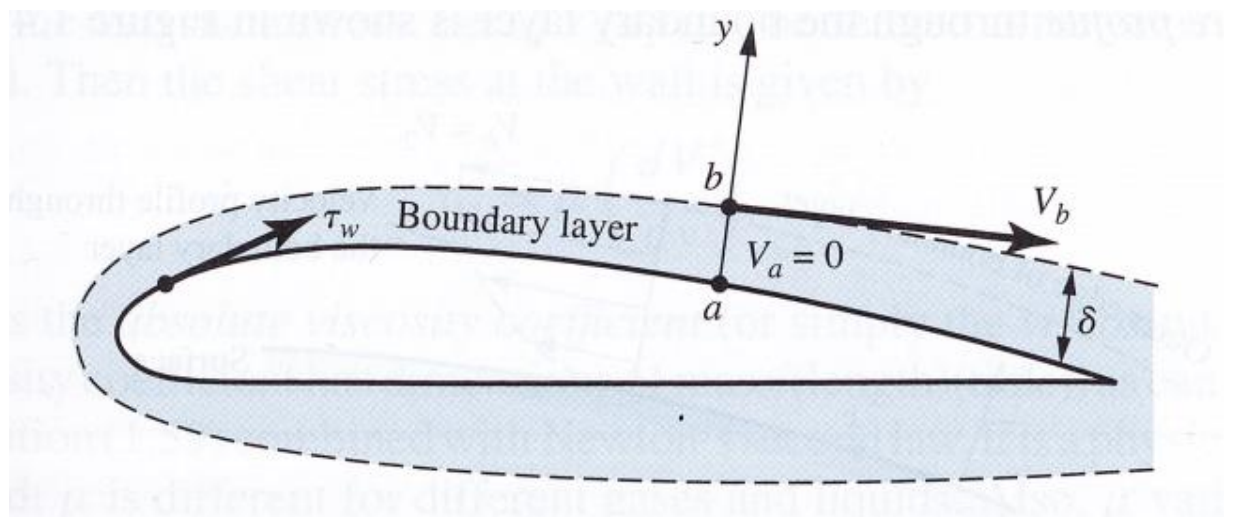
$L$  on kappaleen pituus

$\mu$  on viskositeetti

Suljetussa putkessa Reynoldsin luvun ollessa alle 2000, virtaukset ovat laminaarisia ja kun Reynoldsin luku on yli 3000, virtaukset ovat turbulenttisia. Näiden välissä oleva alue on transiioaluetta. Tätä transiioalueen alkamisarvoa kutsutaan myös nimellä kriittinen Reynoldsin numero. Vapaassa ulkoisessa virtauksessa kriittinen Reynoldsin luku on noin  $5 \cdot 10^5$ . [1, s. 376–377.] Laskemalla Reynoldsin lukua kilpa-auton ulkoiselle virtaukselle saa tulokseksi useita miljoonia, mistä voidaan päätellä kilpa-autosovelluksissa virtauksen olevan useimmiten turbulenttista [4, s. 32].

## 2.4 Rajakerros

Suurimmalla osalla ilmasta, joka virtaa kappaleen ympäri, leikkausvoimat ovat hyvin pieniä verrattuna kohtisuoriin voimiin kontaktipintaa vasten johtuen siitä, että virtauksessa ei tule sisäisiä nopeuseroja. Kontaktipintaa vasten on kuitenkin ohut ilmakerros, jossa syntyy suuria leikkausvoimia, ja sitä kutsutaan rajakerrokseksi (kuva 3). [5, s. 84–85.]



Kuva 3. Rajakerros siipiprofiilin ympärillä [1. s. 69]. Kuvassa rajakerros on korostetun paksu selvyiden vuoksi.

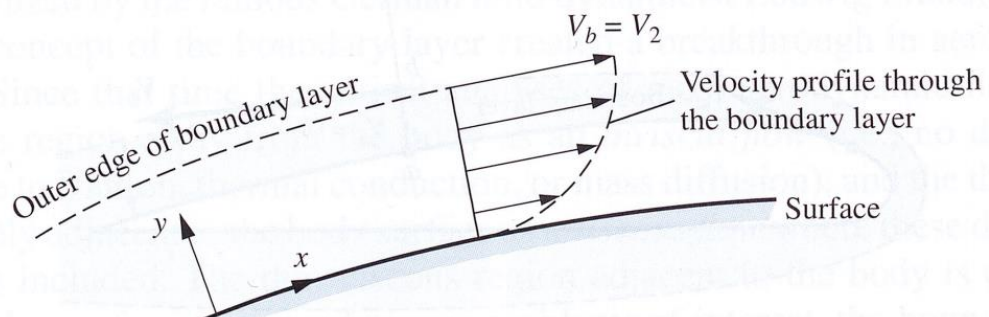


### 2.4.1 Viskoositon ja viskoosinen virtaus

Tärkeä ominaisuus fluideilla on molekyylien suhteellisen vapaa liikkuvuus. Kun molekyylit liikkuvat, ne kuljettavat massaa, energiaa ja liikemäärää sijainnista toiseen. Tämä molekyylien liike aiheuttaa viskositeetin (sisäisen kitkan), lämmönjohtavuuden ja diffuusion. [1, s. 62.] Kaikissa luonnossa tapahtuvissa virtauksissa nämä ominaisuudet ovat olemassa, ja näitä virtauksia kutsutaan nimellä viskoosinen virtaus. Viskoositon virtaus on sen sijaan virtausta, jonka oletetaan olevan kitkaton, lämmönjohtamaton ja diffuusioton ja vaikka viskoositonta virtausta ei todellisuudessa esiinny, monissa käytännön aerodynamiikan sovelluksissa on mahdollista tehdä oletama viskoosittomasta virtauksesta. [1, s. 63.]

### 2.4.2 Rajakerroksen muodostuminen ja merkitys

Rajakerrosilmion, jossa virtaus on jaettu viskoosiseen ja viskoosittomaan alueeseen, löysi saksalainen nestedynaamikko Ludwig Prandtl 1900-luvun alussa. Ilman viskoosisuudesta ja tämän aiheuttamasta kitkavoimasta johtuen ilmapirtauksessa oleva äärettömän pieni kerros ilmamolekyylejä tarttuu kappaleeseen, jolloin tässä kerroksessa ilmalla ei ole nopeutta suhteessa kappaleen pintaan. Tätä kutsutaan no-slip conditioniksi. [1, s. 68–69.] Tavanomaisessa rajakerrosanalyysissä oletetaan, että virtausolosuhteet rajakerroksen ulkoreunalla ovat samat kuin pintavirtaukset viskoosittoman nesteen analyysissä. Nopeus siis nousee rajakerroksessa kerroksittain kappaleen pinnasta vapaan virtauksen nopeuteen rajakerroksen ulkoreunalla (kuva 4). Koska rajakerros on myös hyvin ohut, nopeudenmuutoksen rajakerroksessa täytyy tapahtua hyvin pienellä alueella. [1, s. 70.]



Kuva 4. Virtausgradientit rajakerroksessa kappaleen pinnasta vapaaseen virtaukseen [1, s. 70]

Ilman viskositeetistä johtuvat leikkausvoimat rajakerroksessa syntyvät, kun lähellä kappaleen pintaa olevat ilmakerrokset liikkuvat toisiensa suhteen eri nopeuksilla. Nämä leikkausvoimat ovat samankaltaisia kuin esimerkiksi kitkavoimat kahden kiinteään kappaleen välillä. Tärkeää on näissä voimissa huomioida se, että ilman viskositeetti vie ilmavirtaukselta kineettistä energiaa ja muuttaa sitä lämmöksi ja virtauksen kineettisen-energian menetys on merkittävässä roolissa kilpa-auton aerodynamiikassa. [3, s. 23.]

Virtauksen edetessä kappaleen pinnalla eteenpäin muuttuu rajakerros usein paksummaksi, ja eri nopeuksilla kulkevat nopeuskomponentit virtauksessa nostavat myös rajakerroksen paksuutta. Tämä tarkoittaa siis sitä, että rajakerros voi olla aluksi ohut ja sisältää laminaarista virtausta ja sen jälkeen muuttua kappaleen pinnalla edetessään turbulenteiksi ja paksummaksi. Rajakerrokseen vaikuttaa esimerkiksi kappaleen muoto, pinnakarheus, pituus ja nopeus suhteessa ilmaan. Kilpa-auton pinnalla rajakerros voi aluksi olla muutaman millimetrin paksuinen ja laminaarinen ja muuttua vähitellen turbulenteiksi ja muutaman senttimerin paksuiseksi. [3, s. 24.]

Virtauksen irtoaminen kappaleesta on usein epätoivottu ilmiö aerodynamiikassa. Virtauksen irtoaminen johtuu siitä, että virtauksella rajakerroksessa on paljon vähemmän energiaa kuin sen ulkopuolella ja tietyssä pisteessä virtauksen kineettinen energia ei enää riitä pysymään kappaleen pinnassa rajakerroksen vaikutuksen vuoksi, jolloin virtaus irtoaa. Siipiprofiilissa tapahtuvaa virtauksen irtoamista kutsutaan siiven sakkamiseksi. [6.]

## 2.5 Aerodynamiikan vaikutus kilpa-autoon

Kilpa-auton aerodynamiikassa on kolme merkittävää asiaa, jotka vaikuttavat auton suorituskykyyn. Ne ovat auton negatiivinen nostevoima eli downforce, ilmanvastus eli drag sekä aerodynaaminen balanssi. Myös sivuttaissuuntaisia aerodynaamisia voimia esimerkiksi ristituulen vuoksi voi tulla, mutta tämän työn luonteen vuoksi näihin sivuttaisvoimiin ei ole tarpeen perehtyä.

Aerodynamiikan suunnittelemisessa kilpa-autoon pyritään yleensä niin korkeaan downforcen määrään kuin mahdollista siihen asti, kunnes säännöt rajoittavat downforcen

muodostamista tai kunnes ilmavastus nousee liian korkeaksi. Se, missä suhteessa ilmavastus nousee downforcen määrään suhteutettuna liian korkeaksi, riippuu monesta tekijästä, esimerkiksi radan profiilista, auton massasta tai tehosta. Aerodynaaminen balanssi määrittyy usein samalle alueelle kuin ajoneuvon painopiste, mutta myös kuljettajan preferenssien mukaan.

### 2.5.1 Painekerroin

Painekerrointa (kaava 6) voidaan käyttää kappaleessa sijaitsevien paine-erojen vertailuun, ja se on dimensioton mitta paikallisen staattisen paineen määrittelyyn. Painekerroin on hyödyllinen mitta aerodynaamisille ominaisuuksille, sillä paineen jakautuminen kappaleen pinnalla on riippumaton kappaleen nopeudesta, jolloin paine kerroin on sama kappaleen kaikilla nopeuksilla. [4, s. 42.]

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho v_\infty^2} \quad (6)$$

Painekerroin voidaan laskea myös yksinkertaisemmalla tavalla, jos ilman tiheys ei muutu (kaava 7). Koska kokonaispaine on vakio, tulee lokaalin ja vapaan virtauksen staattisten paineiden erot siitä, kuinka paljon näiden dynaamiset paineet eroavat toisistaan [4, s. 42].

$$C_p = \frac{\frac{1}{2}\rho(v_\infty^2 - v^2)}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho v_\infty^2} \Rightarrow C_p = \frac{v_\infty^2}{v_\infty^2} - \frac{v^2}{v_\infty^2} \Rightarrow C_p = 1 - \frac{v^2}{v_\infty^2} \quad (7)$$

Kun virtausnopeus on nolla, paine kerroin on 1. Kun paine kerroin on alle 1 mutta yli 0, virtaus kulkee hitaammalla nopeudella kuin vapaa virtaus, ja kun virtausnopeus on korkeampi kuin vapaalla virtauksella, on paine kerroin negatiivinen. Negatiivisella paine kerrotoimella ei ole varsinaisesti tarkkaa maksimia, mutta positiivinen paine kerroin ei voi olla korkeampi kuin 1. [4, s. 42.]

## 2.5.2 Downforce

Kilpa-autoilussa erittäin tärkeää on saada renkaat tuottamaan mahdollisimman paljon pitovoimaa kaarreajoa varten. Mitä enemmän pyöränkuormaa kohdistuu renkaille, sitä voimakkaammin renkaat painautuvat tietä vasten ja sitä suurempi on pitovoima. Ongelmana tavanomaisessa pyöränkuorman kasvattamisessa on, että sitä tehdään lisäämällä autolle massaa. Korkeammalla massalla auto tarvitsee enemmän pitovoimaa pysymään ajolinjallaan luistamatta ja enemmän voimaa jarruttamaan sekä kiihdyttämään autoa. Tällöin tullaan lopputulokseen, että pyöränkuormaa ei kannata korottaa lisäämällä autolle massaa. [4, s. 4.]

Pyöränkuormaa halutaan siis korottaa lisäämättä autolle massaa. Pyöränkuormaa voidaan korottaa aerodynaamisilla komponenteilla, sillä ilman virratessa ajoneuvon ohi, kohdistuu autoon ilmavirtauksessa olevien paine-erojen vuoksi nostevoimaa. Kun nostevoima on negatiivista, pyöränkuorma autolla kasvaa. Koska auton massa ei kuitenkaan muutu, auto saa pyöränkuorman kasvusta tulleen hyödyn ilman massan lisäyksen tuomaa haittaa. Negatiivista nostevoimaa kutsutaan myös nimellä downforce.

Konkreettisenä esimerkkinä downforcen merkitykselle on vaikkapa kuvitteellisen kilpa-auton ajonopeudet kaarteessa. Lähtötilanteessa auton renkaiden kitkakertoimeksi on selvyuden vuoksi valittu 1 ja auton massa on 1200 kilogrammaa. Koska kitkakerroin on 1, on keskeiskiihtyvyys autolla  $9,81 \text{ m/s}^2$  ennen kuin auton pyörät alkavat luistaa. Kaarrenoitus ajotilanteelle (kaava 8) voidaan laskea johdetulla keskeiskiihtyvyyden kaavalla.

$$v = \sqrt{a_n r} \quad (8)$$

$$v = \sqrt{1 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 100\text{m}} = 31,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Kaarteeseen voidaan ajaa siis 31,3 metrin sekuntivauhdilla eli noin 113 kilometrin tuntivauhdilla. Sen sijaan jos auto tuottaisi 113 kilometrin tuntivauhdissa 2000 newtonia downforcea, voi auto saavuttaa suuremman keskeiskiihtyvyyden (kaava 9), sillä pitovoima nousee, mutta ajoneuvon massa vastaavasti pysyy samana [3, s. 42–43].

$$\frac{1200\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 2000\text{N}}{1200\text{kg}} = 11,48 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (9)$$

Kun korkeampi keskeiskiihtyvyys on nyt tiedossa, voidaan kasvanut kaarreajonopeus laskea (kaava 10).

$$v = \sqrt{1 \cdot 11,48 \frac{m}{s} \cdot 100m} = 33,9 \frac{m}{s} \quad (10)$$

Kun auto tuottaa 2000 newtonia downforcea, kaarreajonopeus on noussut 33,9 metrin sekuntivauhtiin eli 122 kilometrin tuntivauhtiin. Noussut nopeus on itse asiassa vieläkin suurempi, sillä downforce kasvaa nopeuden neliössä. Lisääntyneen kaarrenopeuden lisäksi downforcen avulla saadaan myös seuraavalle suoralle korkeampi lähtönopeus ja jos ilmastusta ei huomioida, korkeampi kiihtyvyys. Auto myös pysähtyy parantuneen pitovoiman ansiosta nopeammin, jolloin esimerkiksi jarruttamismatkat kaarteisiin lyhenevät. [3, s. 42–43.] Edellä mainitut laskut ovat yksinkertaistettuja, sillä niissä ei ole otettu huomioon esimerkiksi kitkakertoimen muutosta kasvaneen pyöränkuorman johdosta, mutta niistä voi kuitenkin havaita downforcen tuoman hyödyn kaarreajotilanteissa.

Koska downforce/noste on riippuvainen kappaleen nopeudesta, käytetään tämän vuoksi usein nostekerrointa (kaava 11) kuvaamaan kappaleeseen kohdistuvaa downforcea tai nostetta, sillä nostekerroin ei riipu kappaleen nopeudesta vaan pelkästään sen muodosta [4. s. 50–51].

$$C_l = \frac{1}{2} \frac{F_l}{\rho v^2 A} \quad (11)$$

Nostekerrointa laskiessa kokonaisissa ajoneuvoissa pinta-alana käytetään ajoneuvon otsapinta-alaa ja siipiprofiilien nostekertoimissa siiven pinta-alaa alhaalta päin katsottuna.

### 2.5.3 Ilmanvastus

Ilmanvastus eli drag on kilpa-auton aerodynamiikasta puhuttaessa lähes aina negatiivinen seikka. Ilmalla on massa, tiheys ja viskositeetti, ja kun esine kulkee eteenpäin, sen täytyy voittaa tämä ilman ominaisuuksista johtuva liikevastus.

Kun kappale kulkee ilman lävitse, jakautuu ilman virtaaminen kappaleen pintojen välillä. Kohdassa, jossa virtaus jakautuu, on virtausnopeus lokaalisti 0. Tämä tarkoittaa, että staattisen paineen on oltava korkeimmillaan tässä pisteessä ja painekerroin on 1. Kun virtaus etenee kappaleen pinnalla, sillä on oltava virtausnopeutta kappaleeseen nähden ja tämän myötä virtauksella on pienempi ilmanpaine Bernoullin yhtälön mukaisesti. Kun virtaus saavuttaa kappaleen perän, painekerroin ei kuitenkaan saavuta takaisin lukemaa 1 vaan jää sen alle. Tämä ilmiö johtuu virtauksen irtoamisesta kappaleen takaosasta. Paine kertoimen ollessa kappaleen edessä korkeampi kuin takana on seurauksena liikevastusta kappaleelle. Tätä komponenttia ilmanvastuksessa kutsutaan ilman painevastukseksi. [4, s. 44–45.]

Toinen komponentti ilmanvastuksesta on ilman kitkavastus. Ilmalla on viskoosisia ominaisuuksia, vaikka vapaassa virtauksessa ne ovatkin olemattomia. Ilman viskoosiset ominaisuudet rajakerroksessa kuitenkin aiheuttavat sen, että ilman ja kappaleen välille syntyy kitkavoimia, joka vastustaa kappaleen kulkua. Mitä paksumpi rajakerros on, sitä korkeampi kitkavastus ilmalla on ja liian nopeasti paksuntuva rajakerros johtaa virtauksen irtoamiseen ja siitä johtuvaan ilmanvastukseen kasvamiseen sekä downforcen menetykseen. [4, s. 33.]

Kolmas ilmanvastusta aiheuttava komponentti on nosteen tai downforcen aiheuttama ilmanvastus eli indusoitu vastus. Koska siiven pintojen välillä on paine-ero, pyrkii ilma kulkeutumaan siiven kärjissä korkeapainepinnalta siiven matalapainepinnalle. Siksi siiven reunoille muodostuu pyörteet, jotka aiheuttavat ilmanvastusta. Pyörteiden koko on suhteessa siiven nostevoimaan. [4, s. 126.] Indusoidulla vastuksella on merkittävä rooli siivillä varustetun auton kokonaisilmanvastukseen, joten sen vuoksi indusoitua vastusta voi joutua huomioimaan kilpa-auton aerodynamiikan suunnittelussa runsaastikin [4, s. 131–132].

Kuten noste, myös ilmanvastus nousee nopeuden neliössä ja kappaleen ilmanvastuksen kuvaamiseen käytetään usein ilmanvastuskerrointa (kaava 12) samalla tavalla kuin nosteen kuvaamiseen nostekerrointa [4, s. 50–51].

$$C_d = \frac{1}{2} \frac{F_d}{\rho v^2 A} \quad (12)$$

Pinta-alana käytetään tässäkin tapauksessa kokonaisissa ajoneuvoissa ajoneuvon ot-sapinta-alaa ja siipiprofiileissa siiven pinta-alaa alhaalta päin katsottuna.

#### 2.5.4 Lift/drag ratio

Lift/drag ratio, lyhyesti L/D ratio kertoo, kuinka nostevoima suhteutuu kohteen aiheutta-maan ilmanvastukseen. Nimensä mukaisesti L/D ratio voidaan laskea siis nosteen ja ilmanvastuksen osamäärällä. Kyseessä on siis eräänlainen aerodynaaminen hyötysuhde. L/D ratioiden vertailuilla voidaan esimerkiksi selvittää lentokoneelle paras aero-dynaaminen hyötysuhde tai kilpa-autolle parhaan hyötysuhteen siipikonfiguraatio.

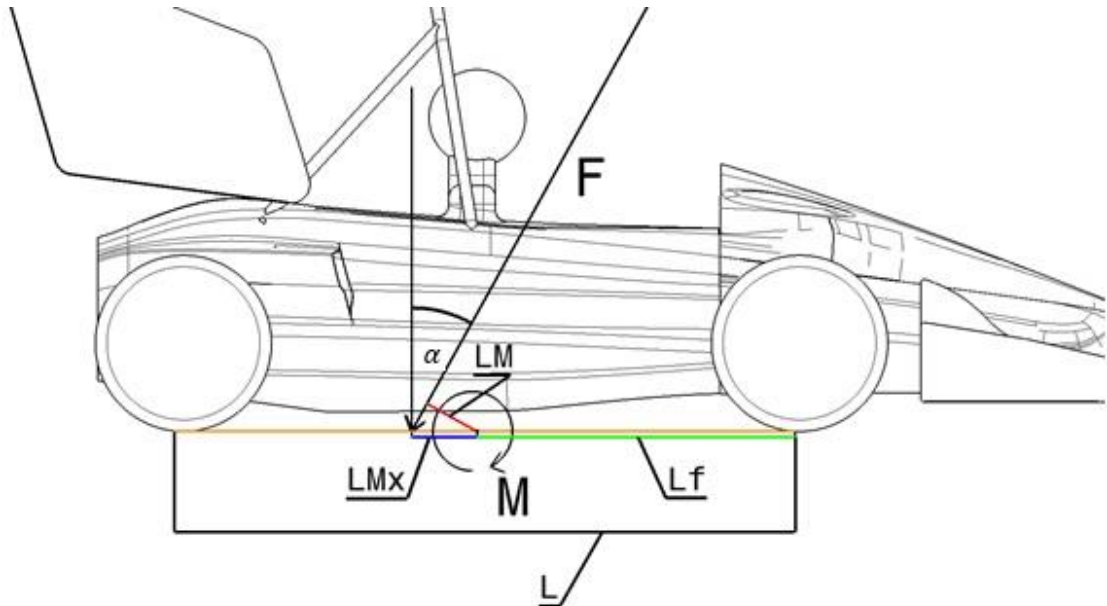
Lentokoneella hyötysuhdelaskelmissa L/D ratio on hyödyllinen mitta, sillä kun riittävä nostevoima lentokorkeudessa pysymiseen on saavutettu, voidaan tämän jälkeen korke-ammalla L/D ratiolla parantaa lentokoneen lentomatkan pituutta [7]. Kilpa-autoilussa pa-ras hyötysuhde ei kuitenkaan takaa parasta kierrosaikaa tai parasta suorituskykyä, sillä hyvin mutkaisilla ja lyhytsuoraisilla radoilla ilmanvastuksen merkitys vähenee ja maks-iimalisen downforcen merkitys kasvaa. Vastaavasti esimerkiksi hyvin nopeilla ja pit-käsuoraisilla radoilla voidaan panostaa mahdollisimman pieneen ilmanvastukseen L/D ration ja downforcen kustannuksella. Tämän vuoksi Formula Student- sekä kilpa-autotii-mit eivät suunnittele autojensa aerodynamiikoita käyttämällä parasta L/D-ratiota aerody-namiikan suunnittelun perustana.

#### 2.5.5 Aerodynaaminen balanssi

Aerodynaaminen balanssi, lyhennettynä aerobalanssi, tarkoittaa aerodynaamisen kuor-man jakautumista etu- ja taka-akselille. Tässä työssä aerobalanssi on laskettu statiikan oppien avulla [8, s. 29–33] vapaakappalekuvan (kuva 5) osoittamalla tavalla. Tällä me-netelmällä aerobalanssin laskemiseksi tarvitaan lähtötietoina auton ilmanvastus, down-force, momentti autolle määritellyn akselin ympäri sekä auton akseliväli.

Laskutavassa lasketaan ilmanvastuksen ja downforcen voimien resultantti (kaava 13), ja sen kulma autolle määritellyn y-akselin suhteen (kaava 14). Näiden avulla lasketaan mo-menttivarren pituus (kaava 15) ja varren pituuden avulla aerodynaamisten voimien re-sultantin etäisyys keskipisteestä (kaava 16). Kun tämä on tehty, voidaan aerobalanssi

taka-akselilta laskea jakamalla aerobalanssin resultantin etäisyys etuakselilta koko akselivälillä (kaava 17) ja tämän jälkeen voidaan laskea myös aerobalanssi etuakselilta (kaava 18).



Kuva 5. Formula Student -auton aerodynaamisen voiman vapaakappalekuvio

$$F = \sqrt{F_d^2 \cdot F_l^2} \quad (13)$$

$$\tan^{-1} \left( \frac{F_d}{F_l} \right) = \alpha \quad (14)$$

$$L_M = \frac{F}{M} \quad (15)$$

$$L_{Mx} = \frac{L_M}{\cos \alpha} \quad (16)$$

$$\text{Aerobalance rear} = \frac{L_f + L_{Mx}}{L} \quad (17)$$

$$\text{Aerobalance front} = 1 - \text{Aerobalance rear} \quad (18)$$

Aerobalanssi vaikuttaa kilpa-auton käyttöön siten, että aerobalanssiltaan etupainotteen auto tuo etuakselin pyörille runsaammin pitoa. Tällöin tiukemmat käännökset ja ajolinjat voivat onnistua ja auto ohjautuu kaarteisiin aggressiivisesti. Negatiivisina puolina ovat taka-akselin pyörien heikomman pidon vuoksi mahdollisuus takapyörien todennäköisempään luistoon ja auton yliohjautuminen sekä yllättävät hallinnanmenetykset yliohjautumisesta johtuen. [9.]



Sen sijaan, jos aerobalanssi on takapainotteinen, pitoa on taka-akselin pyörillä enemmän. Tällöin auto voi aliohjata mutkaan eikä optimaalista ajolinjaa saavuteta auton puskiessa sen ohi. Positiivisena puolena on auton ohjautuminen mutkaan vakaammin eikä auto käyttäydy yhtä ennalta arvaamattomasti, sillä auton perä pysyy radassa tiukemmin kiinni ja yllättäviä hallinnanmenetyksiä ei tapahdu. [9.] Tämä voi auttaa kuljettajaa ottamaan autosta maksimaalisen suorituskyvyn ja kasvattaa kuljettajan itseluottamusta sekä luottoa autoon.

Aerodynaaminen balanssi korostuu, jos nopeuseroja radalla on runsaasti, sillä jos auton aerodynamiikka on painottunut esimerkiksi vahvasti etuakselille, voi auto aliohjata hitaissa kaarteissa, kun aerodynamiikan osuus ajodynamiikkaan on vielä pieni, mutta yliohjata nopeissa kaarteissa aerodynamiikan merkityksen kasvaessa. Aerodynaamisen balanssin valintaan voi vaikuttaa myös kuljettajan preferenssit, sillä osa kuljettajista suosii ali- ja osa yliohjaavampia autoja.

#### 2.5.6 Maaefekti

Kilpa-auton siiven tuottama downforce nousee, mitä lähemmäs maata kohden siipeä lasketaan. Ilmiö perustuu Bernoullin lakiin. Siiven lähestyessä maata se muodostaa samanlaisen ilmiön maan kanssa kuin putken halkaisijan väheneminen suljetussa putkivirtauksessa. Tässä tilanteessa virtausnopeus siiven alapuolella kasvaa ja paine laskee, kunnes tietyssä pisteessä lähellä maata siipi menettää tehoaan, koska siiven alle ei enää pääse riittävän suurta massavirtaa ja kineettinen energia ei enää riitä virtauksen kiinnitykseen siiven pinnassa. [3, s. 126.]

Esimerkiksi maaefektin vuoksi etusiipi on aerodynaamiselta hyötysuhteelta parempi kuin takasiipi ja etusiivestä on myös tämän myötä helpompi tehdä tehokkaampi kuin takasiivestä. Siipien lisäksi maaefektiä hyödynnetään diffuusoreissa ja auton pohjan aerodynamiikassa. Maaefektin ymmärrys ja hallinta ovat kilpa-auton aerodynamiikassa tärkeitä myös siksi, että aerodynaamiset komponentit, jotka hyödyntävät maaefektiä voivat olla erityisen herkkiä auton nyökkäykselle, niaamiselle ja rungon kallisteluille rata-ajossa.

## 2.6 Aerodynaamiset komponentit kilpa-autoissa.

Tavoitellessaan vähäisempää polttoaineen tai energian kulutusta tai vaihtoehtoisesti tavoitellessa kilpa-autolla parempia kierrosaikoja, insinöörit yrittävät kehittää jatkuvasti uusia aerodynaamisia ratkaisuja ja komponentteja. Tässä luvussa kuvataan tämän työn toteuttamisen kannalta tärkeät aerodynaamiset komponentit, mutta erilaisia komponentteja on useita muunlaisiakin.

### 2.6.1 Siipiprofiili

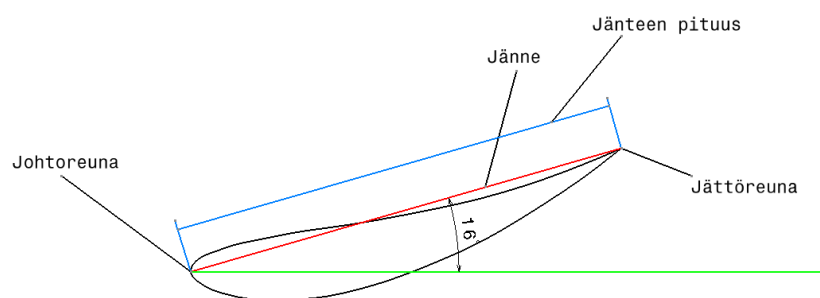
Yleensä sanasta siipi tulee mieleen lentokoneen tai linnun siipi. Siiven toimintaperiaate on tuottaa nostetta ilmanvirtauksen avulla. Siiven nostetta aiheuttavien ilmiöiden ymmärtäminen on haastavaa, ja väärät teoriat siiven nosteen alkuperästä voivat aiheuttaa hankaluuksia esimerkiksi suunnittelijalle tai CFD-laskijalle. Tässä työssä pyritään selittämään siiven toimintaa suhteellisen kattavasti, mutta kuitenkin helposti lähestyttävällä tavalla.

Kilpa-autoissa siipien toimintaperiaate on täsmälleen sama kuin lentokoneissa, mutta niiden tarkoitus on tuottaa downforcea. Sen vuoksi siivet ovat käännetty kilpa-autoissa ylösalaisin (kuva 6). Formula Student -autoissa käytetään siipiprofiileita etusiivissä, takasiivissä ja sivusiivissä ja joskus myös muuallakin autossa voidaan käyttää siipiprofiilin muotoisia ilmanohjaimia. Siivet voidaan asettaa siten, että ne koostuvat useammasta siipielementistä. Tällöin suurinta siipielementtiä kutsutaan pääprofiiliksi ja muita elementtejä siivekkeiksi.

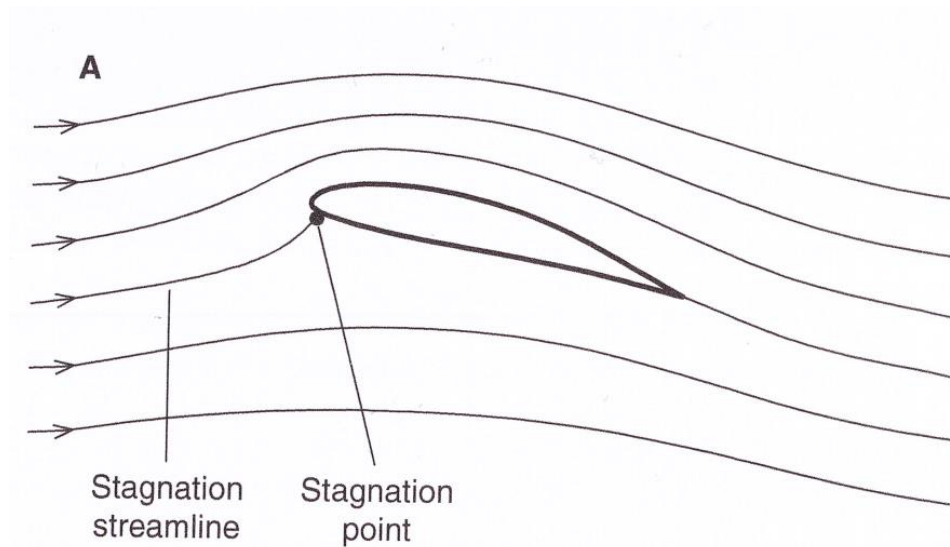


Kuva 6. Lancia LC2 C-ryhmän kilpa-auton takasiipi

Ensimmäinen piste siipiprofilissa (kuva 7), joka kohtaa virtaavan ilman on johtoreuna. Johtoreuna ei kuitenkaan ole välttämättä se piste, jossa virtaus jakautuu siiven ylä- ja alapinnoille. Tätä pistettä kutsutaan stagnaatiopisteeksi (kuva 8) ja siellä virtauksen paikallinen nopeus on 0. [4, s. 109.]



Kuva 7. Kilpa-auton siipiprofiilin mitat



Kuva 8. Stagnaatiopiste siipiprofiilissa. Huomaa, että stagnaatiopiste ei ole siiven johtoreunassa [4, s. 111]

Jättöreuna on nimensä mukaisesti siiven takimmais in piste, jossa siiven ylä- ja alapinta kohtaavat. Kiinnittyneessä virtauksessa virtauslinjat kohtaavat jättöreunassa. Muita tärkeitä mittoja siivessä ovat siiven jänne, joka on suora jana johtoreunan ja jättöreunan välillä, ja kohtauskulma, joka on vapaan virtauksen kulkutas on ja jänteen välinen kulma. Kohtauskulma voidaan verrata tarvittaessa myös esimerkiksi maatasoon. Siipiprofiilin leveyttä alhaaltapäin katsottuna kutsutaan jänneväliksi tai kärkiväliksi. [3, s. 87–88.]

Siiven sivusuhte (kaava 19) on etenkin lentokoneissa tärkeä mitta. Kilpa-autoilussa sivusuhteen merkitys on vähäisempi, sillä siipien mitat määritetään usein kunkin kilpa-autoluokan sääntökirjan mukaan ja sivusuhteeksi päätyy se arvo, jonka säännöt sattuvat sallimaan. Formula Student on kuitenkin poikkeus, sillä esimerkiksi etusiivelle ei ole asetettu vuoden 2019 säännöissä maksimileveyttä [10, s. 53]. Korkeampi sivusuhte vastavankokoisilla siivillä voi tuoda hieman lisää nostetta siivelle ja vähentää siiven ilmanvastusta. [3, s. 88.]

$$AR = \frac{b}{c} \quad (19)$$

*b on siiven jänneväli*

*c on siiven jänne*

Itse siipiprofiilin toiminnasta yleisin väärin esitetty teoria siiven tuottamaan nosteeseen on ns. kauttakulkuajan teoria, jossa stagnaatiopisteessä jakautuvien virtauspartikkeleiden pitäisi kulkea saman ajan puitteissa siipiprofiilin läpi ja kohdata toisensa siiven jättöreunalla. Tämä teoria kuulostaa aluksi järkevältä, sillä kauttakulkuajan ollessa sama täytyisi siiven alapuolella olevan ilman kulkea nopeammin siiven kaarevan muodon vuoksi. Bernoullin lain mukaisesti virtausnopeuksien ero muodostaisi paine-eroa ja tuottaisi siivelle nostetta. Teoria myös selittäisi, miksi kasvattamalla siiven kohtauskulmaa voidaan saavuttaa lisää nostetta, sillä stagnaatiopisteen siirryttyä ylemmäs siipiprofiilia, nousee virtausmatka siiven alapuolella pidemmäksi. Se, miksi teoria ei kuitenkaan voi pitää paikkansa, on syntyvän nosteen määrän aliarviointi, eikä teoria myöskään esimerkiksi selitä, miksi tasainen levy tai purje voi tuottaa nostetta. Myöskään ilmapartikkelit eivät välttämättä kohtaa jättöreunan kohdalla, kuten esimerkiksi Cambridgen yliopiston tutkijan Holger Babinskyn julkaisemalla videolla osoitetaan. [11.]

Oikeampi selitys siiven tuottamalle nosteelle on ilmanvirtauksen kaarevuudessa. Jos virtauslinja on kaareva, tarkoittaa se sitä, että olemassa on oltava paine-eroa. Mitä kaarevampi virtauslinja on, sitä suurempi paine-eronkin on oltava. Lähellä siiven alapintaa kulkeva virtaus on paljon kaarevampi kuin vapaan virtauksen kaarevuus kauempana alapinnasta. Tällöin siiven alapinnalla vallitsee alipaine. Siiven yläpuolella kaarevuus sen sijaan on paljon lievempi, ja virtauslinjat voivat jopa kaareutua enemmän, kun siivestä kuljetaan ylöspäin lähemmäs vapaata virtausta. Tästä virtauslinjojen kaarevuuksista johdettu paine-ero siipien ylä- ja alapintojen välillä tuottaa siis siivelle nostevoimaa. [12.]

Virtauksen kaarevuusteoria ei ole ristiriidassa muiden fysiikan lakien ja ilmiöiden suhteen ja tämän työn puitteissa se on riittävä selitys sille, miksi siipiprofiili tuottaa nostetta. Kasvaneen kohtauskulman vaikutus nosteen kasvuun on myös selitettävissä, sillä siiven kasvanut kohtauskulma nostaa virtauksen kaarevuutta muuttamalla stagnaatiopisteen sijaintia. Bernoullin yhtälö myös selittää sen, miksi virtausnopeudet siiven yläpuolella ja alapuolella poikkeavat toisistaan.

Syy sille, miksi kaareva virtaus ei irtoa siivestä, vaan pysyy kiinnittyneenä siiven pintaan, on ilman ominaisuudet suuressa osassa virtausaluetta. Tällä alueella ilman viskoosiset ominaisuudet ovat lähes olemattomat, jolloin ilmavirtaus on käytännössä viskoositonta

virtausta. Tällöin virtauksen siiven pinnan alapuolella on kohdattava siiven pinnan yläpuolella kulkenut virtaus siiven jättöreunassa. Ja koska tyhjiötä ei ole olemassa normaaleissa luonnonoloissa, on virtauksen pakko kulkea siipeä pitkin kohdatakseen vastakappaleensa. [12.] Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että samojen ilmapartikkeleiden olisi kohdattava toisensa jättöreunassa.

Virtauslinjojen kohtaaminen voi viskoosittomassa virtauksessa kuitenkin olla missä vain siipeä ja toinen virtauslinjoista voisi periaatteessa kiertää siiven jättöreunan ja tehdä yli 90:n asteen kaaroksen kohdatakseen vastakappaleensa. Tällöin kuvaan tulee ilman viskoosisuus ja rajakerros sillä rajakerroksessa virtaukselle ei voida tehdä viskoosittoman ilman olettamaa. [12.] Kutta-ehdon perusteella vakaa virtaus siiven alapuolella kulkee siten, että virtaukset jättävät siiven sulavasti jättöreunasta. [1, s. 340]. Liian tiukka kaarros virtauksessa aiheuttaa rajakerroksen viskoosisuuden vuoksi kuitenkin virtauksen irtoamisen ja virtaus ei voi kulkea tiukkaa kaarrosta jättöreunan yli. Rajakerros myös selittää, miksi virtaus voi irrota, jos siivellä on liian jyrkkä kulma. [12.]

Virtauksen irtoaminen on usein ilmiö, jota halutaan välttää siipiprofiilin toiminnassa. Kun virtaus kulkee siiven pinnalla kohti jättöreunaa ja virtaus muuttuu turbulenttisemmaksi, kasvaa rajakerroksen paksuus. Jos siivessä kulkevan virtauksen kineettinen energia ei enää riitä pitämään virtausta siiven pinnalla, virtaus irtoaa. Virtauksen irtoaminen vähentää siiven tuottamaa downforcea, koska se muokkaa siiven virtauslinjoja ja tehokasta toiminta-aluetta pienemmäksi. [4, s. 32; 6.] Irtoamista voidaan ehkäistä esimerkiksi lisäämällä siipielementtien määrää, sillä saman kohtauskulman monielementtisiivessä siipien välisestä raosta saadaan virtaukselle lisää kineettistä energiaa koska lisätty siipielementti kasvattaa virtauksen paikallista nopeutta.

## 2.6.2 Päätylevyt

Päätylevyt (kuva 9) ovat levyjä, jotka ovat asetettu siipiprofiilin reunoihin ja niiden tarkoitus on nostaa siiven tuottamaa downforcea ja vähentää ilmanvastusta. Siipiprofiilin reunoilla siiven yläpuolella oleva korkea paineen ilma pyrkii virtaamaan siiven alapuolella sijaitsevalle matalamman paineen alueelle. Tämä vähentää paine-eroa siipipintojen reuna-alueilla ja aiheuttaa myös indusoitua ilmanvastusta. Kun siipeen asetetaan päätylevyt, vähentävät ne tätä ilmiötä ja paine-ero pysyy korkeampana, jolloin siipi tuottaa

enemmän downforcea. [3, s. 114.] Päätylevyt myös vähentävät siiven tuottamaa indusoitua vastusta [4, s. 144].



Kuva 9. Cadillac DPi V.R -kilpa-auton takasiiven päätylevyt

Päätylevyjien mitoituksessa pätee sääntönä, että mitä suurempia ne ovat, sitä tehokkaampia ne myös ovat, sillä niiden suurempi koko kasvattaa siiven tehokasta sivusuhdetta [4, s. 144]. Tietyn mitan jälkeen tehokkuuden nousun vaikutus alkaa kuitenkin vähentyä merkittävästi ja tämän mitan on esitetty olevan silloin, kun päätylevyn korkeus on noin 0,6-kertainen siiven jänneväliin verrattuna [3, s. 115]. Päätylevyjien mitoitukseen vaikuttavat usein myös eri kilpa-ajoneuvoluokkien säännöt, joissa määritellään siiville maksimimitat, esimerkiksi korkeudet. Tämän vuoksi takasiivissä päätylevyt jatkuvat usein runsaasti siipiprofiilin alapuolelle, mutta eivät yläpuolelle, sillä siipiprofiili halutaan

mahdollisimman korkealle, jotta siipi saisi suuremman kineettisen energian ilmavirtausta. Samoin paineen muutokset siiven yläpuolella ovat paljon pienempiä kuin alapuolella, jolloin vaikutusalue siiven alapuolella on laajempi ja siipi tarvitsee tietenkin suuremmalle alueelle päätylevyä [3, s. 117].

### 2.6.3 Diffuusori

Diffuusori (kuva 10) on auton pohjassa oleva kiillamainen aerodynaaminen komponentti, jonka tarkoitus on tuottaa downforcea auton pohjan alipaineen ansiosta sekä vähentää ilmanvastusta diffuusoritunnelin avulla.

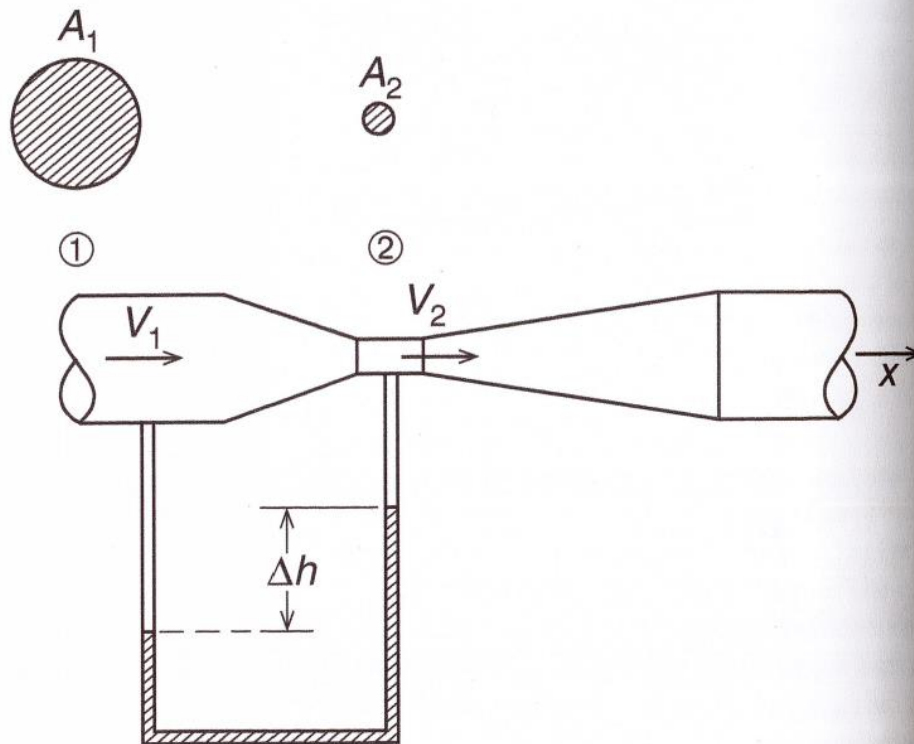


Kuva 10. Cadillac DPi V.R -kilpa-auton takadiffuusori

Diffuusorin toimintaa voidaan selittää Venturi-ilmiöllä, joka on nimetty italialaisen fyysikko G. B. Venturin mukaan, joka tutki hänen mukaansa myöhemmin nimetyn Venturiputken (kuva 11) toimintaa. Putken alussa fluidi kulkeutuu ensin halkaisijaltaan leveämmästä putkenosasta kapeampaan, jolloin Bernoullin lain mukaisesti paineen täytyy laskea virtausnopeuden kasvaessa. Paine-eron mittaamiseen tarkoitettu ohut pieni putki johtaa



sekä leveämpään, että kapeampaan kohtaan putkea ja tämä osa pientä putkea on täytetty nesteellä. Leveän ja kapean putkenosien välinen paine-ero nostaa ohuen putken nestettä kapean putkenosan suuaukkoa kohti ja ilmiön avulla voidaan selvittää putkessa virtaavan fluidin virtausnopeus. [4, s. 41.]



Kuva 11. Venturiputki [4, s. 40]

Tätä samaa periaatetta voidaan soveltaa myös diffuusoriin, vaikka virtaus Venturiputkessa onkin putken sisäistä virtausta [4, s. 222]. Kun auton alapuoli on tasainen pinta, mutta auton pohja nousee perää kohti ylöspäin, saa se aikaan saman ilmiön mitä Venturiputkessa tapahtuu. Ilman virtausnopeus diffuusorissa hidastuu, koska pinta-ala auton alapuolella alkaa kasvaa aivan kuten Venturiputkessa halkaisijan kasvaessa. Hidastunut virtausnopeus kasvattaa painekerrointa auton takana ja tällöin auton ilmanvastus vähenee.

Diffuusorin kurkussa, josta diffuusori alkaa sekä diffuusorin kurkun edessä olevalla alueella ilmiö on sen sijaan päinvastainen, koska näissä kohdissa auton pohjaa pinta-ala on vähemmän kuin diffuusorissa. Auton pohjalla kokonaisuudessaan tilavuutta on kuitenkin enemmän ja tällöin auton alle kulkeutuvan tilavuusvirran täytyy kasvaa. Koska kokonaistilavuusvirta kasvaa, täytyy pohjan virtausnopeuden tällöin kiihtyä diffuusorin kurkkua kohden, koska ilmavirtauksen on pakko päästä täyttämään suurempi tilavuus. Bernoullin lain mukaisesti tämä synnyttää alipainetta auton alle, jolloin auto painautuu maata vasten voimakkaammin.

Diffuusorin nousukulmaan suhteen pätee samat lainalaisuudet kuin siipiprofiilin kohtauskulmaan. Jos nousukulmaa nostetaan liiaksi, on mahdollista virtauksen irtoaminen diffuusorista ja sen seurauksena diffuusorin tehon heikkeneminen. Diffuusorin nousukulmalla ja kurkun sijoittelulla suunnittelija voi myös säätää aerodynaamista balanssia haluttuun suuntaan. Näiden seikkojen lisäksi auton maavara vaikuttaa diffuusorin toimintaan, sillä laskemalla maavaraa, tehostuneen maaefektin avulla diffuusorinkin toiminta tehostuu, mutta liian matalalla maavaralla ilmanvirtaus irtoaa diffuusorin pinnasta, koska virtaukselle ei saada riittävästi kineettistä energiaa.

#### 2.6.4 Gurneyn flap

Gurneyn flap (kuva 12) on ohut levy, joka on asetettu siiven jättöreunaan useimmissa tapauksissa kohtisuoraan siiven jänteestä. Sen korkeus on usein muutama prosentti siiven jänteen pituudesta, yleensä maksimissaan 5 % [4, s. 142]. Vaikka Gurneyn flap ei välttämättä näytä kovin aerodynaamiselta, se voi nostaa downforcea huomattavasti suuremman määrän, kuin se nostaa ilmanvastusta.

Gurneyn flap toimii siten, että rajakerros ohenee siiven alapuolen jättöreunassa siellä tulleen tiukan kaaroksen vuoksi. Tämä vähentää mahdollisuutta virtauksen irtoamiselle ja kasvattaa sen myötä downforcea [4, s. 142-143]. Siipeä on siis tämän vuoksi mahdollista asettaa jyrkempään kohtauskulmaan sakkaamatta siipeä. Sen lisäksi Gurneyn flap kasvattaa painetta siiven yläpinnalla, sillä virtausnopeus hidastuu sen edessä lähellä siiven jättöreunaa. Tämän vuoksi myös matalammankin kohtauskulman siivissä voidaan käyttää Gurneyn flapia tuottamaan lisää downforcea, vaikka tällä ratkaisulla voidaankin samalla heikentää siiven L/D ratiota. [4, s. 143.]



Kuva 12. Gurneyn flap HPF019-auton etusiivessä

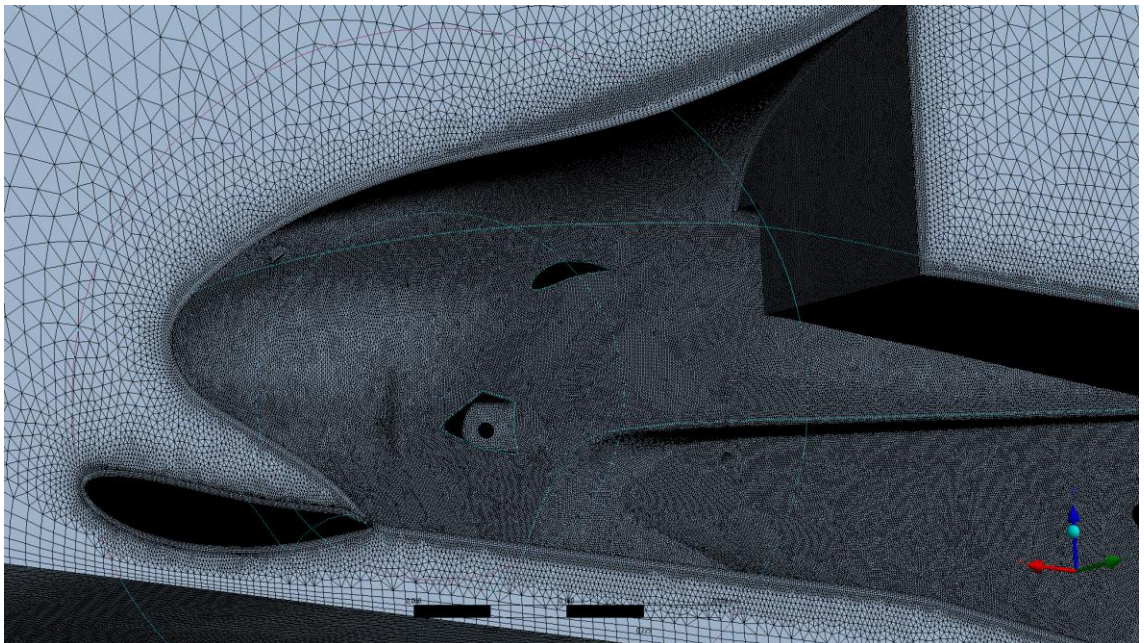
### 3 CFD-laskenta

#### 3.1 CFD-laskennan taustaa

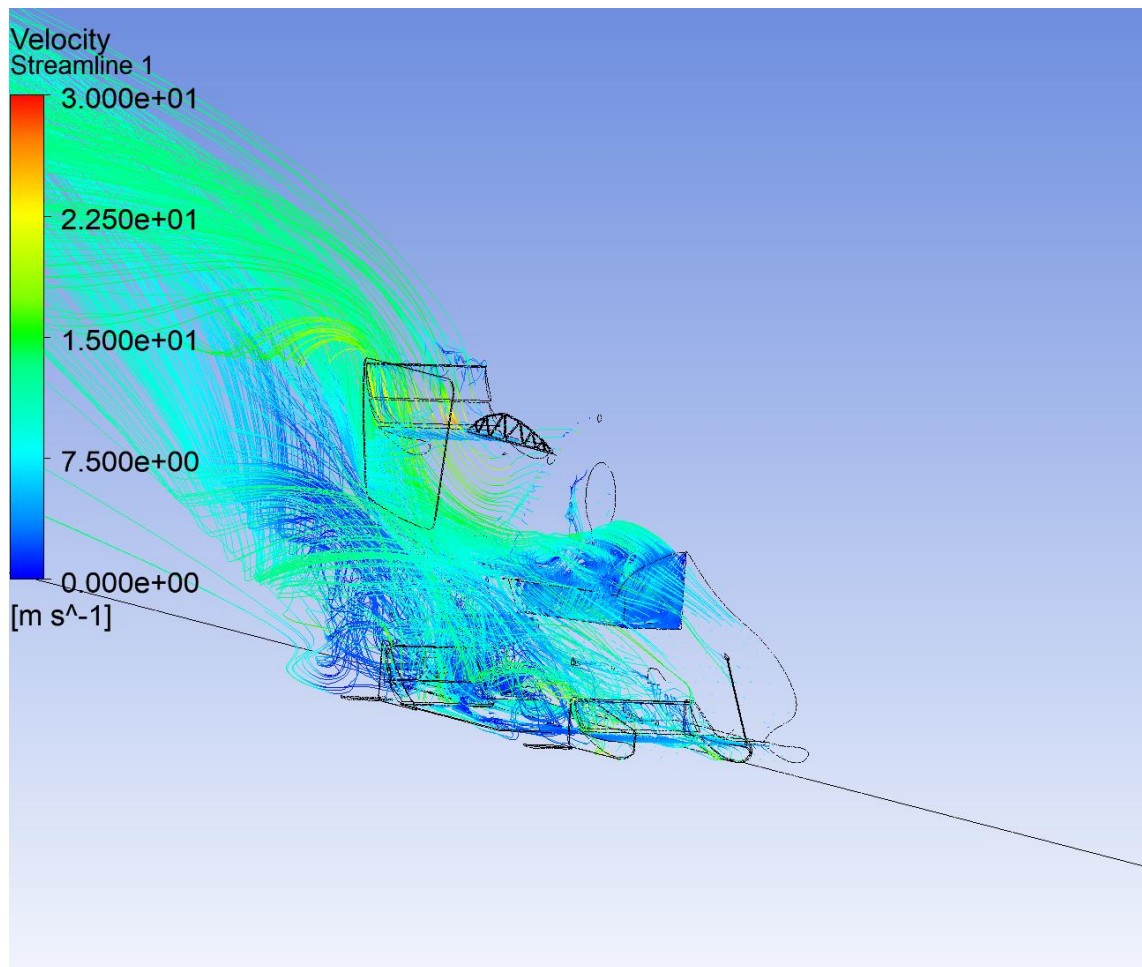
CFD eli Computational Fluid Dynamics tarkoittaa numeerisesti laskettavaa virtausdynamiikkaa. CFD-laskenta on yleistynyt etenkin 2000-luvulla, kun tietokoneet ovat tulleet tehokkaammiksi ja tämän myötä CFD-ohjelmat alkavat yleistyä jo tavallisemminkin tietokoneilla. Lisäksi CFD-laskentaan tarjotaan useita eri pilvipalveluita, jotta haastavimmatkin laskentatapaukset saadaan ratkaistua. Esimerkiksi CSC tarjoaa Suomessa opiskelija- ja tutkimuskäyttöön laskentapalveluitaan, joita on hyödynnetty myös tätä insinöörityötä tehdessä. CFD-laskenta on kustannustehokas, nopea ja tarkka tapa tehdä esimerkiksi tutkimuskohteessa tapahtuvan lämmönsiirron tai paineenmuutosten laskentaa. Moottoriurheilun parissa jokainen F1-tiimi käyttää aerodynamiikkasuunnittelussaan CFD-ohjelmia.

CFD:ssä tehdään matemaattinen malli fysikaalisesta tilanteesta. Esimerkkinä matemaattisesta mallista on vaikkapa Navier-Stokesin yhtälöt. Matemaattisen mallin valinta riippuu tapauksesta, jota halutaan laskea, sillä samaa matemaattista mallia ei voida käyttää jokaisen tapaukseen. Erilaisia tapauksia voi olla esimerkiksi olla lämmönsiirto, nesteen virtaus putkistossa tai ajoneuvon ulkoiset virtaukset. [13.]

Oikean matemaattisen mallin valitseminen on erityisen tärkeää laskennan lopputuloksen ja luotettavuuden kannalta. Roolia laskentatulokseen voi tuoda myös esimerkiksi käytetty CFD-laskentaan erikoistunut ohjelma ja laskennassa käytettyjen solujen tyyppi sekä lukumäärä. Kokonaisen laskennan toteutus CFD-ohjelmassa menee lyhyesti siten, että aluksi ohjelmaan on tuotu CAD-ohjelmassa tehty malli, joka verkotetaan pieniksi soluiksi verkottajassa (kuva 13). Tämän jälkeen CFD-laskennan kohteelle valitaan sopivat rajaehdot CFD-ohjelmassa, esimerkiksi turbulenssimalli, virtauksen nopeus ja virtaavan aineen tiheys. Näiden jälkeen itse laskenta suoritetaan toteuttamalla iterointeja laskentatilanteesta niin pitkälle, että ratkaisijalle asetettu tavoite iteraatioiden tarkkuudessa toisiansa vasten saavutetaan. Sen jälkeen laskentatuloksia voidaan tarkastella jälkikäsitteilyohjelmassa (kuva 14).



Kuva 13. Metropolia Motorsportin CFD-laskentamallin laskentaverkkoa



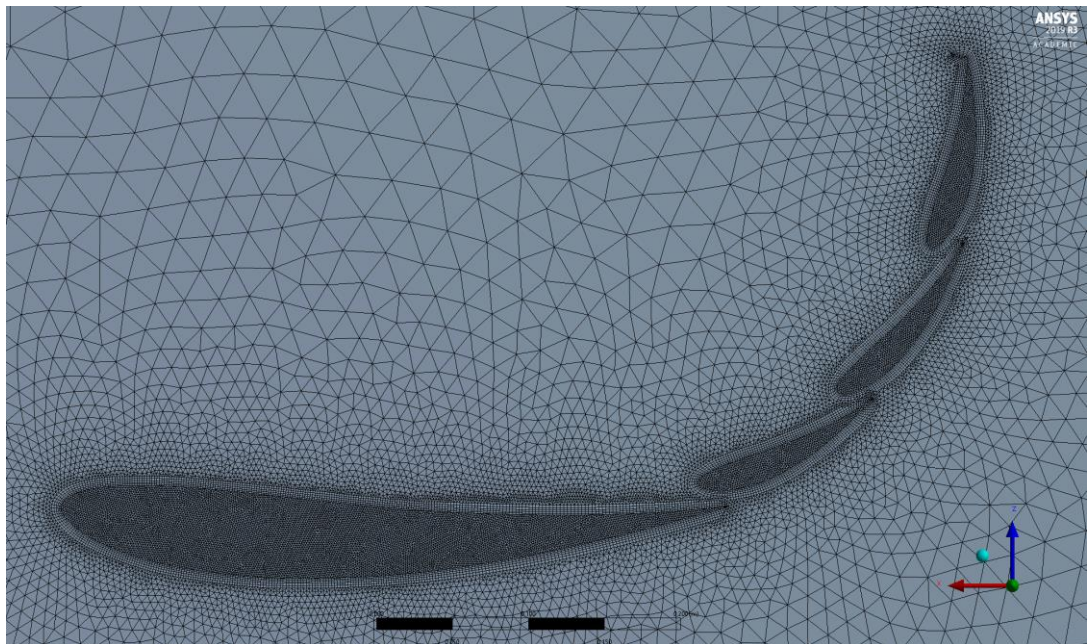
Kuva 14. Kuvakaappaus ANSYS Post -jälkikäsittelyohjelmasta

### 3.2 Laskentaverkko

Ensimmäinen vaihe Metropolia Motorsportin Formulan CFD-laskennassa on laskentaverkon luonti. Metropolia Motorsportin tapauksessa verkottajaan tuotuna CAD-mallina käytetään tilavuusmallia, joka on tunnelimalli, johon on tehty puolikkaan auton muotoinen aukko vasempaan reunaan. Puolikkaalla mallilla toteutettavassa laskennassa tarvitaan laskentatehoa huomattavasti vähemmän ja näin verkosta sekä mallista voidaan tehdä tarkempi ja yksityiskohtaisempi. Puuttuvan puolikkaan vaikutus virtauksiin voidaan korvata symmetriatasolla, joka peilaa tason sisäpuolen vaikutuksen ja laskentatuloksia analysoidessa esimerkiksi saavutetun negatiivisen nosteen määrä voidaan yksinkertaisesti tuplata, jotta tulokset vastaavat kokonaista autoa.

Itse laskentaverkko koostuu soluista, joita voi olla useita miljoonia. Tässä työssä on käytetty ANSYS CFX -ohjelmaa, mutta CFD-laskennan periaatteet ovat jokaisella ohjelmalla kuitenkin samat, joten työvaiheet ovat kaikilla ohjelmillakin hyvin samankaltaisia. ANSYS CFD -ohjelmat käyttävät laskentaan tilavuusmenetelmää (FVM) ja laskentaverkon ratkaisija ANSYS CFX:ssä on solmukeskeinen. Tämä tarkoittaa, että ratkaisukentät ovat varastoitu verkon solmuihin ja kontrollitilavuus muodostuu jokaiseen verkon solmuun. ANSYS Fluentissa, jonka käyttöönottoa Metropolia Motorsport suunnittelee tulevaisuudessa, on ratkaisumenetelmä solukeskeinen. Tässä ratkaisumenetelmässä ratkaisukentät toimivat verkon solujen kautta, jolloin kontrollitilavuudet on muodostettu jokaiseen verkon soluun. [14, s. 14.]

Tähän insinööriyöhön CFX-ohjelma ja sen verkottaja (kuva 15) on valittu siitä syystä, että niiden käytöstä ja toimivuudesta on jo aiemmin osoitettuja tuloksia ja niiden käyttöön on myös ollut formulatiimissä suurin osaaminen.



Kuva 15. CFX-ohjelmalla verkotettu takasiipi. Kuvassa näkyvät myös siiven rajakerroseelementit.

### 3.3 Käytetty turbulenssimalli

Koska ilmanvirtauksessa esineen pinnalle muodostuu rajakerros ja kilpa-auton aerodynamiikkaan liittyvissä virtauksissa syntyy turbulenttista virtausta, tarvitaan kilpa-auton CFD-laskentaan turbulenssin mallintamista. Turbulenssin aiheuttamat pyörteet ovat hyvin haastavia mallintaa täydellisesti, käytännössä mahdottomia. Tämän vuoksi CFD-laskennoissa käytetään turbulenssimalleja nesteessä tai kaasussa esiintyvän turbulenssin likimääräistämiseen. Eri turbulenssimalleja on eri sovelluksia varten ja ulkoisten virtausten laskentaan, jossa on monimutkaisia geometrioita, käytetään usein K-turbulenssimalleja [16].

K-Omega-turbulenssimallin etuna on sen parempi ennakointi pyörteisille- sekä seiniä lähellä oleville virtauksille, mutta haittapuolena on, että se yliarvioi virtauksen irtoamista. K-Epsilon-mallin etuna on laskentaprosessin tasaisempi ja varmempi suoriutuminen sitä käytettäessä. K-Epsilonissa myös vapaan virtauksen hallinta ja seinämästä kauempana olevat virtaukset ovat paremmin ennakoitavissa kuin K-Omegassa. Koska K-Epsilon on käytetyin turbulenssimalli, sen heikkoudet myös tunnetaan parhaiten ja sen käytöstä on eniten tietoa tarjolla. K-Epsilonin ja K-Omegan lisäksi on olemassa myös kummankin K-turbulenssimallin parhaita ominaisuuksia yhdistävä K-Omega SST (Shear Stress Transport) -turbulenssimalli, joka toimii kuten K-Epsilon kauempana kohteen pinnasta ja kuten K-Omega lähellä kohdegeometriaa. [16.]

Laskennoissa design-kaudella turbulenssimalliksi on valittu K-Epsilon, sillä sen tuoman varmemman ja vakaamman laskennan katsottiin olevan tärkeää aerodynamiikan designin vertailujen kannalta ja tällä turbulenssimallilla on myös aiemmin saavutettu relevantteja tuloksia.

## 4 Suunnitteluprosessin aloitus

### 4.1 Aerodynamiikkasuunnittelun tavoitteet

HPF019-auton edeltäjässä HPF018-autossa (kuva 16) oleva aerodynamiikkapaketti suunniteltiin kiinnittämällä runsaasti huomiota aerodynaamiseen balanssiin sekä ilmanvastukseen. Tämän ansiosta aerodynaamisen balanssin jakauma oli saatu lähes samaksi kuin auton painojakauma ja ilmanvastus suhteellisen matalaksi. Aerobalanssin ja ilmanvastuksen optimointi aiheutti HPF018-autossa kuitenkin sen, että auton aerodynamiikkapaketin tuottama downforce oli vähäisempi kuin 2017-vuoden HPF017-autossa (kuva 17). HPF018-auto ei myöskään ollut kilpailukaudella Espanjassa 2018 erityisen suorituskykyinen kaarreajon osalta ja osan siitä uskottiin johtuvan downforcen puutteesta.



Kuva 16. HPF018





Kuva 17. HFP017

Yksi syy HPF018-auton aerodynamiikkapaketin heikommasta tehokkuudesta selittyy sillä, että tehokkaan etusiiven suunnittelu voi helposti viedä aerobalanssia kohti etuakselia etusiiven hyötysuhteen ollessa paljon takasiipeä korkeampi. HPF018-autossa päädyttiin tämän sekä ilmanvastuksen vähentämisen vuoksi tehottomampaan etusiipeen kuin HPF017 autossa, jossa aerobalanssi painottuikin suhteellisen runsaasti etuakselille ja ilmanvastus oli korkeampi. Toinen syy HPF018-auton matalammalle downforcen tuotolle oli siinä, että HPF018 autossa oli luovuttu resurssien puutteen ja painonsäästön vuoksi aerodynaamisesta pohjalevystä kokonaan, jollainen oli HPF017-autossa.

CFD-laskentojen perusteella (taulukko 1) HPF017 tuottaa 15 m/s vauhdilla 446 newtonin downforcen ja 184 newtonin ilmanvastuksen ja aerodynaaminen balanssi on 57 % etuakselilla. HPF018 tuottaa laskennan perusteella samassa vauhdissa 345 newtonin downforcen ja 131 newtonin ilmanvastuksen aerobalanssin ollessa 52 % taka-akselilla. Rataolosuhteissa mitatut testit syksyllä 2017 osoittivat HPF017:n aerodynamiikkapaketin tuottavan 365 newtonin downforcen ja 153:n newtonin ilmanvastuksen samalla ajonopeudella kuin CFD-laskennoissa. HPF018:lle ei päästy tekemään tiukan aikataulun vuoksi mitattuja kokeita downforcesta ja ilmanvastuksesta, joten sen vuoksi arvoja tullaan vertailemaan CFD-laskennan tuloksien perusteella.

Taulukko 1. HPF019:ta aerodynamisten voimien sekä aerobalanssin tavoite verrattuna HPF018- ja HPF017-autojen CFD-laskentatuloksiin

Car	Downforce (N)	Drag (N)	Aerobalance (% rear)
HPF017	446	184	43
HFF018	345	131	52
HPF019 (target)	>500	<200	~55

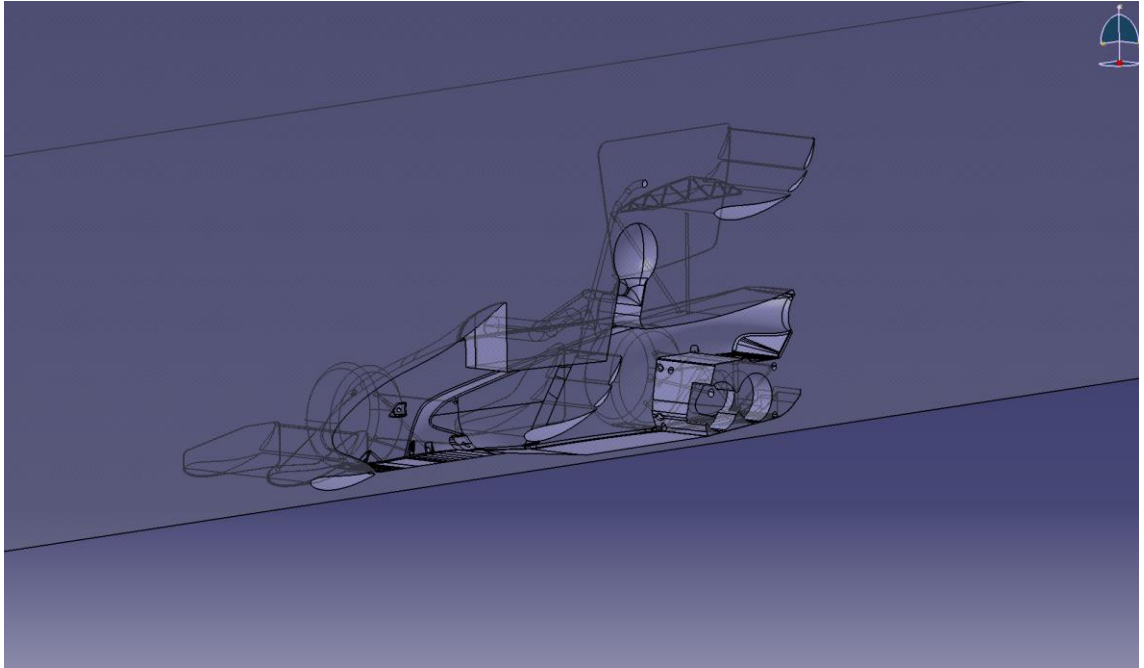
Edellä mainituista lähtökohdista halutaan lähteä tekemään parannuksia HPF019-auton aerodynamiikkapakettiin. Kokonaisueropaketista tavoitellaan merkittävästi tehokkaampaa kuin HPF018-autolla ja tehokkaampaa kuin HPF017-autolla kaarreajonopeuksien nostamiseksi. Downforcen tavoitteeksi muutaman CFD:llä toteutetun koelaskennan jälkeen on asetettu 500 newtonin saavuttaminen ajonopeudella 15 m/s. Aerobalanssia tavoitellaan vielä hiukan enemmän taka-akselille kuin HPF018-autossa. Tämä sen vuoksi, että HPF019-auton ajettavuudesta halutaan aerodynamiikan kannalta amatöörikuljettajaystävällisempi ja aerobalanssin ollessa takapainotteinen auto on vakaampi ja yllätyksettömämpi ajaa korkeammilla nopeuksilla. Auton painojakaumaksi arvioidaan noin 55 % taka-akselilta mitattuna ja sen vuoksi aerobalanssille on valittu tavoitteeksi samanlainen jakauma. Formula Studentissa ilmanvastus ei matalien huippunopeuksien vuoksi ole yhtä merkittävässä osassa auton suorituskykyä kuin downforce, joten ilmanvastuksen suhteen ollaan valmiita siihen kompromissiin, että HPF019-autossa ilmanvastus tulisi olemaan korkeampi kuin HPF017- ja HPF018-autoissa. Tavoitteeksi ilmanvastukselle on asetettu alle 200 newtonin ilmanvastus nopeudessa 15 m/s.

Aerodynamiikkasuunnittelulle asetettuja tavoitteita lähdettiin tavoittelemaan suunnitteleamalla autoon tehokkaammat etu- ja takasiivet sekä sivusiivet, minkä lisäksi kokeilemaan lähdettiin myös nose cone -siivekkeiksi nimettyjen pienien siipielementtien toimintaa.

#### 4.2 Suunnittelussa käytetyt työkalut

Aerodynamiikkapaketin komponenttien suunnitteluun ja CAD-mallintamiseen käytetään CATIA V5 -ohjelmaa. CATIA V5 on moottoriurheilukäytössä eräs yleisimpiä CAD-ohjelmia, ja sitä suositaan myös hyvien pintamallinnusominaisuuksien vuoksi. Siipien CAD-

mallintamisen jälkeen siivet asetetaan tuulitunnelimalliin (kuva 18). Kun lopullinen aerodynamiikkapaketti on määritetty CFD-laskentojen perusteella, suunnitellaan aerodynamiikkapaketti mekaanisesti käyttäen myös siinä CATIA V5 -ohjelmaa.



Kuva 18. Kuvakaappaus CATIA V5 -ohjelmalla tehdystä auton tuulitunnelimallista

Aerodynaamisten komponenttien vaikutus auton aerodynamiikkaan lasketaan käyttämällä jo aiemmin valittua ANSYS CFX CFD-ohjelmaa. ANSYS on eräitä maailman suurimpia teknisen laskennan ohjelmistoja tarjoavia yrityksiä ja sitä käytetään yleisesti esimerkiksi ajoneuvoteollisuuden suunnittelutehtävissä toteuttamaan virtauslaskentoja, lujuuslaskelmia, käyttöikälaskelmia, lämpölaajenemislaskelmia ja sähköjärjestelmien simuloitteja.

CFD-laskennoissa jokaisen osan aerodynaamiset ominaisuudet on päätetty mitata kokonaisen automallin kanssa, sillä tällä menetelmällä jokaisen osan toimivuus itse autossa voidaan varmimmin selvittää. Esimerkiksi takasiiven toiminta vapaassa virtauksessa yksittäisen komponentin laskennassa voi olla hyvin erilaista kuin kokonaisessa autossa renkaiden, sivusiipien, kuljettajan sekä etusiiven aiheuttamien virtausmuutosten takia. CFD-laskennoissa käytetään myös liikkuvaa lattiaa ja pyöriä rengasmalleja, jotta

laskentojen tulokset ovat mahdollisimman tarkkoja vastaamaan oikeita olosuhteita. Suunnitteluprosessissa CFD-laskennoissa käytetään vapaan virtauksen nopeutena 15:tä m/s, sillä auto ajaa keskimäärin Formula Student -radalla yli puolet ajasta tätä nopeammin tai tällä nopeudella.

CFD-laskentojen ratkaisijan toiminta suoritetaan CSC:n superklusterilla, sillä Metropolian omien tietokoneiden avulla 50 miljoonaa elementtiä sisältävien laskentamallien ajaminen on mahdotonta. Tämä toimii siten, että asetuksineen ja verkotuksineen valmiit CFD-tiedostot ladataan CSC:n serverille, jonne annetaan komento aloittaa laskenta tiedostojen latauduttua. Tämän jälkeen CSC:n klusterit suorittavat laskennan, joka voi viedä tapauksesta riippuen muutamasta tunnista jopa vuorokauteen. CFD-laskentojen suoriutumista pystyy seuraamaan tekstitiedoston välityksellä.

Aerodynamiikkapaketin suunnittelussa käytetään myös OptimumLap -kierrosaikasimulointia. Kierrosaikasimuloinnissa tehdään malli ajoneuvosta rengasdatan, massan, väännön, vetosuhteen sekä aerodynaamisten ominaisuuksien avulla ja tämän jälkeen ohjelma laskee kierrosajan radalla hyödyntäen näitä parametreja. OptimumLap ei kuitenkaan ota huomioon esimerkiksi auton alustageometrioita tai aerobalanssia, joten kierrosaikasimulaatiot ovat vain suuntaa antavia, mutta niitä voidaan kuitenkin käyttää hyödyksi aerodynamiikkapaketin suunnittelussa.

#### 4.3 Aikataulukus

Kaudelle 2019 Metropolia Motorsport sopi design freezeen päiväykseksi 6.12.2018. Tämä tarkoittaa, että 90 % autosta pitää tällöin olla suunniteltu ja osien pääkokoontamisessa. Design freezeen jälkeen pienet muutokset ovat vielä mahdollisia, mutta aerodynamiikan tapauksessa siipien sijaintien autoon nähden tarvitsee olla valmiita. Design freezeen jälkeen tehdään viimeistely aerodynamiikkapaketille hiomalla yksityiskohtia ja pienkomponentteja ja tämän jälkeen siipien mekaaninen suunnittelu tehdään loppuun. Helmikuussa 2019 oli tarkoituksena aloittaa siipien valmistaminen.

Aerodynamiikkapaketin tavoitteena on olla valmis ja asennettuna autoon 1.5.2019, testikauden alkuun mennessä. Testikauden aikana tarkoitus on testata auton aerodynaamisia ominaisuuksia sekä CFD-laskennalla, että ratatesteillä ja näiden lisäksi etsiä autolle

optimaalisia rata-ajosäätöjä aerodynamiikan ja ajodynamiikan suhteen sekä validoida suunniteltua aerodynamiikkapakettia. Testikausi päättyy heinäkuun puolivälissä, jolloin Metropolia Motorsportin kilpailukausi alkaa FS EAST -kilpailulla Unkarissa.

Aerodynamiikkapaketin suunnittelu- ja valmistusprosessin edistymistä seurataan Excel- taulukolla (liite 1) ja viikoittaisilla tiimipalavereilla sekä osa-aluepäälliköiden palavereilla. Samoin tullaan pitämään aerodynamiikka osa-alueen sisäisiä palavereita, joissa seurataan osa-alueen edistymistä.

#### 4.4 Formula Student Germanyn aerodynamiikkasäännöt

Metropolia Motorsport osallistuu kilpailukaudella 2019 vain kilpailuihin, jotka noudattavat Formula Student Germanyn vuoden 2019 sääntökirjaa. Sääntökirja määrittää esimerkiksi aerodynaamisten komponenttien maksimitat.

Sääntökirjan perusteella kuljettajan niskatuen edessä sijaitsevien aerodynaamisten komponenttien korkeus saa olla maksimissaan 500 mm, mutta etuakselin etupuolella ja etupyörän sisäreunan ulkopuolella korkeus saa olla maksimissaan 250 mm. Niskatuen takana sijaitsevien aerodynaamisten komponenttien maksimikorkeus takarenkaiden sisäreunojen välisellä alueella on 1200 mm. [10, s. 52.]

Aerodynaamisten komponenttien leveys on etuakselin etupuolella vapaa, mutta muuten maksimileveys määrittyy eturenkaan ja takarenkaan ulommaisten pisteiden välisen janan sisäpuolelle. Mikään aerodynaaminen komponentti saa ylittää 700 mm:n etäisyyttä eturenkaan etummaisimmasta pisteestä ja 250 mm:n etäisyyttä takarenkaan takimmaisimmasta pisteestä. [10, s. 52.]

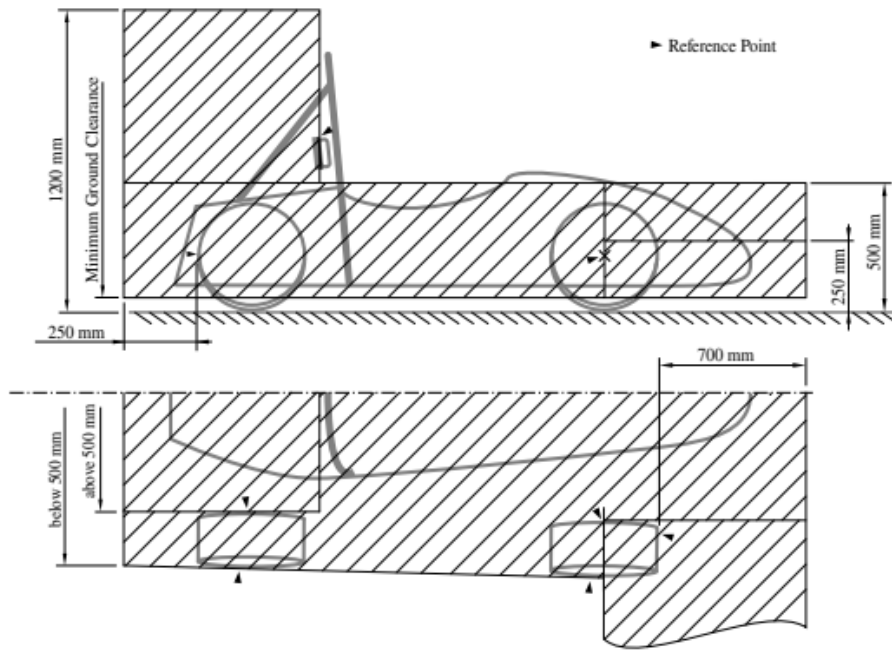


Figure 15: Maximum dimensions and positioning of aerodynamic devices. The positioning space is further restricted, see T2.1.

Kuva 19. Formula Student Germanyn aerodynamiikkakomponenttien maksimitat [10, s. 53]

Maksimimittojen lisäksi autoissa täytyy olla minimissään 30 millimetrin maavara joka kohdassa [10, s. 27]. Auton etu- ja takarenkaalla ovat myös omat niin sanotut keep-out zonensa, joissa ei saa olla mitään ylimääräisiä komponentteja (kuva 20). Tämä alue on renkaan leveyden mitalta 75 mm renkaan pinnasta sekä eteen- että taaksepäin [10, s. 26].

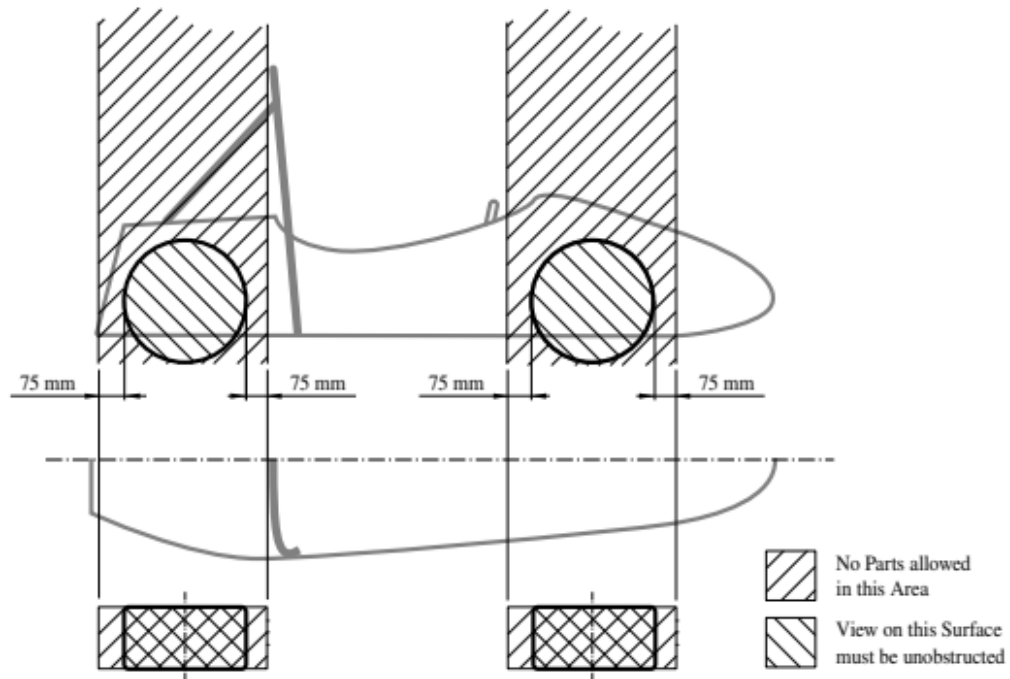


Figure 3: Keep-out-zones for the definition of an open-wheeled vehicle.

Kuva 20. Formula Student Germanyn Keep-out-zonejen määrittely [10, s. 26]

Aerodynamiikkasääntöjen ja yleisten sääntöjen lisäksi takasiiven mittoja voi rajoittaa sähköautoissa pääkaaren yläosassa sijaitsevan TSAL-valon näkyvyys. Säännöt määrittävät, että mistä tahansa kohdasta, josta katsellaan autoa 3 metrin etäisyydeltä 1,6 metrin korkeudesta, TSAL-valon täytyy näkyä, paitsi alueelta, jossa pääkaari peittää TSAL-valon näkyvyyden [10, s. 80].

Aerodynaamisilla komponenteilla on myös muutamia sääntöjä turvallisuuden lisäämiseksi. Kaikki osat, jotka voivat osua ohikulkijaan, ovat säteeltään minimissään 5 mm pystysuuntaan ja 3mm vaakasuuntaan [10, s. 52]. Sen lisäksi turvallisuuden vuoksi komponenttien, jotka ovat pinta-alaltaan yli 225 cm<sup>2</sup>, täytyy kestää yli 200 newtonin voima taipumatta 10 mm:ä enempää ja minkä tahansa kokoisen aerodynaamisen komponentin täytyy kestää 50 newtonin pistekuorma taipumatta enempää kuin 25 mm. [10, s. 53].

Minkäänlaisten puhaltimien ja virtalaitteiden käyttö virtausten muokkaamiseen ja maa-efektin tehostamiseen auton alapuolella ei ole sallittua [10, s. 52].

#### 4.5 Resurssit ja suunnitteluprosessin järjestely

Resurssien vuoksi suunnittelussa käytetään jo olemassa olevaa siipiprofiilia siipien pääprofiilina. Tämän ansiosta aikaa ei kulu eri siipiprofiilien vertailuihin CFD:ssä sekä siipimuottien valmistamiseen. Metropolia Motorsportilla on olemassa valmiina kolmea erikokoista siipiprofiilimuottia, suuri pääprofiili, keskikokoinen profiili sekä pieni profiili. Etusiiven suhteen on tehty päätös, että mahdollista on tehdä yksi uudenlainenkin muotti etusiiven siivekkeiden profiileja varten tarpeen vaatiessa. Kun lähes kaikki profiilit on valittu jo ennen suunnittelun aloitusta, voidaan aikaa ja resursseja kohdistaa enemmän esimerkiksi erilaisten siipidesignien tekemiseen, siipien kohtauskulmien optimointiin, sivusiipien ja eri päätylevyratkaisujen suunnitteluun.

Aerodynamiikkapaketti suunnitellaan siten, että pääkomponenttien suunnittelu etenee auton keulasta auton perää kohti. Kun raakaversio komponentista on valmis, siirrytään seuraavan raakaversioon tekemiseen ja raakaversioiden jälkeen hiotaan yksityiskohtia, esimerkiksi kohtauskulmia, Gurneyn flapeja ja muita pienempiä komponentteja. Työssä kohdistetaan suurimmat resurssit komponenttikokonaisuuksien muutoksiin, vaikka esimerkiksi kohtauskulmien optimointeja ja erikokoisia Gurneyn flapeja tullaan myös kokeilemaan siivissä.

Aerodynamiikkapaketin suunnittelussa on myös päätetty, että pelkästään CFD-laskentoihin tai suunnittelijan omiin päätelmiin ei luoteta, vaan design-kokeilujen täytyy toimia sekä suunnittelijan ideoinnissa että CFD-laskennoissa, jotta ne ovat mahdollisia vaihtoehtoja lopulliseen autoon.



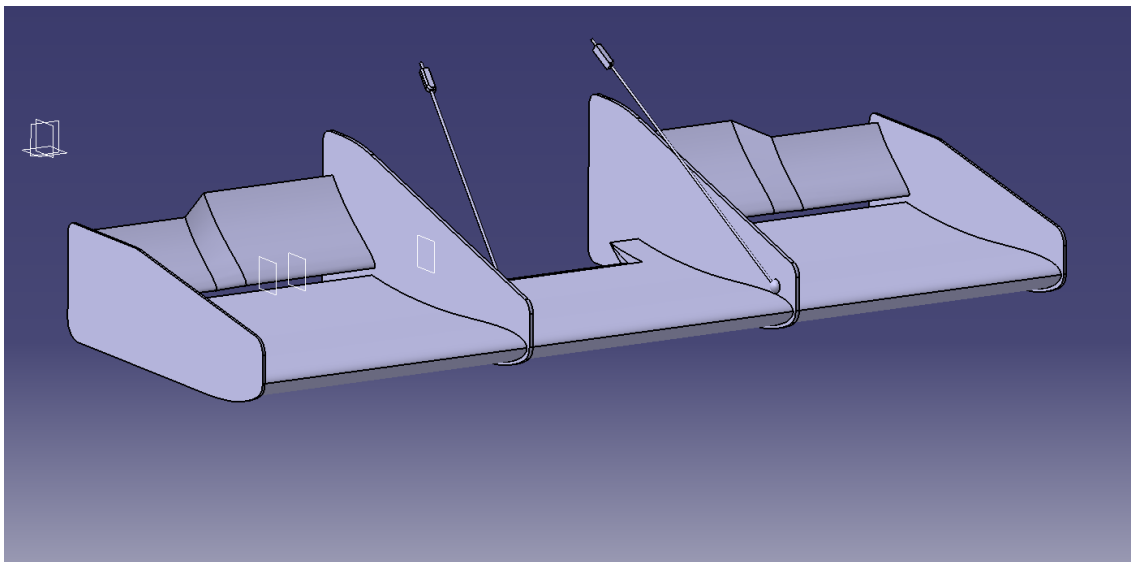
## 5 Aerodynamiikkapaketin suunnittelu

### 5.1 Etusiipi

Suunnittelu aloitetaan etusiivestä, sillä se on ensimmäinen osa autoa, johon ilmavirtaus kohdistuu. Erilaiset etusiivet vaikuttavat eri tavoin auton muihin aerodynamiikkakomponentteihin, jolloin niiden toimintaa on hankalaa ennakoida, jos etusiiven suunnittelee esimerkiksi vasta takasiiven jälkeen. Kuitenkin jos takasiiven suunnittelisi ensimmäisenä, olisi etuna se, että riski liian etuakselipainotteiselle aerobalanssille olisi pienempi sillä etusiivestä olisi helpompi tehdä sopivan tehoinen takasiipeen nähden. Tämän ei silti uskottu olevan ongelma, sillä autoon on tulossa sivusiivet, joiden sijoittelulla aerobalanssia voidaan siirtää tarvittaessa taaksepäin.

#### 5.1.1 Etusiiven eri versioiden suunnittelu

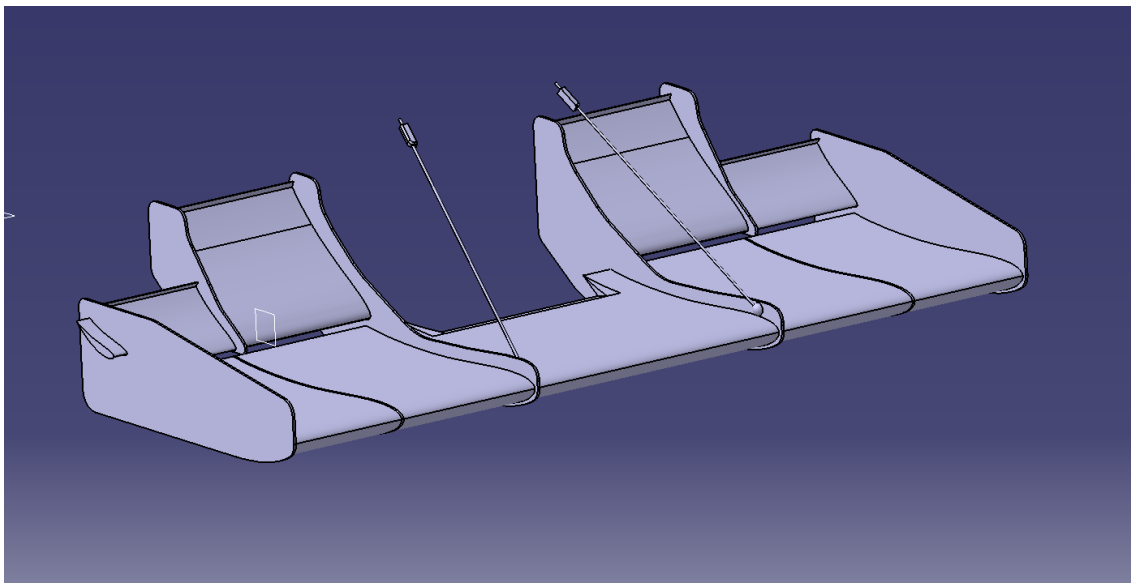
Ensimmäinen versio etusiivestä (kuva 21) on siivekeprofiililta muuttuvaprofiilinen malli, jossa ulompina profiileina käytetään valmiina olevaa pientä profiilia ja sisempään osaan siivekkeitä, eturenkaan sisäpuolella olevalle alueelle, on suunniteltu uusi profiili. Ennen CFD-laskentaa on uskottu, että etusiipi saavuttaa hieman korkeammat downforce-luemat HPF018-auton etusiipeen verrattuna, sillä virtauslinjan kaarevuus siiven alapuolella nousee siivekkeen muuttuneen sisäprofiilin vuoksi ja paine-ero siiven pinnoilla kasvaa. Siiven kohtauskulma ulommassa osassa siivekkeitä pidettiin aluksi samana kuin HPF018-autolla ja pääprofiilin kulma on asetettu kahteen asteeseen.



Kuva 21. Etusiiven ensimmäinen versio

CFD-laskennan tuloksien perusteella ensimmäinen siipimalli on ollut lähes yhtä tehokas kuin HPF018-auton etusiipi. Uusi siipimalli tuottaa noin 158 newtonin downforcen, kun HPF018-auton etusiipi tuottaa laskentojen perusteella noin 162 newtonia downforcea. Vaikka downforcen tuotossa uusi siipi hieman jää hieman, on se ollut tässä vaiheessa potentiaalinen, sillä siiven jättöreunaan ei ole vielä asetettu Gurneyn flapia ja kohtauskulmia sekä keskimmäisiä päätylevyjä ei ole optimoitu. Tämän jälkeen siipeä on testattu 10 mm korkean Gurneyn flapin kanssa ja muutokset nostavat siiven downforcea 166 newtoniin. Ilmanvastus nousee samalla 26:sta newtonista 29 newtoniin. Jatkokehitykseen ei kuitenkaan valittu ensimmäiseen versioon pohjautuvaa siipeä.

Jatkokehittäväksi päätynyt versio (kuva 22) on valittu siksi, että CFD-laskennan perusteella se on ollut välittömästi runsaasti tehokkaampi kuin aiemmat etusiiven versiot tuottaen CFD-laskennan mukaan noin 194:n newtonin downforcen. Ilmanvastus on noussut 34 newtoniin, mutta ilmanvastuksen nousu hyväksyttiin downforcen nousun ollessa merkittävästi runsaampaa. Tässä jatkoon valitussa designversiossa siiveke sisältää kahta eri profiilia. Ulompi, pienempi profiili on sama, mitä tiimi on käyttänyt kahdessa edellisessä autossaan siivekeprofiileina ja sisempää, suurempaa profiilia on käytetty aikaisemmin kaudella 2015. Pääprofiilin kulma pidettiin myös tässä versiossa 2 asteessa.



Kuva 22. HPF019-auton etusiiven raakaversioista jatkoon valittu versio

Se, miksi siiven on uskottu ennen CFD-laskentojen toteuttamistakin toimivan tehokkaammin kuin HPF018-auton etusiipi, perustuu suurempien siivekeprofiilien toimintaan. Suurempien siivekeprofiilien uskotaan ohjaavan siiven alapuolen virtauslinjoista siipiprofiiliin mukaisesti kaarevampia, kuitenkin virtauksen irtoamatta. Tämän vuoksi siiven alapuolella on entistä matalamman paineen alue. Johtuen siivekkeiden koosta ja korkeammasta pinta-alasta, myös ylipaine kasvaa siiven yläpuolella ja paine-ero siipipintojen välillä nousee. Kasvaneen siivekkeiden muodon, pinta-alan sekä downforcen uskotaan tosin myös nostavan jonkin verran ilmanvastusta, mutta huomattavasti vähemmässä määrin kuin downforcea. Erikokoisten profiilien väliselle alueelle on kehitetty vielä päätylevy, jotta siipiprofiilien muutoskohdassa virtauksen kulkeutuminen siiven yläpuolelta alapuolelle on minimoitu ja siiven tehokkuutta maksimoitu. Päätylevyn muotoilussa on tavoiteltu sekä sopivaa ulkonäköä että riittävää kokoa siivekeprofiilin alapuolelle. Siipidesignistä on hyötyä myös mekaanisessa suunnittelussa ja siiven valmistamisprosessissa, sillä se hyödyntää jo valmistettuja muotteja. Samoin siiven mekaanista toteutusta on mietitty jo alkuvaiheessa.

### 5.1.2 Valitun version yksityiskohtien muokkaaminen

Ensimmäisenä hiontakohteena etusiiven valitulle versiolle on tehty CFD-laskentoja siivekkeiden eri kohtauskulmille, mutta näitä ei tehty monta, sillä aggressiivisemmalla kohtauskulmalla ulompi osa siivekkeistä nousee yli päätylevyistä ja Formula Student Germanyn korkeussäännöistä. Jos siivekettä asettaa jyrkempään kulmaan ja laskee sen sijaintia päätylevyyn ja pääprofiiliin nähden, rako pääprofiilin ja siivekkeen välillä kutistuu niin pieneksi, että seurauksena on siiven tehon heikkeneminen. Loivempi kohtauskulma siivekkeelle taas vähentää downforcea. Lopputuloksena paras ja toteuttamiskelpoisin kohtauskulma siivekkeelle on se, jolla siipeä alun perin on lähdetty suunnittelemaan.

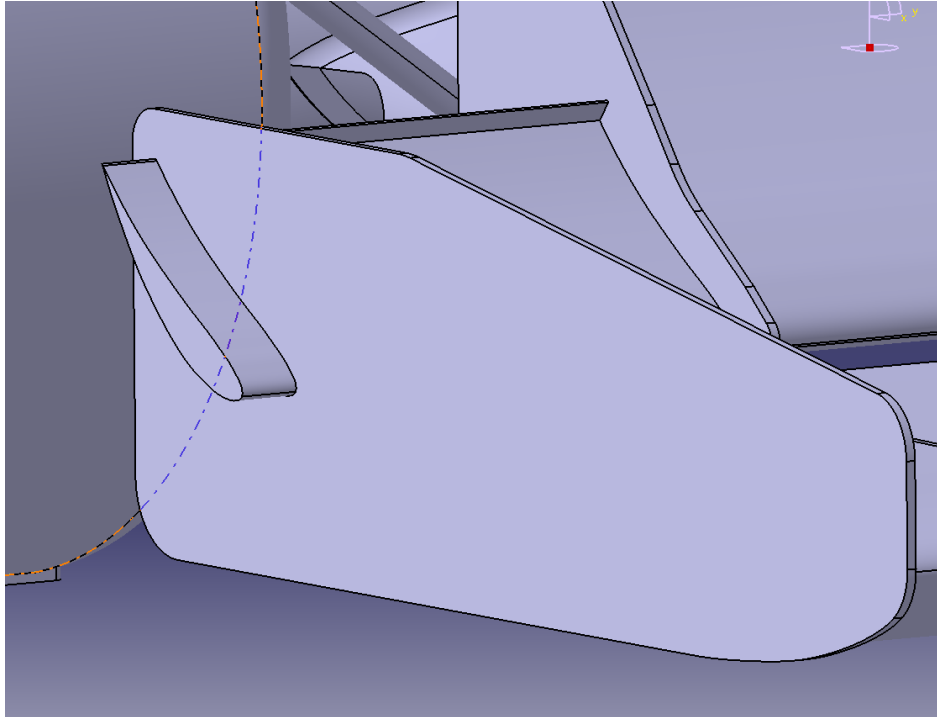
Siivessä eräs hionnan kohde on myös päätylevyjen ulkopuolella olleet pienet siipiprofiilin muotoiset ilmanohjaimet. Näiden ilmanohjaimien tarkoituksena on rajoittamaa syntyvää pyörrettä siiven reunalla. Vähentyneen pyörteilyn ansiosta ylipaine siivekkeen yläpuolella on korkeampi ja indusoitu vastus pienempi. Versioita on testattu ensimmäisen mallin jälkeen muutamissa eri kohtauskulmissa sekä sijainneissa, mutta suuria eroja laskennoissa ei ollut syntynyt näiden versioiden välillä.

Etusiipeä on CFD-laskettu myös muutamilla erilaisilla Gurneyn flapeilla ja parhaaksi Gurneyn flapiksi on osoittautunut 12 mm korkea Gurneyn flap, joka on 90 asteen kulmassa siivekkeen jänteeseen nähden. Gurneyn flapin CFD-laskennoissa on testattu myös loivempaa Gurneyn flapin kulmaa, jota käytettiin esimerkiksi HPF014-auton etusiivessä, mutta laskentojen tulokset ovat niin samankaltaisia, että ne mahdollisesti menevät myös CFD-laskentojen laskentatoleransseihin.

### 5.1.3 Etusiiven lopullinen design

Viimeisenä ja parhaana designinä etusiipeen ja sen ilmanohjaimiin pidetään ratkaisua, jossa päätylevyyn tehdään reikä, jonka läpi tulee siivekeprofiili (kuva 23). Tämän ratkaisun syy on, että siivekeprofiilin uskotaan olevan hieman tehokkaampi kuin pienempi ilmanohjain ja ratkaisun konkreettinen toteuttaminen tulee onnistumaan helposti. CFD-laskennan jälkeen on todettu, että edut ovat samat kuin pienemmässä päätylevyn ilmanohjaimessa, mutta suurempana ja tehokkaampana se nostaa downforcea 10 newtonilla.

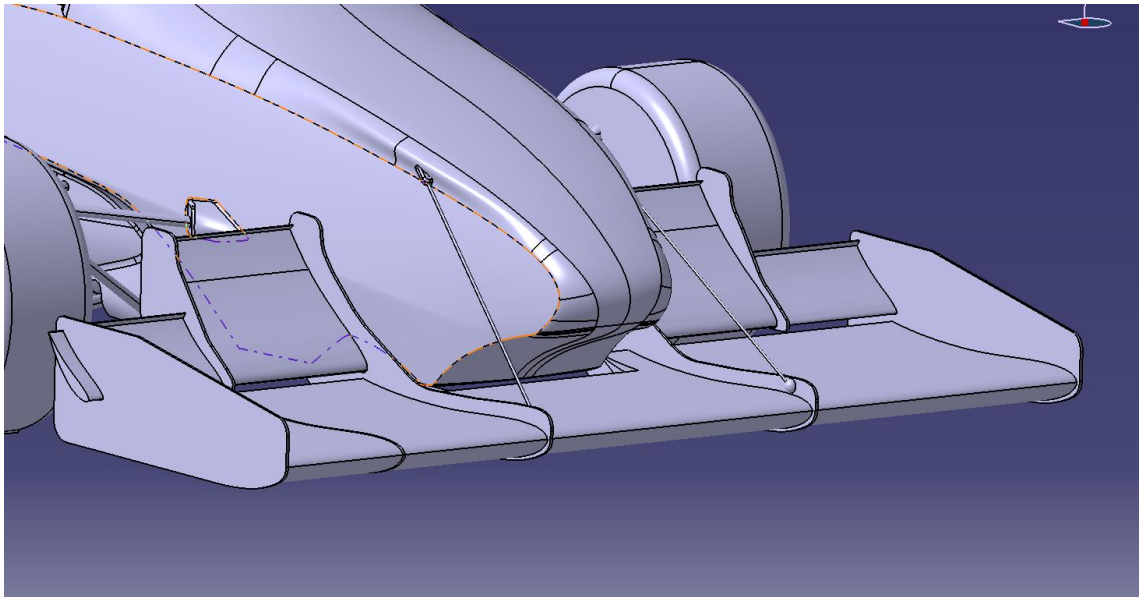
Ilmanvastus nousee noin 2–3 newtonia, sillä ratkaisu kasvattaa kuitenkin siiven muoto-  
vastusta. Ilmanvastuksen nousu on kuitenkin pieni ja downforcen nousu riittävän suuri,  
että ratkaisu on päätetty valita autoon.



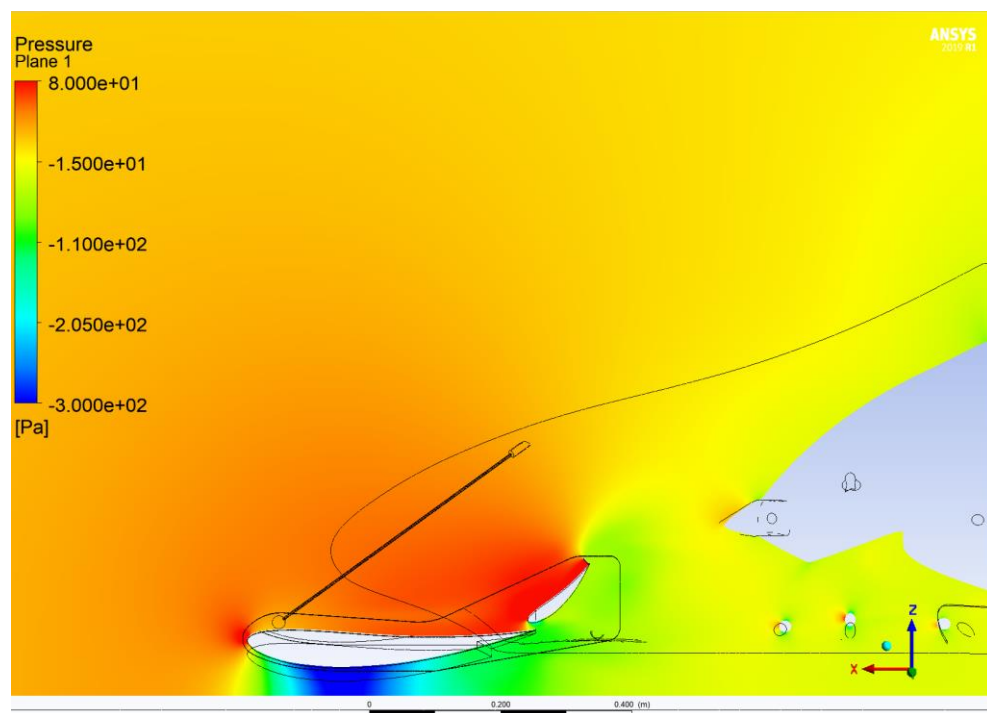
Kuva 23. Etusiiven päätylevyn ilmanohjain

Etusiiven toteuttamistapa tekee siivekkeen kohtauskulmasta lukitun, mikä vaikuttaa hie-  
man auton ilmanvastukseen kiihdytysnopeutta mittaavassa ajo-osuudessa Formula Stu-  
dent -kilpailuissa. Tällöin ilmanvastusta ei voida vähentää loiventamalla siivekkeen koh-  
tauskulmaa. Hyöty, jota siiven nousseesta downforcesta saadaan muihin kilpailuosuuk-  
siin, on katsottu kuitenkin suuremmaksi kuin hieman noussut ilmanvastus kiihdytysosuus-  
teen.

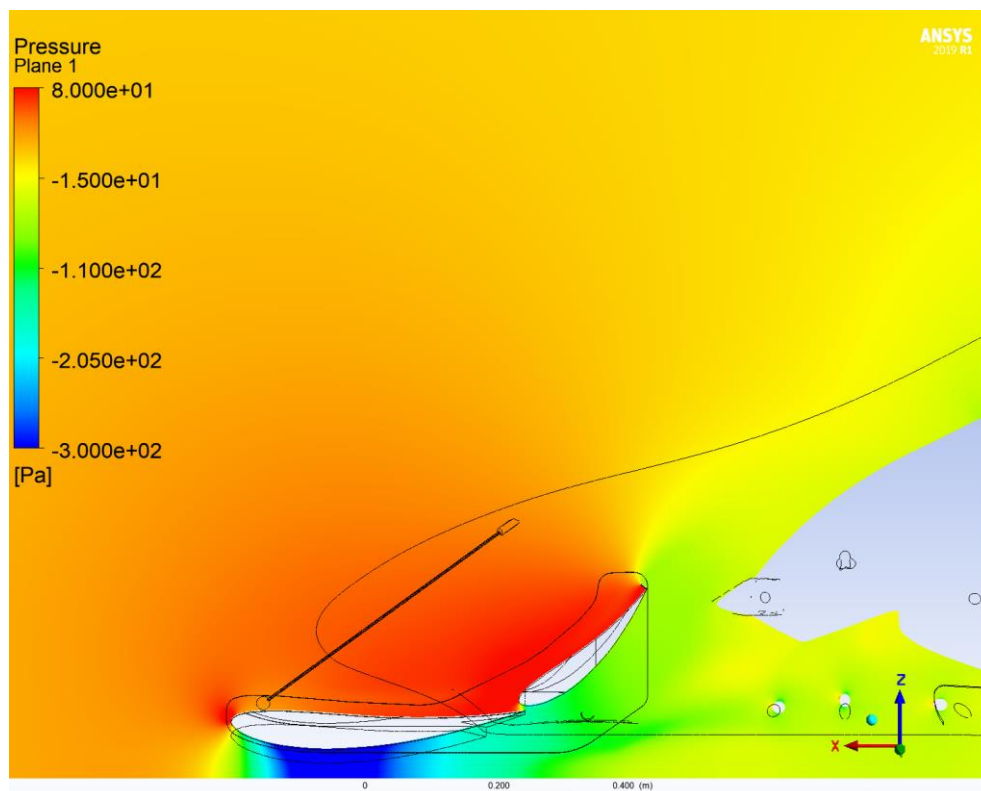
Lopullinen etusiiven design (kuva 24) tuottaa lopulta 206 newtonin downforcen ja 37  
newtonin ilmanvastuksen ja painejakaumista (kuvat 25 ja 26) näkee kasvaneet paine-  
erot siiven ylä- ja alapuolella verrattuna HPF018-auton etusiipeen.



Kuva 24. HPF019-auton lopullinen etusiipi CFD-laskentaan tehdyssä mallissa



Kuva 25. HPF018 etusiiven painejakaumataso 0,25 metrin päästä auton keskitasoa



Kuva 26. HPF019 etusiiven painejakaumataso 0,25 metrin päästä auton keskitasoa

## 5.2 Sivusiivet

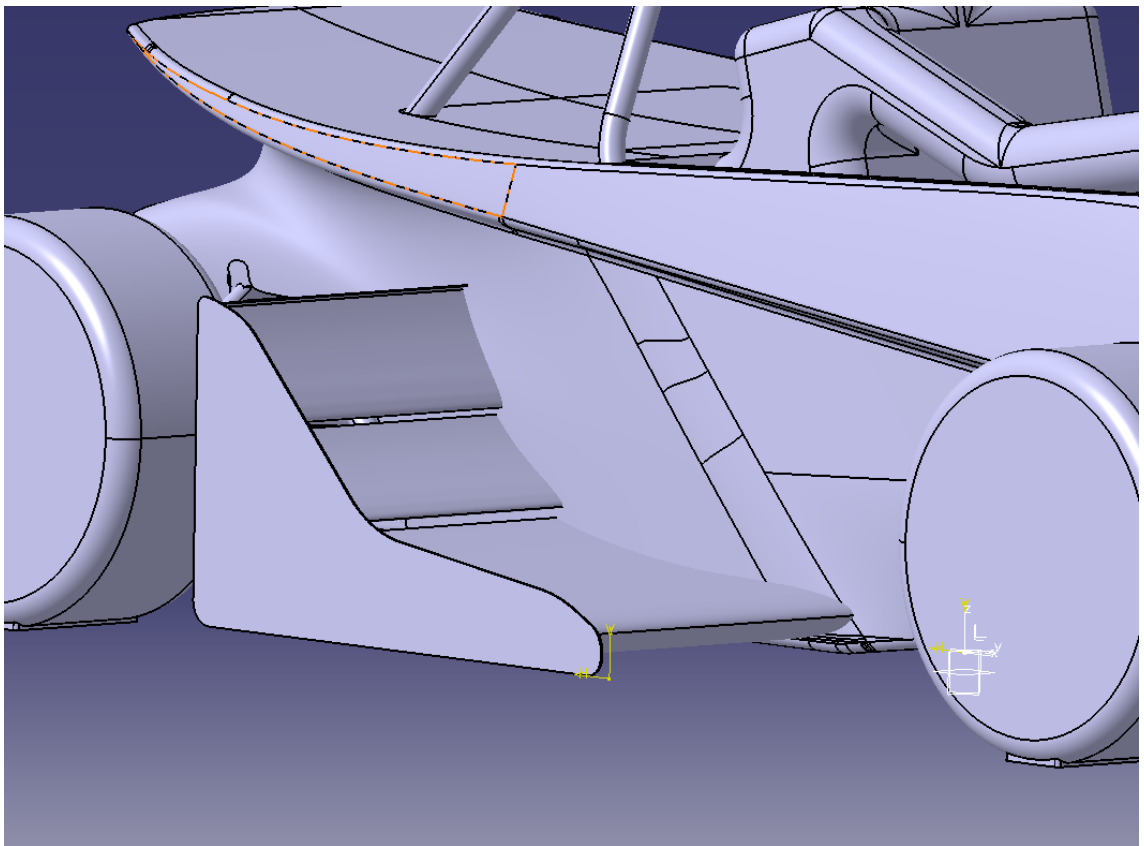
Sivusiivet tai pohjalevyt ovat Formula Student -autoissa yleisiä. Näiden avulla myös auton kylkien ohi ohjautuvista virtauksista voidaan saada aerodynaamisia hyötyjä. Sivusiipiin tai pohjalevyyn saatetaan myös integroida esimerkiksi jäähdytin. Sivusiivet halutaan HPF019-autoon, sillä niiden uskotaan tuovan autolle lisää downforcea ilmanvastuksen nousun ollessa suhteellisen vähäinen. Kasvanutta jäähdytystarvetta ei HPF019-autolle ole, joten sivusiipien ja aerodynamiikan suunnittelussa jäähdytystä ei tarvinnut ottaa huomioon.

### 5.2.1 Sivusiipien ideointi

Sivusiivistä halutaan massaltaan kevyet, helpot kiinnittää ja irrottaa sekä sellaiset, että ne tuottavat selkeän noston auton tuottamaan kokonaisdownforcen määrään. Sivusi-

vistä on tehty useita kymmeniä toisistaan poikkeavia versioita, joten jokaista erilaista sivusiipiversiota ei tämän työn puitteissa käydä läpi. Tässä työssä käydään kuitenkin läpi muutamaa erilaista desing-iteraatiota, jotta saadaan kuva, mitä erilaisia ratkaisuja on esimerkiksi suunniteltu. Jokainen sivusiipimalli on kummallakin puolella autoa identtinen.

Sivusiipimalli 6 (kuva 27) on eräs vaihtoehtoista, jota on harkittu autoon. Tässä ratkaisussa on pääprofiili ja kaksi sitä tukevaa siivekettä. Tällöin siiven kokonaiskohtauskulman ansiosta virtauslinjat siiven alapuolella ovat hyvin kaarevia, jonka myötä siiven alla virtaa matalapaineista ilmaa ja paine-ero siksi siipipinnoilla korkea. Tämän lisäksi myös maaefektin uskotaan nostavan siiven tehoa. Takarenkaiden ilmanvastuksen vähentämiseksi siiven uskotaan ohjaavan virtausta takarenkaiden ohi ja vähentävän täten myös niiden aiheuttamaa nostetta. Epäilyksenä siiven toiminnalle on se, onko etusiiven ja eturenkaan takana kulkevassa virtauksessa riittävästi kineettistä energiaa siivelle toimia toivotulla tavalla sekä siipien runkoon kiinnittämisen hankaluus.

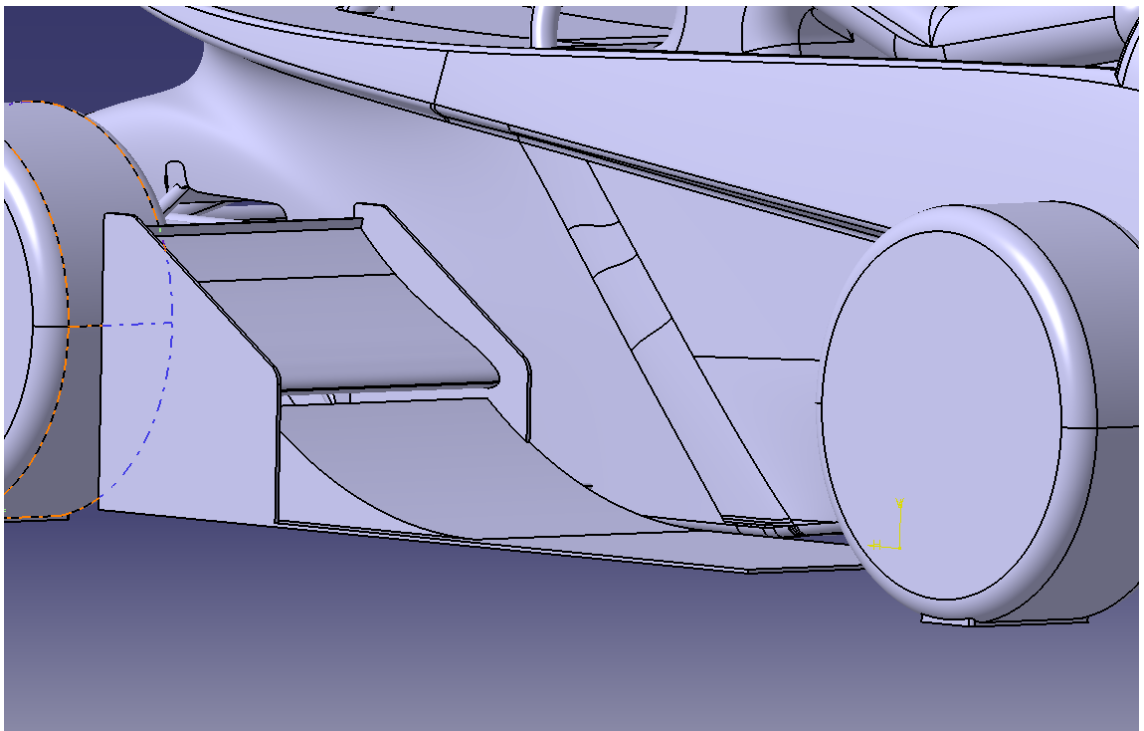


Kuva 27. Sivusiipimalli 6 HPF019-auton kyljessä



Sivusiipimalli 6:sta on tehty CFD-laskelmat ja tuloksena on auton diffuusorin kasvanut downforce sekä siiven itsensä tuottama downforce. Diffuusorin uskotaan toimivan sen vuoksi tehokkaammin, että auton sivuilta ei enää virtaa lisää virtausta auton alapuolelle koska tämä virtaus ohjautuu sivusiivelle. Kokonaistuloksena sivusiipimalli 6 tuo autolle 67 newtonia downforcea diffuusorille ja 77 newtonia downforcea siivusiipien tuottamana. Ilmanvastusta sivusiipimalli 6 tuottaa 37 newtonia ja takarenkaan ilmanvastus oli siiven ansiosta hävinnyt merkityksettömäksi.

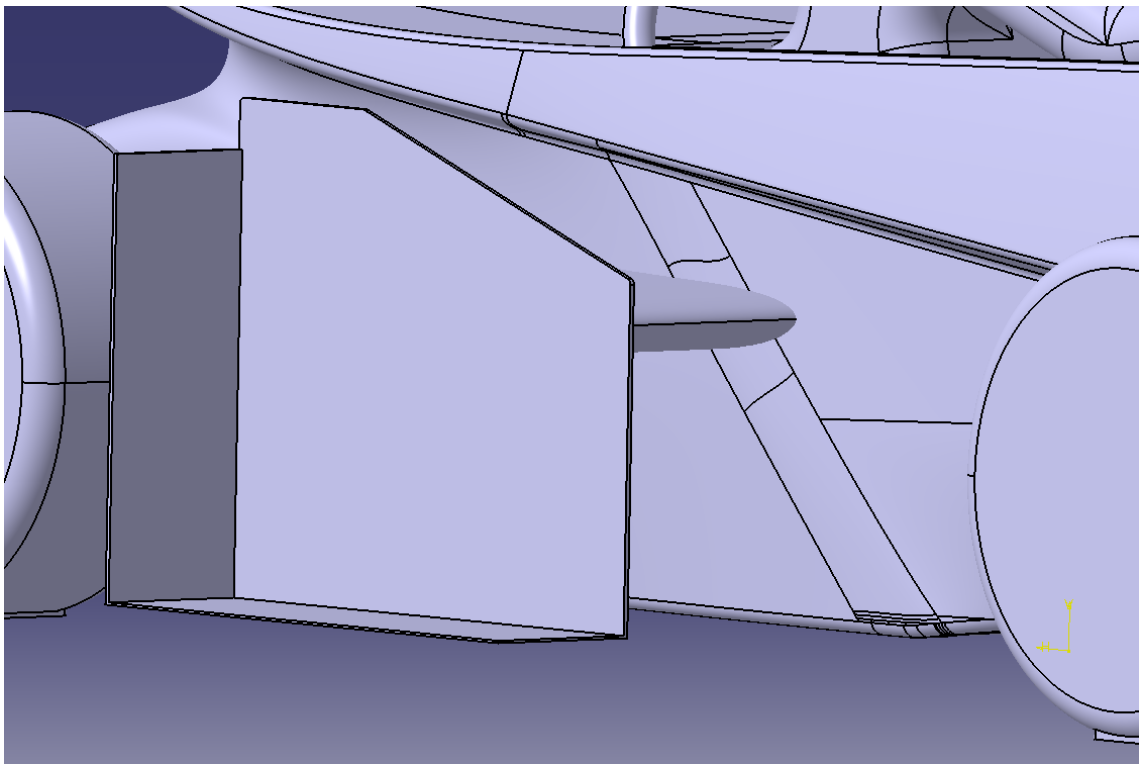
Sivusiipi/pohjalevymalli 13:ta (kuva 28) uskotaan toimivan samalla periaatteella kuin diffuusorin. Tunneliosan taakse on lisätty vielä keskikokoinen siipiprofiili. Siipiprofiili itse tuo hieman downforcea ja sen avulla saadaan myös mahdollisesti tunneliosan toimintaa tehostettua. Siipiprofiilin uskotaan myös ohjaavan virtausta yli takarenkaista, jotta takarenkaan tuottama ilmanvastus ja noste vähenee. Siipiprofiilin jättöreunaan on asetettu myös Gurney flap, kuten sivusiipimalli 6:ssa.



Kuva 28. Sivusiipi/pohjalevymalli 13 HPF019-auton kyljessä

CFD-laskennan perusteella sivusiipi/pohjalevy 13 tuottaa 56 newtonin downforcen ja diffuusori tuottaa 41 newtonin downforcen. Malli tekee diffuusorista heikomman kuin esimerkiksi sivusiipi 6:n tapauksessa. Ilmanvastus mallilla on 24 newtonia ja takarenkään ilmanvastus vain muutamia newtoneita.

Sivusiipimalli 17 (kuva 29) on suunniteltu pitäen mahdollisena, että lähellä maatasoa eturenkaan ja takarenkaan välisellä alueella, virtauksessa ei välttämättä ole riittävästi kineettistä energiaa erilaisten siipikonfiguraatioiden kunnolliseen toimintaan ja siipiprofiili täytyy siksi viedä ylemmäs, korkeamman kineettisen energian virtaukseen. Ratkaisu on myös suhteellisen yksinkertainen toteuttaa ja mekaanisesti sivusiivistä tulee kevyitä, joka on erittäin tärkeä osa aerodynamiikkakomponenttien mekaanista suunnittelua. Siipien valmistus tulee myös olemaan suhteellisen helppoa ja kaikki tarvittavat muotit siipiä varten ovat jo valmiina olemassa.



Kuva 29. Sivusiipimalli 17 HPF019-auton kyljessä

Mallissa päätylevyn sisäpuolella on siipiprofiili, jossa on käytetty samaa profiilia kuin etusiiven pääprofiilissa. Siipiprofiilin uskotaan toimivan sakkaamatta maatasossa olevaan siipeen verrattuna virtauksen korkeamman kineettisen energian vuoksi. Päätylevyn ulkopuolella sijaitsevan tasaisen levyn on myös tarkoitus tuottaa downforcea siten että pystylevy hidastaa virtausta tasaisen levyn yläpuolella ja kasvattaa paine-eroa levyn pinoilla. Sen lisäksi pystylevyn on tarkoitus ohjata virtausta takarenkaiden yli vähentämään takarenkaiden ilmanvastusta ja virtaushäiriöitä. Sivusiipiversion CFD-laskennan perusteella sivusiivet tekevät 48 newtonia downforcea ja diffuusion tuottama downforce autolle on 69 newtonia. Ilmanvastusta sivusiivet tuottavat 21 newtonia, mutta takarenkaiden noste ja ilmanvastus on saatu minimoitua merkityksettömiksi.

Mallia on haluttu myös testata varmuuden vuoksi muuten samanlaisena, mutta siipiprofiilia on laskettu lähemmäs maatasoa maaefektin vaikutuksen kokeilemiseksi. Tulokset CFD-laskennasta ovat 40 newtonin downforce sivusiiville ja 48 newtonin downforce diffuusionille. Ilmanvastus on 21 newtonia. Heikentyneen tehon uskotaan johtuvan siitä, mitä mallia alun perin suunniteltaessa on päätelty.

### 5.2.2 Sivusiipien designin valinta ja viimeistely

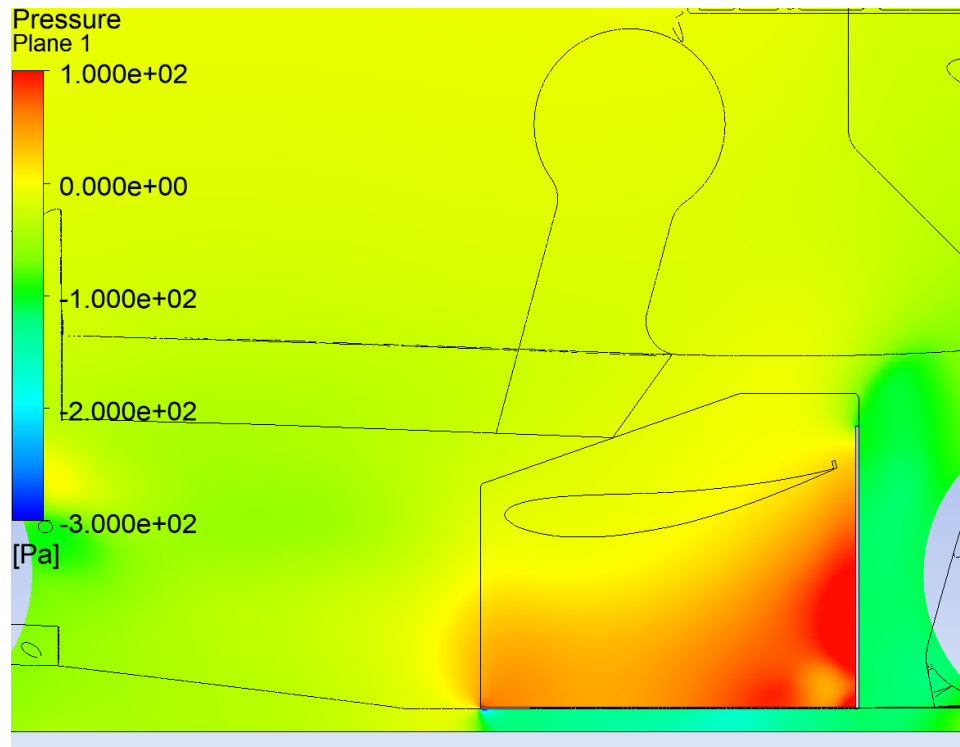
Sivusiipiversioista on valittu jatkokehitykseen ja viimeisteltäväksi sivusiipiversio 17, vaikka downforcen kannalta tehokkaampiakin siipiratkaisuita on suunniteltu. Valintaan vaikuttaa se, että sivusiipiversio 17 on mekaanisesti helpompi toteuttaa kuin muut versiot ja sivusiivistä halutaan myös mahdollisimman kevyet. Tässä sivusiipiversio 17 on vahvin ehdokas, sillä siitä saa mekaanisella suunnittelulla erittäin kevyen verrattuna tehokkaampiin versioihin. Myös resurssien ja aikataulujen vuoksi monimutkaiset sivusiipirakennelmat eivät päätyneet valituksi, sillä ne toisivat ylimääräistä riskiä aerodynamiikkapaketin tavoitteiden onnistumiselle esimerkiksi aikataulun suhteen.

Sivusiipeä on testattu CFD-laskennassa designvalinnan jälkeen ilman Gurneyn flappia sekä sen kanssa. Gurneyn flapin uskotaan tuottavan lisädownforcea siivelle, mutta koska on tapauksia, jossa Gurneyn flapia ei suositella käytettäväksi loivemmilla siivenkulmilla, on vaihtoehtoa ilman Gurneyn flappia punnittu. Tuloksena on, että ilman Gurneyn flapia sivusiipien downforce putoaa 4:llä newtonilla ja ilmanvastus yhdellä newtonilla, jonka vuoksi Gurneyn flapia on päädytty käyttämään sivusiivissä.

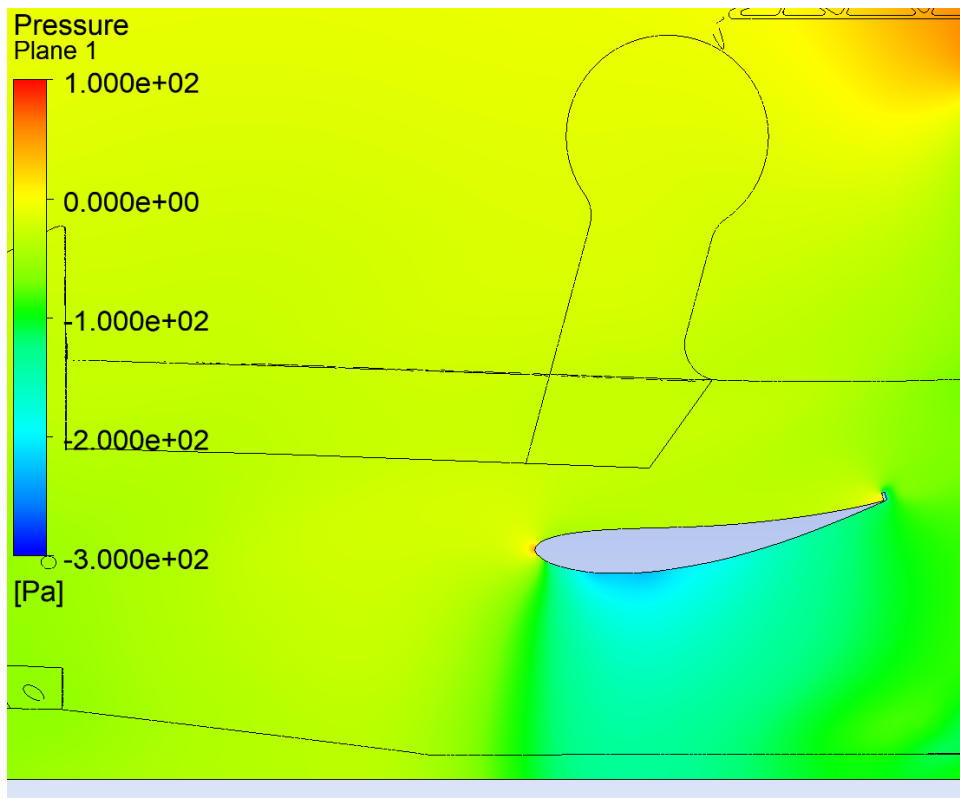
Sivusiiven pystyseinämälle on kokeiltu myös kahta eri kokoa. Tätä vertaillaessa CFD-laskennassa sivusiiven pystyseinämän kokoa on muutettu ensimmäisen version 370 millimetristä 310 millimetriin. Tämän uskotaan vähentävän hieman ilmanvastusta, mutta myös downforcen uskottiin laskevan. Laskentatuloksien perusteella sivusiipien ilmanvastus laskee noin 2 newtonia downforcen laskiessa 4–5 newtonia. Tämän vuoksi sivusiivissä on päädytty käyttämään 370 mm korkeaa pystyseinämää.

Näiden jälkeen siipiprofiilia on kokeiltu CFD-laskennoissa eri kohtauskulmalla. 8:n ja 13 asteen kohtauskulmilla ei tullut merkittäviä muutoksia siipien toimintaan, joten kohtauskulmaksi siipiprofiilille on valittu 8 astetta, sillä alkuperäiset suunnitelmat siiven mekaanisesta kiinnityksestä sopivat parhaiten tälle vaihtoehdolle.

Viimeinen vertailtu osuus on pienikokoiset, noin sentin korkuiset sivuseinämät sivusiiven tasaisen levyn ulkoreunassa, sillä näiden on uskottu ehkäisevän ilmavirran kulkeutumista lattiatason yläpuolelta alapuolelle. Laskentatuloksissa on vain hyvin pieni ero malleilla ilman sivuseiniä ja sivuseinien kanssa ja sen vuoksi sivuseinämiä ei olla päädytty käyttämään. Lopulliseksi valittu sivusiipidesign (kuvat 30 ja 31) tuottaa autossa 52 newtonin downforcen ja diffuusori tuottaa 73 newtonin downforcen. Ilmanvastusta sivusiivet tuottavat 21 newtonia. Takarenkaan ilmanvastus ja noste on saatu sivusiipien ansiosta hyvin pieneksi, käytännössä merkityksettömäksi.



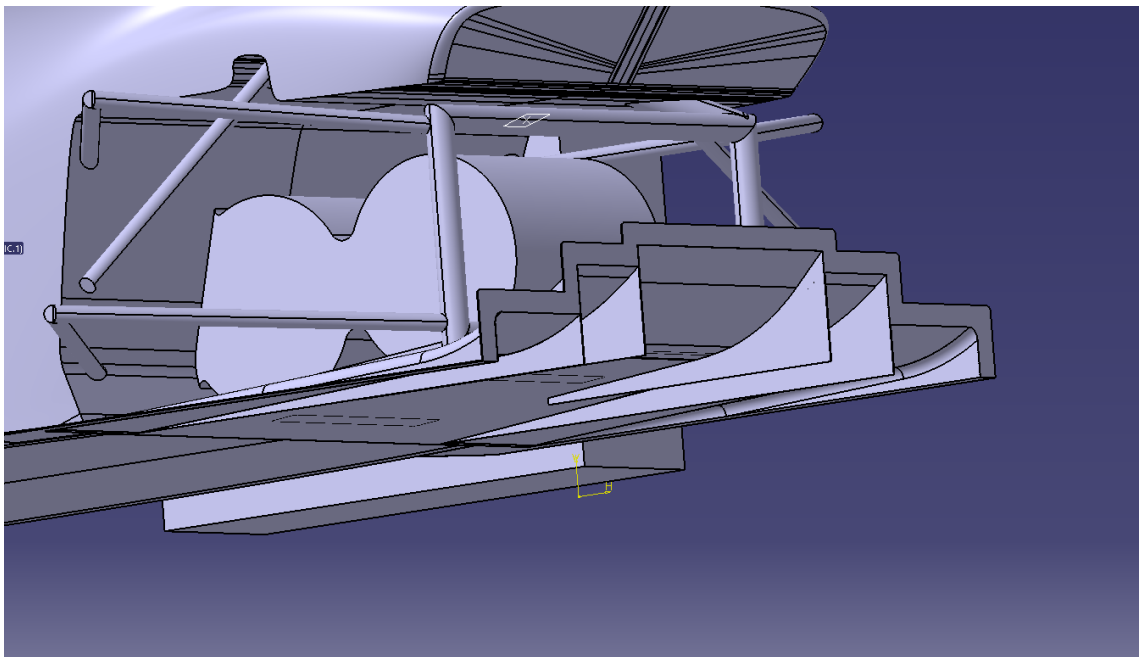
Kuva 30. Sivusiiven lopullisen version painekuvaajataso 0,61 m:n päästä auton keskitasoa



Kuva 31. Sivusiiven painejakaumataso 0,4 m:n päästä päästä auton keskitasoa

### 5.3 Diffuusori

HPF019 ja HPF018 ovat rungoiltaan lähes identtisiä, joten vanha diffuusori tulee sopimaan edelleen HPF019-auton runkoon kiinni. Sen lisäksi HPF018 auton diffusorin suunnitteluun oli jo käytetty satoja työtunteja kaudella 2018. Näiden seikkojen vuoksi suunniteltu uusi diffuusori tulisi olemaan toiminnaltaan todennäköisesti vain hyvin pieni parannus HPF019-auton aerodynamiikkaan. Sen vuoksi resursseja on haluttu kohdistaa muualle ja HPF019-autossa on päädytty käyttämään samaa diffusoria kuin HPF018-autossa (kuva 32).



Kuva 32. HPF018- ja HPF019-autojen diffuusori

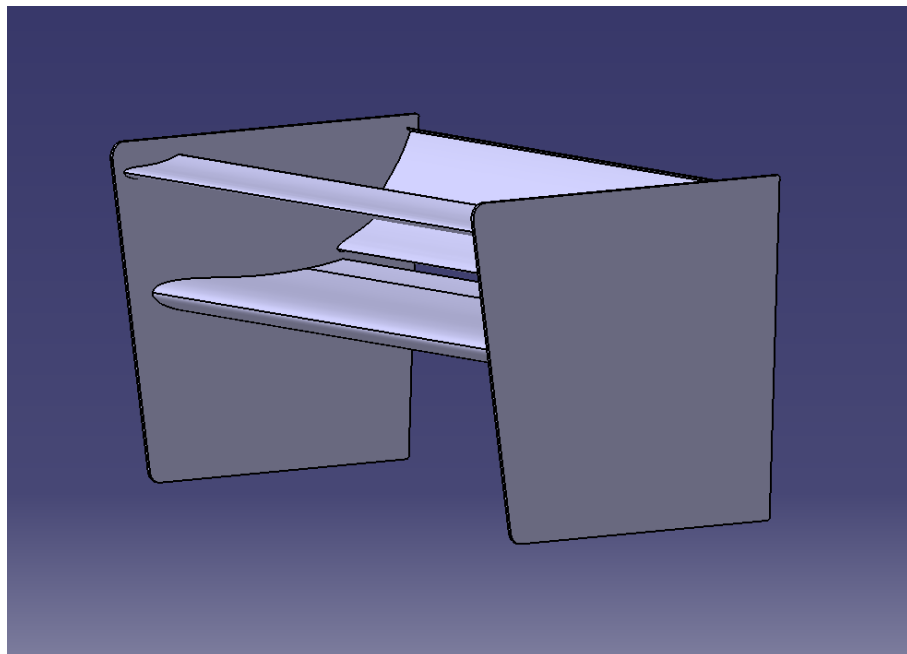
Diffuusori tuotti HPF018-autossa noin 30 newtonin downforcen. Koska diffusorin kurkku sijaitsee vain hieman taka-akselin edessä, siirtää diffuusori myös aerobalanssia taka-akselia kohti. HPF019-auton sivusiipien vuoksi diffusorin teho on noussut ja diffuusori tuottaakin HPF019-autossa noin 73 newtonin downforcen ja aerobalanssi on siirtynyt tämän avulla hieman enemmän taka-akselille.

## 5.4 Takasiipi

HPF019-auton viimeinen pääkomponentti aerodynamiikkapaketista on takasiipi. Takasiiven merkittävä tehostaminen on haastavin osa HPF019-auton suunnittelua, sillä erityisesti etusiiveltä ja sivusiiviltä kulkeutuvat jättövirtaukset heikentävät takasiiven toimintaa. Tämän vuoksi takasiipi on haluttu suunnitella viimeisenä, koska tällöin tiedetään, kuinka edellä mainitut komponentit sen suorituskykyyn vaikuttavat. Takasiipi on myös hyötysuhteeltaan tehottomin aerodynaaminen komponentti, joten sen suunnittelussa joudutaan tekemään mahdollisesti paljon kompromisseja ilmanvastuksen suhteen, kun tavoitteena on korkeiden downforce-lukemien saavuttaminen.

### 5.4.1 Uuden takasiiven lähtökohdat ja suunnittelu

Takasiivestä halutaan selkeästi tehokkaampi kuin HPF018-auton takasiivestä, jotta auton tuottama downforce kasvaisi ja aerodynaaminen balanssi siirtyisi kohti taka-akselia. Tämän vuoksi suunnittelussa on kokeiltu hyvin monenlaisia takasiipiversioita. Esimerkkinä eräässä versiossa takasiiven yläpuolelle päätylevyn etukulmaan on asetettu siivekke (kuva 33), koska on pidetty mahdollisena siivekkeen tehostavan takasiipeä.



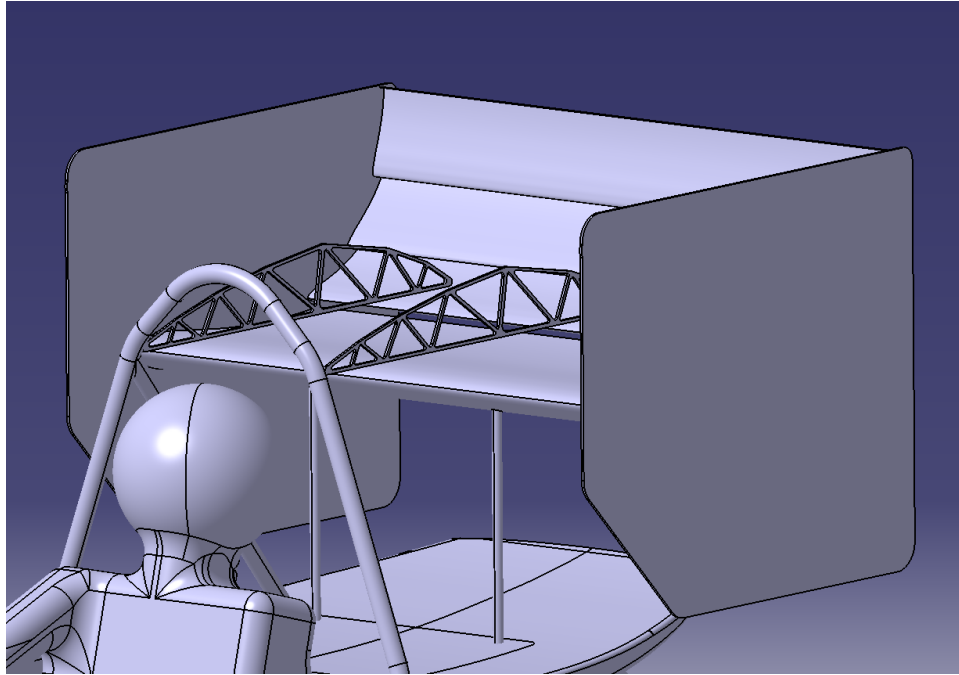
Kuva 33. Eräs HPF019:n takasiiven versioista

Mahdollisuutena on pidetty myös sitä, että siiveke ei välttämättä tehosta siiven toimintaa, sillä alipainealue, joka siivekkeellä on alapuolella, on siiven pääprofiilin ylipainealuetta. Tämä voi heikentää siivekkeen sekä pääprofiilin tehoa jopa niin paljon, että kokonaisuudessa siivekkeen lisääminen siipeen vain heikentää siiven toimintaa. Koska asia on haluttu selvittää, on siipiversiolle tehty CFD-laskenta ja lopputuloksena downforcen ja ilmanvastuksen nousu on hyvin pientä, lähes merkityksetöntä. Ratkaisua on kokeiltu myöhemmin myös hieman erilaisilla kohtauskulmilla ja siivekkeen sijainnilla, mutta eroja laskentatuloksissa ei silti näkynyt merkittävästi.

Myös tavallista, HPF018-auton tyylistä siipikonfiguraatiota on kokeiltu CFD-laskennassa eri kohtauskulmilla. Kohtauskulmien optimoinnit nostavat downforcea, mutta hyvin vähän eivätkä useita kymmeniä newtoneita, joka on ollut tavoitteena.

Takasiipeen on kokeiltu viimeisimpänä versiona vielä neljättä elementtiä muiden siivekkeiden jatkoksi (kuva 34). Tämän uskotaan tehostavan siipeä, sillä vaikka sääntöjen vuoksi pääelementin profiilia joudutaan hieman laskemaan ja tällöin pääprofiilille ohjautuva virtaus ei ole aivan yhtä korkean kineettisen energian virtausta, saadaan siivekkeiden välisestä raosta kuitenkin korkeamman energian virtausta vielä viimeisellekin siivekkeelle, jolloin tämän siivekkeen kohtauskulma voidaan asettaa hyvin jyrkkään kulmaan, lähes kohtisuoraan maatasoa nähden. Tällöin kokonaisuutena virtauslinja siiven alapuolella muuttuu kaarevammaksi kuin kolme-elementtisellä siivellä ja paine-ero kasvaa korkeammaksi. Siiven odotetaan siis kasvattavan auton downforcea, mutta etenkin viimeisen elementin jyrkän kohtauskulman aiheuttaman muoto- sekä kitkavastuksen vuoksi ilmanvastuksen odotetaan myös nousevan. Tällaisia siipiratkaisuja ei kuitenkaan näe usein moottoriurheilun kärkiluokissa sääntöjen vuoksi; esimerkiksi FIA:n World Endurance Championshipissä säännöt rajoittavat LMP1-luokassa siipielementtien määrän kahteen [17, s. 18].



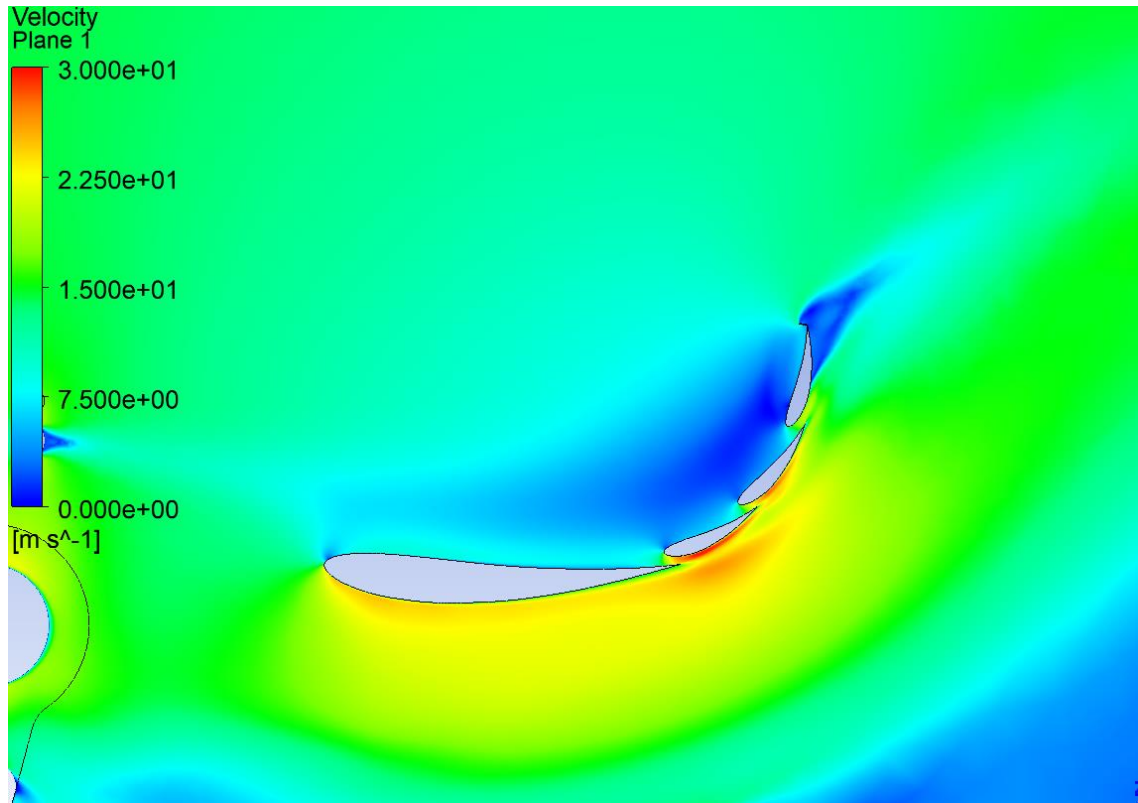


Kuva 34. HPF019:n nelielementtinen takasiipi

Nelielementtinen takasiipi toimii CFD-laskennan perusteella toivotunlaisesti ja downforcen tuotto kasvoi verrattuna HPF018:n takasiipeen. Takasiipi tuottaa ensimmäisellä versiollaan 181 newtonin downforcen ja 74 newtonin ilmanvastuksen ja aerodynaaminen balanssi siirtyi 51 %:sta etuakselilta 52 %:iin taka-akselille. Siiven aerodynaaminen hyötysuhde verrattuna kolmielementtiseen HPF018-auton siipeen heikkeni, mutta kasvaneen downforcen ja taaksepäin siirtyneen aerodynaamisen balanssin vuoksi nelielementtinen siipi on valittu HPF019-autoon.

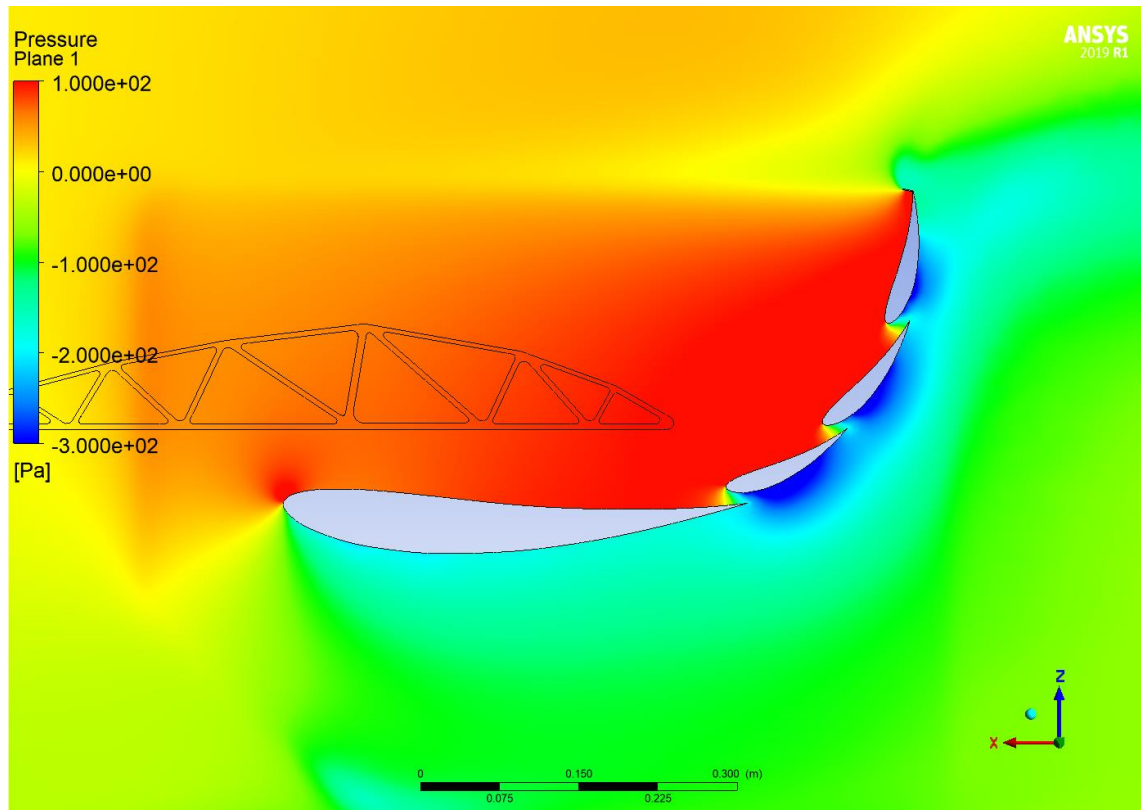
#### 5.4.2 Takasiiven lopullinen design

Kun siiven perusrakenne on valittu, on siitä tehty versioita eri kohtauskulmilla. Näitä versioita on tehty yhteensä seitsemän erilaista, sillä tiukan aikataulun vuoksi kohtauskulmia ei ole ehditty optimoida enempää. Mikään versio ei toimi aivan täydellisesti, sillä osassa versioista on havaittavissa virtauksen irtoamista ennen neljännen elementin jättöreunaa (kuva 35) ja loput versiot eivät taas ei olleet stagnaatiopisteen optimoinniltaan parhaita mahdollisia ja paine-erot siiven pinnoilla eivät sen vuoksi aivan yhtä korkeita



Kuva 35. Nopeustaso eräästä nelielementtisen takasiiven versiosta 0,01 m:n päästä auton keskitasoa. Virtauksen irtoaminen ennen neljännen elementin jättöreunaa on havaittavissa sinisenä nopeuskuvajana.

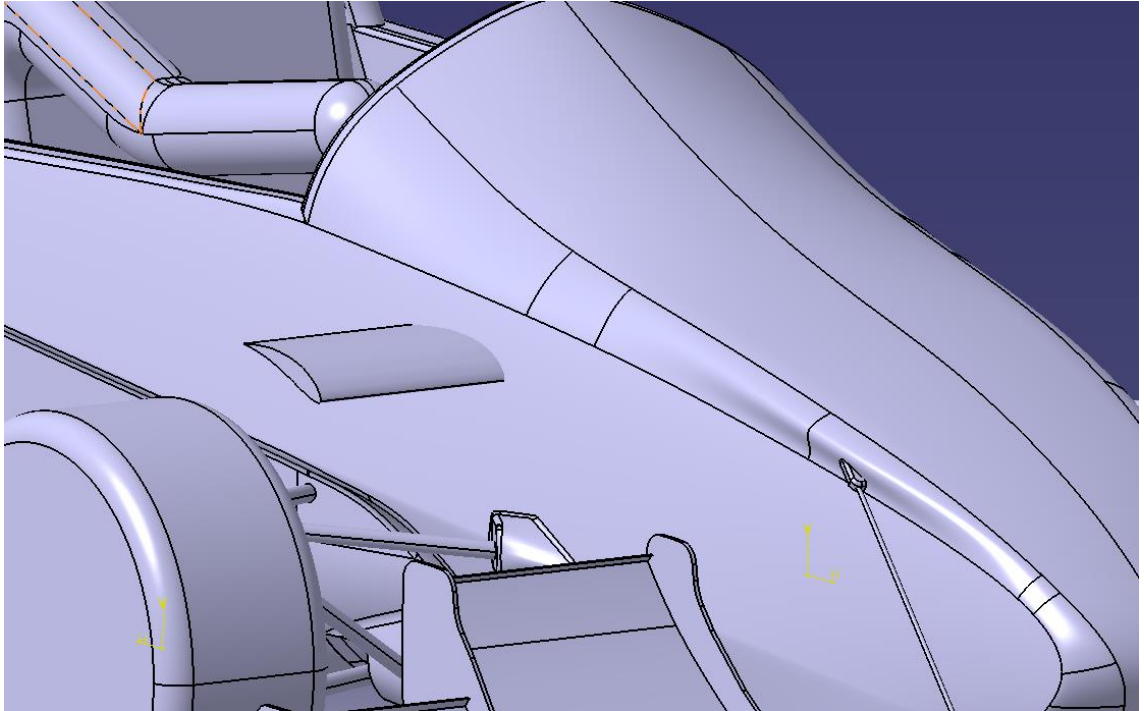
Seitsemästä tehdystä versiosta autoon on lopuksi valittu versio 5:ksi nimetty takasiipi (kuva 36). Takasiipiversio tuottaa 186 newtonia downforcea ja 84 newtonia ilmanvastusta. Lopputuloksena takasiiven downforcen nousu HPF018-autoon verrattuna on 15 newtonia ja ilmanvastuksen nousu 29 newtonia. Pitää kuitenkin huomioida, että HPF018-auton etusiipi ei häiritse takasiiven toimintaa yhtä paljon ja HPF018-autossa ei ole sivusiipiä aiheuttamassa ylimääräistä häiriötä takasiiven virtauksiin. Tämän vuoksi täydellistä vertailua HPF018:n ja HPF019:n takasiipien välillä on mahdotonta tehdä. Suhteessa enemmän lisääntynyt ilmanvastus on kuitenkin hyväksytty downforcen kasvattamisen ja aerobalanssin optimoinnin vuoksi. Takasiipeä voidaan tulevaisuudessa jatkokehittää paremmaksi tuleviin Metropolia Motorsportin autoihin optimoimalla siivekkeiden kohtauskulmia enemmän.



Kuva 36. Takasiiven painekuvaaja 0,45 m:n päästä auton keskijakajaa

## 5.5 Nose cone -siivekkeet

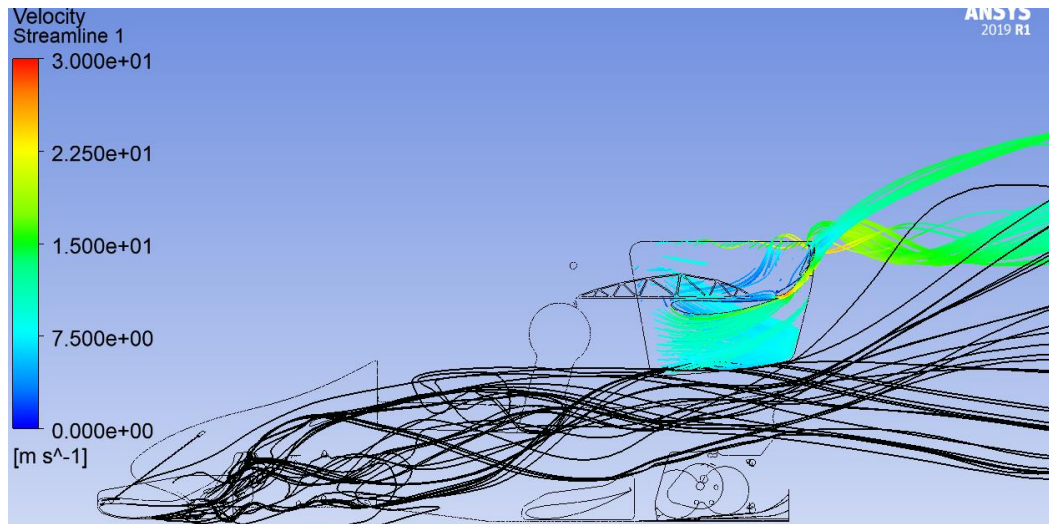
Nose cone siivekkeet (kuva 37) ovat yleistyneet Formula Student -autoissa runsaasti viimeisen kahden kauden aikana. Nose cone -siivekkeitä on testattu myös HPF019-auton suunnittelussa, sillä niiden uskotaan parantavan auton takasiiven toimintaa tuomalla sille enemmän vapaata korkeamman kineettisen energian ilmavirtausta ohjaamalla etusiiven jättövirtauksen heikomman kineettisen energian ilmavirtausta alaspäin, ohi takasiivestä. Tällöin virtauksen irtoaminen takasiiven neljännessä elementissä voisi kulkeutua lähemmäs siipielementin jättöreunaa ja alipaine sekä virtaus takasiiven pääprofiilin alapuolella kasvaa.



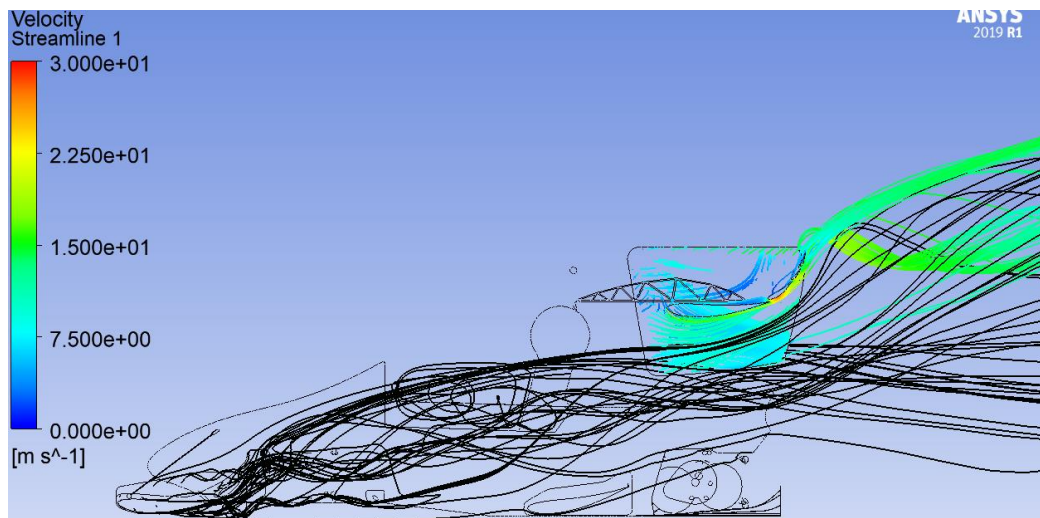
Kuva 37. Nose cone -siiveke HPF019-autossa

Nose cone -siivekkeiden muotoilu on samanlainen kuin muillakin pienemmillä siivekkeillä. Sitä ei kuitenkaan ole käännetty ylösalaisin kuten kilpa-auton siivet tavallisesti, sillä siivekkeen tarkoitus on vain ohjata ilmavirtausta, siivekkeiden tuottama noste on vain valitettava sivutuote. Designin kuitenkin uskotaan tuottavan takasiivelle ja autolle kokonaisuudessaan enemmän downforcea kuin siivekkeet tuottavat nostetta ja tehostuneen takasiiven avulla voidaan myös saada auton aerodynaamista balanssia taka-akselia kohti.

Tulokset nose cone -siivekkeillä varustellun auton CFD-laskennoista ovat olleet rohkaisevia. Etusiiven tehokkuus heikkenee 1–2 prosentilla, minkä uskotaan johtuvan etusiiven jättöreunan virtausmuutoksesta, mitä nose cone -siivekkeet tuovat. Takasiiven tehokkuus sen sijaan nousee noin 5 % ja itse nose cone -siivekkeet tuo noin 3 newtonin nostevoiman. Aerodynaaminen balanssi siirtyy runsaat 2 % enemmän taka-akselille. Ilmanvastukseen nose cone -siivekkeet eivät ole vaikuttaneet merkityksellisellä tavalla. Myös virtauskuvaajien perusteella nose cone -siivekkeet toimivat halutulla tavalla (kuvat 38 ja 39).



Kuva 38. Virtauskuvaajat, kun autossa on asennettuna nose cone -siivekkeet



Kuva 39. Virtauskuvaajat, kun autossa ei ole nose cone -siivekkeitä

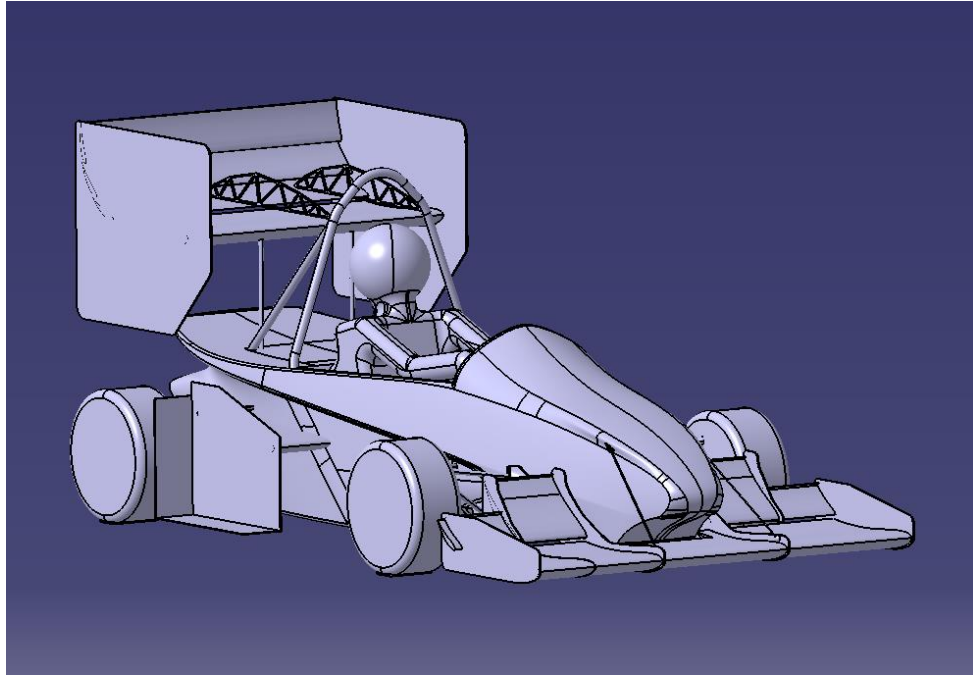
Nose cone -siivekkeiden mekaanisen kiinnityksien suunnittelu autoon on ollut kuitenkin haaste. Alkuperäinen suunnitelma on ollut kiinnittää nose cone -siivekkeet katteisiin. Kiinnitys tapahtuisi suunnitelmissa 3D-tulostetuilla paloilla, jotka tukevat katetta sisä- ja ulkopuolelta ja johon siivekkeet kiinnittyvät, mutta tämän ratkaisun ei uskottu olevan riittävän jäykkä täyttämään Formula Student -sääntökirjan vaatimukset. Katekiinnityksen hylkäämisen jälkeen siivekkeille on suunniteltu kiinnitystä runkoon, mutta kiinnitysten suunnittelu vaatii runkoon muutoksia, vie aikaa ja tuo runkoon lisää massaa.

## 5.6 Lopullinen aerodynamiikkapaketti

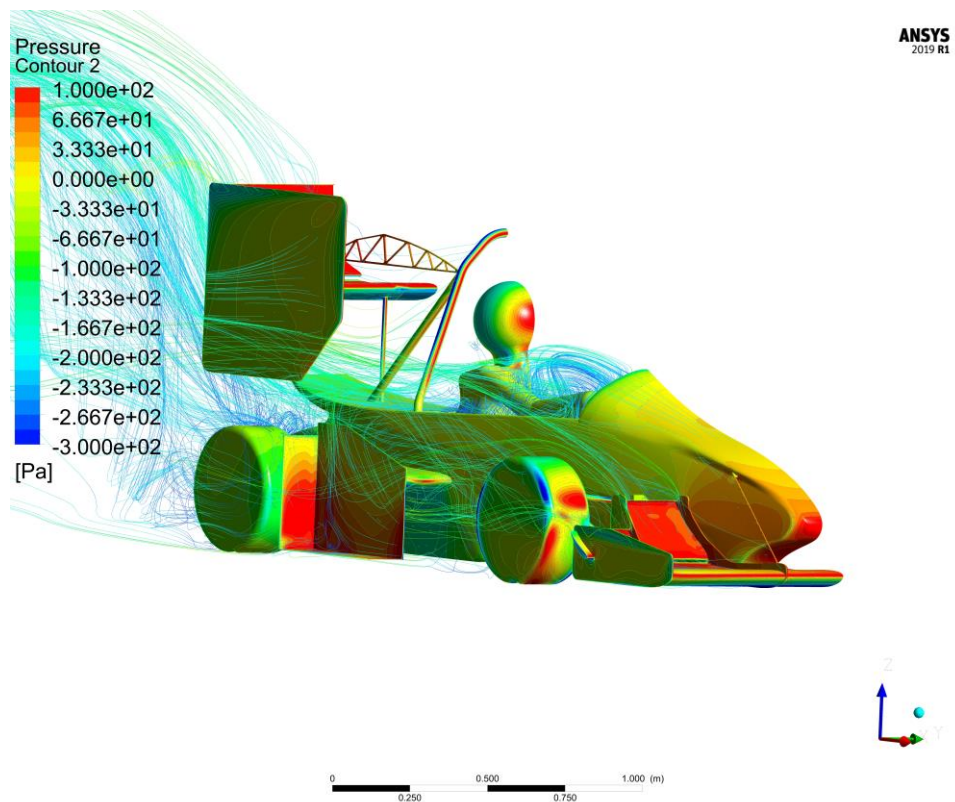
Lopulliseksi tarkoitettu HPF019-auto tuottaa CFD-laskennan perusteella 513 newtonia downforcea, 192 newtonia ilmanvastusta ja aerodynaaminen balanssi on 55,8-prosenttisesti taka-akselilla. Nämä lukemat täyttävät erittäin hyvin kauden alussa asetetut tavoitteet. Aeropaketista uskotaan mekaanisen suunnittelun tuloksena tulevan myös hyvin keveä. Tässä versioissa on kuitenkin nose cone -siivekkeet ja niiden mekaanisesta suunnittelusta johtuvien ongelmien vuoksi sekä siksi, että hyödyt nose cone -siivekkeistä on todettu kuitenkin suhteellisen pieniksi, on siivekkeistä päätetty lopullisessa autossa luopua. Kehitystyö, mitä nose cone -siivekkeiden suhteen on tehty, ei silti mene hukkaan, sillä Metropolia Motorsportin 2020-autoon on suunnitelmissa tehdä nose cone -siivekkeet.

Siksi täysin lopullinen HPF019-auton aerodynamiikkapaketti (kuvat 40 ja 41) sisältää etusiiven, takasiiven, sivusiivet sekä diffuusorin ja se tuottaa CFD-laskentojen perusteella 509 newtonia downforcea ja 193 newtonia ilmanvastusta (taulukko 2). Aerodynaaminen balanssi on 53,6-prosenttisesti taka-akselilla ja auton nostekerroin on -3,7 ilmanvastuskertoimen ollessa -1,4. Aerodynamiikkapaketti toteuttaa nose cone -siivekkeistä luopumisesta huolimatta hyvin sille asetetut tavoitteet downforcen ja ilmanvastuksen suhteen ja aerodynaamisen balanssiin ollaan tyytyväisiä, vaikka tavoitetta ei aivan saavutettukaan.

Kiihdytysajo-osuuksia varten autoon on tehty myös ns. low-drag-asetus, jossa takasiiven ylin siiveke on asetettu kohtauskulmaltaan 0 asteeseen (kuva 42). Tällöin CFD-laskennan perusteella downforce on 431 newtonia ja ilmanvastus 134 newtonia aerobalanssin ollessa 62,23-prosenttisesti etuakselilla.



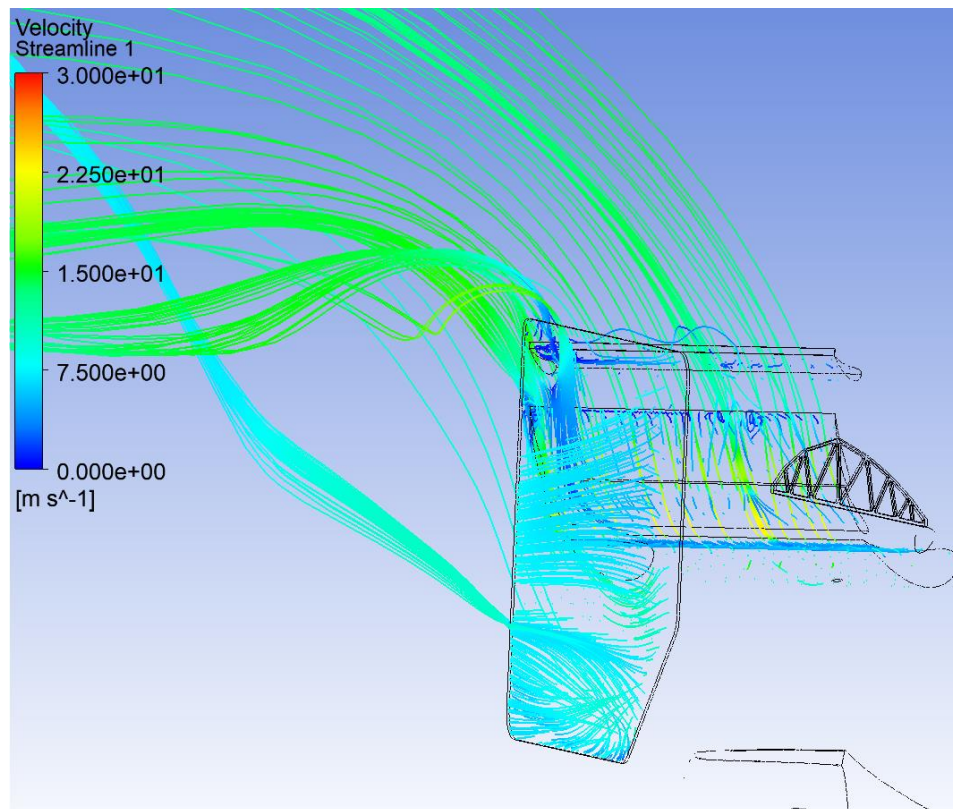
Kuva 40. HPF019 lopullinen aerodynamiikkadesign



Kuva 41. HPF019 lopullisen aerodynamiikkadesignin painekuvaajat ja virtauslinjat

Taulukko 2. HPF019 auton lopullisen designin aerodynaamiset voimat

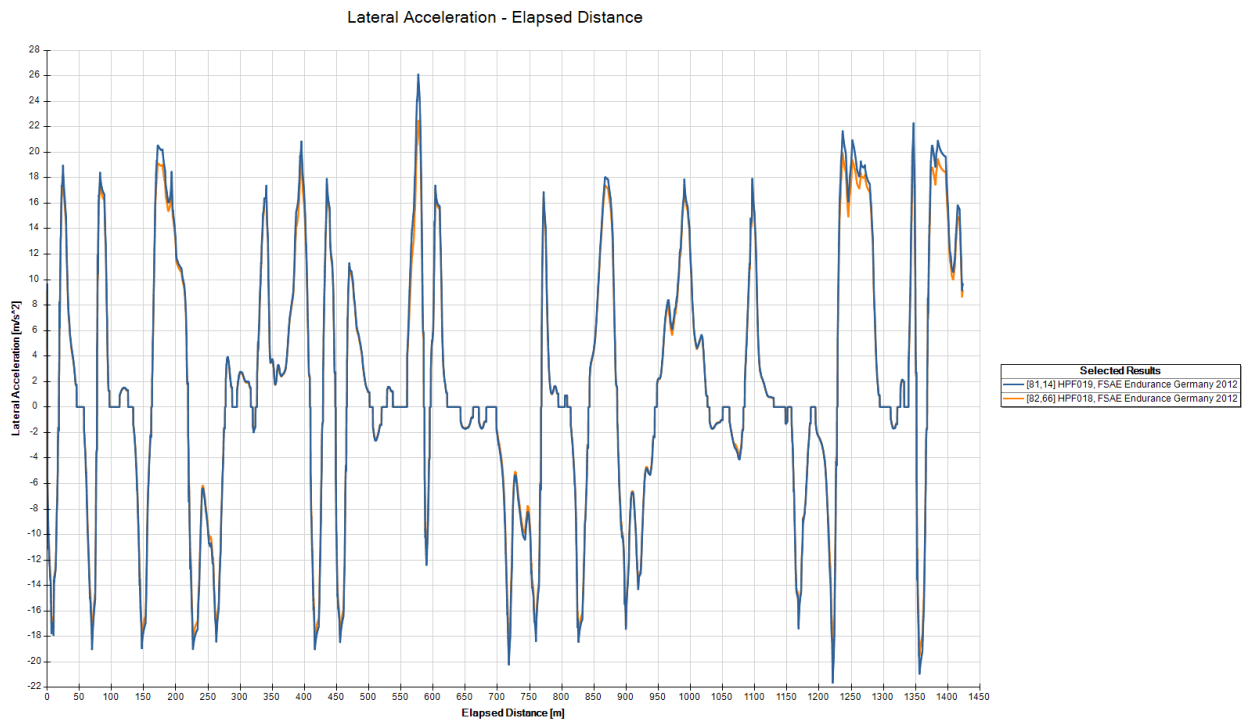
Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-45,03	-73,01	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	45,66	16,88	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-6,00	5,90	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1850
	Total Torque	-3,16	-2,64	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-37,49	-205,92		
	Total Torque	72,58	-34,87		
rear_wheel	Total Force	1,35	1,58	Aerodynamic balance front	46,40
	Total Torque	-1,37	-1,05	Aerodynamic balance rear	53,60
rear_wing	Total Force	-84,03	-186,54	Cl	-3,7031
	Total Torque	76,77	-3,26	Cd	-1,4025
side_wing	Total Force	-21,86	-51,726	L/D	2,6403
	Total Torque	16,204	-23,126		
full_car	Total Force	-193,06	-509,72		
	Total Torque	206,68	-48,07		



Kuva 42. Takasiiven virtauslinjat siipi avattuna low-drag-asetuksessa



Lopullisen designin valmistumisen jälkeen aerodynamiikkapakettiin on tehty OptimumLap-kierrosaikasimulointi (kuva 43) joissa verrataan HPF018- ja HPF019-autojen suorituskykyä radalla. Simuloinneilla halutaan validoida aerodynamiikkapaketin vaikutusta auton suorituskykyyn ennen testikautta. Tuloksena simuloinneista on, että 25 Nm:n vääntöpyynnöllä Formula Student Germanyn vuoden 2012 radalla kierrosaika autolla, jossa on HPF019:ta suunniteltu aerodynamiikkapaketti, on puolitoista sekuntia nopeampi kuin HPF018 ja saavuttaa hieman korkeampia sivuttaiskiihtyvyyksiä. Kierrosaikasimuloinneissa muut arvot ovat pidetty samana ja vain aerodynaamisia arvoja on muutettu vertailukohteiden välillä.



Kuva 43. OptimumLapissa toteutettujen simulointien sivuttaiskiihtyvyydet ja kierrosajat HPF018- ja HPF019-autoilla

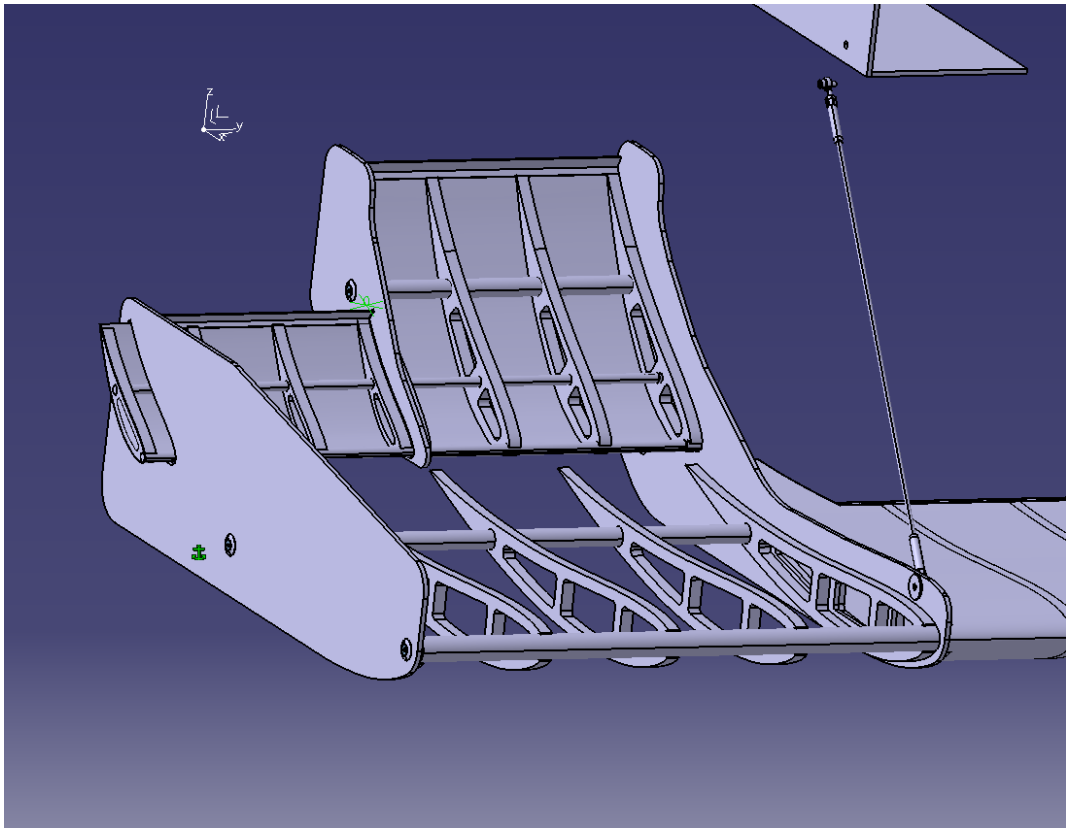
## 6 Mekaaninen suunnittelu

### 6.1 Siipirakenteet

Aerodynamiikkasuunnittelun valmistuttua, on aloitettu mekaaninen suunnittelu siiville. Mekaanisen suunnittelun tavoitteeksi on asetettu alle 9 kilogramman massa aerodynaamiikkapakettille sen valmistuksen jälkeen. Siipirakenteissa hyödynnetään tiimin aiempaa kokemusta ja tietoa. Sen vuoksi etusiipi pysyy rakenteeltaan suhteellisen samanlaisena kuin edelliskausilla. Takasiiven pääprofiili ja kaksi siivekettä on päätetty kierrättää HPF018-autosta, sillä niiden kunto on vielä riittävällä tasolla HPF019-autossa käytettäväksi. Päätös kierrättämisestä on ollut helppoa tehdä, sillä profiilien jännevälien on päätetty olevan autoon edelleen sopivat, koska HPF019-auton raideväli on sama kuin HPF018-auton ja näin ollen siiven leveys on edelleen sääntöjen puitteissa. Siipien komponenttien kierrättäminen säästää myös resursseja.

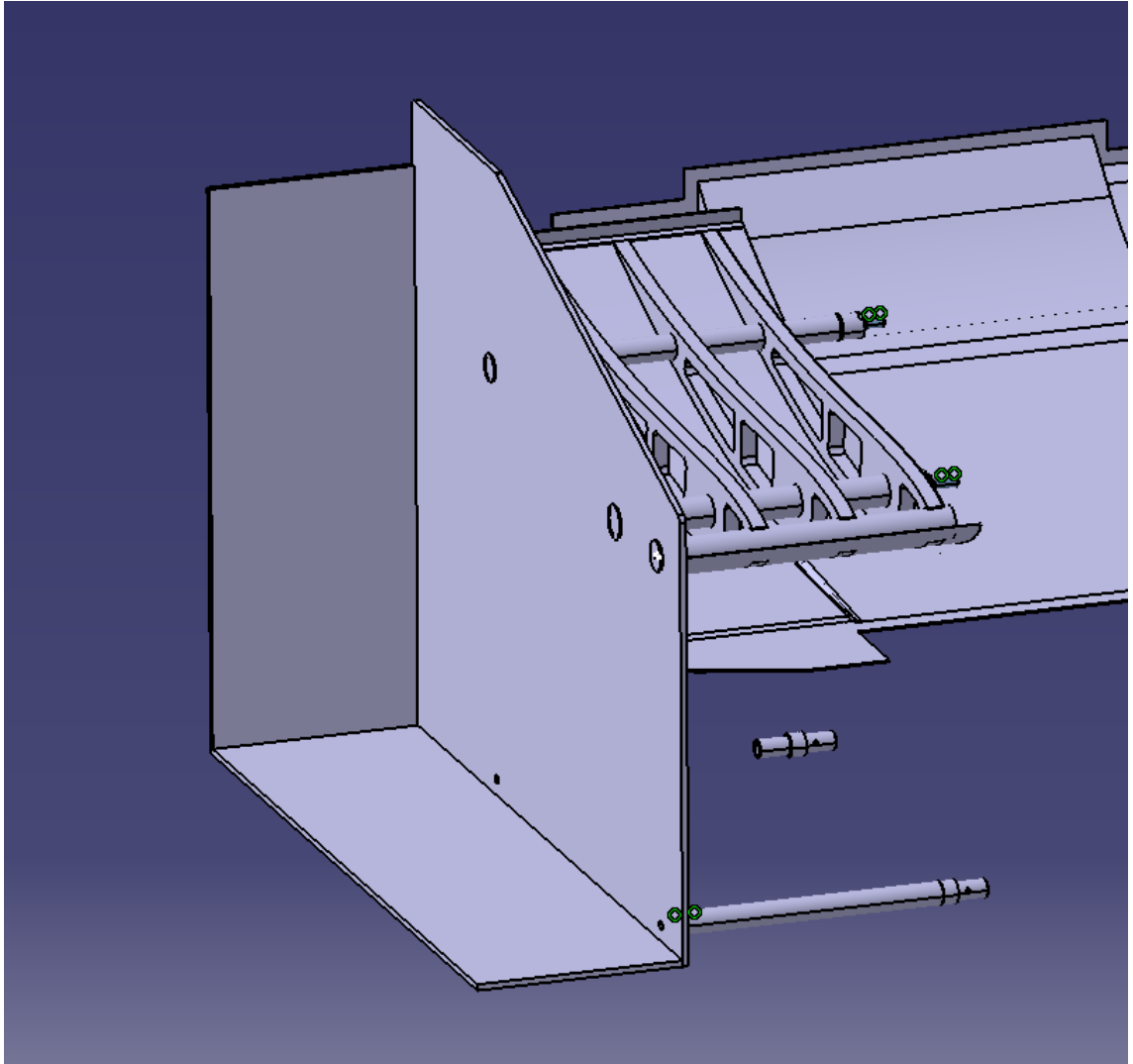
Siipien sisällä olevat tukirakenteet koostuvat foamcoresta muodostuvista siipiprofiilin muotoisista paloista, joita tukevoittavat hiilikuituputket. Putket menevät profiilien läpi ja niiden päissä ovat alumiinikierteet, joihin kiinnitetään päätylevyt ruuvien avulla. Päätylevyt ovat tehty hunajakkenno-hiilikuitumatto sandwich-rakenteesta. Siipiprofiilin päällä ja alla ovat hiilikuitumatosta valmistetut kuoret, jotka tuovat siipiprofiilille ulkoisen muotonsa.

Etusiiven mekaanisessa suunnittelussa (kuva 44) suurin muutos siipiin on siivekkeiden tukirakenteissa. Koko siivekkeen läpi kulkee kaksi hiilikuituputkea, jotka yhdistävät siivekkeen kaksi eri profiilia toisiinsa. Sen lisäksi suuremmassa osassa siivekettä on vielä kolmas hiilikuituputki tuomaan rakenteeseen jämäkkyyttä. Siivekkeen erikokoisten profiilien välissä on päätylevy, joka on kiinnitetty ruuvilla ja liimalla isompaan siivekeprofiiliin.



Kuva 44. Etusiiven mekaanista rakennetta

Sivusiipien rakenne (kuva 45) koostuu samalla tavoin foamcoreprofiileista ja hiilikuituputkista kuin muidenkin siipien. Sivusiivissä päätylevy, lattia ja pystyseinä liitetään toisiinsa 90 asteen hiilikuituprofiileilla ja liimalla. Sivusiipien pääprofiilissa on tavanomaisen kahden hiilikuituputken putken sijasta kolme hiilikuituputkea siipeen tulevien kiinnitysten vuoksi. Etummaisena putken tarkoitus on vahvistaa rakennetta, jotta siipi ei vaurioituisi esimerkiksi ratamerkkeinä pidettävien kartioiden mahdollisista osumista.



Kuva 45. Sivusiiven mekaaninen rakenne

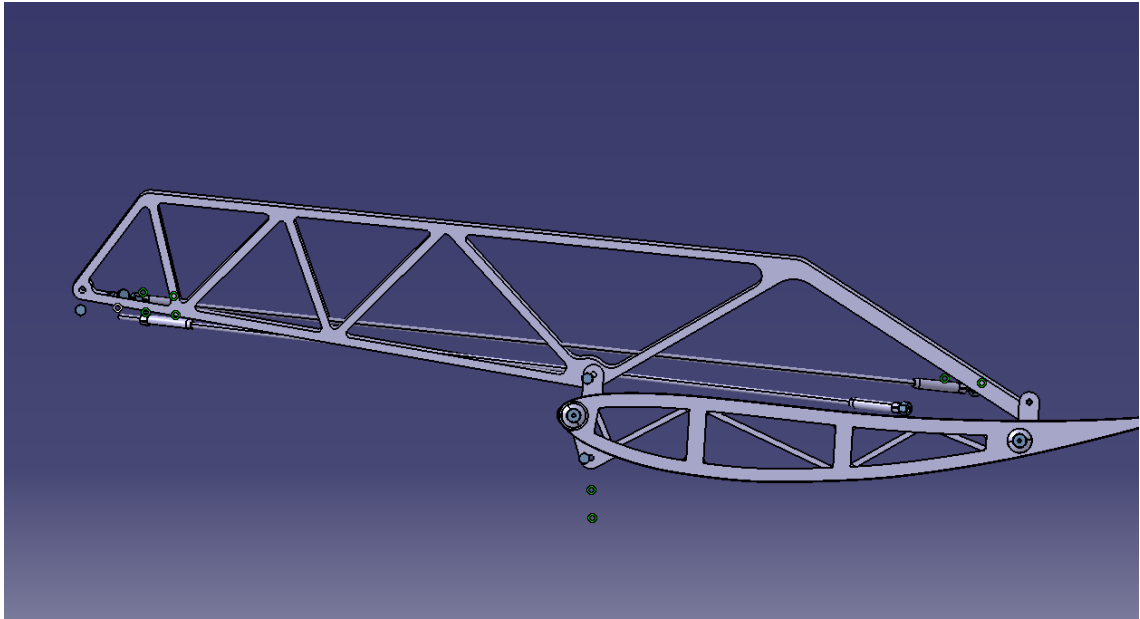
## 6.2 Siipien kiinnitykset

Etu- ja takasiiven kiinnityskonsepti on pysynyt samanlaisena Metropolia Motorsportin autoissa jo monta vuotta ja myös HPF019-autossa on käytetty samaa kiinnityskonseptiratkaisua. Tämän vuoksi tässä lopputyössä käydään läpi etusiiven ja takasiiven kiinnitykset hyvin lyhyesti.

Etusiiven sisempien päätylevyjen etuosat kiinnittyvät runkoon hiilikuituputkillä ja päätylevyn takaosat ruuveilla. Hiilikuituputkien molemmissa päissä on nivelpäät ja nivelpäiden

läpi kulkevat ruuvit siiven päätylevyissä sijaitseviin alumiinikierteisiin ja toisessa päässä putkia runkoon.

Takasiipi kiinnittyy runkoon kahdella hiilikuituputkella ja alumiinisilla kannakkeilla (kuva 46). Hiilikuituputkien on määrä tukea siipeä ja ottaa vastaan kuormitusta ja alumiinisten kannakkeiden päätarkoitus on pitää siipeä paikallaan. Takasiivessä on myös pienet hiilikuituiset ristikkäisputket siiven pääprofiilin yläpuolella.



Kuva 46. Takasiiven alumiininen kannake

Sivusiipien kiinnitysten suunnittelu on ollut haastavin osa mekaanista suunnittelua. Kiinnityksistä on haluttu nopeat irrottaa, sillä aina kun auton akkua tarvitsee ladata, tarvitsee katteet poistaa autosta ja katteiden poisto tarkoittaa myös sivusiipien irrottamista. Kiinnityksistä on haluttu myös jämäkät, jotta siivet pysyvät varmasti paikallaan suurimpienkin kuormitusten aikana ja täyttävät Formula Student Germanyn sääntökirjan määräykset.

Erilaisia ratkaisuita kiinnityksiin on pohdittu, ja lopullinen kiinnitys sivusiiville muodostui yhteistyössä runko-osa-alueen kanssa. Sivusiiven pääprofiili on kiinni rungossa siten, että pääprofiilin sisällä olevan hiilikuituputken toiseen sisäpäähän liimataan ontto alumiininen päätypala, jonka sisään asetetaan ruuvi. Rungossa on ruuville suunniteltu kierre,

ja se voidaan kiristää pitkällä työkalulla siiven ulkopuolelta työntämällä työkalu putken sisälle.

Sivusiivet tarvitsevat myös alakiinnitykset, sillä lattiatasolle tullessa kuormaa, taipuu sivusiipi sivuttaissuunnassa. Alakiinnityksiä varten on suunniteltu hiilikuituputki, jossa on toisessa päässä alumiinikierre, jotta putken saa siiven päätylevyyn, aivan kuten siipiprofiileissa ja toisessa päässä sijaitsee sokkakiinnitys runkoon. Edellä mainituilla kiinnitysmenetelmillä sivusiivet ovat erittäin nopeita irrottaa autosta ja ovat hyvin kevyitä rakenteiltaan. Alakiinnityspotket ovat myös vaihdettavia, jos sellainen rikkoutuu tai katoaa.

## 7 Aerodynamiikkapaketin rakentaminen

### 7.1 Valmistus- ja kokoonpanoprosessi

Aerodynamiikkapaketin valmistuksessa komposiitti-osa-alue on laminoitu hiilikuituprofiilit ja komposiittimateriaalit siipiä varten ja tämän jälkeen siipien valmistuksessa käytettävät päätylevy- sekä foam-materiaalit ovat vesileikattu, jotta ne saavat tarvittavan muotonsa siipiä varten. Siipirakenteissa putket, foam-profiilit sekä alumiinikierteet putkien päissä ovat kiinnitetty toisiinsa Loctite 9466 -epoksiliimalla (kuvat 47 ja 48). Liimalla on erittäin hyvä liitoskestävyys vedossa ja puristuksessa. Liiman heikkona puolena on sen vaatima lähes vuorokauden mittainen kuivumisaika, joten valmistusprosessin aikataulun etenemistä on määrittänyt myös liiman kuivumiseen kulunut aika.



Kuva 47. Etusiiven rakenteiden liimausta



Kuva 48. Sivusiiven rakenteiden liimausta päätylevyyn

Kun tukirakenteet ovat olleet valmiita, on siipien kuoret liimattu foam-profiileihin. Tämä tapahtuu siten, että kuoret asetetaan Finnfoamista valmistettuun liimausmuottiin ja foam-rakenteet liimataan kuoriin. Siipirakenteiden päälle asetetaan painoja, jotta siipirakenteet ja kuoret varmasti liimautuvat toisiinsa riittävän lujalla liitoksella. Tässä vaiheessa myös Gurneyn flapit liimataan siipiin. Viimeisenä siipirakenteet on viimeistelty täyttämällä mustalla täyteliimalla syntyneet saumat sekä päätylevyjen reunat ja terävät kulmat on hiottu pois hiomapaperilla. Siipien kiinnityspotket valmistetaan liimaamalla alumiinikierteet niihin Loctite 9466 -epoksilla ja takasiiven alumiinikannakkeet on laserleikattu.

## 7.2 Valmistuskauden aikataulu ja onnistuminen

Siipien valmistus on aloitettu, kun materiaalit ovat saapuneet vesileikkauksesta helmikuun lopulla. Valmistamisen aloittaminen on hieman myöhästynyt, mutta silti tavoitteena on ollut saada siivet valmiiksi testikauden alkuun toukokuun ensimmäiseen päivään mennessä. Valmistusprosessin aikana on päätetty, että siipien tulee olla valmiit jo American Car Show'hun mennessä huhtikuun puolenvälin jälkeen. Ripeän etenemisen ansiosta siivet ovatkin valmistuneet (kuva 49) juuri ennen American Car show'ta tavoiteajassa. Siivet myös täyttävät erinomaisesti niille asetetut tavoitteet massan suhteen, sillä aerodynamiikkapakettin kokonaismassa alittaa reilusti alle 9 kilogramman tavoitteen. Aerodynamiikkapaketti painaa yhteensä noin 7,5 kilogrammaa (taulukko 3).

Taulukko 3. HFP019 aerodynaamisten komponenttien massa

Part	Weight (kg)
Front wing	2,3
Rear wing	3,1
Side wings	1,3
Diffuser	0,8
<b>All parts total</b>	<b>7,5</b>





Kuva 49. HPF019-auto aerodynamiikkapaketteineen

## 8 Aerodynamiikkapaketin testaaminen

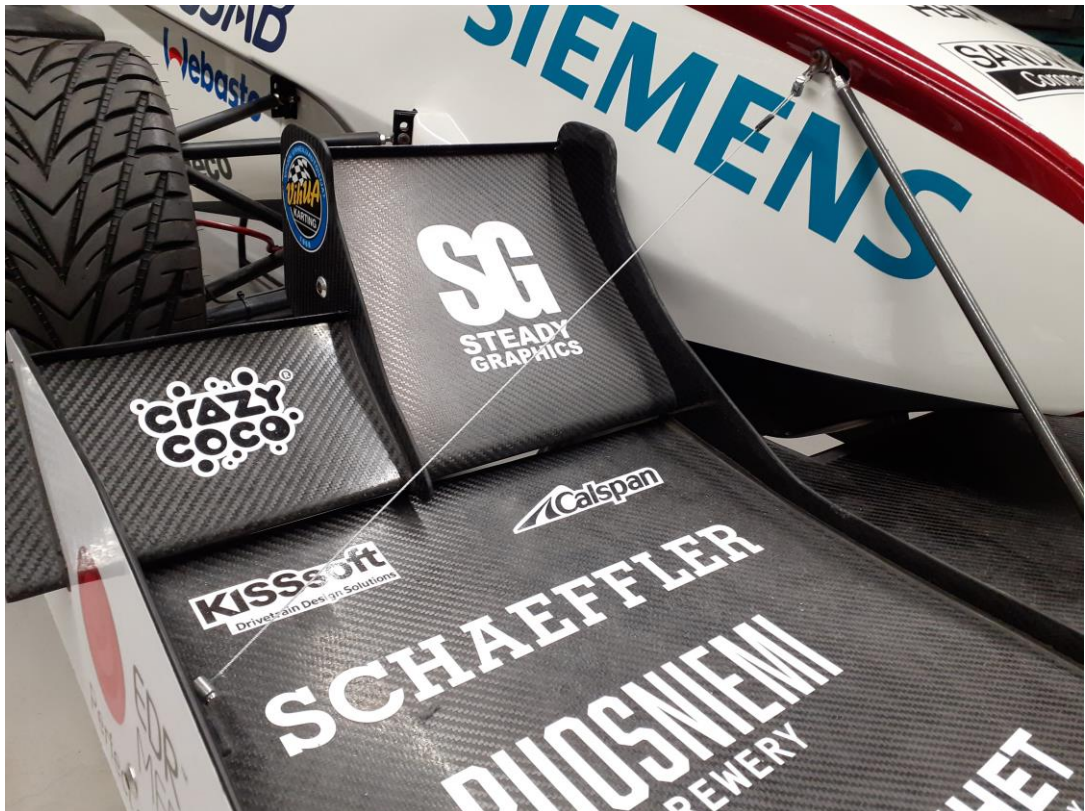
### 8.1 Testikaudella tulleiden ongelmien korjaus

Aerodynamiikkapaketin valmistuttua on Metropolia Motorsportin testikaudella tehty parannuksia ja korjauksia havaittuihin virheisiin ja ongelmiin. Ensimmäinen virhekorjaus on etusiiven rakenteen kestävydessä. Toinen etusiiven sisemmistä päätylevyistä vaurioitui runkokiinnityspisteestä voimakkaan ratamerkintäkartiioon osumisen vuoksi. Tämän jälkeen etusiiven päätylevyihin on liimattu runkokiinnityspisteiden ympärille ylimääräinen kerros hiilikuitua, jotta rakenne tulee vahvemmaksi ja etusiipi ei enää vaurioidu kiinnityspisteestä. Etusiipeen on myös 3D-tulostettu ulompien päätylevyjen kärkiin muoviset törmäyssuojat, jotka suojaavat päätylevyjä iskuilta

Kummankin sivusiiven päätylevyn ja rungon välille on testikauden aikana lisätty myös toinen putki vahvistamaan sivusiipien tasaisten levyjen rakennetta. Ennen toisen putken

lisäystä, kuormaa asettaessa sivusiiven tasaiselle levyille, se taipui niin paljon, että sivusiipien ei uskottu läpäisevän katsastuksia kilpailuissa. Toisen putken lisäksi sivusiipiin on tasaisen levyn ja siipiprofiilin välille asetettu teräsvaijeri.

Etusiiven jämäkyys on myös ollut ongelmana testikaudella. Tehokkaamman etusiiven vuoksi jämäkyys etusiiven rakenteissa ei ollut riittänytään halutulle tasolle, vaan esimerkiksi lähellä HPF019:n maksimiajonepeutta etusiipi on huojunut ja tärissyt selkeästi ja Formula Student Germanyn kuormitussääntöjen täyttäminen on ollut kyseenalaista. Tähän ratkaisuna on sivusiipien lailla lisätä teräsvaijerit (kuva 50) ulompien päätylevyjen sisäreunasta runkokiinnityksiin. Myös jämäkämmät kiinnitystangot on valmistettu. Lopputuloksena vaijerit jämäköittävät siipeä ja tärinää sekä huojuntaa ei enää esiinny ajassa autoa korkeillakaan nopeuksilla.



Kuva 50. Etusiiven rakennetta vahvistava teräsvaijeri

## 8.2 Alustan vaikutus aerodynamiikkaan

Testikauden aikana on haluttu myös selvittää, kuinka aerodynamiikka mahdollisesti reagoisi alustan muutoksiin ja alustan eri säätöihin. Tämä tieto on arvokasta, sillä sen avulla voidaan säätää alustaa ottaen huomioon myös aerodynamiikan käytöksen muutokset eri ajotilanteissa. Lisäksi voidaan saada myös käsitystä siitä, kuinka paljon auton aerodynaamisesta suorituskyvystä voidaan esimerkiksi joustaa, jotta auton alustadynamiikkaa voidaan parantaa. Autosta on tehty CFD-laskennassa aluksi neljä eri laskentaa ajokorkeuksilla 30 mm, 45 mm, 50 mm ja 60mm (taulukko 4). Suunnitteluvaiheessa ajokorkeutena diffusorin pohjasta on pidetty 32 mm, joten erityisenä kiinnostuksena on syntyvät erot tämän lähtöarvoon tuloksiin. Ajokorkeudet myös muihin malleihin on mitattu diffusorin pohjasta taka-akselin kohdalta.

Taulukko 4. Ajokorkeusvertailun CFD-laskentojen tulokset

Ride height	Downforce (N)	Drag (N)	Aerobalance (% rear)	Cl	Cd
HFP019 30mm	517	190	52,3	3,76	1,38
HPF019 32mm (standard)	510	193	53,6	3,7	1,4
HPF019 45mm	507	193	53	3,69	1,4
HPF019 50mm	504	196	52,3	3,66	1,42
HPF019 60mm	488	198	53,5	3,55	1,44

CFD-laskennan perusteella auton aerodynamiikan kannalta paras ajokorkeus on 30 mm. Tämän uskotaan johtuvan siitä, että auton etusiipi ja diffusori toimivat parhaiten maaefektin suurimman hyödyntämisen ansiosta. 30mm:n maavaralla auto tuottaa 517 newtonia downforcea ja 190 newtonia ilmanvastusta. Aerodynaaminen balanssi on 52,3-prosenttisesti taka-akselilla. Vertailun heikoin ajokorkeus on 60 mm, jolloin auto tuottaa 488 newtonia downforcea ja 198 newtonia ilmanvastusta. Heikomman suorituskyvyn uskotaan johtuvan erityisesti diffusorin tehon runsaasta heikkenemisestä. 45 mm:n maavaralla auto tuottaa 507 newtonia downforcea ja 193 newtonia ilmanvastusta, joten tulokset ovat tällä ajokorkeudella hyvin lähellä vertailuarvoa. 50 mm:n maavaralla tulokset ovat hyvin samankaltaisia kuin 45 mm:n maavaralla, mutta aerodynaaminen hyötysuhde hieman heikkenee.

Neljästä CFD-laskennasta voidaan havaita, että ajokorkeuden muutoksella on merkitystä auton aerodynamiikkaan, mutta muutokset aerodynamiikassa 30–50mm:n ajokorkeuksien välillä ovat suhteellisen pieniä alkuperäiseen vertailuarvoon nähden.

Vertailun jälkeen on tehty laskentamalli tilanteesta, jossa auto on pienessä rake-kulmassa. Tämän tilanteen vaikutus aerodynamiikkaan on haluttu selvittää esimerkiksi jarrutustilanteita varten, jossa auto niiää. Rake-kulmaksi malliin on valittu 2 astetta ajokorkeuden ollessa 100 mm diffuusorin pohjasta tilanteen korostamisen vuoksi. Auton diffuusorin on uskottu menettävän toimintakykyään virtauksen irtoamisen ja vähentyneen virtausnopeuden vuoksi ja lopputuloksena laskennoissa on, että downforcea tässä ajotilanteessa on 488 newtonia ja ilmanvastusta 206 newtonia. Takasiipi tehostuu, sillä sen teho nousee noin 20 newtonia, mutta kokonaisuudessa tämä ei riitä korvaamaan muiden komponenttien menettyä downforcea.

CFD-laskentojen sekä alusta-osa-alueen preferenssien perusteella ajokorkeudeksi on valittu 47 mm. Syyksi ajokorkeusvalinnalle on ollut se, että aerodynamiikan toiminnan uskotaan CFD-laskentojen perusteella olevan alueella, jossa aerodynamiikkapaketti toimii siten kuin se on suunniteltu, koska esimerkiksi 45 mm:n maavaralla (taulukko 5) voimat eivät eroa juuri lainkaan vertailuarvosta. 2 mm:n eron CFD-laskennan ja toteutetun ajokorkeuden välillä ei uskota aiheuttavan merkittävää muutosta aerodynamiikkaan. Alusta myös toimii tiimin alusta-osa-alueen mukaan 47 mm:n ajokorkeudella paremmin kuin matalammilla ajokorkeuksilla ja aerodynaamisten voimien takia auton ajokorkeus laskee kuitenkin aerodynamiikan kannalta halutummalle alueelle korkeissa nopeuksissa.

Taulukko 5. HPF019:n aerodynaamiset voimat 45 mm:n ajokorkeudella

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-40,63	-64,62	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	34,88	16,17	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-6,57	6,93	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,185
	Total Torque	-3,49	-4,79	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-38,10	-210,54		
	Total Torque	73,55	-35,35		
rear_wheel	Total Force	1,10	0,53	Aerodynamic balance front	47,04
	Total Torque	-1,20	-2,84	Aerodynamic balance rear	52,96
rear_wing	Total Force	-86,98	-191,78	Cl	-3,686
	Total Torque	79,60	-4,21	Cd	-1,4029
side_wing	Total Force	-21,934	-47,886	L/D	2,6273
	Total Torque	14,206	-23,126		
full_car	<b>Total Force</b>	<b>-193,11</b>	<b>-507,37</b>		
	<b>Total Torque</b>	<b>197,55</b>	<b>-54,14</b>		

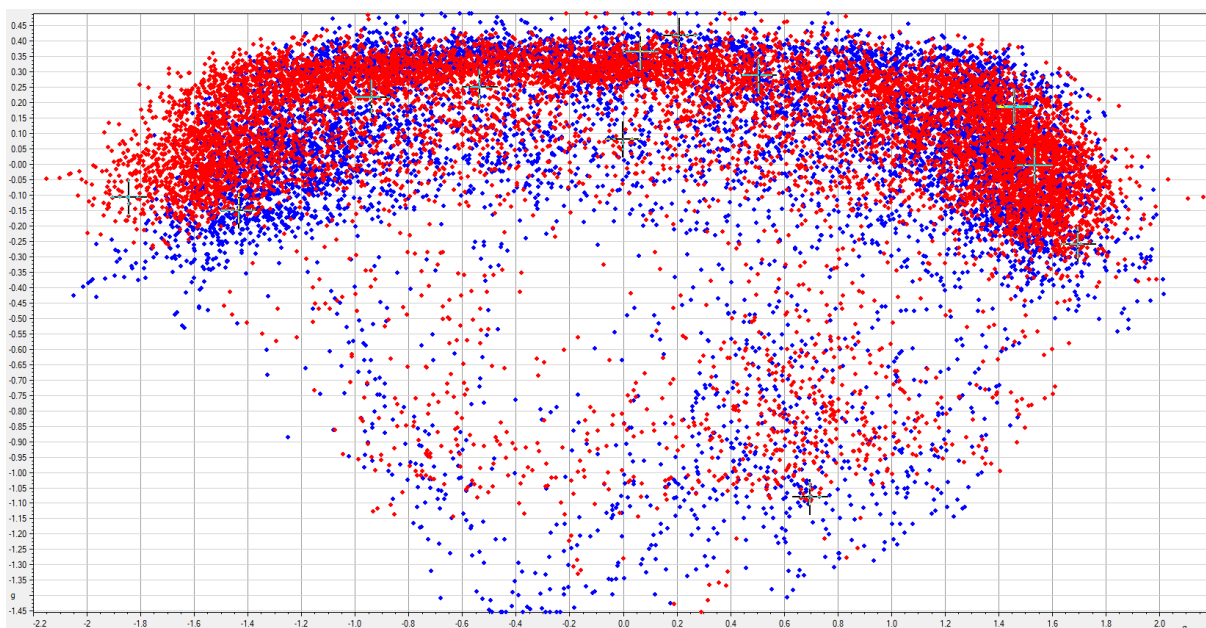
Ajokorkeuden valinnan jälkeen autosta on tehty CFD-laskenta vielä 2:n asteen rungon kallistuskulmalla 45:n mm:n maavaralla. Kallistuskulmaksi rungolle on valittu 2 astetta, koska se edustaa HPF019-autossa suurinta kallistusta, jolla alusta kallistaa runkoa kaarreaajossa. Laskennan perusteella auton ilmanvastus ei juuri muutu, mutta downforce puutoa 466 newtoniin ja aerodynaaminen balanssi siirtyy 51-prosenttisesti etuakselille. Eniten heikkenee takasiipi, minkä uskotaan johtuvan siitä, että etusiipi ja sivusiivet häiritsevät takasiiven virtauksia eniten silloin, kun auto on kallistuksessa. Tämän tuloksen perusteella menetykset downforcessa ovat kuitenkin hyväksytyt, sillä auton mekaanisen pidon ja alustadynamiikan kannalta suorituskykyhyödyt ovat alusta-osa-alueen mukaan niin korkeat, että kompromissi aerodynamiikan suhteen kannattaa tehdä.

CFD-laskentojen avulla on siis pystytty määrittelemään autolle sopivaa ajokorkeutta aerodynamiikan kannalta sekä löytää sopiva kompromissi aerodynaamisen suorituskyvyn ja alustan suorituskyvyn väliltä.

### 8.3 Vertailut HPF018:n ja HPF019:n välillä

Testikaudella on haluttu vertailla myös HPF018- ja HPF019-autojen suorituskykyä, sillä aerodynamiikkapaketissa tapahtuneiden parannuksien uskotaan näkyvän sekä kierrosajassa, että sivuttaiskiihtyvyyksissä. Vertailuun on käytetty RaceStudio-ohjelmaa ja sinne MoTeCista saatua ajodataa. Vertailussa ratana on ollut Vihdin kartingrata, jonka rataprofiilia on muokattu Formula Student -radalle tyypillisemmäksi ratamerkintäkartioiden avulla.

Kiihtyvyytkuvaajat (kuva 51) ovat valittu siten, että testitilanteiden olosuhteet ovat olleet mahdollisimman samanlaisia. Kummassakin testitilanteessa on ollut aurinkoinen kesäpäivä, autoissa on käytetty samanmallisia renkaita ja kuljettajana on toiminut sama henkilö. Ajoneuvojen massat ovat myös olleet runsaan kilogramman sisällä toisistaan, sillä HPF018:n punnittiin kilpailuissa painavan 206,5 kilogrammaa ja HPF019:n on punnittu painavan 207,9 kilogrammaa. Kiihtyvyytkuvaajien tulokset eivät kuitenkaan ole täysin vertailukelpoisia määrittämään pelkästään aerodynamiikan toimintaa, sillä esimerkiksi alustan säätöjen muutokset voi myös näkyä niissä.



Kuva 51. Sivuttaiskiihtyvyysskartta. HPF019 punaisella ja HPF018 sinisellä. Vaaka-akselilla sivuttais- ja pystyakselilla pitkittäiskiihtyvyyden. Kiihtyvyyden yksikkönä g.

Kuvaajista voidaan havaita HPF019-auton kasvanut kaarreajosuorituskyky korkeampien sivuttaiskiihtyvyyksien perusteella. Sivuttaiskiihtyvyyksien huippuarvot ovat suurempia ja sivuttaiskiihtyvyyksikeskittymät ovat siirtyneet sekä suuremman sivuttais-, että pitkittäiskiihtyvyyden alueille kuin HPF018:ta. Kuvaajista voidaan myös havaita, että HPF019 jää hieman pitkittäiskiihtyvyyksissä verrattuna HPF018-autoon, kun sivuttaiskiihtyvyyttä ei ole tai sitä on vain vähän. Vaikka kuvaajiin vaikuttavat myös aerodynamiikan ulkopuolisetkin tekijät, voidaan niiden perusteella pitää kuitenkin mahdollisena aerodynamiikka-paketin vaikutus auton suorituskykyyn suunnitellulla tavalla.

Kierrosaikavertailuissa HPF019 on saman kuljettajan ajamalla parhaimmalla kierroksellaan lähes kaksi sekuntia nopeampi kuin saman kuljettajan paras kierros oli HPF018-autolla (taulukko 6). Myös kokonaistuloksissa parhaiden kierrosten ero eri kuljettajien välillä on tätä luokkaa. Testikierrokset ovat kokonaisuudessaan olleet keskimäärin noin puolitoista sekuntia nopeampia HPF019:ssä verrattuna HPF018-autoon. Kuten kiihtyvyyksikuvaajien vertailussa, myös kierrosaikavertailussa kierrosaikoihin vaikuttamat muutkin tekijät kuin muuttunut aerodynamiikka, mutta kierrosaikojen parantuessa merkittävästi on syytä epäillä, että muuttuneella aerodynamiikalla on varmasti osuutta asiaan.

Taulukko 6. Kierrosaikavertailu HPF018 ja HPF019-autoilla. Kierrosajat on ajettu 25 Nm:n vääntöpyynnöllä.

Car	Same driver's best time (s)	Best time (s)	Diff best runs w/s driver (s)	Diff best runs (s)
HPF018	67,455	66,207	1,92	1,723
HPF018 w/o wings	69,136	69,136	3,601	4,652
HPF019	65,535	64,484	-	-

#### 8.4 Siipikonfiguraatioiden testaus

Koska suunnittelukaudella tehtyjen CFD-laskentojen perusteella low-drag-säädöllä HPF019:n aerodynaaminen hyötysuhde nousee sekä kierrosaikasimulaatioissa Formula Student Germanyn vuoden 2012 radalla kierrosaika paranee puoli sekuntia endurancessa käytettävällä vääntöpyynnöllä, on haluttu testata kiihdytyksen lisäksi myös rata-ajoa low-drag-säädöllä (kuva 52). Kierrosaikasimulaatiot eivät tosin ota huomioon aerobalanssia, joten testeillä on haluttu validoida myös aerobalanssin merkitystä. Lopputulos

testeissä on ollut se, että auto yliojtaa runsaasti ja on erittäin hankala ajaa, minkä vuoksi kuljettajat ovatkin todenneet, että autolla on lähes mahdotonta ajaa kunnollisia kierroksia. Testeillä on siis todistettu, että neljäs elementti takasiivessä toimii downforcea merkittävästi lisäävänä tekijänä ja että aerobalanssilla on merkitystä Formula Student -auton suorituskykyyn. Kierrosajat ovat jääneet low-drag-säädöillä 3–4 sekuntia verrattuna normaalilla siipisäädöillä ajettuihin kierrosaikoihin.



Kuva 52. Kuva Vihdin ratatesteistä low-drag-asetuksilla

Toinen siipikonfiguraatiotesti, jota on kokeiltu, on etusiipien eri korkeuksien vaikutus autoon. Etusiivessä on kolme eri korkeusasetusta, joista perusasetus on keskimmäinen. Aiemmin CFD-laskettujen ajotilannekorkeuksien perusteella etusiiven teho ei muutu erityisen suuresti maavaraa muuttaessa. Autoa on näiden lisäksi CFD-laskettu vielä 32 mm:n maavaralla siten, että etusiipeä on nostettu 20 mm normaalista korkeudesta 40 mm:stä. Lopputuloksena on, että etusiiven teho ei tällöinkään juuri muuttunut, sillä CFD-laskentatuloksissa etusiipi tuottaa 201 newtonin downforcen.

Koska etusiiven ajokorkeuden vaikutusta on haluttu verifioida myös rata-ajossa, on asiaa testattu Vihdin kartingradalla. Etusiipeä on aluksi testattu sen ollessa vajaan 50 mm:n korkeudella ja tämän jälkeen on ajettu testikierroksia. Sen jälkeen etusiipeä on nostettu noin 60 mm:n korkeuteen, ja kuljettajapalautteen mukaan etusiiven korkeuden muutosta



ei havaitse ajassa autoa. Myöskään kierrosaikojen tai ajodatan perusteella merkittävää eroa ei ole löytynyt, joten etusiiven korkeus on asetettu testeissä ja kilpailuissa oletusarvoisesti keskimmäiseen korkeusasetukseen, mistä poiketaan vain alustan tehdessä runsaita muutoksia ajokorkeuteen esimerkiksi töyssyisen radan vuoksi.

## 9 CFD-laskentamenetelmien kehittäminen ja testaaminen

### 9.1 CFD-Laskennan tarkkuuden parantaminen

Syksyllä 2017 ajettujen testien perusteella ilmanvastukset ja downforcet ovat olleet noin 80 % siitä, mitä CFD-laskennan tuloksissa. Tämän jälkeen CFD-laskennan saralla on yritetty tehdä kehitystä ja tuloksia laskennoista on haluttu tarkemmiksi. Tätä on tehty testaamalla erilaisia laskentaverkon asetuksia, esimerkiksi parantamalla verkon tarkkuutta tekemällä siitä hyvin tiheä alueilla, jotka CFD-mallissa ovat kriittisiä laskentatarkkuuden kannalta, kuten siivet. Tiheämpi verkko ei kuitenkaan tuo enää juurikaan muutosta tuloksiin ja tekee samalla vain verkotus- sekä laskentaprosessista hankalamman ja riskialttiimman häiriöille. Sen vuoksi yksin verkon muutokset eivät riitä. Muita tapoja parantaa CFD-laskentojen tarkkuutta on ollut esimerkiksi mallin yksityiskohtien muokaus sekä laskennan toimintavarmuuden nostaminen esikäsittelemällä mallia ennen verkotusta.

### 9.2 Turbulenssimallien testaus

Kilpailukauden 2019 jälkeen on haluttu tehdä vertailuja kahden eri turbulenssimallien välillä ennen HPF020-auton varsinaisen suunnittelutyön aloitusta. Vertailun avulla voidaan esimerkiksi tutkia laskentaverkon laatua, tulosten potentiaalista tarkkuutta sekä laskennan iterointien onnistumista. Tämän vuoksi erästä laskentamallia, joka on nimetty HPF019/30-versioksi, on testattu sekä K-Omega- että K-Epsilon-turbulenssimalleilla.

Laskentojen perusteella lopputuloksissa turbulenssimallien välillä erot ovat vain prosentin luokkaa auton tuottamassa downforcessa sekä -ilmanvastuksessa ja aerobalanssi on jakautunut lähes identtisesti. Suurin ero laskentatuloksiin tulee diffuusorin tehossa, jossa

tulokset poikkeavat noin 5 %. Hyvin lähellä toisiaan olevat tulokset ovat hyvä merkki siitä, että laskentaverkon laadun on todennäköisesti oltava kohtuullisen hyvällä tasolla. Tulokset todennäköisesti myös kertovat eri aerodynaamisten komponenttien vaikutukset auton aerodynamiikkaan suhteellisen tarkasti toisiensa suhteen, vaikka niiden tuottamat voimat CFD-laskennassa poikkeaisivatkin toteutuneista voimista.

### 9.3 Laskentamenetelmien jatkokehittäminen

HPF019-autoon tehtyjen CFD-laskentojen ja todellisten ajotilanteiden välistä vertailua ei valitettavasti tämän lopputyön puitteissa toteutettu, sillä autolle ei ole päästy tekemään coast down -testiä ilmanvastuksen selvittämiseen eikä ajamaan riittävän pitkää tasaista suora-ajoa downforcen määrän selvittämiseen venymäliuskojen avulla. Tästä huolimatta CFD-laskentojen uskotaan kuitenkin olevan suhteellisen tarkkoja syksyn 2017 tulosten, joissa mitatut tulokset olivat noin 80 % CFD-lasketuista, sekä sen jälkeen toteutettujen, laskentatarkkuutta oletettavasti parantavien muutosten perusteella.

Tulevaisuudessa tarkoitus on siirtyä Metropolia Motorsportin aerodynamiikan CFD-laskennoissa ANSYS Fluent -ohjelmaan ja K-Omega SST -turbulenssimallin käyttöön, mutta tässä lopputyössä ANSYS Fluent -ohjelmalla tehtyjä laskentoja ei käydä läpi tulosten ollessa vielä liian keskeneräisiä. Uuden laskentaohjelman ja turbulenssimallin uskotaan nostavan laskentojen tarkkuutta ja nopeuttavan myös koko CFD-laskentaprosessia.

## 10 Loppupäätelmät

### 10.1 Aerodynamiikkapaketin onnistuminen ja aikataulussa pysyminen

Aerodynamiikkapaketti toteuttaa suunnittelun osalta sille asetetut tavoitteet hyvin. Sekä ilmanvastuksen että downforcen määrän on todettu olevan virtauslaskennassa hieman paremmalla tasolla suunnitteluprosessin alussa asetettuihin tavoitteisiin verrattuna ja aerodynaaminen balanssi osuu lähes tavoitealueelle. Aerodynamiikkapaketti on myös valmistunut tavoiteajassa.

Testikaudella HPF019:n sivuttaiskiikthyvydet rata-ajossa ovat nousseet ja kierrosajat Vihdin kartingradalla HPF018-autoon verrattuna ovat parantuneet lähes kahdella sekunnilla. Näihin muuttuneella aerodynamiikalla uskotaan olevan oma osansa. Testeissä on todistettu myös aerodynaamisen balanssin merkitys ja sen huomioon ottamisen tärkeys tulevien autojen suunnittelussa. Testikaudella toteutettujen mekaanisten parannusten myötä HPF019 on myös läpäissyt kilpailukaudella jokaisen kilpailun katsastukset ongelmitta ja siiven rakenteet ovat kestäneet hyvin kilpailuissa niihin kohdistuneet kuormat ja iskut. Kilpailukaudella Metropolia Motorsport on saavuttanut kilpailuissa vaihtelevaa menestystä; kilpailukauden kirkkaimpana saavutuksena on ollut Formula Student Czech Republic -osakilpailun kolmas sija.

Lopputyön ja aerodynamiikkakehityksen tuloksena aerodynamiikan tärkeys Formula Student -kilpa-auton suunnittelussa on hahmotettu Metropolia Motorsportin sisällä paremmin kuin koskaan ennen ja tulevien aerodynamiikkapakettien suunnittelulle on annettu nyt hyvä pohja, mistä lähteä seuraavilla kausilla auton aerodynamiikkaa suunnittelemaan. HPF019-auton aerodynamiikkapaketissa on komponentteja, jotka tulevat olemaan mahdollisesti käytössä lähes samanlaisina myös HPF020-autossa ja esimerkiksi tutkimustyö nose cone -siivekkeiden suhteen tulee mahdollisesti kehittämään HPF020-auton aerodynamiikkaa eteenpäin.

## 10.2 Parannuskohteet

Vaikka tavoitteet suunnittelulle on saavutettu CFD-laskennan tulosten muodossa, ei HPF019-auton aerodynamiikkapaketin todellisia downforce- ja ilmanvastuslukemia ole päästy mittaamaan. Tämä on eräs suurimpia kehityskohteita, joka kannattaa ehdottomasti toteuttaa HPF020-autolle. Mittausten perusteella virtauslaskentamenetelmiä voidaan saada tarkemmiksi hyödyntämällä mittaustuloksia referenssinä laskentatuloksille. Virtauslaskennan tarkkuutta voidaan yrittää myös parantaa tulevaisuudessa ottamalla käyttöön ANSYS Fluent -ohjelma ja K-Omega SST-turbulenssimalli. ANSYS Fluentia käyttämällä voidaan myös hyödyntää sen omaa verkottajaa.

Aerodynamiikkasuunnittelussa takasiiven kohtauskulmia voi optimoida vielä runsaasti, sillä HPF019:n suunnittelussa niille ei ole ehditty keskittää resursseja. Mekaanisen ra-

kenteen suunnittelun suhteen siivissä on myös hieman parannettavaa testikaudella erityisesti etusiivessä ilmenneiden ongelmien perusteella. Ongelmat voidaan korjata seuraaviin autoihin jo suunnitteluvaiheessa muokkaamalla mekaanista siiven rakennetta kestävämmäksi. Esimerkiksi siiven päätylevyissä voidaan käyttää hieman jämekämpää rakennetta käyttämällä paksumpaa hiilikuitumattoa ja/tai vaihtaa päätylevyjen hunajakennomateriaali foam-tyyppiseen materiaaliin. Myös etusiiven runkorakenteen profiilimäärää voisi nostaa, jotta yksittäisen katkenneen profiilin haitta olisi pienempi.

## Lähteet

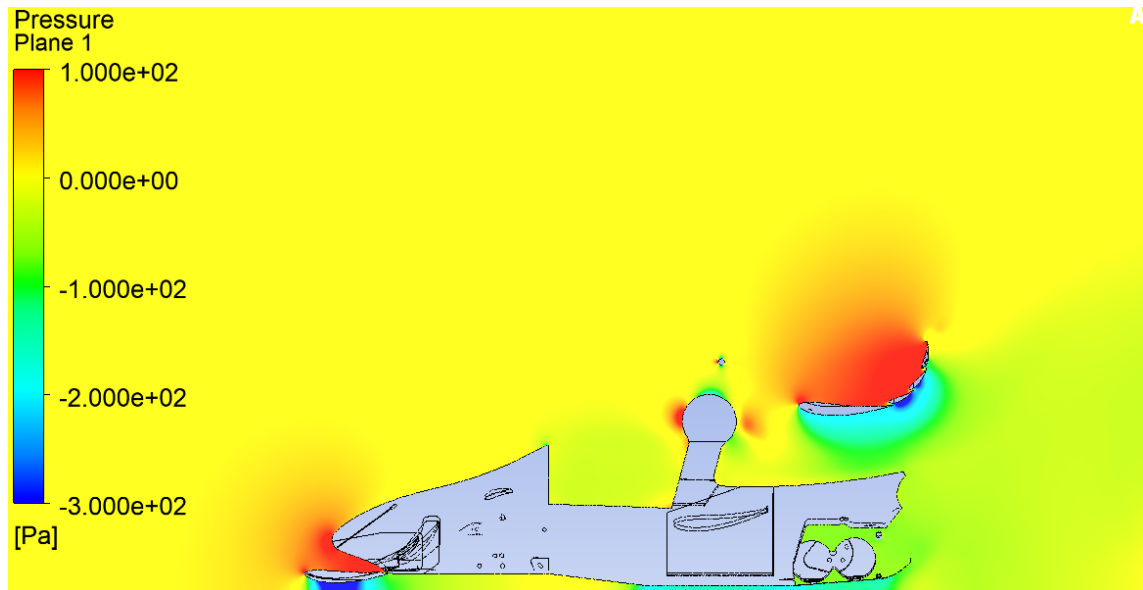
1. Anderson, John D. 2017. Fundamentals of Aerodynamics. Sixth Edition. New York, NY: McGraw-Hill Education.
2. Suvanto, Kari. 2003. Tekniikan Fysiikka. Helsinki: Edita Publishing Oy.
3. McBeth, Simon. 2015. Competition Car Aerodynamics. Dorchester: Veloce Publishing Limited.
4. Katz, Joseph. 2006. Race Car Aerodynamics, Designing for Speed. Cambridge, MA: Bentley Publishers.
5. Milliken, William & Milliken, Douglas. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: SAE International.
6. Boundary Layer. Glenn Research Center. Verkkoaineisto. National Aeronautics and Space Administration. <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundary.html>>. Luettu 8.9.2019.
7. Lift to Drag Ratio (L/D Ratio). Glenn Research Center. Verkkoaineisto. National Aeronautics and Space Administration. <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/ldrat.html>>. Luettu 11.10.2019.
8. Salmi, Tapio. 2001. Statiikka. Tampere: Pressus Oy.
9. Secrets of Formula 1 Part 2 – Importance of Aerodynamics. 2016. Verkkoaineisto. Totalsim. <<https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-2-importance-aerodynamics/>>. Luettu 6.7.2019.
10. Formula Student Rules 2019. Verkkoaineisto. Formula Student Germany. <[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2019/rules/FS-Rules\\_2019\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf)>. Luettu 9.10.2018.
11. Babinsky, Holger. 2012. How Wings Really Work. Verkkoaineisto. University of Cambridge. <<https://www.cam.ac.uk/research/news/how-wings-really-work>>. Luettu 10.11.2019.
12. Fidkowski, Krzysztof, Associate Professor: Graduate Program Chair Aerospace Engineering. 2015. How Planes Fly. Verkkoaineisto. University of Michigan Engineering. <<https://www.youtube.com/watch?v=aa2kBZAoXg0>>. Avattu 19.11.2019.

13. What is CFD | Computational Fluid Dynamics? Verkkoaineisto. Simscale. <<https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>>. Luettu 5.11.2019.
14. Acharya, Rutvike. 2016. Investigation of Differences in Ansys Solvers CFX and Fluent. Master Thesis in Fluid Dynamics. Mechanics Institution: Royal Institute of Technology, KTH.
15. Solver Settings for CFD-Simulations. Verkkoaineisto. CFD-Dyna. <<http://www.cfdyna.com/CFDHT/SolverSetting.html>>. Luettu 20.11.2019.
16. Wasserman, Shawn. 2016. Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation. Verkkoaineisto. Engineering.com. <<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>>. Luettu 17.11.2019.
17. 2020 Technical Regulations for LMP1 Prototype Hybrid. 2019. Verkkoaineisto. FIA. <<https://www.fia.com/fia-wec-2020-technical-regulations-imp1-prototype-hybrid>>. Luettu 10.1.2020.

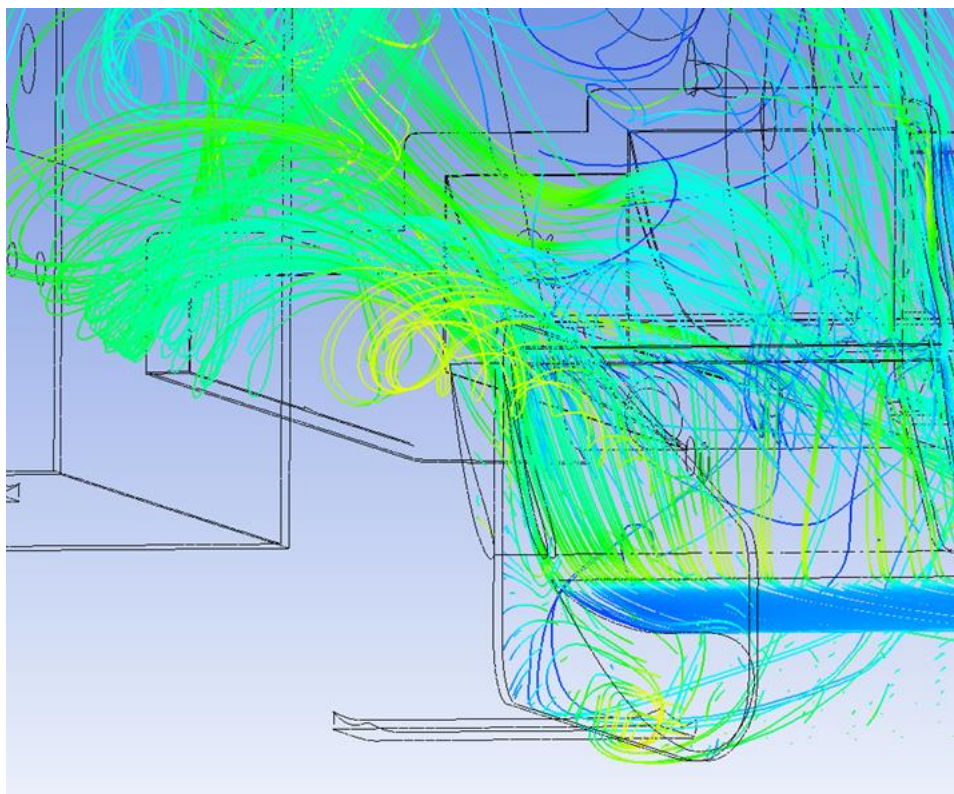
**Aerodynamiikka osa-alueen edistymistaulukko**

Asia / Tehtävä	Valmis (pp.kk.vvvv)	Valmistuminen (%)	Päiviä Jäl- jellä
<b>Suunnittelu</b>	<b>14.1.2019</b>	<b>100 %</b>	<b>Valmis</b>
Etusiiven CFD	10.12.2018	100 %	Valmis
Takasiiven CFD	21.12.2018	100 %	Valmis
Pohjalevyn CFD	10.12.2018	100 %	Valmis
Body (Nc -siiveke)	21.12.2018	100 %	Valmis
Kiinnitykset	1.12.2018	100 %	Valmis
Mekaaninen suunnittelu	14.1.2019	100 %	Valmis
<b>Valmistus</b>	<b>15.4.2019</b>	<b>100 %</b>	<b>Valmis</b>
Kuitujen tilaukset	30.11.2018	100 %	Valmis
Hiilikuituputkien tilaus	30.11.2018	100 %	Valmis
Nomex-tilaus	30.11.2018	100 %	Valmis
Vesileikkuut	1.3.2019	100 %	Valmis
Koneistukset	1.2.2019	100 %	Valmis
Siivet parsittu kasaan	1.4.2019	100 %	Valmis
Inserttien koneistukset	15.2.2019	100 %	Valmis
Siipien viimeistely	14.4.2019	100 %	Valmis
Rod-endit, mutterit, ruuvit tilauk- set	1.2.2019	100 %	Valmis
Mountit kiinni runkoon	1.4.2019	100 %	Valmis
Päätylevyjen lammas/liimaus	10.2.2019	100 %	Valmis
<b>Dokumentaatio</b>		<b>100 %</b>	<b>Valmis</b>
Cost report	30.5.2019	100 %	Valmis
Design report	31.5.2019	100 %	Valmis

### Kuvia HPF019-auton CFD-laskennan jälkikäsittelystä

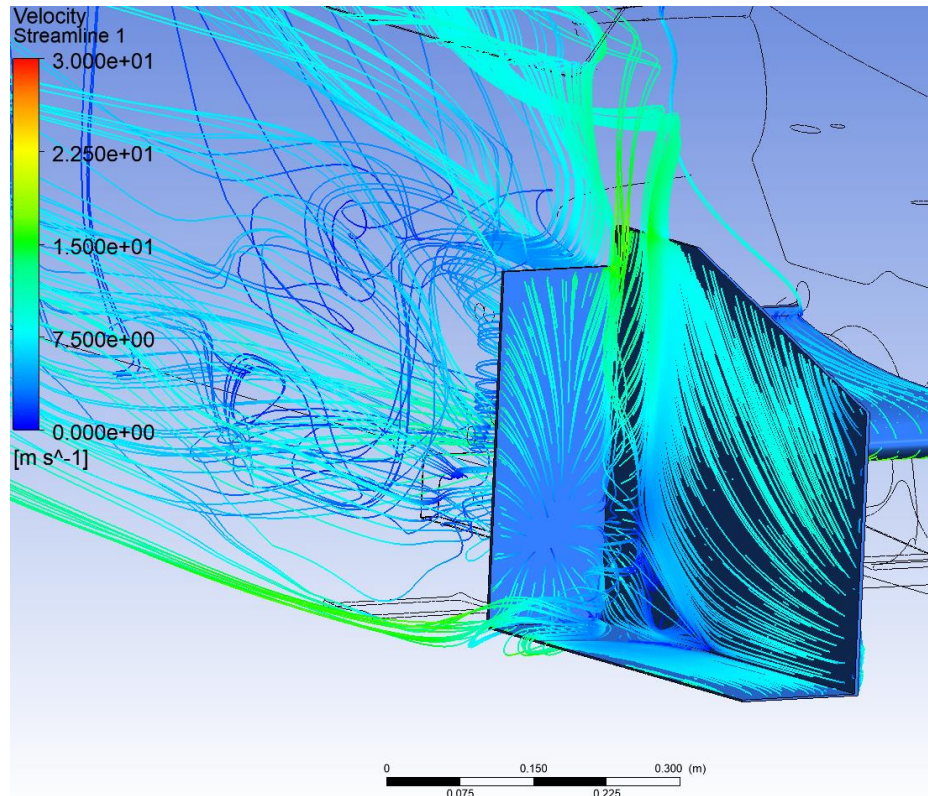


HPF019:n painekuvaajataso 0,15 metriä auton keskeltä ulospäin

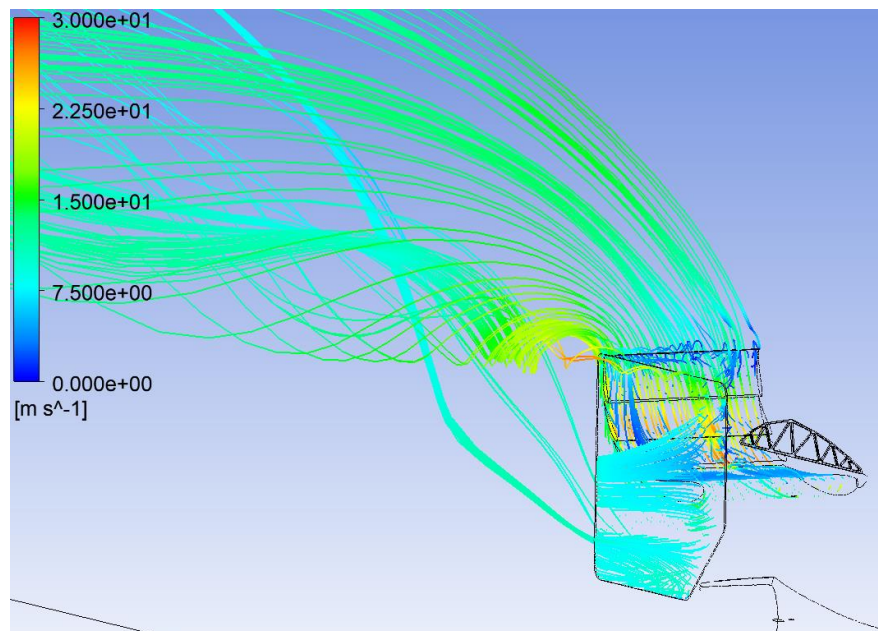


HPF019:n etusiiven reuna-alueiden virtauslinjoja





HPF019:ta sivusiiven virtauslinjoja



HPF019:ta takasiiven virtauslinjoja

## Laskentatulokset HPF019 varustettuna nose cone -siivekkeillä

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-44,34	-74,21	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	45,36	17,85	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0558
front_wheel	Total Force	-5,82	5,93	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1850
	Total Torque	-2,93	-3,51	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-36,73	-202,38		
	Total Torque	71,38	-34,52		
rear_wheel	Total Force	1,76	1,88	Aerodynamic balance front	44,23
	Total Torque	-1,61	-1,16	Aerodynamic balance rear	55,77
rear_wing	Total Force	-85,52	-194,71	Cl	-3,6463
	Total Torque	76,07	-7,10	Cd	-1,3639
side_wing	Total Force	-22,044	-52,806	L/D	2,6736
	Total Torque	16,77	-23,146		
nc_flap	Total Force	0,738	3,076		
	Total Torque	-0,88	-0,05		
full_car	total force	-191,96	-513,23		
	total torque	204,16	-51,64		

## Laskentatulos HPF019 low-drag-asetus

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-37,57	-67,97	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	39,84	13,88	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-5,75	6,27	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1850
	Total Torque	-3,04	-3,98	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-36,72	-203,40		
	Total Torque	71,64	-34,71		
rear_wheel	Total Force	2,33	1,22	Aerodynamic balance front	62,23
	Total Torque	-1,00	-0,15	Aerodynamic balance rear	37,77
rear_wing	Total Force	-36,84	-123,11	Cl	-3,2896
	Total Torque	49,96	1,30	Cd	-1,0234
side_wing	Total Force	-20,36	-47,024	L/D	3,2143
	Total Torque	14,706	-21,396		
full_car	<b>Total Force</b>	<b>-133,98</b>	<b>-430,65</b>		
	<b>Total Torque</b>	<b>171,13</b>	<b>-45,05</b>		

## Laskentatulos HPF019 30 mm:n ajokorkeudella

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-40,82	-76,73	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	36,54	17,56	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-6,77	6,89	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,185
	Total Torque	-3,68	-3,99	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-37,48	-214,12		
	Total Torque	75,02	-35,72		
rear_wheel	Total Force	1,64	1,13	Aerodynamic balance front	47,72
	Total Torque	-1,25	-1,42	Aerodynamic balance rear	52,28
rear_wing	Total Force	-84,17	-183,24	Cl	-3,7538
	Total Torque	78,89	-0,93	Cd	-1,3781
side_wing	Total Force	-22,082	-50,628	L/D	2,7240
	Total Torque	14,926	-24,018		
full_car	Total Force	-189,69	-516,70		
	Total Torque	200,44	-48,52		

### Laskentatulos HPF019 rungon 2 asteen kallistumalla 45 mm:n ajokorkeudessa

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-50,31	-56,86	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	-5,76	-2,93	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-6,34	6,85	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,185
	Total Torque	-1,18	4,47	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-36,12	-204,46		
	Total Torque	6,36	-25,55		
rear_wheel	Total Force	0,68	1,85	Aerodynamic balance front	51,35
	Total Torque	-1,95	-2,69	Aerodynamic balance rear	48,65
rear_wing	Total Force	-78,17	-170,52	Cl	-3,3822
	Total Torque	1,08	8,96	Cd	-1,3908
side_wing	Total Force	-21,181	-42,423	L/D	2,4319
	Total Torque	-2,086	1,096		
full_car	<b>Total Force</b>	<b>-191,44</b>	<b>-465,56</b>		
	<b>Total Torque</b>	<b>-3,54</b>	<b>-16,64</b>		

## Laskentatulos HPF019/30-versiosta K-Epsilon-turbulenssimallilla

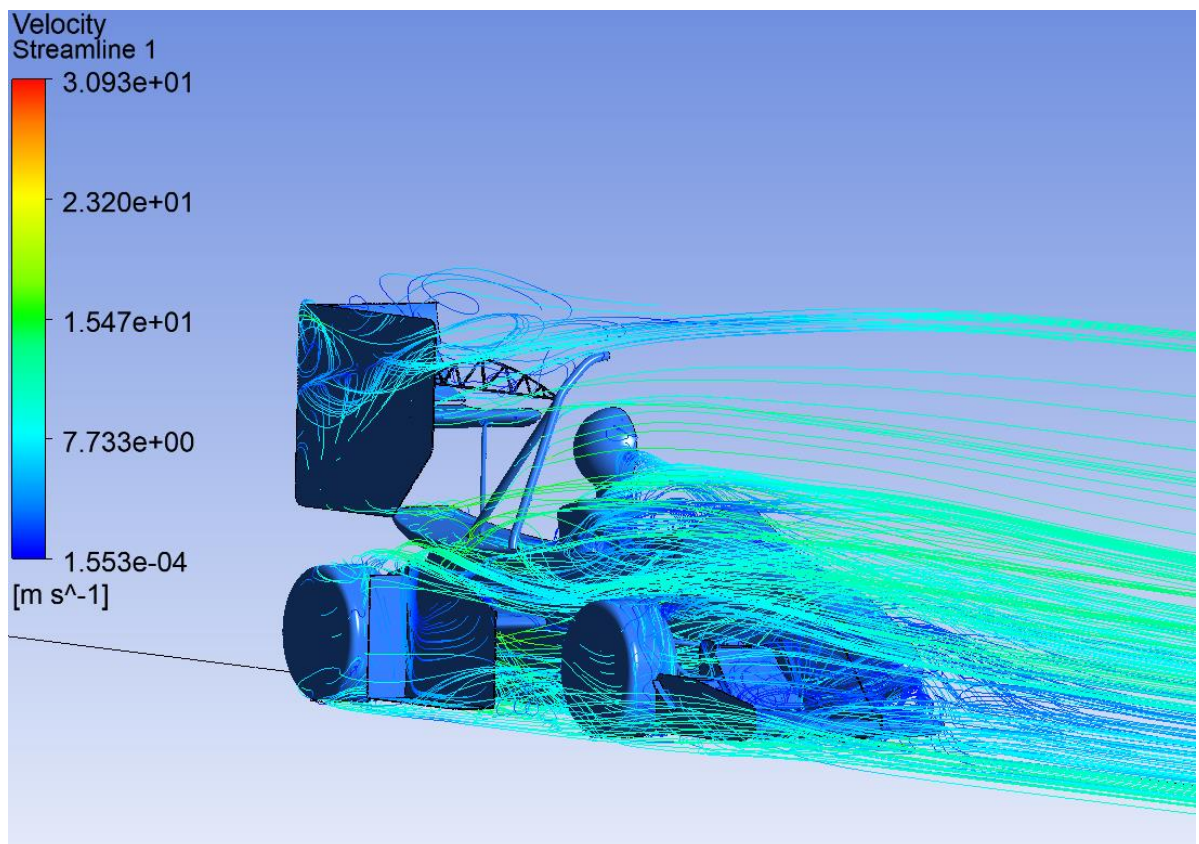
Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-42,08	-103,23	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	39,13	14,74	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-6,45	6,82	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1850
	Total Torque	-3,74	-3,40	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-37,01	-214,32		
	Total Torque	75,20	-35,98		
rear_wheel	Total Force	1,41	2,39	Aerodynamic balance front	53,60
	Total Torque	-1,17	1,71	Aerodynamic balance rear	46,40
rear_wing	Total Force	-79,51	-156,58	Cl	-4,0789
	Total Torque	81,77	11,18	Cd	-1,4017
side_wing	Total Force	-29,306	-96,538	L/D	2,9100
	Total Torque	43,948	-20,996		
full_car	Total Force	-192,94	-561,45		
	Total Torque	235,14	-32,76		

## Laskentatulos HPF019/30-versiosta K-Omega-turbulenssimallilla

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	-43,28	-98,43	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	40,08	15,27	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	-5,88	6,31	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1850
	Total Torque	-3,65	-2,42	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	-36,06	-217,52		
	Total Torque	75,76	-36,60		
rear_wheel	Total Force	1,79	2,15	Aerodynamic balance front	53,58
	Total Torque	-1,03	1,83	Aerodynamic balance rear	46,42
rear_wing	Total Force	-81,18	-159,33	Cl	-4,0550
	Total Torque	81,39	8,98	Cd	-1,4166
side_wing	Total Force	-30,394	-91,338	L/D	2,8624
	Total Torque	40,458	-21,86		
full_car	Total Force	-195,00	-558,17		
	Total Torque	233,01	-34,81		

### Pyörähtäneen HPF019-auton laskentatulokset ja virtauslinjoja

Location	Type	Drag (N)	Lift (N)	speed V [m/s]	15
body/diffuser	Total Force	34,75	25,87	angular velocity [rev/s]	11,6036
	Total Torque	26,09	8,57	frontal area A [m <sup>2</sup> ]	1,0325
front_wheel	Total Force	3,86	2,15	air density rho [kg/m <sup>3</sup> ]	1,185
	Total Torque	-1,53	2,30	Wheelbase	1580
front_wing	Total Force	6,22	-3,26		
	Total Torque	0,40	1,93		
rear_wheel	Total Force	10,47	4,87	Aerodynamic balance front	98,15
	Total Torque	0,69	19,39	Aerodynamic balance rear	1,85
rear_wing	Total Force	36,00	-2,01	Cl	0,1877
	Total Torque	20,52	38,47	Cd	0,7173
side_wing	Total Force	7,434	-1,782	L/D	0,2617
	Total Torque	4,232	8,178		
full_car	Total Force	98,73	25,83		
	Total Torque	50,41	78,84		





## Sivuttais- ja pitkittäiskihtiyyden kuvaajat HPF018:sta ilman siipiä ja HPF019:stä

