



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Miikka Mäkinen

Kilpa-auton aerodynamiikkapaketin 3D-mallintaminen virtauslaskennan iterointiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

11.5.2021

Tekijä Otsikko	Miikka Mäkinen Kilpa-auton aerodynamiikkapaketin 3D-mallintaminen virtauslaskennan iterointiin
Sivumäärä Aika	30 sivua 11.5.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pasi Oikarinen Teknologiajohtaja Oskar Elmgren, Elmer Racing
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli luoda muutoksia kestävä kilpa-auton aerodynamiikkapaketin 3D-malli virtauslaskennan iterointia varten. Mallin tuli olla tehokkaasti muokattavissa, jotta aerodynamiikkapaketin kehitystyö olisi jatkossa sulavaa.</p> <p>Työ toteutettiin SolidWorks CAD-mallinnusohjelmalla Elmer Racingin tiloissa. Mallissa käytettiin kehittyneitä 3D-mallinnustekniikoita. 3D-mallin kestävyyttä testattiin luomalla aktiivisesti uusia versioita aerodynamiikkapaketista.</p> <p>Teoriaosuudessa avataan aerodynamiikan perusteita niiltä osin, että saadaan ymmärrys aerodynamiikkapaketissa käytetyistä komponenteista. CAD-mallinnusosuudessa esitellään työssä käytetyt 3D-mallinnustekniikat.</p> <p>Ensimmäistä mallia varten selvitettiin auton aikaisemman aerodynamiikkapaketin 3D-mallin ongelmakohdat, minkä perusteella alettiin luomaan muokkauksia kestävämpää versiota. Työn toteutuksessa on kuvattu auton mallissa käytetyt työvaiheet tiivistetysti, mistä saadaan kuva 3D-mallin rakennepuun jäsentelystä. Malleihin tehtiin tarvittuja muutoksia virtauslaskennan perusteella. Versioiden lisääntyessä mallin työvaiheiden kestävyyttä saatiin parannettua entuudestaan.</p> <p>Työn tuloksena syntyi tavoitteiden mukainen 3D-malli. Käytetyillä mallinnustekniikoilla pystyttiin luomaan halutut muutokset tehokkaasti. Insinööriyön loppuun mennessä mallista saatiin tehtyä 44 päivitettyä versiota.</p>	
Avainsanat	ajoneuvosuunnittelu, aerodynamiikka, 3D-mallintaminen, CAD

Author Title	Miikka Mäkinen 3D Modeling of a Race Car Aero Package for CFD Iteration
Number of Pages Date	30 pages 11 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Lecturer Oskar Elmgren, CTO, Elmer Racing
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to create a 3D model of a race car aero package for CFD iteration. The model had to be easily modifiable for the development work to be effective in the future.</p> <p>The 3D model was designed using SolidWorks CAD program at Elmer Racing premises. Highly developed 3D modeling techniques were used while making the model. The durability of the models' was tested by actively creating new versions of the aero package.</p> <p>In the theoretical paragraph, basics of aerodynamics are explained so that components in the aero package are understood. The modelling techniques that were used are described and displayed in the CAD modeling paragraph.</p> <p>For the first model, problems in the 3D models of the previously modelled aero packages were examined. Based on these results, a more durable version of the model began to be designed. Design tree features that were used for the car model, are summarised in the execution of work paragraph. Desired changes were made to the models based on the CFD calculations. As the number of different versions of the 3D model increased, the durability of the design tree features were further improved.</p> <p>As a result of this thesis, a 3D model in line with the objective was created. The desired changes were created effectively with the modeling techniques described in the text. By the end of this thesis, 44 updated models were created in total.</p>	
Keywords	vehicle design, aerodynamics, 3D-modeling, CAD

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Elmer Racing	1
2	Aerodynamiikka	3
2.1	Perusteet	3
2.1.1	Voimat	3
2.1.2	Bernoullin laki	4
2.1.3	Coandă-ilmiö	5
2.2	Kilpa-autoissa käytetyt aerodynaamiset komponentit	6
2.2.1	Käännetyt siivet	6
2.2.2	Gurney flap	7
2.2.3	Diffuusori	8
2.2.4	Splitteri	9
3	CAD-mallintaminen	10
3.1	Lähestymistavat mallinnuksessa	10
3.1.1	Top-down	10
3.1.2	Bottom-up	11
3.1.3	Middle-out	12
3.2	3D-mallinnustapoja	12
3.2.1	Solidien mallinnus	12
3.2.2	Pintamallinnus	13
3.2.3	Skeleton	13
3.2.4	Add delete	14
3.3	SolidWorks	15
4	Virtauslaskenta	16
5	Kilpa-autoprojektin esittely	17
5.1	World Time Attack Challenge	18

6	Työn toteutus	19
6.1	3D-mallin työvaiheet	19
6.2	Muutoksien tekeminen virtauslaskennan jälkeen	25
7	Yhteenveto ja pohdinta	28
	Lähteet	29

Lyhenteet ja käsitteet

Billet	Koneistuksessa käytetty metalliaiho.
CAD	Computer-aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CFD	Computation Fluid Dynamics. Numeerinen virtausdynamiikka.
CNC	Computer numerical control. Numeerinen ohjaus eli koneistuslaitteiden automatisoitu ohjaus.
Fluidi	Väliaine, jossa rakenneosat liikkuvat vapaasti. Sisältää nesteet, kaasut ja plasmata.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli CAD-mallintaa kilpa-auton aerodynamiikkapaketti virtauslaskennan iterointia varten. Työn toimeksiantajana toimi Elmer Racing. Elmer Racingilla on ollut suunnitelmissa suunnitella ja valmistaa kilpa-auto World Time Attack Challenge -luokkaan. Auton on tarkoitus toimia demoautona yrityksen Thor-moottorille ja näin lisätä yrityksen tuotteiden myyntiä.

Kilpa-autoprojekti on ollut suunnitteilla jo useita vuosia, ja siihen on CAD-mallinnettu kymmeniä aerodynamiikkapaketteja, mutta projekti on jäänyt useasti taka-alalle asiakkaiden vuoksi. Aikaisempien aerodynamiikkapakettien muokkaaminen virtauslaskennan tietojen pohjalta on huomattu olevan haastavaa johtuen huonoista mallinnustekniikoista. Viime vuosina yritys on ottanut käyttöön kehittyneempiä mallinnustekniikoita, joita on käytetty myös tässä insinööriyössä.

Tämä insinööriyö keskittyy enimmäkseen aerodynamiikkapaketin 3D-mallintamiseen, eikä niinkään sen jälkeen tapahtuvaan virtauslaskentaan. Virtauslaskentaa käsitellään teoriaosuudessa vain pintapuoleisesti. Työssä kerrotaan kumminkin ensimmäisistä virtauslaskennan jälkeisistä halutuista muutoksista auton 3D-malliin.

1.1 Elmer Racing

Elmer Racing on aputoiminimi, jonka omistaa Elmer Technology Development Oy. Yrityksen toiminnan pääpaino on räätälöityjen moottorinosien suunnittelussa ja valmistuksessa. Suosituimpana tuotteena sillä on pakosarjojen billet-kollektorit. Yrityksellä on laitteistot ja tarvittava osaaminen aerodynamiikan optimointiin, komponenttien suunnitteluun ja optimointiin, moniakselisiin prototyyppiosien jyrshintään sekä ajoneuvojen suorituskyky- ja ratasimulointiin.

Elmer Racing suunnittelee ja valmistaa myös muita räätälöityjä monimutkaisia komponentteja, kuten imusarjoja ja kokonaisia moottoripaketteja. Yritys on mm. suunnitellut ja valmistanut World Time Attack Challenge -kilpailun kaksinkertaisen mestaruusauton

moottorin. Komponenttien valmistus yrityksessä suoritetaan kahdella CNC-työstökeskuksella. [1]

2 Aerodynamiikka

2.1 Perusteet

2.1.1 Voimat

Liikkuva ajoneuvo joutuu jatkuvasti syrjäyttämään ilmaa edetessään ja myöhemmin ilma pyrkii täyttämään ajoneuvon taakse syntyvän tyhjiön. Tällainen ilman liikkuminen luo ajoneuvon koriin voimia, jotka pyrkivät hidastamaan, nostamaan ylös tai painamaan ajoneuvoa alas.

Ilmanvastus (Drag)

Ilmanvastus on mekaaninen voima, joka pyrkii hidastamaan ilman läpi kulkevaa kappaletta. Se vaikuttaa kappaleen liikettä vastakkaiseen suuntaan. Ilman väliainetta ilmanvastusta ei synny. Ilmanvastus koostuu kahdesta osasta, kitkavastuksesta ja painevastuksesta. Kitkavastus syntyy pinnan ja kaasun välisestä kitkasta kappaleen pinnan suuntaisesti. Pinnankarheus ja kaasun viskositeetti vaikuttavat kitkavastuksen suuruuteen.

Ilman virratessa kappaleen ympäri sen nopeus ja paine muuttuvat ja aiheuttavat vastuksia kappaleeseen. Kappaleen muotoilulla voidaan vaikuttaa merkittävästi näiden suureiden voimakkuuteen. Tätä kappaleen muodon aiheuttamaa vastusta voidaan kutsua painevastukseksi. [2]

Nostovoima (Lift)

Nostovoima on voima, joka on vastakkaiseen suuntaan kappaleen painosta. Se pyrkii nimensä mukaisesti nostamaan kappaletta ilmaan. Nostovoima syntyy kappaleen kulkiessa ilman läpi, jos sen muoto kääntää ilmavirtaa maahan päin niin, että se synnyttää paine-eroja kappaleen eri puolille. [3]

Negatiivinen nostovoima (Downforce)

Negatiivinen nostovoima on käänteinen versio nostovoimasta. Tyypillisesti kilpa-autoilussa tästä puhutaan termillä downforce. Muodot, jotka aiheuttavat nostovoimaa, luovat negatiivisen vaikutuksen, kun ne on käännetty ylösalaisin.

Kilpa-autoilussa parempaa suorituskykyä tavoitellessa tarvitaan lisää pitoa renkaan ja maan välille. Yksi keino olisi lisätä painoa, mutta se huonontaa auton käyttäytymistä ja tarvittaisiin enemmän tehoa moottorilta. Paras keino lisätä voimaa maata kohti on muotoilla auto niin että se luo downforcea. Nykyaikaisessa kilpa-autoilussa downforce on yksi tärkeimmistä suunnittelukohdista suorituskykyä parantaessa, sillä downforcen lisäämisellä voidaan autolla saavuttaa suurempia mutkanopeuksia ja nopeampia jarrutuksia. [4]

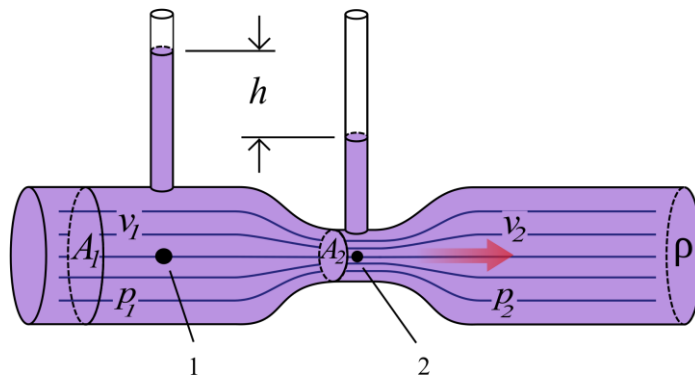
2.1.2 Bernoullin laki

Bernoullin laki kuvaa fluidien nopeuden, tiheyden ja paineen välisiä suhteita virtauksessa. Sen mukaan kun virtauksen nopeus kasvaa, niin paine laskee ja vastakkaisesti kun nopeus laskee, niin paine kasvaa. Bernoullin yhtälö on

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{vakio}$$

jossa p on paine, ρ on aineen tiheys, g on painovoiman aiheuttama kiihtyvyys, h on korkeus ja v on nopeus.

Virtauksen nopeuden ja paineen välisen suhteen voi todeta helposti venturiputkella. Venturiputkessa putkeen on valmistettu kaventuma, jossa poikkipinta-ala on pienempi kuin muualla putkessa. Putkeen on sijoitettu painemittarit ennen kaventumaa ja kaventuman kohdalle. Koska virtausnopeus kasvaa nesteen virratessa kaventumassa, huomataan sen kohdalla olevassa painemittarissa matalampi paine kuin ennen kaventumaa. Kuvassa 1 on havainnollistettu edellä mainittu ilmiö.



Kuva 1. Venturiputki [6].

Bernoullin lakia sovelletaan monissa päivittäisissä asioissa, kuten moottorien kaasuttimien kurkuissa, joissa polttoaine imetään kurkussa olevan alipaineen avulla ilman sekaan. Myös lentokoneen siiven toiminta perustuu samaan ilmiöön, sillä siiven yläpuolelle syntyy alipaine, koska virtausnopeus on siellä suurempi. Paine-ero siiven eri puolilla taas aiheuttaa nostovoimaa. Koska kilpa-autoissa käytetään käännettyjä siipiprofiileja, paine-ero aiheuttaa downforcea. [5, s. 360.]

2.1.3 Coandă-ilmiö

Coandă-ilmiö on virtauksen pyrkimys kääntyä sitä lähellä olevaa kaarevaa pintaa kohti ja virrata sen mukaisesti. Efektiiä voidaan käyttää vaihtamaan virtauksen suuntaa. Näin tekemällä virtauksen nopeus kasvaa vapaaseen virtaukseen verrattuna. Bernoullin lain mukaisesti virtausnopeuden kasvaessa paine laskee. Tästä syystä virtaus pysyy kaarevan pinnan mukaisesti niin kauan, kunnes nopeus taas pienenee. [7]

Ilmiön voi todeta helposti roikuttamalla lusikkaa kevyesti vesihanan virtauksen suuntaisesti niin, että kupera puoli on virtauksen puolella. Kun lusikkaa liikuttaa lähelle vettä, huomaa, kuinka se imeytyy virtaukseen ja vesi muuttaa suuntaa pinnan mukaisesti. Toinen keino demonstroida ilmiö on pitää paperia yhden reunan kulmista vaakatasossa ja puhalttaa sen yläpuolelle. Matalampi paine nostaa paperia ylöspäin, kun ilman virtauksen nopeus kasvaa kaarevalla pinnalla.

2.2 Kilpa-autoissa käytetyt aerodynaamiset komponentit

Tyypillisesti auton korin muodot aiheuttavat nostetta, joka huonontaa auton käyttäytymistä. Tästä syystä kilpa-autoihin on hyvin yleistä suunnitella aerodynaamisia komponentteja, jotka lisäävät downforcea ja näin parantavat auton käyttäytymistä sekä renkaiden pitoa. Tässä luvussa on kerrottu yleisimmistä aerodynaamisista komponenteista kilpa-autoissa.

2.2.1 Käännetyt siivet

Siiveksi kutsutaan auton etu- tai takaosassa olevaa komponenttia, joka muistuttaa ylösalaisin olevaa lentokoneen siiven muotoa. Poikkileikkauksesta nähtäisiin, että se vastaa samanlaisia siipiprofiileja kuin lentotekniikassa käytetään. Sen tarkoituksena on luoda downforcea korkeissa nopeuksissa luomalla paine-ero siiven eri puolille. Siipiprofiilin muodolla luodaan sen alapuolelle Bernoullin lain mukaisesti matalampi paine ohjaamalla ilma kulkemaan nopeammin sen pinnalla.

Siiven kulmaa muuttamalla jyrkemäksi saadaan suurempia paine-eroja, mutta samalla ilmanvastus lisääntyy. Kulmaa ei voi kumminkaan jyrkentää loputtomasti, sillä lopulta siipi alkaa sakata eli ilmavirta irtoaa alapinnasta ennen aikaisesti. Jos halutaan lisätä siiven tuottamaa negatiivista nostetta entuudestaan ilman että se alkaa sakata, voidaan käyttää monielementtistä siipeä. Siinä isomman siipiprofiilin jälkeen on sijoitettu yksi tai useampi pienempi profiili. Elementtien sijoituksen toisiinsa nähden tulee olla oikea, koska halutaan, että aikaisempi profiili syöttää ilmaa seuraavan siiven alapuolelle. [8] Kuvassa 2 nähdään tyypillinen kilpa-autoilussa käytetty yksi elementtinen takasiipi päätylevyillä.

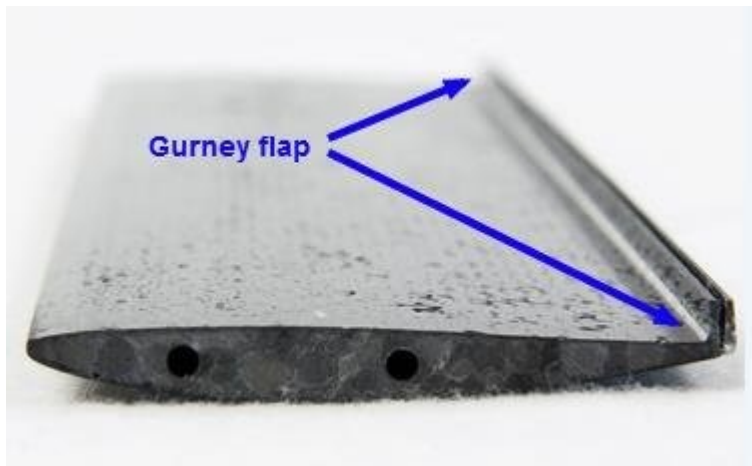


Kuva 2. Audi RS5 2013 DTM -kilpa-auton takasiipi [9].

2.2.2 Gurney flap

Gurney flap on pieni lippa siiven korkeapainepuolen jättöreunassa (kuva 3). Sen kehitti amerikkalainen Dan Gurney vuonna 1971 parantamaan oman kilpa-autonsa pito-ominaisuuksia. Myöhemmin Gurney flap kasvatti suosiotaan myös lentotekniikassa yksinkertaisuutensa takia.

Gurney flapin toiminta perustuu siihen, että lipan ja siiven yhdyskohtaan syntyy pyörre, joka auttaa tuottamaan suurempia paine-eroja siiven eri puolille. Sen takapuolelle taas aiheutuu kaksi pyörrettä, jotka vetävät pinnoista irronneen ilmavirran takaisin yhteen. Lipalla pystytään luoda vastaava downforcen lisäys, kuin siiven kulmaa jyrkentämällä. Suurena erona on, ettei lippa lisää niin merkittävästi ilmanvastusta, kuin siiven kulman jyrkentäminen. [10]



Kuva 3. Gurney flap siiven jättöreunassa [11].

2.2.3 Diffuusori

Diffuusoriksi kutsutaan muuttuvapoikkipinta-alaista tunnelia auton pohjan takaosassa (kuva 4). Sen tehtävä on kiihdyttää ilman virtausta auton alla ja näin aiheuttaa downforcea lisäävän matalapaineen. Sen toiminta perustuu venturi-ilmiöön. Tasapohjainen kilpa-auto luo downforcea maan pinnan ja pohjan välillä ilmavirran kiihtymisen takia. Lisäämällä autoon diffuusori pohjan matalapainetta saadaan kasvatettua entisestään. Diffuusorin muoto helpottaa sen alussa olevan matalapaineisen ilmavirran siirtymistä takaisin korkeapaineisempaan ilmakehään auton takana. Tämän seurauksena syntyy lisääntynyt negatiivinen noste diffuusorin alkuun, jossa esiintyy suurin matalapainealue.

Siipiin verrattuna diffuusori luo huomattavasti enemmän negatiivista nostetta vähemmällä ilmanvastuksen lisäämisellä. Normaalisti diffuusorissa on pystysuuntaiset seinät sen reunoilla, jotka sulkevat tunnelissa kulkevan ilmavirran maan ja yläpinnan välille. Diffuusorin nousukulma on tärkeä pitää sellaisena, ettei ilmavirta irtoa sen pinnasta eli ala sakata. [12]



Kuva 4. Audi RS5 2013 DTM -kilpa-auton diffuusori [9].

2.2.4 Splitteri

Splitteriksi kutsutaan auton etupuskurin alareunassa olevaa levyä, joka ulottuu ulospäin puskurista. Sen tehtävä on nimensä mukaisesti jakaa auton ylitse kulkeva korkeapaineinen ja alitse kulkeva matalapaineinen ilma. Auton kulkiessa ilman lävitse puskuriin syntyy suuri korkeapainealue. Splitterillä estetään tämän ilman kulkeutuminen auton alle, joka muuten aiheuttaisi nostetta. Splitteri ei itsessään luo downforcea, mutta se lisää aluetta, johon korkeapaine syntyy. Mitä enemmän puskuriin syntyvää korkeapaineista ilmaa saadaan eristettyä auton alta, sitä enemmän alle pääsee matalapaineista ilmaa. [13]

3 CAD-mallintaminen

CAD-mallintaminen eli tietokoneavusteinen suunnittelu on mallinnusohjelmilla tehty suunnitteluprosessi. Se auttaa suunnittelijoita rakentamaan realistisia malleja ja kokoonpanoja, ennen kuin valmis tuote valmistetaan. CAD-mallintamisella havainnollistetaan tuotteen ulkonäkö ja toiminta ennen valmistusta. Näin säästetään aikaa ja rahaa tuotekehityksessä sekä vähennetään virheiden mahdollisuutta lopullisessa tuotteessa.

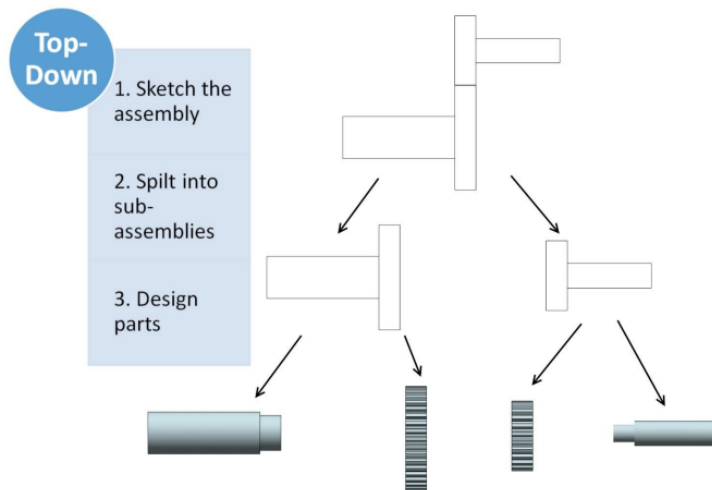
Mallinnusohjelmia voidaan käyttää 2D-piirrustusten tai 3D-mallien luomiseen. Useilla ohjelmilla voidaan myös luoda laajasti erilaisia simulaatioita, kuten lujuuslaskentaa tai lämpötilankeston testausta.

3.1 Lähestymistavat mallinnuksessa

Uutta CAD-mallinnusprojektia aloittaessa on hyvä pohtia miten se tulisi rakentaa, jotta se olisi kustannustehokasta ja ettei ajautuisi turhiin ongelmatilanteisiin. Lähestymistapoja mallintamiseen on useita erilaisia, ja myös eri tapojen yhdistäminen voi olla oikea ratkaisu. Tässä luvussa on kerrottu yleisimmistä lähestymistavoista CAD-mallinnuksessa.

3.1.1 Top-down

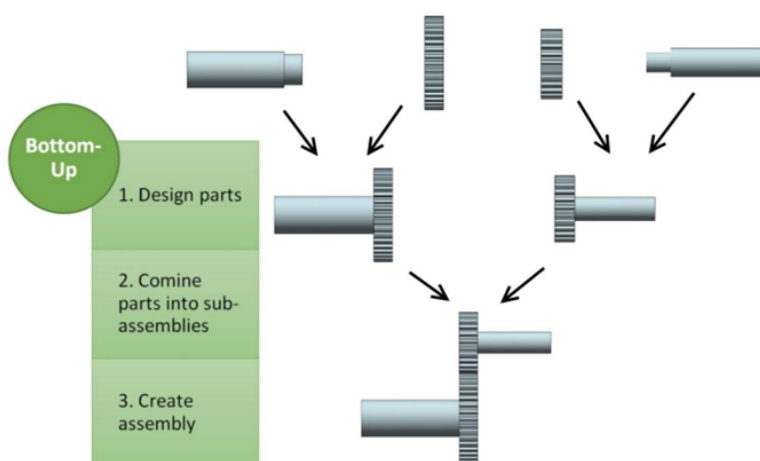
Top-down-lähestymistavassa tiedetään tarvittavien komponenttien kriteerit. Näiden pohjalta luodaan uuteen tiedostoon alustava perustus, jossa on kaikki komponenttien tärkeimmät parametrit. Perustus voi olla esimerkiksi 2D- tai 3D-malli. 2D-mallissa tiedostoon luodaan sketchejä, jotka tarvitaan lopullisten osien yhteensopivuuteen. 3D-mallissa käytetään mallinnustyökaluja luomaan multi-body-malli yhteen osatiedostoon. Multi-bodyllä tarkoitetaan, kun osatiedoston sisällä on useampi pursoitettu osa, jotka eivät ole yhdistettynä toisiinsa. 3D-perustuksessa koko designia ohjataan yhdellä osatiedostolla. Top-down menetelmällä saadaan tehtyä nopeita kokoonpanon päivityksiä, ja se helpottaa työskentelyä suuremmassa työyhteisössä, jossa useampi tekee saman kokoonpanon eri osia. [14] Lähestymistapa nähdään yksinkertaistettuna kuvassa 5.



Kuva 5. Top-down-lähestymistapa [15, s. 16].

3.1.2 Bottom-up

Bottom-up-lähestymistapaa voidaan pitää niin sanottuna perinteisenä tapana CAD-mallintaa. Siinä luodaan tarvittavat osat tyhjästä, minkä jälkeen ne sijoitetaan kokoonpanotiedostoon ja luodaan rajoitukset osien välille. Kun erilliset osat on mallinnettu yksittein, voi niiden yhteensopivuus olla huono, kun ne tuodaan kokoonpanotiedostoon. Tällöin osista voi halutessaan tehdä adaptiivisia jättämällä haluttuja kohtia mitoittamatta ja kiinnittämällä ne toisen osan mittaan kokoonpanossa. Tällöin yhden komponentin mittoja muuttamalla saadaan siihen kuuluva komponentti mukautumaan samassa suhteessa. [14] Lähestymistapa nähdään yksinkertaistettuna kuvassa 6.



Kuva 6. Bottom-up lähestymistapa [15, s. 15].

3.1.3 Middle-out

Middle-out-lähestymistavassa luodaan tarvittavia osia jo olemassa olevien rinnalle. Olemassa olevat osat laitetaan oikeisiin paikkoihin yhteen kokoonpanotiedostoon, minkä jälkeen luodaan uusi osatiedosto ja tuodaan se kokoonpanoon. Tämän jälkeen rakennetaan tarvittava osa vanhojen osien mittojen perusteella. Uuden osan mittoja on mahdollista kiinnittää vanhoihin osiin, jolloin ne muuttuvat automaattisesti, jos vanhan osan mittoja muutetaan. Toisaalta uusi osa saattaa hajota mittoja muuttaessa, jos jokin geometria ei toimi uusilla mitoilla. [14]

3.2 3D-mallinnustapoja

Tavanomaisilla mallinnustavoilla tehdyssä monimutkaisemmassa 3D-mallissa on tyypillistä huomata paljon rikkinäisiä toimintoja rakennepuussa, kun jotain muokataan. Kehittyneemmällä mallinnustavoilla saadaan luotua kestäviä ratkaisuja mallin muokkauksen kannalta. Tässä luvussa on kerrottu tämän työn kannalta olennaisista 3D-mallinnustavoista.

3.2.1 Solidien mallinnus

Kiinteiden muotojen eli solidien 3D-mallintamista voidaan pitää perustason mallinnustapana, sillä sitä opetetaan kaikilla CAD-mallinnuksen alkeiskursseilla. Mallinnustapa on kumminkin hyvä mainita tässä työssä, koska se on yleisin tapa mallintaa ja nähdään ero seuraavassa kappaleessa kerrottuun pintamallinnukseen.

Solidien mallinnuksessa luodaan kiinteitä muotoja eli bodyja, jotka vastaavat täysin oikeaa valmistettavaa tuotetta. Solideja luodaan piirtämällä luonnos eli sketch, joka pursotetaan kolmiulotteiseksi muodoksi. Luomalla bodyja, jotka osuvat toisiinsa, voidaan ne yhdistää ja näin luoda monimutkaisia kappaleita. Niitä käytetään myös poistamaan osia toisista solideista. Kiinteiden muotojen kulmiin voidaan lopuksi luoda pyöristyksiä tai viisiteitä. Solidien mallintamisen hyvä puoli on siinä, että ne ovat useasti parametrisia eli niitä voidaan helposti muokata muuttamalla vain jotain mittaa. [16]

3.2.2 Pintamallinnus

Pintamallinnuksella voidaan esittää CAD-ohjelmassa kappaleen visuaalinen ulkokuori. Nimensä mukaisesti se on vain pintaa, eli sillä ei ole paksuutta tai painoa. Pintamallinnuksella tehdyt muodot on helpompi saavuttaa kuin kiinteitä kappaleita mallintaessa. Se antaa mahdollisuuden luoda pintoja yksittäin, kun taas kiinteää kappaletta tehdessä syntyy jokainen pinta samalla työvaiheella. Tästä syystä suunnittelija saa paljon uusia mahdollisuuksia muotoilla kappaletta täsmälleen haluamansa mukaan. Toisinaan on järkevä käyttää pintamallinnusta ja kiinteää mallinnusta yhdessä parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. [17]

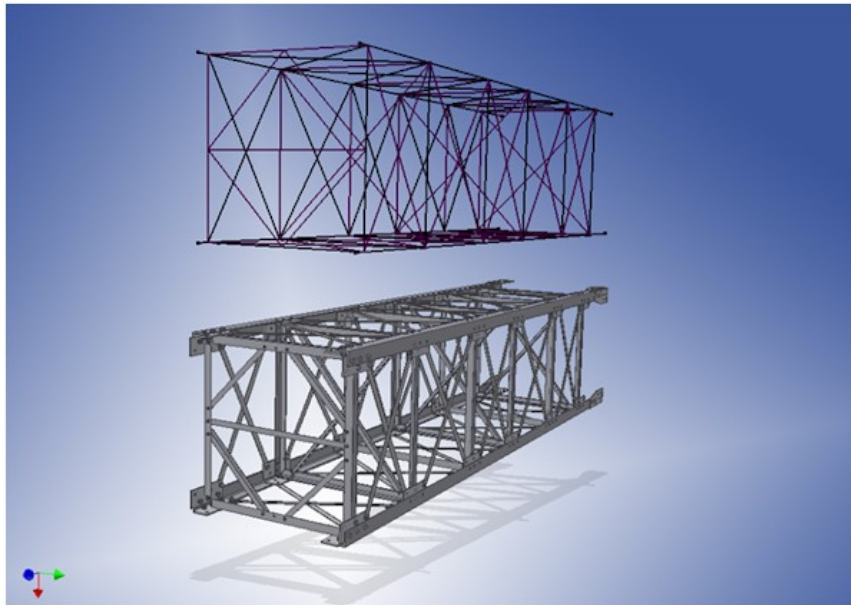
Tyypillisesti pintamallia tehdessä ensimmäiseksi luodaan halutut pinnat erikseen, minkä jälkeen ne liitetään nitomistyökalulla yhdeksi kokonaiseksi pinnaksi. Koska pintamallilla ei ole paksuutta, sitä ei voi koneistaa tai 3D-tulostaa. Pintoja voidaan kumminkin luoda niin, että kappale on suljettu ja tällöin on mahdollista täyttää kappale kiinteäksi malliksi. Toinen vaihtoehto on käyttää CAD-ohjelmien paksunnustyökalua, joka luo pinnalle halutun paksuuden.

3.2.3 Skeleton

Skeleton-mallinnuksessa luodaan erillinen osatiedosto ohjaamaan osan tai kokoonpanon mittoja. Se kuuluu top-down-lähestymistapaan. Osatiedostoon luodaan tekijöitä, joita tiedetään tarvittavan useassa osassa. Skeleton sketchiin luodaan tarvittavat geometriat ja muodot, jotka sidotaan pursotettuihin osiin. Muuttamalla skeletonin mittoja, kaikki siihen liitetyt osan tai kokoonpanon mitat muuttuvat, eikä tällöin tarvitse käydä erikseen muuttamassa jokaista työvaihetta. Skeleton-mallinnus helpottaa kokoonpanon komponenttien luontia ja myös myöhempi muokkaaminen on helppoa. Kuvassa 7 on esimerkki kappaleen skeletonista ja valmiista mallista. Tyypillisesti skeleton-tiedostoon luodaan

- sketchejä, jotka määrittävät lopullisen tuotteen, tai joita käytetään useassa eri tuotteen osassa
- yhdyspisteitä, akseleita ja työtasoja, joita tarvitaan kokoonpanossa

- parametreja, jotka määrittävät mittoja, kulmia ja muita tiedettyjä arvoja
- kiinteitä muotoja, jotka voivat osoittaa eri tilavuuksia tuotteessa. [18]



Kuva 7. Skeleton ja lopullinen tuote [18].

3.2.4 Add delete

Add delete -mallinnus on 3D-mallinnustekniikka, joka soveltaa multibody-mallinnustekniikkaa. Multibody-tekniikassa osatiedostoon luodaan kiinteitä bodyja, joita ei ole sulautettu yhteen. Osat ovat riippumattomia toisistaan, eli niitä voi muokata vapaasti ilman, että se vaikuttaa muun kokonaisuuden osiin. Osien välille ei voi tällöin luoda kulmien pyöristyksiä tai viisteitä. Myöhemmin bodyja voidaan halutessaan yhdistää, poistaa toisistaan tai risteyttää combine-työkalun eri vaihtoehdoilla. [19]

Ensimmäiseksi add delete -tekniikassa päätetään osasta poistettavat alueet eli luodaan delete-bodyt. Tämän jälkeen poistettavien alueiden ympärille luodaan halutun materiaali-paksuuden mukaiden add-body. Jos mallinnettava delete ei vaadi ympärilleen materiaalia, kuten esimerkiksi tasopinnoissa, voidaan se jättää ilman add-bodya. Kun kaikki add- ja delete-bodyt on luotu, lisättävät osat yhdistetään combine-työkalun add-toiminnolla ja poistettavat alueet poistetaan combine-työkalun subtract-toiminnolla.

Kyseisen mallintamistapa sallii monimutkaisten kappaleiden suunnittelun ja niiden kestävän muokkaamisen jälkeenpäin. Add delete -mallinuksella voidaan luoda helposti kappaleita, joissa on vain tarvittava määrä materiaalia. Tämän takia saadaan kevyempiä ratkaisuja, jotka ovat hyödyllistä mm. kilpa-autojen suunnittelussa ja lentotekniikassa. Toisinaan kappaleelle on silti tarve luoda lisätukirakenteita tarvittavan jäykkyyden saamiseksi. Kun add delete -mallinnuksen yhdistää skeletonin kanssa, molemmat add ja delete -bodyt saadaan muuttumaan samanaikaisesti sketchien mittoja muuttamalla. [20]

3.3 SolidWorks

Solidworks on yksi suosituimmista 3D-CAD-suunnitteluohjelmistoista Microsoft Windows -käyttöjärjestelmille. Ohjelmisto tarjoaa helppokäyttöiset työkalut 3D-mallien luomiseen, simulaatioon, julkaisuun ja tiedonhallintaan. Tuotetta valmistava yritys on perustettu vuonna 1993 Massachussetissa Yhdysvalloissa. Vuodesta 1997 yrityksen on omistanut ranskalainen Dassault Systèmes, joka on johtava tuotteiden elinkaaren hallintaratkaisujen kehittäjä.

Ensimmäinen tuote SolidWorks 95 julkaistiin vuonna 1995. Yrityksen lähtökohtana oli tehdä CAD-ohjelma, joka on helppo käyttää, edullinen ja saatavilla Windows-käyttöjärjestelmille. [21]

4 Virtauslaskenta

Virtauslaskenta on prosessi, jossa tietokoneella simuloidaan matemaattisesti nesteiden tai kaasujen virtauksia. Sitä kutsutaan myös nimellä CFD (Computational fluid dynamics) eli numeerinen virtausdynamiikka. Tietokoneiden laskentatehon parannuttua virtauslaskenta on muodostunut yleiseksi menetelmäksi tutkia auton aerodynaamisia ominaisuuksia. Virtauslaskenta on kustannustehokkaampi tapa tutkia auton ympärillä kulkevaa virtausta kuin tuulitunneli tai ratatestaus. Virtauslaskennassa auton ei tarvitse olla fyysisesti valmis, vaan voidaan se 3D-mallintaa ja tämän pohjalta tutkia sen käyttäytymistä. Aikaisemmin auto on pitänyt ensin rakentaa valmiiksi aiemmin opittujen tietojen pohjalta, testata sen aerodynamiikkaa tuulitunnelissa tai radalla ja vasta sen pohjalta tehdä parannuksia.

Virtauslaskennassa tuodaan siihen tarkoitettuun ohjelmaan 3D-malli, jonka ympärille luodaan laskentaverkko ja määritellään halutut laskennat. Jos halutaan mahdollisimman realistinen kuva virtauksien käyttäytymisestä, mallin kannattaa olla mahdollisimman tarkasti mallinnettu sellaiseksi, kuin oikeat muodot on tarkoitus valmistaa. Kumminkin on tärkeä tiedostaa, mitkä mallinnetut muodot ovat olennaisia virtauslaskennan kannalta, jotta säästytään turhalta ajan ja resurssien käytöltä. Laskennan valmistuttua tuloksia voidaan tarkastella eri jälkikäsitteilyyn tarkoitetuilla käyttöliittymillä. Jälkikäsitteilyssä voidaan nähdä visuaalisesti mm. autoon kohdistuvia pintapaineita tai ilman virtauksen suuntia. Näillä tiedoilla voidaan parantaa seuraavan 3D-mallin ilmanvastusta tai downforcen syntymistä. Virtauslaskentaohjelman käyttö ja siitä saatava tieto vaativat korkean tietotekniikan ja aerodynamiikan ymmärryksen. [22]

5 Kilpa-autoprojektin esittely

Elmer Racingilla on ollut suunnitelmissa suunnitella ja valmistaa kilpa-auto, joka toimii demoautona yrityksen Thor-moottorille ja muulle osaamiselle. Auton on tarkoitus olla kykenevä kilpailemaan maailman nopeimpien time attack -autojen kanssa. Alun perin tarkoituksena oli rakentaa auto roadsport-kilpaluokkaan, mutta yrityksen moottoriprojekti kaksinkertaisen World Time Attack -luokan mestariauton kanssa sai kiinnostumaan nopeimmista luokista.

Projektin pohjaksi oli tavoitteena löytää mahdollisimman matala ja virtaviivainen auto, koska haluttiin, että korin ilmanvastus on pieni ja ilmavirta takasiivelle olisi häiriötöntä. Korin tuli myös olla kapea, sillä autoon haluttiin lisätä kylkileivityksiä, jolla saadaan parannettua aerodynaamisia ominaisuuksia. Lopulta kilpa-auton pohjaksi valittiin vuoden 1973 Opel GT. Ostettaessa autolla oli ajettu 73 tuhatta kilometriä. Alkuperäisenä tekniikkana autossa toimi nelisynterinen, nelivaihteisella manuaalivaihteistolla varustettu, 1,9-litrainen 90 hv:n bensiinimoottori. Aluksi autoon oli tarkoituksena asentaa yksilitrainen moottorikelkan turboahdettu nelitahtimoottori, mutta suunnitelmat vaihtuivat yrityksen Thor-moottoriin. Thor on nelilitrainen nelisynterinen täysbillet-kilpamoottori, joka on suunniteltu tuottamaan 1500 hevosvoimaa. Moottorilla on aikaisemmin voitettu World Time Attack Challenge -mestaruus vuosina 2018 ja 2019. Projektin nimeksi valikoitui ER8, joka juontuu yrityksen nimestä Elmer Racing ja aikaisempien autoprojektien lukumäärästä.

Tämän opinnäytetyön tekohetkellä auton kori oli kiinnitettynä jigipöytään ja siihen oli tehty tarvittavia peltitöitä, valmistettu turvakaaret sekä kiinnitykset vaihteistolle ja tasauspyörästölle. Kuvasta 8 nähdään, että auton takaosa on leikattu melkein kokonaan pois takalasin jälkeen, koska se suunnitellaan uudelleen aerodynamiikkapakettissa. Myös auton keula on tarkoituksena leikata moottoritilan etuosasta eteenpäin, ja se tullaan jäykistämään putkirungolla. Ulospäin näkyvistä alkuperäisistä peltiosista autoon jää jäljelle katto pilareineen. Muuten aerodynamiikkapaketti on tarkoitus suunnitella ja valmistaa täysin uudelleen, kumminkin kunnioittaen auton alkuperän tunnistettavuutta.



Kuva 8. ER8-kilpa-auton kori.

5.1 World Time Attack Challenge

World Time Attack Challenge on vuosittain Australiassa järjestettävä kansainvälinen time attack -kilpailu. Kilpailu ajetaan Sydneyssä sijaitsevalla Sydney Motorsport Park -moottoriradalla. Ensimmäinen tapahtuma järjestettiin vuonna 2008 nimellä Superlap Australia, jolloin se oli Australian kansallinen kilpailu. Lajin suosion kasvun myötä perustaja Ian Baker näki tilaisuuden järjestää kansainvälisen kilpailun kotimaahansa. Nykyisellä nimellään tapahtumaa on järjestetty vuodesta 2010. Tapahtuman suosio on kasvanut, ja rataennätystä on saatu parannettua vuosittain.

Time attackissa kuljettajat ajavat radalla kelloa vastaan sallitun määrän kierroksia ja oman luokkansa nopeimman kierrosajan ajanut kuljettaja voittaa. Lajin kiinnostavuus piilee siinä, että nopeimpien luokkien autojen rakentelusäännöt rajoittuvat turvallisuusmääräyksiin. Vähäisten rakentelurajoitusten takia lajissa on hyvin näyttäviä aerodynaamikkapaketteja ja useita erilaisia moottorityyppejä. WTAC-kilpailun autot on jaoteltu neljään luokkaan: Clubsprint, Open, Pro Am ja Pro. Jokainen luokka ajaa kolmena hetkenä päivässä, eli yhteensä kuutena viikonlopun aikana. Luokkansa nopeimmat viisi autoa pääsevät bonuskierrokselle, jota kutsutaan Superlap Shootoutiksi. Bonuskierroksen kilpailijat saavat ajaa lisäkierrokset tyhjällä radalla illan viilennettyä optimaaliseksi, jolloin on suuri mahdollisuus parantaa kierrosaikaansa. [23]

6 Työn toteutus

Työ toteutettiin Elmer Racingin tiloissa Kirkkonummella käyttäen Solidworks 2012 -mallinnusohjelmaa. Aerodynamiikkapakettia alettiin suunnittelemaan aikaisempien toimivien muotoilujen pohjalta, sekä uusien haluttujen toivomusten kautta. Yrityksellä oli karkea 3D-skannaus auton korista, josta saatiin olemassa olevat kattolinjat ja auton mittasuhteet. Tukivarsien pisteet on laskettu aikaisemmin ja sen perusteella voitiin mallintaa pyöränaukot oikeille paikoilleen.

Ennen työn aloitusta tutkittiin, kuinka auton aikaisempi 3D-malli oli tehty. Huomattiin, että suurimmat ongelmat olivat pintamallinnuksen sketcheissä ja rakennepuun sekavuudessa. Sketchit oli tehty 3D-sketcheiksi käyttämällä projected curve -työkalua. Siinä kaksi eri tasolle tehtyä viivaa yhdistetään yhdeksi kolmiulotteiseksi viivaksi. Tämä tapa tehdä 3D-sketchejä toimisi yksinkertaisessa mallissa, mutta kun auton pintamallinnuksessa tarvitaan kymmeniä eri kolmiulotteisia viivoja, on ne helpompi tehdä suoraan kolmiulotteiseksi spline-työkalua käyttämällä. Rakennepuusta oli taas hankala löytää mitään, koska kaikkia työvaiheita ei ollut nimetty ja ne saattoivat sijaita missä vain kohti puuta. Uuteen malliin haluttiin myös lisätä mukaan selkeää add delete -mallinnustekniikka.

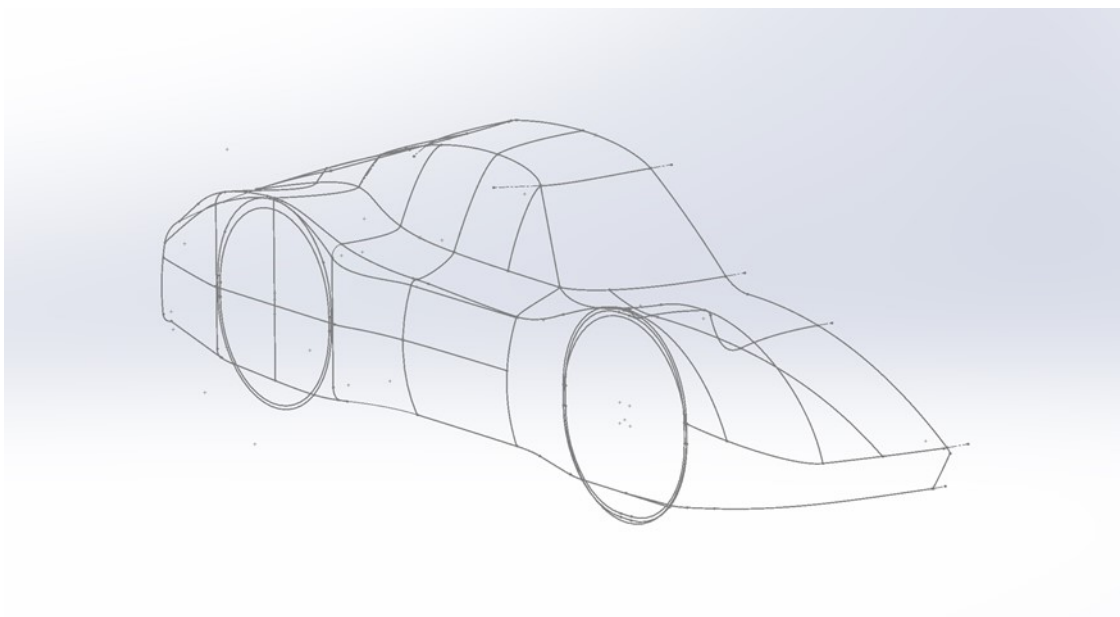
6.1 3D-mallin työvaiheet

Opinnäytetyön alussa auton kokoonpano jäsennettiin niin, että samaan luokkaan kuuluvat osat tuodaan omiin alakokoonpanoihinsa. Pääkokoonpano sisältää korin, voimansiirron ja ulkokuoren alakokoonpanot. Projektin edetessä alakokoonpanoja tullaan lisäämään tarpeen mukaan. Aerodynamiikkapakettien osatiedostot tuotiin ulkokuoren kokoonpanoon.

Ensimmäisenä vaiheena osatiedoston luonnin jälkeen alettiin luomaan tasoja, joita tiedettiin heti tarvitsevan. Näitä oli akselien paikat pituussuunnassa, auton maksimi mitat, pohjan korkeus ja poikittaissuuntaiset välitasot 200 millimetrin välein. Välitasojen tarkoituksena oli käyttää niitä loft-toiminnon sketchien luontiin. Tasot järjesteltiin samansuuntaisiin ja siirrettiin nimettyihin kansioihin selvän rakennepuun ylläpitämiseksi. Myöhemmin kansioihin lisättiin myös muita sekalaisia tarvittavia tasoja.

Aerodynamiikkapaketti mallinnettiin yhteen osatiedostoon, joten tiedettiin, ettei erillistä skeleton-tiedostoa tulla tarvitsemaan. Osatiedostoon kumminkin luotiin sisään vastaavanlainen sketeton-systeemi, jossa kaikki sketchit sijaitsevat erillisinä rakennepuun alussa omassa kansiossaan. Tämän tarkoituksena oli helpottaa sketchien löytämistä muokkauksia tehdessä, ja ne olisi helpompi kopioida useampaan eri työvaiheeseen. CAD-ohjelmat tyypillisesti absorboivat sketchin työvaiheen alle, mikä hidastaa muokkauksien tekemistä pitkissä rakennepuissa.

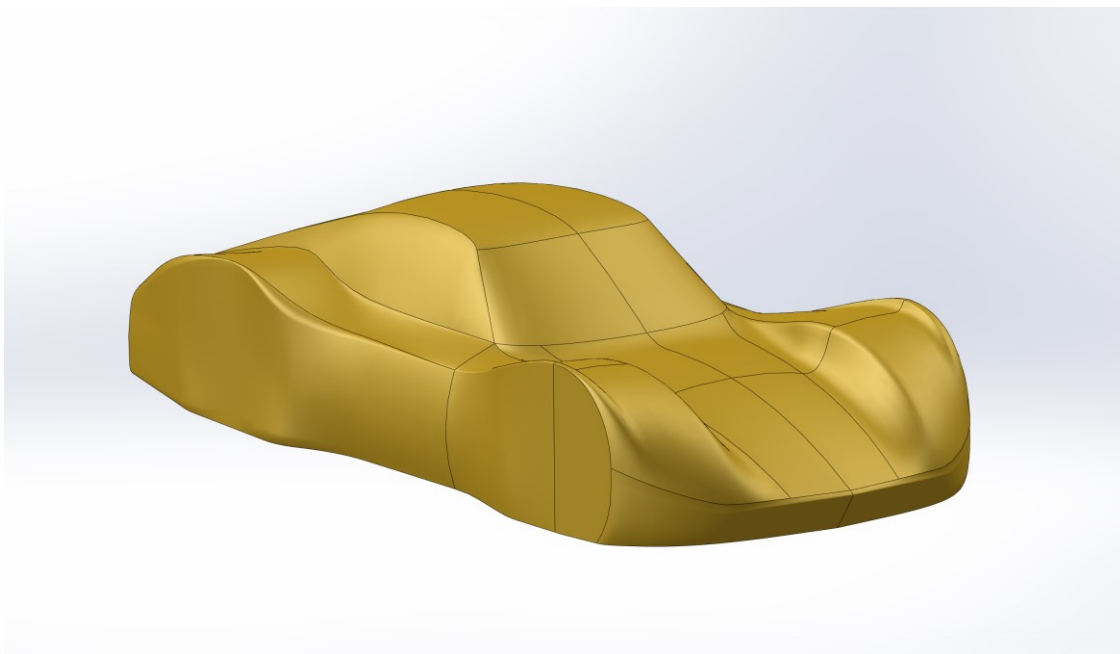
Sketcheissä käytettiin hyväksi 3D- ja 2D-sketch-työkaluja. 3D-sketcheinä luotiin muodot kuten pintamallinnuksessa käytettävät koripaneelit. Apuna käytettiin välitasoja, johon kiinnitettiin lofteissa käytettyjä muotoja. Koripaneelien muodot luotiin erillisiin sketcheihin kumminkin niin, että muodot olivat tarvittaessa tangentissa toisen koripaneelin sketchin kanssa. Pääasiassa muotoilu tapahtui spline viivatyökalun avulla, jolla saatiin tehtyä vapaasti taivutettuja viivoja. Lopulliset koripaneelien sketchit muistuttivat rautalankamalleja valmiista paneeleista, jotka nähdään kuvasta 9. Pääasiassa kaikki sketchit luotiin vain oikealle puolelle autoa, koska myöhemmin valmiit muodot kopioitiin vasemmalle puolelle pelikuvaksi.



Kuva 9. Pintamallinnuksessa käytetyt sketchit.

Seuraavana työvaiheena oli auton korinpaneelien muotoilu käyttämällä pintamallinnusta. Pintamallinnus valittiin työtavaksi, koska se on helpompi keino luoda haastavampia pintoja, kuin solidien mallinnuksessa. Suurin osa autosta muotoiltiin pintamallinnuksen loft työkalua käyttäen. Loftilla on hankala luoda koko auto kerralla, joten pinnat tehtiin useammassa eri osassa, kuitenkin niin, ettei niitä ole liikaa vaikeuttamassa muokkauksia. Tärkeimpänä pintamallinnuksessa oli saada auton katon muoto vastaamaan oikeaa autoa, koska se on ainut alkuperäinen koripaneeli lopullisessa aerodynamiikkapakettissa. Tässä käytettiin apuna autosta aikaisemmin tehtyä 3D-skannausta. Myös konepellin muoto mukaillee alkuperäistä autoa, lukuun ottamatta etusivukytkiä. Ne on nostettu huomattavasti alkuperäistä korkeammalle, koska kori on laskettu niin alas, ettei suunnitellut pyörät muuten mahtuisi pyöränkaariin. Myös takapyörän kaaret on nostettu alkuperäistä ylemmäs samasta syystä.

Kun auton muodot saatiin mallinnettua, kopioitiin ne toiselle puolelle mallia. Tämän jälkeen auton pohja täytettiin, jotta pinnat muodostivat suljetun kappaleen. Seuraavaksi kaikki pinnat nidottiin yhteen nitomistyökalulla. Virtauslaskentaa varten mallin tuli olla kiinteä, koska pienikin rako pintamallissa vaikeuttaisi laskentaverkon tekemistä. Suljetut pinnat saatiin täytettyä kiinteäksi malliksi paksunnustyökalulla. Kuvassa 10 näkyy pintamallinnusvaiheessa tehty muotoilu.

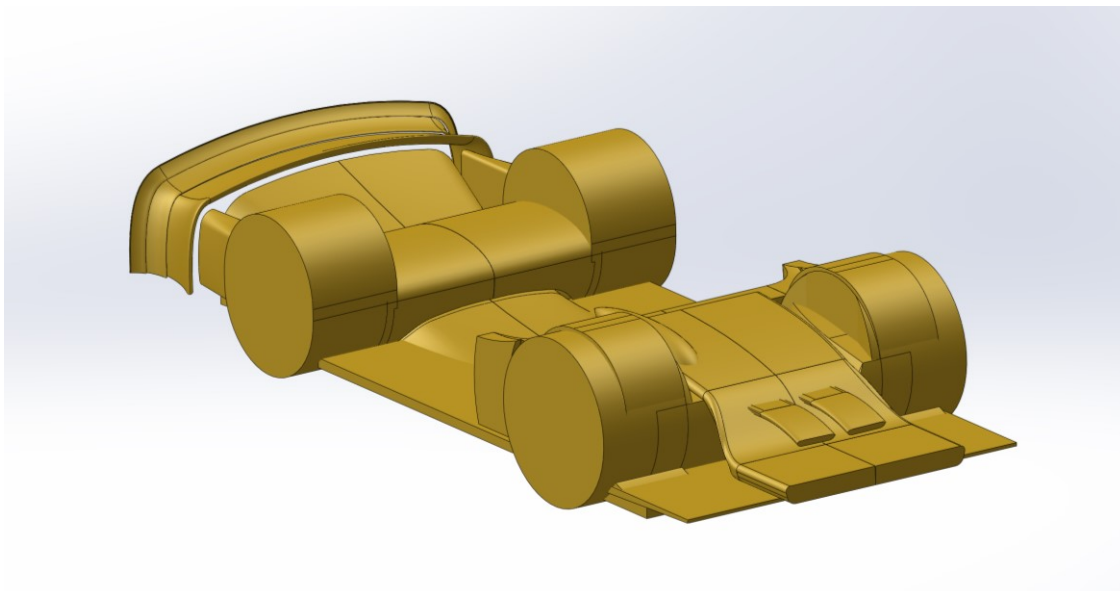


Kuva 10. Pintamallinnettu auto.

Pintamallinnuksen jälkeen siirryttiin tekemään add delete -bodyja. Ensimmäiseksi tehtiin deletet eli osat, jotka haluttiin poistaa lopullisesta auton mallista. Näitä olivat pyöränaukot, diffuusori, moottoritila, etupyörien diffuusorit sekä ilmansisäännot ja poistot. Pyöränaukot mitoitettiin mittaamalla autoon laitettavat vanteet renkaineen ja ottamalla huomioon renkaan pyörimisnopeuden aikaansaama kumin korkeudenmuutos. Tarvittava korkeus saatiin aikaisemmin laskettujen jousitusarvojen perusteella. Diffuusori muotoiltiin mahdollisimman suureksi, jotta se tuottaisi mahdollisimman paljon downforcea. Apuna muotoilussa käytettiin auton 3D-skannausta, sillä diffuusorin tuli mukaila auton olemassa olevaa pohjaa, että kaikki tila tuli hyödynnetyksi.

Tämän jälkeen tehtiin add-bodyt eli osat, jotka lisättiin lopulliseen autoon. Näitä olivat splitteri, pohjalevy, diffuusori ja takasiipi. Splitteri ja pohjalevy voitiin tehdä yhtenä solidina, koska tiedettiin, että delete-bodyt poistavat ylimääräisen materiaalin työvaiheen lopussa. Auton ensimmäisessä versiossa päätettiin kokeilla kolmielementistä takasiipeä. Siipi sijoitettiin matalalle auton perään, sillä haluttiin, että sen matalapainepuoli jatkaa diffuusorin muotoa. Tästä samasta syystä siipi tehtiin sweep-työkalulla kiertämään koko perän muoto. Siiven takimmaisena elementin korkeapainepuolen jättöreunaan tehtiin pieni Gurney flap lisäämään siiven tuottamaa downforcea. Diffuusoriin luotiin paksunnus kopiaimalla delete-vaiheen pinta ja käyttämällä thicken-työkalua.

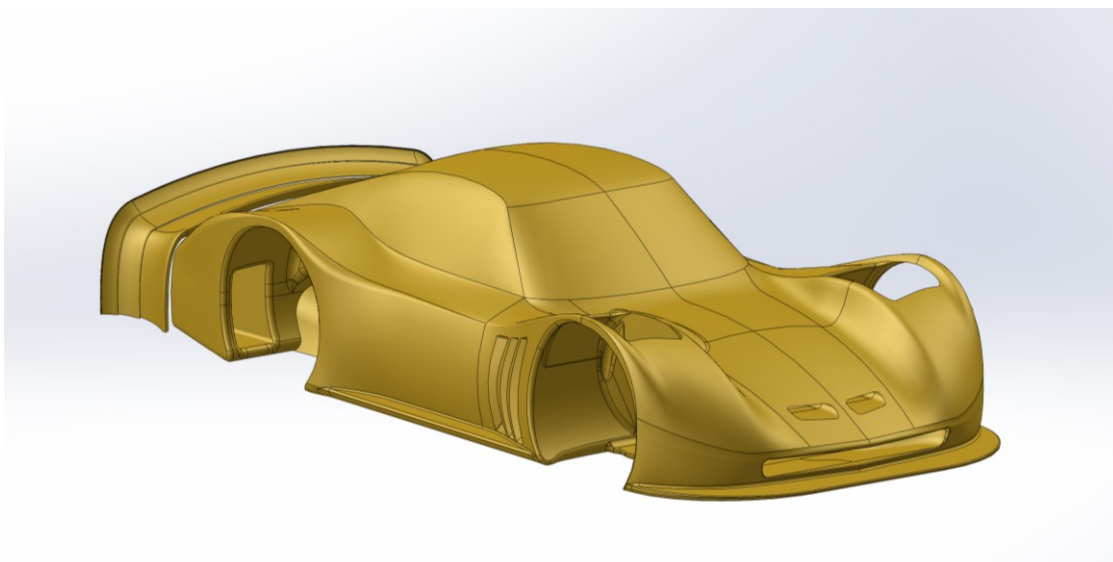
Osa solideista tehtiin yksinkertaistetusti, koska ne eivät olleet niin olennaisia virtaislas-kujen kannalta. Esimerkiksi moottoritila on vain karkea versio auton oikeasta konehuoneesta. Jos olisi mallinnettu täysin autoa vastaava moottoritila, se olisi vienyt huomattavasti enemmän aikaa ja mahdollisesti voinut aiheuttaa enemmän ongelmia isompia mallin muutoksia tehdessä. Kaikki solidit tehtiin erillisille tasoille, koska piirtämällä sketch toisen bodyn pintaan aiheuttaa helposti rikkinäisiä työvaiheita monimutkaisemmissa 3D-mallinnuksissa. Kuvassa 11 nähdään kaikki add delete -osat, jotka on kopioitu myös toiselle puolelle autoa.



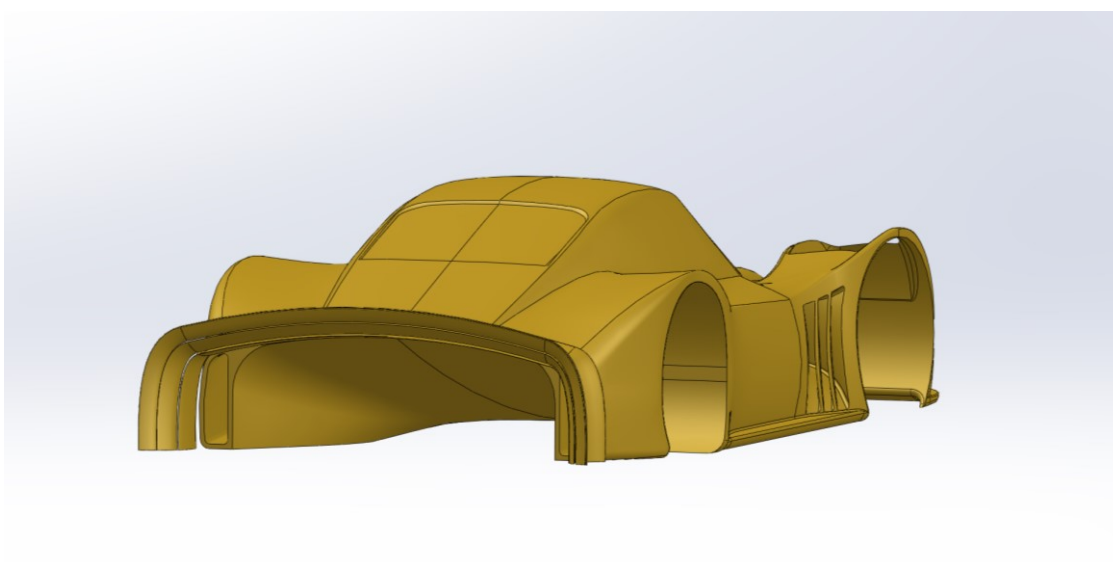
Kuva 11. Add delete -osat mallinnettuna.

Kun kaikki add delete -osat saatiin tehtyä, käytettiin combine-työkalua yhdistämään ja poistamaan halutut alueet. Ensiksi käytettiin työkalun add-vaihtoehtoa, jolla kaikki erilliset bodyt muuttuivat yhdeksi bodyksi. Vaikka takasiipi kuului add-osiin, sitä ei voitu yhdistää muihin, koska se on irrallaan muista tässä virtauslaskentaan tarkoitettussa mallissa. Tämän jälkeen käytettiin combine-työkalun subtract-vaihtoehtoa poistamaan kaikki deletet aikaisemmin tehdystä bodysta.

Viimeinen työvaihe auton mallissa oli filletien eli pyörityksien luominen. Pyöritykset ovat erittäin hyödyllisiä parantamaan ilman virtauksen kulkemista pintoja pitkin, joten niiden tekoon käytettiin kiitettävästi aikaa. Kaikki pyöritykset laitettiin saman kansion alle rakennepuun loppuun. Kuvasta 12 ja 13 nähdään valmis auton 3D-malli, jossa on kaikki pyöritykset.



Kuva 12. Etuviisto ensimmäisestä mallinnetusta aerodynamiikkapaketesta.



Kuva 13. Takaviisto ensimmäisestä mallinnetusta aerodynamiikkapaketesta.

Koko mallinnuksen ajan pidettiin mielessä mallin rakennepuun selkeys. Jokainen työvaihe nimettiin kuvaamaan tarkemmin mitä siinä tapahtui. Kaikki deletet tehtiin peräkkäin ja niiden nimen perään lisättiin tunnus DEL. Myös add-työvaiheet tehtiin peräkkäin ja nimen perään lisättiin tunnus ADD. Tasot, sketchit, pintamallit ja pyöristykset laitettiin omien kansioden alle, jotta rakennepuu olisi selvempi. 3D-mallin kanssa työskentely hi-

dastuu huomattavasti, jos ei kiinnitetä huomiota rakennepuun rakenteeseen. Vaikka auton rakennepuussa on satoja työvaiheita, on sinne helppo ja nopea tehdä muutoksia jatkossa, kun mitään ei tarvitse etsiä kauaa.

6.2 Muutoksien tekeminen virtauslaskennan jälkeen

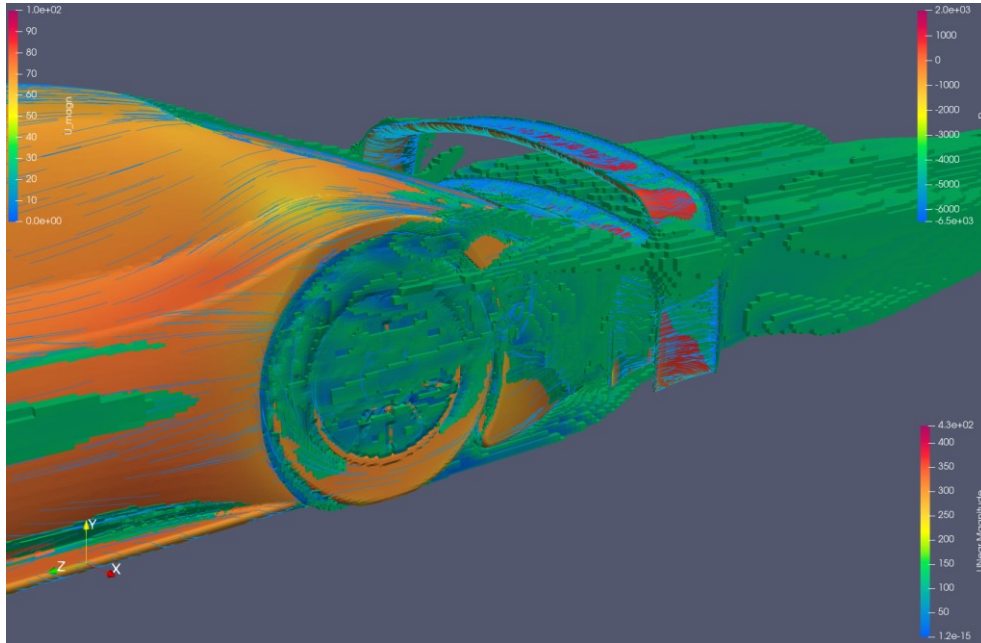
Jokaisen virtauslaskentakerran jälkeen tarkasteltiin mallin tuottamaa ilmanvastusta ja nostetta. Nämä arvot saatiin näkyviin automaattisesti laskennassa käytetyllä koodilla. Tarvittaessa virtauksen ominaisuuksia tarkasteltiin myös jälkikäsitteilyohjelmalla.

Kun mallista haluttiin uusi versio, käytiin kopioimassa aikaisempi malli ja tähän tehtiin halutut muutokset. Aina uusi versio ei osoittautunutkaan paremmaksi virtauslaskennassa. Tällöin palattiin tekemään seuraavat muutokset vanhempaan versioon. Jokaisesta muutoksesta pidettiin selvää listaa, jotta tarvittaessa voitiin kopioida työvaiheita aikaisemmista toimivista ominaisuuksista. Tämän insinööriyön loppuun mennessä aerodynamiikkapakatista oli tehty 44 eri versiota.

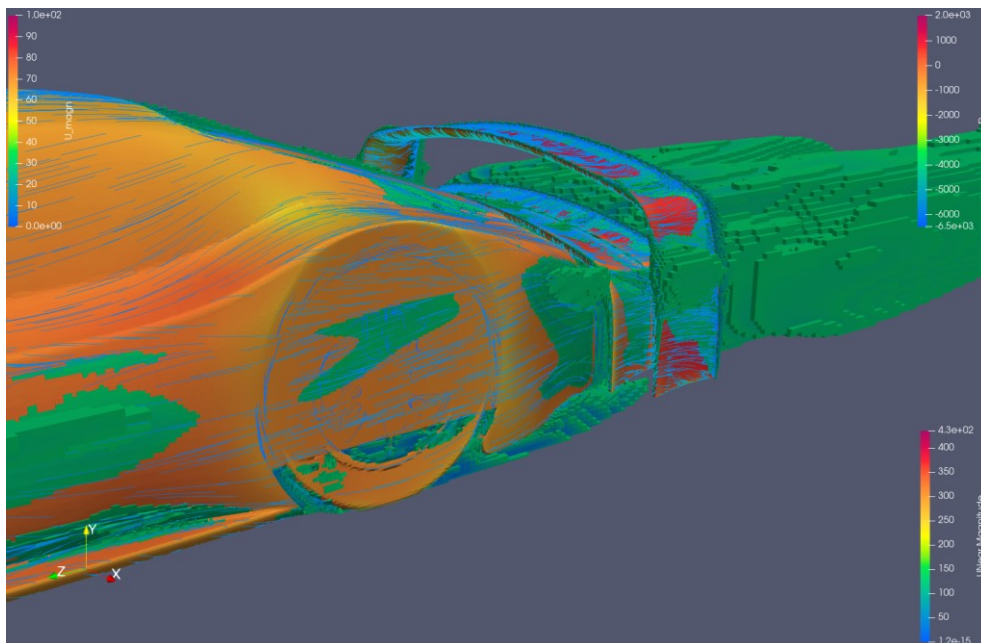
Eniten tutkittiin diffuusorin ja takasiiven toimivuutta, koska näillä tuotetaan suurin downforce autossa. Hyvin nopeasti siirryttiin kaksielementtiseen siipeen, johon kokeiltiin erilaisia kohtauskulmia. Takasiipi siirrettiin alemmaksi ja lähemmäksi autoa, jotta se toimisi paremmin diffuusorin kanssa yhdessä. Sen tieltä otettiin pois materiaalia auton perän yläosasta, koska ilmapirran haluttiin yhä virtaavan auton takakontilta siiven alapuolelle. Siiven päälle tehtiin toinen kaksielementtinen siipi takaikkunan korkeudelle. Tällä saatiin ilmapirta pysymään auton takaosassa ja virtaamaan alemman siiven alapuolelle. Myös pyörien aiheuttamalle turbulenttiselle ilmalle kokeiltiin paljon erilaisia ratkaisuja.

Viimeisimmissä malleissa takapyörienaukot suljettiin levyillä, jotta sieltä kylkien kautta poistuva ilmapirta ei sekoittaisi takasiiven toimintaa. Pyöränaukoissa on poistoaukot takasiiven sisäpuolelle, mutta silti liikaa virtausta poistui kyljistä. Virtauksen muutos muokkauksen jälkeen on esitetty jälkikäsitteilyohjelmasta otetuista kuvissa 14 ja 15. Kuvissa nähdään virtauksen suuruus auton pinnan läheisyydessä ja pintapaineen vaihtelu. Vihreillä kuutioilla on esitetty virtauksen alueet, jossa nopeus on alle 30 m/s. Nähdään, kuinka virtaus muuttuu merkittävästi paremmaksi, kun takapyöränaukot on suljettu. Ta-

kapyöränaukoista poistuva virtaus sekoitti myös diffuusorin toimintaa. Se ratkaistiin tekemällä diffuusorin takaosaan poikittainen levy, joka eristi ilmavirran siirtymisen pyöränaukoista diffuusoriin. Levyllä voitiin myös muuttaa diffuusorin laajenemisen suhdetta auton perää kohti.



Kuva 14. Takapyöränaukosta poistuva virtaus ennen sulkemista.



Kuva 15. Takapyöränaukosta poistuva virtaus sulkemisen jälkeen.

Muutoksien tekeminen ei ollut aina ihan ongelmaton. Suurimmat ongelmat aiheutuivat pintamallinnuksen loft-työkalusta. Muuttaessa loftien sketchejä oli yleistä, ettei loft enää toiminut uusilla muodoilla. Loftit joko eivät toimineet enää ollenkaan, tai pintoihin syntyi ei haluttuja ylimääräisiä kurveja. Näiden korjaamiseen kului suurin osa ajasta muutoksia tehdessä. Lopulta mitä enemmän eri malleja luotiin, sitä parempia ratkaisuja alkoi pintamallien tekoon löytyä. Järkevin tapa korjata loft-pintamalli oli jakaa se useampaan eri osaan. Loftien väliin tuli tällöin lisätä tangenttiehtoja, jotta ne jatkoivat toistensa pinnanmuotoja.

Ennen 3D-mallin aloitusta tiedettiin, että jokainen suurempi muutos tarkoittaa myös muutoksia pyöristykseen. Monet pyöristykset menivät helposti rikki, jos ne olivat lofteilla tehtyjen muotojen kulmissa. Näiden korjaamisesta syntyi kumminkin rutiini, koska tähän ongelmaan ei ollut mitään järkevää ratkaisua.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli 3D-mallintaa Elmer Racingille muokkauksia kestävä aerodynamiikkapaketti virtauslaskentaa varten. Mallia piti pystyä muokkaamaan tehokkaasti, jotta aerodynamiikkapaketin virtauslaskentaa saataisiin iteroitua mahdollisimman paljon.

Tavoitteessa onnistuttiin hyvin, vaikka toisinaan jotkut mallin työvaiheet hajosivat ennalta-arvaamattomasti. Välillä rikkinäisten työvaiheiden korjaus vei turhan paljon aikaa, mutta versioiden edetessä parani myös 3D-mallin kestävyys. Samalla korjausten tekeminen opetti itseäni ennaltaehkäisemään samanlaisia ongelmien lähtökohtia. Loppujen lopuksi malli toimi hyvin muutoksia tehdessä. 3D-mallin uudelleen luominen herätti ER8-projektin kehitystyön hetkellisestä horroksesta, koska se helpotti virtauslaskennan jälkeisten muutosten eteenpäin viemistä. Opinnäytetyötä kirjoittaessa huomattiin, kuinka hankalaa oli löytää suomenkielisiä käännöksiä mallinnusohjelmien termeille, sillä kaikki CAD-mallinnusohjelmat ovat englanninkielisiä. Tästä syystä jouduttiin käyttämään paljon alkuperäisiä englanninkielisiä termejä.

Työ oli samalla itselleni hyvin opettavainen, koska jouduin käyttämään sellaisia mallinnustekniikoita, joita en ollut vielä tarvinnut aikaisemmissa töissäni. Tällainen oli esimerkiksi laaja-alaisempi pintamallinnus. Opinnäytetyön teoriaosuuden tietojenhankinnasta saatiin myös hyödyllistä osaamista tulevaisuutta ajatellen. Ennen tätä työtä aerodynamiikan ymmärrykseni oli huomattavasti vähäisempää.

Aerodynamiikkapaketin kehitystyö jatkuu tämän opinnäytetyön ulkopuolella, kunnes päästään lopulliseen haluttuun tavoitteeseen. Samaan aikaan autoa rakennetaan eteenpäin muilta osin, jotta aerodynamiikkapaketti voidaan lopulta valmistaa ja kiinnittää auton koriin.

Lähteet

- 1 Elmer Racing - Race Engine Specialists. 2020. Verkkoaineisto. Elmer Racing. <<https://www.elmerracing.com/>>. 17.11.2020. Luettu 18.1.2021.
- 2 What is Drag? Verkkoaineisto. Nasa. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/drag1.html>>. Luettu 5.4.2021.
- 3 What is lift? Verkkoaineisto. Nasa. <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/lift1.html>>. Luettu 5.4.2021.
- 4 Downforce. Verkkoaineisto. Technical F1 Dictionary. <<http://www.formula1-dictionary.net/downforce.html>>. Luettu 5.4.2021.
- 5 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita.
- 6 Bernoulli's principle. 2018. Verkkoaineisto. HVAC School. <<https://hvacschool.com/bernoullis-principal/>>. Luettu 13.4.2021.
- 7 The Coanda effect: History and implications. 2019. Verkkoaineisto. Nex Flow Air Products Corps. <<https://www.nexflow.com/blog/coanda-effect-history-implications/>>. Luettu 4.5.2021.
- 8 Car Aerodynamics Basics and How-To Design Tips. Verkkoaineisto. Build Your Own Race Car. <<https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/4/>>. Luettu 4.5.2021.
- 9 World Premiere in Geneva: Audi RS5 DTM. 2013. Verkkajulkaisu. EuroCar news. <<http://www.eurocarnews.com/0/0/2698/0/world-premiere-in-geneva-audi-rs5-dtm.html>>. Luettu 7.5.2021.
- 10 Noble, Jonathan. 2019. FIA closes off Gurney flap trick previously available to F1 teams. Verkkoaineisto. Autosport. <<https://www.autosport.com/f1/news/fia-closes-off-gurney-flap-trick-previously-available-to-f1-teams-5281547/5281547/>>. Luettu 7.5.2021.
- 11 Computational Investigations on the Effects of Gurney Flap on Airfoil Aerodynamics. 2014. Verkkajulkaisu. <<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2015/402358/>>. Luettu 7.5.2021.
- 12 Ehirim, O.H. Knowles & K. Saddington, A.J. 2018. A Review of Ground-Effect Diffuser Aerodynamics. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/326525637_A_Review_of_Ground-Effect_Diffuser_Aerodynamics>. Luettu 7.5.2021.

- 13 Splitter and air dam. Verkkojulkaisu. Technical F1 Dictionary. <<http://www.formula1-dictionary.net/splitter.html>>. Luettu 10.5.2021.
- 14 Top-down, bottom-up, middle-out design. 2021. Verkkoaineisto. Autodesk. <<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-Help/files/GUID-63FA128E-63E2-4176-8653-327BD80D8A43-htm.html>>. Luettu 20.4.2021.
- 15 Juustovaara, Alexander. 2015. Research of modular assembly methods in NX 8.0. Insinööriyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 16 Davies, Jack. 3D modeling CAD software. Verkkoaineisto. 3D HUBS. <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-modeling-cad-software/>>. Luettu 30.4.2021.
- 17 Surface Modeling. Verkkoaineisto. 3DS Spatial. <<https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-surface-modeling>>. Luettu 30.4.2021.
- 18 Skeletal Modeling. 2021. Verkkoaineisto. Autodesk. <<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-Help/files/GUID-D96F0063-3813-4EED-98FA-C34D3946265C-htm.html>>. Luettu 27.4.2021.
- 19 Martin Dave. 2020. Multibody Design for Beginners. Verkkoaineisto. ptc. <<https://www.ptc.com/en/blogs/cad/multibody-design-beginners>>. Luettu 11.5.2021.
- 20 Elmgren, Oskar. Teknologiajohtaja. Elmer Technology Development Oy. Kirkkonummi. 21.4.2020.
- 21 Tietoja SOLIDWORKSISTA. Verkkojulkaisu. Solidworks. <https://www.solidworks.fi/sw/6453_SVF_HTML.htm>. Luettu 10.4.2021
- 22 What is CFD? Verkkojulkaisu. Simscale. <<https://www.simscale.com/docs/sim-wiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>>. Luettu 10.5.2021.
- 23 Understanding WTAC: Racing format. Verkkoaineisto. World Time Attack Challenge. <<https://worldtimeattack.com/index.php/understanding-wtac-racing-format/>>. Luettu 3.2.2021.