



Arttu Mursu

Formula Student -kilpa-auton aktiivinen takasiipi (DRS)

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

28.3.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Arttu Mursu
Otsikko: Formula Student -kilpa-auton aktiivinen takasiipi (DRS)
Sivumäärä: 38 sivua + 5 liitettä
Aika: 28.3.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja: Tehtävänimike Pasi Oikarinen

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin Metropolia Motorsport Formula Student -tiimille automaattinen DRS-järjestelmä eli aktiivinen ilmanvastusta vähentävä takasiipi, joka on tarkoitettu nostamaan huippunopeutta radan suorilla osuuksilla. DRS-järjestelmä suunniteltiin käyttäen uutta takasiipeä ja erilaisia siipiprofiileita. Työssä tutkitaan formula-auton aerodynaamisten voimien muutoksia CFD-simulaatioiden avulla sekä kuvataan mekaanisten ja elektroniikan komponenttien mitoittamista, suunnittelua ja ohjauslogiikan toteutusta. Lisäksi työssä arvioidaan DRS-järjestelmän kannattavuutta, toteutusta ja erilaisia toteutustapoja.

Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia kattava suunnitelma järjestelmän toteuttamiseksi ja tarjota vaihtoehtoinen ratkaisu jo olemassa olevaan DRS-järjestelmän suunnitelmaan. Toinen suunnitelma oli tehty nykyiselle nelielementtiselle takasiivelle. Tässä työssä esitetty kaksielementtinen takasiipi perustuu yksinkertaisempaan mekanismiin suunnitellussa DRS-järjestelmässä.

Työ alkoi CFD-simulaatioilla, joissa havaittiin vaikuttavat ilmanvastus- ja negatiiviset nostevoimat. Kun takasiipi oli avoimessa asennossa, ilmanvastuksen määrä väheni 25 % ja negatiivinen nostevoima 19 %. CFD-simulaation voimia hyödynnettiin NX-ohjelmiston dynaamisessa simulaatiossa, josta saadaan tuloksena DRS-järjestelmän maksimivääntömomentti, 12,3 Nm. Työssä DRS-järjestelmän hyötyä simuloitiin Optimum Lap -ohjelmalla 75 metrin kiihdytysosuudella. Takasiiven ollessa auki asennossa kiihdytysaika oli 0,01 sekuntia nopeampi kuin takasiiven ollessa kiinni. Mekanismin liikkuvuus todettiin toimivaksi laskemalla vapausasteiden määrä ja simuloimalla liikettä Linkage-ohjelmalla. DRS-järjestelmän käyttövoimaksi valittiin harjaton DC-moottori.

Opinnäytetyö toi esiin kehityskohteita. DRS-järjestelmän suunnittelua voisi laajentaa ratasimulaation, mekaanisten komponenttien ja elektroniikan osalta. Ratatarkasteluihin parempi kierrosaikaohjelma olisi hyödyllinen. Mekaanisten komponenttien mitoitukset olisivat voineet olla tarkempaa lujuuslaskelmien avulla. Elektroniikkajärjestelmän suunnitteluosuus kaipaisi kattavuutta. Lisäksi ohjelmakoodin ja väyläviestinnän toteutus jäivät puuttumaan.

Avainsanat: DRS-järjestelmä, CFD, simulaatio, kierrosaika, aerodynaamikka, Formula Student, harjaton DC-moottori

Abstract

Author: Arttu Mursu
Title: Formula Student Racecar Active Rearwing (DRS)
Number of Pages: 38 pages + 5 appendices
Date: 28 March 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive engineering
Professional Major: Automotive design
Supervisor: Pasi Oikarinen, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to design an automatic DRS (Drag Reduction System) for the Metropolia Motorsport Formula Student team. This system, an active rear wing that reduces air resistance, is intended to increase top speed on the straight sections of a track. The DRS system is planned to be developed using a new rear wing and various wing profiles. The work involves investigating changes in the aerodynamic forces of a Formula car through CFD simulations, as well as detailing the sizing, design, and implementation of mechanical and electronic components and control logic. Additionally, the thesis evaluates the feasibility, implementation, and various methods of executing the DRS system.

The objective of this thesis is to develop a comprehensive plan for implementing a system and to offer an alternative solution to an existing plan for a DRS. The existing plan was designed for the current four-element rear wing. In this work, a simpler mechanism-based two-element rear wing is presented for the DRS system.

The workflow began with CFD simulations, which identified significant drag and negative lift forces. With the rear wing in the open position, drag reduced by 25 % and negative lift by 19 %. The forces from the CFD simulation were utilized in a dynamic simulation using NX software, resulting in a maximum torque requirement for the DRS system of 12,3 Nm. The benefit of the DRS system is simulated using the Optimum Lap program on a 75-meter acceleration straight. The acceleration time with the wing open was 0,01 seconds faster than with the wing closed. The mechanism's mobility was confirmed to be functional by calculating the number of degrees of freedom and simulating the motion using the Linkage program. A brushless DC motor is selected as the power source for the DRS system.

The thesis highlighted areas for improvement. The design of the DRS system could be expanded in terms of track simulation, mechanical components, and electronics. A better lap time program would be beneficial for track analyses. The sizing of mechanical components could have been more precise with strength calculations. A more comprehensive design of the electronic system is needed. Additionally, the implementation of the programming code and CAN communication were omitted.

Keywords: DRS-system, CFD, simulation, lapttime, aerodynamics, Formula Student, BLDC-engine

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Formula Student	1
2.1	Historia	2
2.2	Metropolia Motorsport	2
3	Aerodynamiikan teoria ja siivet	3
3.1	Aerodynamiikka	3
3.1.1	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	3
3.1.2	Bernoullin laki	5
3.1.3	Rajakerros	7
3.1.4	Negatiivinen nostevoima	7
3.1.5	Ilmanvastus	9
3.1.6	Siivet	10
4	Simulaatiot	11
4.1	CFD-simulaatiot	11
4.1.1	Ansys Discovery	11
4.1.2	Ansys SpaceClaim	14
4.1.3	Ansys Fluent	16
4.1.4	Tulokset	18
4.2	Ratasimulaatiot	20
4.2.1	Formulan tiedot	20
4.2.2	Kiihdytysajoaikasimulaatio	21
4.2.3	Kierrosajoaikasimulaatio	21
4.2.4	Tulokset	22
4.3	Mekaaninen simulaatio	24
4.3.1	3D-malli takasiivestä	24
4.3.2	Tulokset	26
5	Mekaaninen suunnittelu	27
5.1	Moottoripaketti	28

5.1.1	Moottorityyppi	28
5.1.2	Moottoripaketin valinta	29
5.2	Nivelmekanismi	32
5.3	Laakerointi	34
6	Elektroniikan suunnittelu	34
7	Ohjelmoinnin suunnittelu	35
8	Yhteenveto	37
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1: CFD-simulaatioiden laskentatulokset	
	Liite 2: Moottoripaketin tietosivut	
	Liite 3: Moottorin tietosivut	
	Liite 4: Vaihdelaatikon tietosivut	
	Liite 5: Liikeohjaimen tietosivut	

Lyhenteet

DRS: Drag Reduction System. Ilmanvastusta vähentävä järjestelmä.

CFD: Computational Fluid Dynamics. Numeerinen virtausdynamiikka.

BLDC: Brushless DC electric motor. Harjaton tasavirtasähkömoottori.

1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena DRS-järjestelmän (Drag Reduction System, suomeksi vastuksenvähennysjärjestelmä) suunnittelu Formula Student -kilpa-autoon. DRS-järjestelmä on ilmanvastusta vähentävä järjestelmä, joka aktivoituu radan suorilla osuuksilla ja kasvattaa auton huippunopeutta.

Aluksi esitellään Formula Student -kilpailu ja Metropolia Motorsport -tiimi, jotta saadaan käsitys siitä, millaiseen formula-autoon järjestelmää ollaan suunnittelemassa. Opinnäytetyössä käsitellään tärkeimpiä seikkoja aerodynamiikan teorian osalta, jotta voidaan ymmärtää ilman vaikutus formula-auton siipiin. Työn simulaatio-osuudessa kuvataan suoritettuja aerodynaamisia simulaatioita, joiden avulla on selvitetty optimaaliset siipien asennot ja niiden aiheuttamat voimat. Työssä tutkitaan DRS-järjestelmän hyötyä formula-autolle radalla ajettavien simulaatioiden avulla. Koska kyseessä on liikkuva mekanismi, suunnitelmassa käsitellään moottorin valintaa, vipumekanismia ja laakerointia. Järjestelmä on suunniteltu automaattiseksi, joten sen elektronisen ohjausjärjestelmän tulee tunnistaa formula-auton ajo-olosuhteet radalla. Lopuksi tarkastellaan kokonaisuutta ja pohditaan, miten eri asiat voitaisiin toteuttaa toisin tai paremmin.

2 Formula Student

Formula Student on kansainvälinen suunnittelukilpailu korkeakouluopiskelijoille, jotka ovat kiinnostuneita moottoriurheilusta. Siinä opiskelijatiimit vuosittain suunnittelevat, rakentavat ja kilpailevat formulatyypisellä kilpa-autolla. Tiimit valmistautuvat kilpailuihin 8–12 kuukauden ajan kehittäen sähkö- tai polttomoottori-käyttöisiä kilpa-autoja kilpailusääntöjen mukaiseksi. Kilpailuihin osallistuville tiimeille järjestetään valmistautumisaikana jokaiseen kilpailuun omat pääsykokeet, joten kaikki tiimit eivät pääse kisoihin. Kilpailuun osallistuvia kilpa-autoja arvioidaan sekä staattisissa että dynaamisissa osioissa, joihin sisältyvät tekniset suunnitelmat, tarkastukset ja testit sekä kustannusarvioinnit ja esitykset. Jokainen osio on pisteytetty, ja eniten pisteitä kerännyt tiimi julistetaan voittajaksi. (1.)

2.1 Historia

Formula Student -kilpailun juuret ulottuvat vuoteen 1981, jolloin Yhdysvaltain autoinsinöörien yhdistys (SAE) aloitti ohjelman nimeltä Formula SAE. Tästä eteenpäin kilpailut ovat laajentuneet kansainvälisesti ja niiden määrä on kasvanut. Yhä useammat korkeakoulut osallistuvat kilpailuihin, sääntöjä on uudistettu, ja autoteollisuuden eri sponsoreita on tullut mukaan. (2.)

2.2 Metropolia Motorsport

Suomalainen Formula Student -tiimi perustettiin vuonna 2000 Metropolia Ammattikorkeakoulussa. Tiimi toimii Metropolia Motorsport -nimellä, ja vuosien aikana on valmistunut 17 kilpa-autoprototyyppiä. Tiimissä työskentelee tällä hetkellä noin 40 opiskelijaa. Metropolia Motorsport toimi polttomoottoreiden parissa aina vuoteen 2011 asti, jolloin tiimi päätti siirtyä sähköiseen voimansiirtoon. Ensimmäinen sähköauto valmistui vuonna 2013, ja siitä lähtien Metropolia Motorsport on ollut Suomen ainoa sähköformulatiimi. Kuvassa 1 on esitetty vuoden 2021 sähköformula.



Kuva 1. Metropolia Motorsportin 2021 vuoden ensimmäinen nelivetoinen formulakilpa-auto.

Metropolia Motorsport -tiimin formula-autot kehittyvät joka vuosi. Tiimin vuoden 2022 formulassa siirtyi teräsputkirunkorakenteesta hiilikuituiseen monokokkirunkoon. Tulevaisuudessa tiimillä on suunnitelmia kehittää autonominen formula-auto. (3.)

3 Aerodynamiikan teoria ja siivet

Tämän työn osalta teoriaa käsitellään rajallisesti, keskittyen DRS-järjestelmän keskeisiin näkökohtiin. Seuraavissa luvuissa käsitellään erityisesti vähemmän tunnettua aerodynamiikkaa ja aerodynaamisia komponentteja. Aerodynamiikan perusteet tuodaan esiin siten, että lukijalle syntyy selkeä käsitys ilman käyttäytymisestä formula-auton pinnoilla.

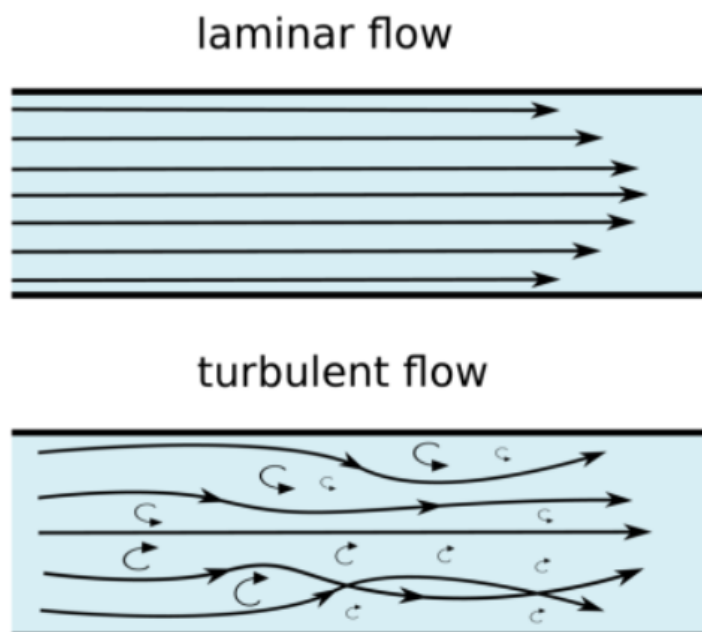
3.1 Aerodynamiikka

Aerodynamiikassa käsitellään keskeisiä voimia, jotka syntyvät liikkuvaan kilpa-autoon ilmavirran suunnan ja nopeuden muuttuessa. Nämä voimat ovat ilmavirransuunnan muuttuessa ilmanvastus (drag), negatiivinen nostevoima (downforce) ja sivuttaisvoima (sideforce). Nämä kolme voimaa vaikuttavat liikkuvaan ajoneuvoon eri suunnista. Sivuttaisvoima on kovasta sivutuulesta johtuva voima, joka voidaan jättää huomioimatta työssä. Kilpa-auton nopeuden kaksinkertaistuessa ilmanvastus ja negatiivinen nostevoima kasvavat nelinkertaiseksi. (4, s. 25–28.) Työn aerodynamiikan teoriaosuudessa käsitellään virtaustyypppejä, Bernoullin lakia, rajakerroksia, negatiivista nostevoimaa, ilmanvastusta ja siipiä, jotta voidaan ymmärtää aktiivisen takasiiven toimintaa.

3.1.1 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Virtauslaatu on tärkeässä osassa aerodynamiikassa, sillä se vaikuttaa suuresti negatiiviseen nosteeseen ja ilmanvastukseen. Ilmavirtaus on laminaarista, kun ilmakerrokset liikkuvat suoraviivaisesti ja eivät sekoitu keskenään. Kun ilmavirran nopeus kasvaa, ilmavirran kerrokset alkavat sekoittua keskenään ja virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Reynoldsin luku kertoo, onko virtaus turbulenttinen vai

laminaarinen. Reynoldsin lukua käytetään formula-autoissa vertailemaan pienikokoisen mallin tuloksia täysikokoiseen malliin. Alla olevassa kuvassa 2 nähdään molemmat virtaustyytit, ja Reynoldsin luku lasketaan kaavan 1 mukaisesti.



Kuva 2. Laminaarinen ja turbulenti virtaus.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

- v on ilmavirran nopeus.
- L on kappaleen pituus tai putken halkaisija.
- μ on ilmavirran viskositeetti.
- ρ on ilmantiheys.

Reynoldsin luku on dimensioton suure, joka kuvaa virtauskohteen vaikuttavien hitausvoimien ja viskositeettivoimien suhdetta. Hitausvoimat johtuvat ilmavirran liikkeestä, ja viskositeettivoimat syntyvät ilmavirran kerrosten välisistä leikkausvoimista. Esimerkiksi putkivirtauksessa, kun Reynoldsin luku on alle 2300, virtaus on laminaarista, mutta kun luku ylittää 3000, virtaus on turbulenti. Kilpa-autossa turbulenti virtaukset aiheuttavat merkittävän määrän ilmanvastusta

verrattuna laminaarisiin virtauksiin, joten niiden syntymistä pyritään minimoimaan. (4, s. 28–32.)

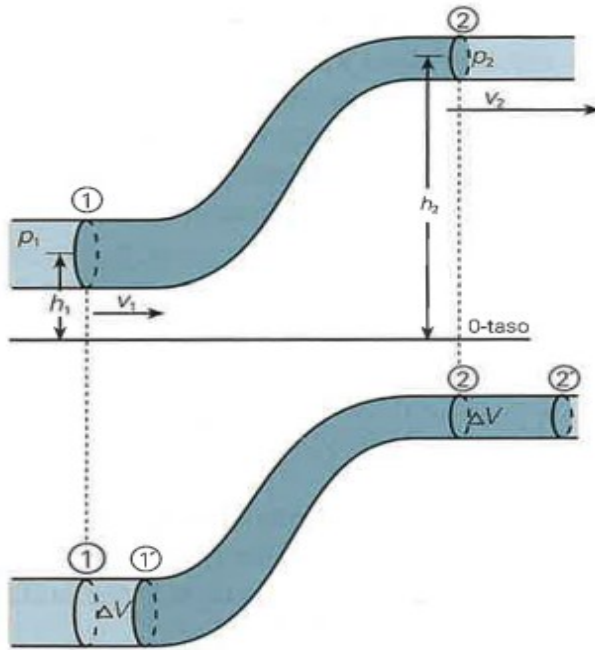
3.1.2 Bernoullin laki

Ennen kuin voimme käsitellä Bernoullin lakia, on tehtävä oletus ilman kokoonpuristumattomuudesta. Luonnossa kaikki aineet kokoonpuristuvat eli niiden tiheys pienenee tietyn paineen vaikutuksesta. Aerodynamiikassa mitä nopeammin ajoneuvo liikkuu, osa sen energiasta kuluu ilman kokoonpuristumiseen. Tutkijat ovat luoneet suhdeluvun, jota kutsutaan Machin luvuksi (kaava 2), joka on kilpa-auton nopeuden suhde äänen nopeuteen. Kaikki Mach-luvut, jotka ovat alle yhden, voidaan määrittää kokoonpuristumattomiksi, koska ilman tiheys pysyy lähes vakiona, kuten kilpa-autoissa. (4, s. 296.) Mach-luku lasketaan seuraavasti:

$$M = \frac{V}{a} \quad (2)$$

- M on Mach-luku.
- V on kilpa-auton nopeus.
- a on äänen nopeus.

Bernoullin laki on hyvä työkalu havainnollistamaan paineen ja nopeuden suhdetta keskenään. Bernoullin laki koostuu staattisesta paineesta, dynaamisesta paineesta ja hydrostaattisesta paineesta, joiden summa on vakio. Bernoullin laki pätee vain kitkattomassa, laminaarisessa ja kokoonpuristumattomassa virtauksessa. Bernoullin laki voidaan helposti selittää suljetun putken avulla kuten kuvassa 3.



Kuva 3. Virtausnopeuden ja paineen erot pisteissä 1 ja 2.

Kuvan ylemmän putken tiedot voidaan avata kaavan muodossa. Putken virtaus-tilanteet on eroteltu yhtäsuuruusmerkillä kaavassa. Kaava 3 esittää Bernoullin yhtälön putken tilanteessa.

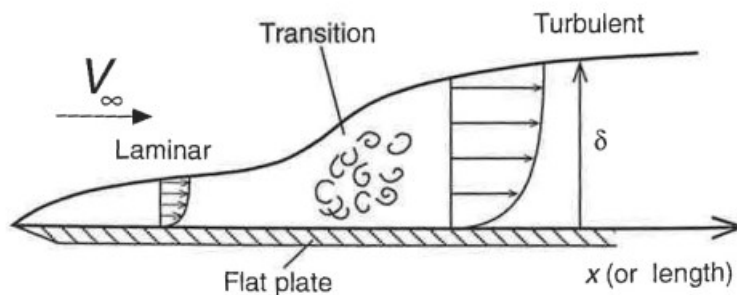
$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (3)$$

- p_1 on paine putkessa kohdassa 1.
- p_2 on paine putkessa kohdassa 2.
- ρ on aineen tiheys.
- v_1 on aineen nopeus putkessa kohdassa 1.
- v_2 on aineen nopeus putkessa kohdassa 2.
- g on maan vetovoiman kiihtyvyyys.
- h_1 on putken korkeus kohdassa 1.
- h_2 on putken korkeus kohdassa 2.

Kuvasta voi havaita, että virtauksen tilavuusvirta pysyy samana putken eri kohdissa. Tämä tarkoittaa sitä, että nopeuden on kasvettava ja paineen on vähennettävä putken kapeassa kohdassa, kun taas leveässä kohdassa päinvastoin.

3.1.3 Rajakerros

Kilpa-auton aerodynamiikassa rajakerros muodostuu siipien ja korin pintoihin. Ilman nopeus vaihtelee rajakerroksessa kerroksittain, ja aivan kappaleen pinnan läheisyydessä suhteellinen nopeus on sama kuin kappaleen nopeus. Kappaleen pinnasta etäämmälle rajakerrosta pitkin mentäessä ilman nopeus kasvaa, kunnes se saavuttaa vapaan ilmanvirran nopeuden. Vapaan virtauksen törmätessä pintaan alkaa rajakerros noin 0,01–2 mm:n paksuisena ja laminaarisena virtauksena. Kun virtaus kulkee pintaa pitkin, alkaa rajakerros paksuuntua senttimetreiksi ja virtaus muuttuu turbulenttiseksi (kuva 4). (4, s. 32–36.)



Kuva 4. Vapaan ilmanvirran käyttäytyminen kappaleen pinnassa.

Kuvasta näkee, miten vapaa virtaus vaikuttaa kappaleeseen ja muodostaa rajakerroksen kappaleen pintaan. Ilmanvirran nopeus muuttuu nopeammaksi kappaleen pinnasta ylöspäin, ja samalla sen virtausluonne muuttuu.

3.1.4 Negatiivinen nostevoima

Kilpa-autoissa aerodynamiikan osalta pyritään saamaan mahdollisimman paljon negatiivista nostevoimaa. Negatiivinen nostevoima, joka syntyy ilmanvirran ansiosta, lisää renkaiden pystykuormaa ilman, että kilpa-auton massa kasvaa.

Negatiivisen nostevoiman aiheuttama lisääntynyt pystykuorma renkaissa parantaa niiden pitovoimaa mutkissa mahdollistaen kovemmat nopeudet mutkaosuuksilla. Pystykuormaa voidaan myös lisätä epäedullisella tavalla lisäämällä ajoneuvon massaa, mutta tällöin kaarreajossa tarvitaan enemmän pitovoimaa. Lisäksi massan lisääminen aiheuttaa sen, että kilpa-auton jarruttaminen ja kiihdyttäminen vaativat enemmän voimaa.

Kilpa-auton siipiin vaikuttaa epätasainen painejakauma, joka pääasiassa aiheuttaa negatiivisen nostevoiman. Siipiin kohdistuva paine on kohtisuorassa siiven pintaa vasten ja jakautuu sen ympärille. Kilpa-autojen siipien yläpinnalla on korkeampi paine kuin alapinnalla, mikä aiheuttaa paine-eron ja siten negatiivisen nostevoiman. Siiven asentokulma vaikuttaa merkittävästi sekä negatiivisen nostevoiman että ilmanvastuksen määrään.

Negatiivinen nostevoima voidaan ilmaista dimensiottomalla kertoimella. Tämä kerroin on riippumaton nopeudesta, ja ainoastaan kilpa-auton otsapinta-ala vaikuttaa kertoimeen. (4, s. 49–58.) Alla oleva kaava 4 esittää, miten nostevoimakertoimen voi laskea.

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (4)$$

- L on negatiivisen nostevoiman määrä.
- ρ on ilman tiheys.
- v on ilman nopeus.
- A on kilpa-auton otsapinta-ala.

3.1.5 Ilmanvastus

Aerodynamiikan osalta ilmanvastus on liikettä vastustavaa voimaa, jota pyritään minimoimaan. Ilmanvastus koostuu kolmesta ilmiöstä, jotka ovat indusoitu vastus, kitkavastus ja painevastus. Indusoitu vastus aiheutuu negatiivisen nosteen vaikutuksesta siipiin, kun siiven päällä oleva korkeapaine vuotaa siiven alle matalapainepuolelle. Tämä vuoto aiheuttaa siipien reunoilla pyörteilyä, joka puolestaan aiheuttavat ilmavastusta.

Kitkavastus aiheutuu ilman viskositeetista ja pinnan sileydestä kilpa-auton siivissä ja pinnoissa. Siivissä ja pinnoissa syntyy pinnan suuntaan leikkausvoimia, jotka aiheuttavat kitkavoimia ilman ja pinnan välillä. Kitkavoimat ovat sitä suurempia, mitä paksumpi on rajakerros. Leikkausvoimat siivenpinnassa aiheuttavat vain ilmanvastusvoimia.

Painevastus johtuu kilpa-auton paine-erosta keulan ja perän välillä. Kilpa-auton keulaan kohdistuu korkeaa ilmanpainetta, kun ilma törmää siihen, kun taas ilma irtoaminen kilpa-auton perästä aiheuttaa pyörteistä matalapaineista virtausta perään. Paine-eron takia syntyy voima, joka suuntautuu ajosuuntaa vastaan.

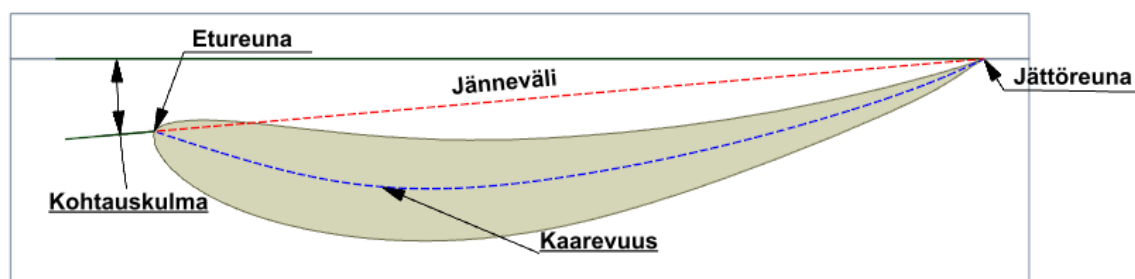
Ilmanvastus voidaan ilmoittaa samalla tavalla kuin nostevoima, dimensiottomalla kertoimella. Tämä kerroin on riippumaton nopeudesta, ja ainoastaan kilpa-auton otsapinta-ala vaikuttaa kertoimeen. (4, s. 49–58.) Ilmanvastuskerroin lasketaan kaavan 5 mukaisesti:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (5)$$

- D on ilmanvastuksen määrä.
- ρ on ilman tiheys.
- v on ilman nopeus.
- A on otsapinta-ala.

3.1.6 Siivet

Siivet ovat yksi tehokkaimmista tavoista lisätä negatiivisen nostevoiman määrää. Siipiprofiileja on useita satoja erilaisia, ja ne on suunniteltu eri käyttötarkoituksiin. Siiven eri kohdista, yhdistelmistä ja suhteista toisiinsa käytetään tiettyjä nimityksiä, jotta tiedetään, mistä puhutaan. Kuvasta 5 selviävät yksittäisen siipiprofiilin kohtien nimet.



Kuva 5. Siiven nimetyt kohdat.

Lisäksi joskus siiven jättöreunan korkeapainepuolelle päähän on laitettu 90° kulmaan pieni seinämä, jota kutsutaan gurney flapiksi. Gurney flap parantaa siiven matalapainepuolen nopean virtauksen pysymistä siiven pinnassa ja samalla lisää negatiivisen nostevoiman määrää sekä vähentää ilmanvastusta.

Usein formula-sarjan autojen siivet koostuvat monista siivistä, joita kutsutaan siipielementeiksi. Siipielementit koostuvat yleensä yhdestä pääsiivestä ja monista flap-siivistä, mutta maailmalta löytyy monenlaisia siipielementtiratkaisuja. Siipielementtien kokonaisuuksien on toimittava hyvin yhdessä, jotta saadaan maksimaalinen hyöty. (4, s. 109–155.)

Tässä työssä tarkastellaan kaksielementtistä takasiipeä, koska DRS-järjestelmästä halutaan mahdollisimman kevyt ja yksinkertainen. Nykyisessä Formula Student -formula-autossa on nelielementtinen takasiipi, jossa on pienellä kaarevuudella olevia siipiprofiileja. Kaksielementtisen takasiiven suunnitteluun tarvitaan kaarevammatt siipiprofiilit, jotta kaksielementtisestä takasiivestä saadaan yhtä toimiva ja tehokas kuin nelielementtisestä. Valitsin suuremmalla

kaarevuudella olevan siipiprofiilin nimeltä E423 pää- ja flap-siivelle. Profiilin muoto näkyy kuvasta 5.

4 Simulaatiot

Tässä työssä tehtiin kolmenlaisia simulaatiota, joiden avulla voitiin mitoittaa DRS-komponentit mahdollisimman sopiviksi kilpa-autolle. Työn suorittamisen kannalta on selvitettävä voimat, jotka kohdistuvat takasiipeen. Takasiipeen kohdistuvat voimat voidaan selvittää tietokoneavusteisen laskennan avulla, joka tunnetaan paremmin nimellä CFD-simulaatiot, eli Computational Fluid Dynamics. Työn kannalta on myös selvitettävä, kuinka hyödyllinen DRS on. Tämän takia tarkasteltiin ja tehtiin ratasimulaatioita Optimum Lab -ohjelmalla. DRS-järjestelmän komponenttien mitoituksen selvittämiseksi suoritetaan dynaamisia simulaatioita NX-ohjelmalla.

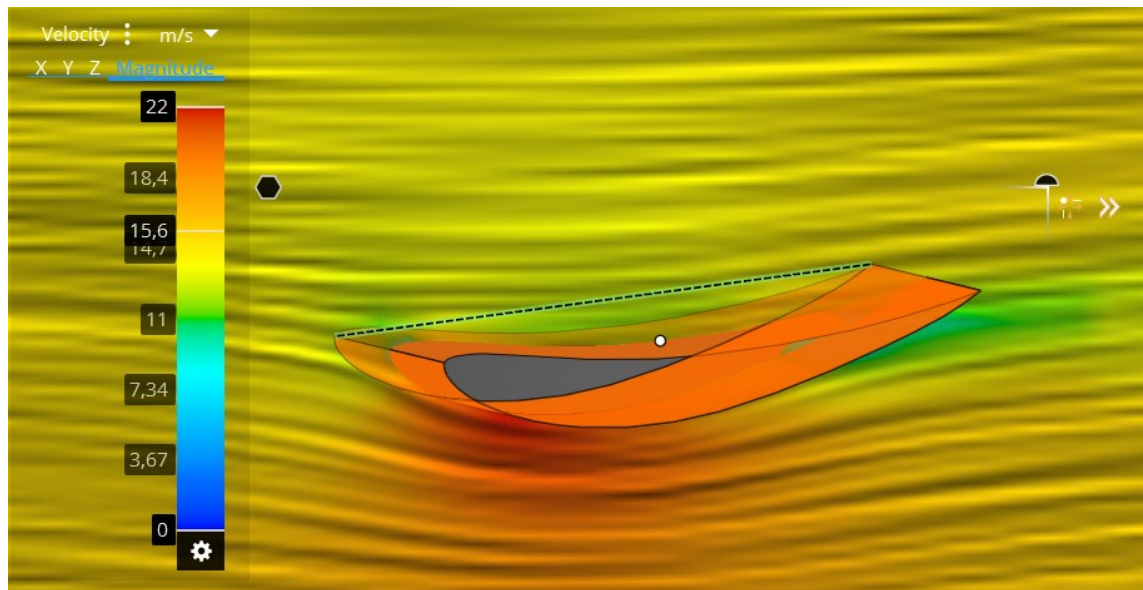
4.1 CFD-simulaatiot

CFD-simulaatiot suoritettiin Ansys Discovery ja Ansys Fluent -ohjelmilla. Ansys SpaceClaim -ohjelmalla suoritettiin simulaation yksinkertaisen mallin 3D-mallinnus. Ansys Discovery -ohjelmalla tehtiin alustavaa työtä parhaiden mahdollisten pääsiiven ja flap-siiven asentokulmien sekä sijaintien löytämiseksi. Ja Ansys Fluent -ohjelmalla tehtiin varsinainen koko kilpa-auton CFD-simulaatiot.

4.1.1 Ansys Discovery

Pääsiiven asentokulmaa säädettiin 1° :n välein alkaen nollasta ja päättyen 19° :seen. Jokaisesta siiven asentokulmasta kirjattiin ylös kaksi voiman suuntaa, jotka vastasivat negatiivista nostevoimaa ja ilmanvastusta. Jokaisesta siiven asentokulman kohdalla laskettiin negatiivisen nostevoiman ja ilmanvastuksen

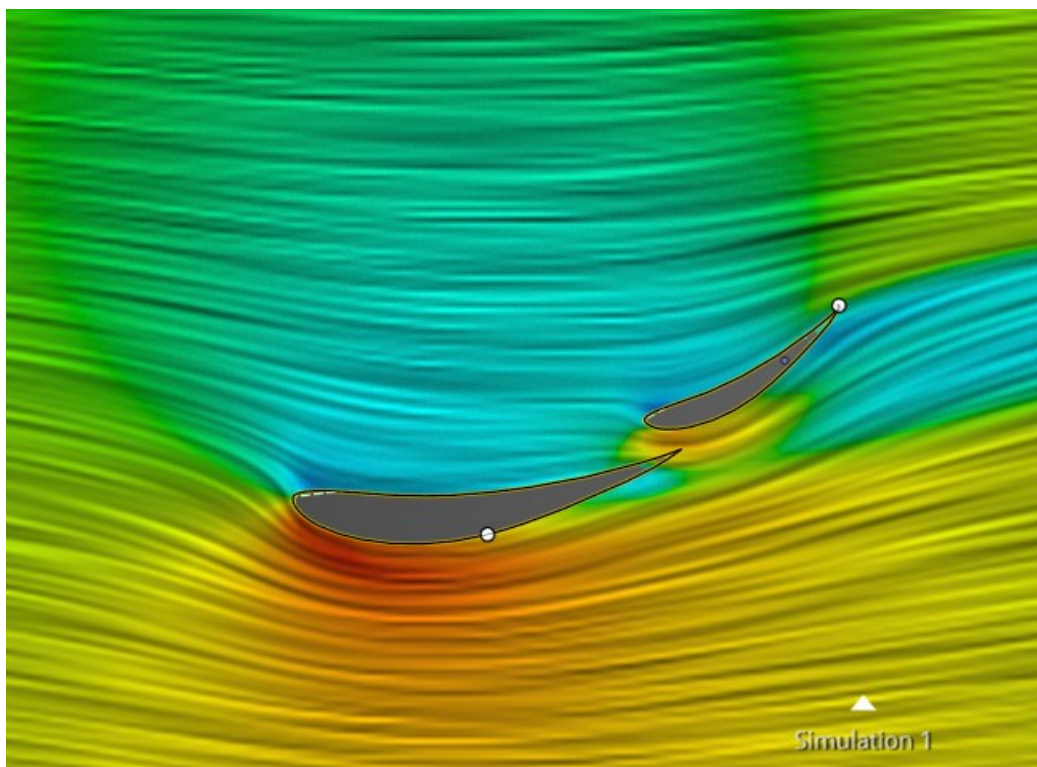
suhde eli L/D-suhde, ja valittiin suurin L/D-arvo. Alla olevasta kuvasta 6 nähdään Ansys Discoveryn simulaatio pääsiiven profilista.



Kuva 6. Ansys Discover -simulaatio pääsiipeen vaikuttavasta ilman nopeudesta.

Suurin L/D-arvo pääsiivelle saavutettiin 7 asteen asentokulmassa, jolloin negatiivisen nostevoiman ja ilmanvastuksen ero oli suurin. Seuraavaksi asetettiin avautuvan flap-siiven asentokulma pääsiiven perään. On tärkeää, että pääsiipi ja flap-siipi tuottavat yhdessä mahdollisimman paljon negatiivista nostevoimaa ja mahdollisimman vähän ilmanvastusta. Flap-siiven asentokulmaa säädettiin 2 asteen välein, alkaen 29 asteesta ja päättyen 41 asteeseen. Flap-siipeä

säädettiin myös formulan pituus- ja korkeussunnassa. Alla olevasta kuvasta 7 voidaan nähdä lopulliset pääsiiven ja flap-siiven asemat suhteessa toisiinsa.

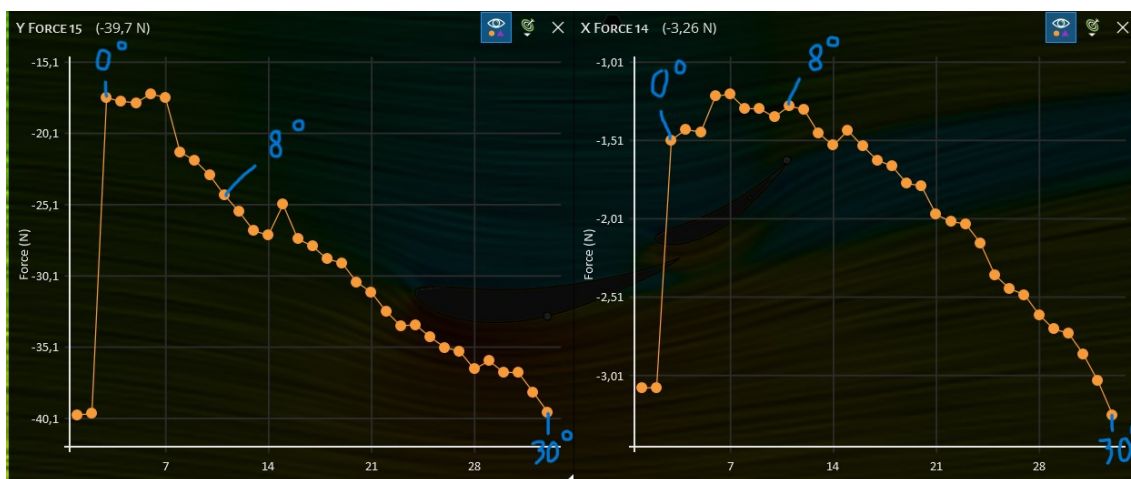


Kuva 7. Siipien lopullinen asento Ansys Discovery -simulaatiossa.

Pääsiiven lopulliseksi asentokulmaksi saatiin 7 astetta. Flap-siiven asentokulmaksi saatiin 30 astetta. Flap-siiven säätäminen formula-auton pituus- ja korkeussunnassa oli vaikeaa huonon laskentaverkon takia, mikä näkyy yllä olevassa kuvassa siipien etureunoissa ja jättöreunoissa. Tämän huonon laskentaverkon vuoksi ilmavirtaus pääsi irtoamaan siiven pinnasta liian aikaisin, joka vaikuttaa tuloksien oikeellisuuteen. Lopulta löydettiin sopiva ylityspituus ja välipituus. Ylityspituudeksi tuli 43 mm ja välipituudeksi 23 mm. Ylityspituus on flap-siiven etureunasta pääsiiven jättöreunaan oleva horisontaalinen etäisyys, ja välipituus on flap-siiven alapinnan ja pääsiiven yläpinnan välinen vertikaalinen etäisyys.

Ansys Discovery -ohjelmalla simuloitiin myös paras mahdollinen kohtauskulma flap-siivelle, kun DRS oli aktiivinen eli siipi oli auki. Flap-siiven kohtauskulmaa

säädettiin 0 asteen kohtauskulmasta lähtien 1 asteen välein, kunnes saavutettiin 30 asteen kohtauskulma. Kohtauskulman löytäminen flapsiivelle oli helppoa, koska flap-siiven sijainti suhteessa pääsiipeen oli tiedossa. Alla olevasta kuvasta 8 voidaan nähdä, miten flap-siiven asentokulman muutos vaikuttaa syntyviin aerodynaamisiin voimiin.



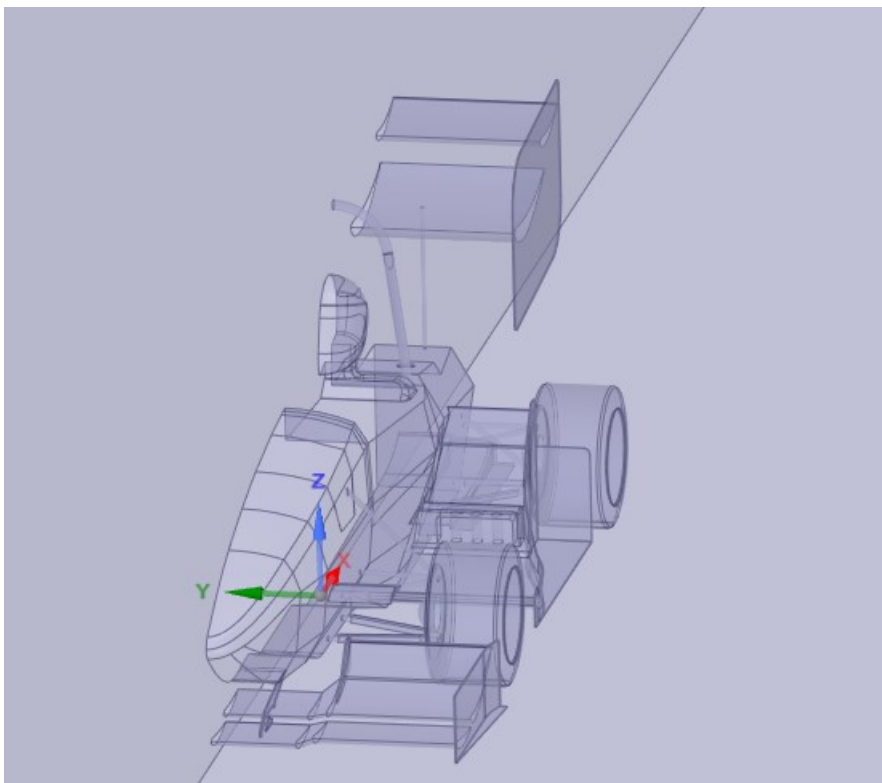
Kuva 8. Ansys Discoveryn voimakuvaajat flap-siiven asentokulman muuttuessa.

Siipien asentoja säädettäessä tarkkailtiin yllä olevassa kuvassa esitettyjen kuvaajien suurinta suhdetta. Y Force -kuvaaja esittää siipielementin negatiivista nostevoimaa ja X Force -kuvaaja ilmanvastuksen voimaa. Kuvaajista voidaan päätellä, että siipielementin kannalta flap-siiven optimaalinen kohtauskulma auki-asennossa olisi 8 astetta, jossa negatiivisen nostevoiman ja ilmanvastusvoiman suhde on suurimmillaan. Tällöin flap-siipi toimii tehokkaasti myös DRS:n ollessa aktiivinen.

4.1.2 Ansys SpaceClaim

Ennen Ansys Fluent -ohjelman koko formula-auton simulaation suorittamista, tehtiin yksinkertainen malli formulasta Ansys SpaceClaim -ohjelmalla (kuva 9).

Tähän malliin on sijoitettu uusi takasiipi, jossa on uusi siipiprofiili. Siivet asetettiin samaan asentoon, joka simuloitiin parhaaksi Ansys Discovery -ohjelmalla.



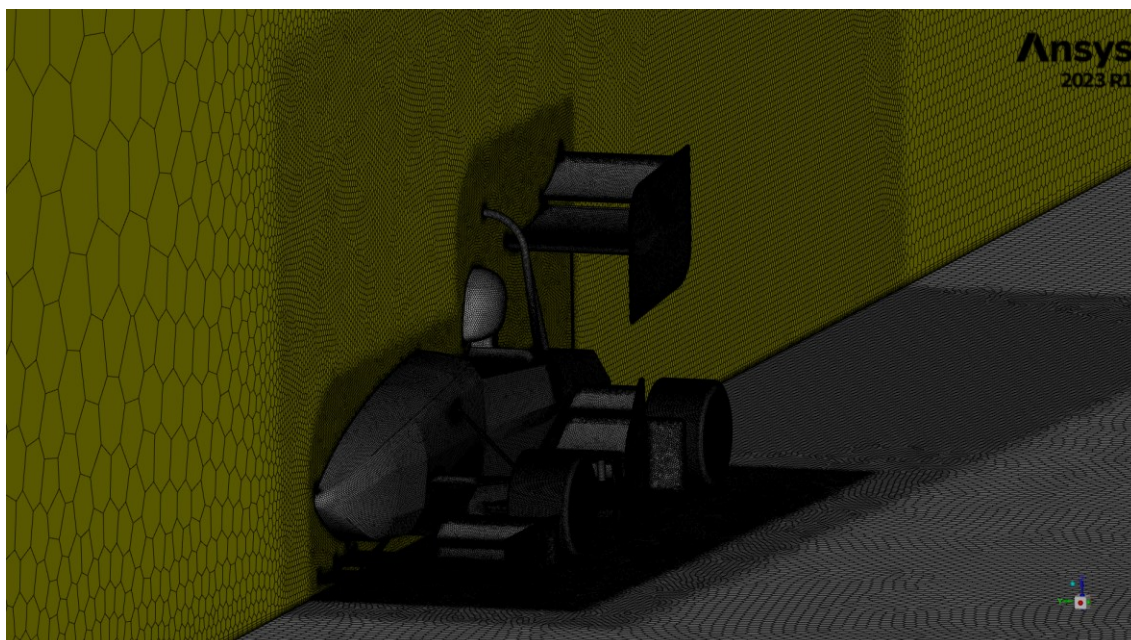
Kuva 9. Ansys SpaceClaim -malli.

Simulaatiossa formula-auton puolikas on sijoitettu suorakulmion muotoiseen tilaan, joka kuvaa tuulitunnelia, missä ilma ja lattia liikkuvat 15 m/s nopeudella suorakulmion päädyistä läpi. Simulaatiossa myös pyörät on asetettu pyörimään ilman nopeutta vastaavaan pyörimisnopeuteen. Näin voidaan sanoa, että simulaatio jäljittelee tuulitunnelikokeita. Lisäksi kilpa-autoon, mukaan lukien peräosa, on luotu viisi erillistä aluetta simulaation laskentatarkkuuden määrittämiseksi. Näihin viiteen eri alueeseen on määritelty omat solukokonsa. Formula-auton aerodynaamiset osat on jaettu ryhmiin, jotka ovat etusiipi, käänteinen siivet, sivusiivet, takasiipi, formulan kori, eturenkaat ja takarenkaat. Aerodynaamisten

osien ryhmittely on tehty siksi, että voidaan laskea eri osiin kohdistuvat voimat erikseen.

4.1.3 Ansys Fluent

Ansys Fluent -ohjelmalla tehtävässä CFD-simulaatiossa Ansys SpaceClaim -mallin ilmatila ja ympäristö jaettiin pieniksi heksagonisoluiksi, joita kutsutaan verkoksi eli meshiksi. Solujen koko ja määrä vaikuttavat simulaation laskenta tarkkuuteen. Pienemmät solut ja tiheämpi verkko mahdollistavat tarkemmat tulokset, mutta vaativat enemmän laskentatehoa. Alla olevasta kuvasta 10 näkyy, miten SpaceClaim-malli on verkotettu Ansys Fluent -ohjelmalla.

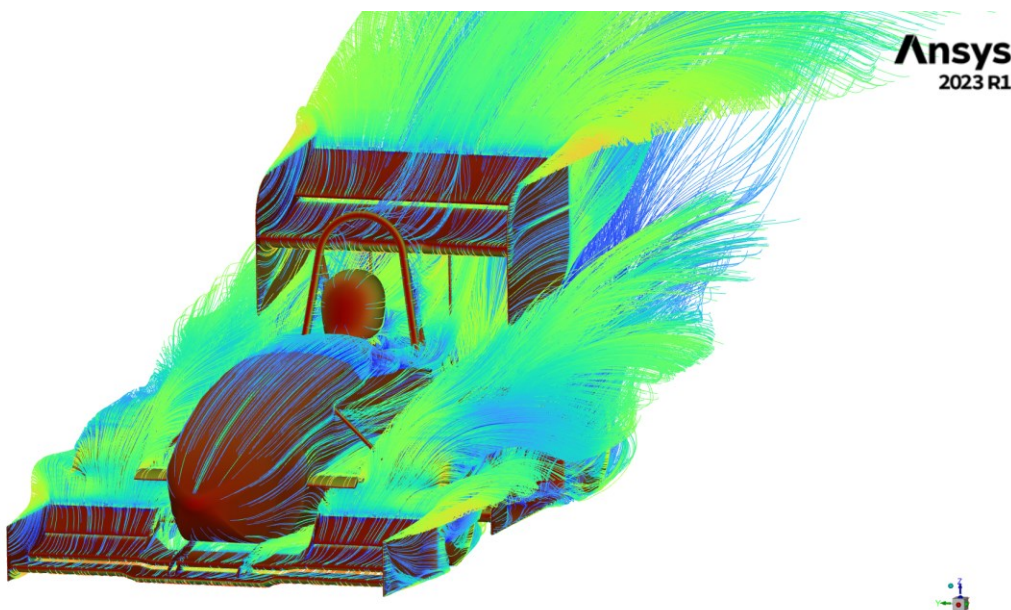


Kuva 10. CFD-simulaatiota varten Ansys Fluentilla tehty laskentaverkko.

Kuvasta voidaan havaita, että formula-auton keulan edessä on suuria soluja ja harvaa verkotusta. Tämä johtuu siitä, että tiedetään ilmavirran muuttuvan tässä kohdassa vielä suhteellisen vähän, minkä vuoksi laskennan ei tarvitse olla erityisen tarkkaa. Lähemmäksi formula-autoa siirryttäessä verkko tiivistyy ja solut pienenevät, mikä tarkoittaa laskennan tarkkuuden parantumista. Formula-auton kaarevat pinnat ja rajapinnat on myös verkotettu tiheämmällä verkolla, koska ne

ovat laskennallisesti kriittisiä alueita. Kuvasta tämä ilmenee niistä kohdista, joissa verkotus on niin tiheää ja pientä, että se ei erotu selvästi.

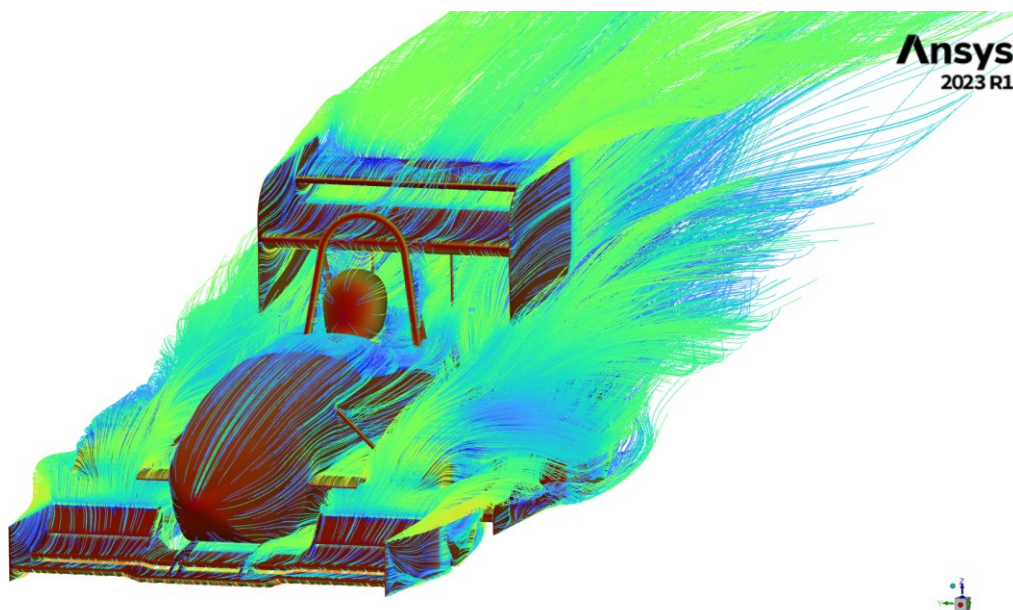
Ansys Fluentilla tarkasteltiin samaa formula-autoa kahdessa eri takasiiven asennossa. Simulaatiossa formula-auton pintoihin on lisätty paine-erojen näkyminen sekä ilmavirrat on visualisoitu viivoilla. Alla olevasta kuvasta 11 voidaan nähdä ilmavirtauksen käyttäytyminen, kun takasiipi on kiinni-asennossa.



Kuva 11. Ansys Fluent -simulaatio takasiipi kiinni eli DRS ei-aktiivisena.

Kuvasta voidaan havaita, miten takasiiven korkeapainealueella kulkee hidas, sininen ilmavirtaus ja takasiiven matalapaine alueella näkyy nopea, punainen

ilmavirtaus. Seuraavasta kuvasta 12 nähdään, miten ilmavirtaus muuttuu takasiivellä, kun takasiiven flap-siipi on auki asennossa.



Kuva 12. Ansys Fluent simulaatio takasiipi auki eli DRS aktiivisena.

Kun vertaillaan molempia kuvia takasiivestä, huomataan selvä ero päätylevyjen yläreunassa. Siinä, missä siipi on kiinniasennossa, pyörteilevä ilmavirta on voimakkaampaa, koska paine-ero on suurempi. Nämä pyörteilevät ilmavirrat ovat merkittäviä ilmanvastuksen aiheuttajia.

4.1.4 Tulokset

Ansys Fluent -ohjelmalla luotu verkko lähetettiin laskettavaksi suomalaisen CSC-tietotekniikan keskuksen supertietokoneelle nimeltään Mahti. Mahti on suunniteltu suurten simulaatioiden suorittamiseen, joten tulokset saadaan nopeasti. Solujen määrä laskennassa on noin 18 miljoonaa, joka on pieni mutta riittävä määrä. Laskennan jälkeen tulokset (liite 1) syötettiin Excel-tiedostoon, jossa laskettiin yhteen aerodynaamiset voimat jokaiselta ryhmältä. Yhteensä laskettu tulos kerrotaan kahdella, koska käsittelyssä on formula-auton puolikas

malli. Alla olevasta taulukosta 1 nähdään aerodynaamisten voimien muutokset koko formula-autoon, kun takasiipi on eri asennossa.

Taulukko 1. Formulan aerodynaamiset voimat eri takasiiven asennossa.

Formula	Lift Force	Drag Force	L/D ratio	C_L	C_D
DRS Close	-513,4	152,4	-3,4	-3,7	1,1
DRS Open	-416,9	113,7	-3,7	-3,2	0,9
	19 %	25 %	9 %	13 %	20 %

Kun takasiipi on auki-asennossa, koko formula-auton negatiivinen nostevoima laskee 96,5 N ja ilmanvastus 38,7 N. Aikaisemmassa luvussa 4.1.2 mainittiin Ansys SpaceClaim -ohjelmalla tehdystä aerodynaamisten komponenttien ryhmittelystä. Voimme tarkastella myös pelkästään takasiiven voimien muutosta koko formula-auton simulaatiosta. Seuraavassa taulukossa 2 nähdään pelkän takasiiven aerodynaamisten voimien muutokset, kun siiven asento muuttuu.

Taulukko 2. Aerodynaamisten voimien muutos pelkässä takasiivessä.

Rear Wing	Lift Force	Drag Force
DRS Close	-70,2	21,4
DRS Open	-30,9	7,4
	56 %	66 %

Kun takasiipi on auki-asennossa, takasiiven negatiivinen nostevoima laskee 39,2 N ja ilmanvastus 14,0 N. Molempien taulukoiden tulokset ovat tärkeitä tämän työn kannalta. Taulukon 1 voimat kertovat, kuinka paljon DRS-järjestelmä vaikuttaa formula-auton suorituskykyyn. Taulukon 2 voimat ovat tärkeitä DRS-järjestelmän mekaanisten komponenttien mitoituksen kannalta.

4.2 Ratasimulaatiot

Kierros- ja kiihdytysajoaikasimulaatioita suoritettiin Optimum lab -ohjelmalla. Optimum lab -ohjelmalla ei voi muuttaa kesken simulaation formula-auton teknisiä tietoja tietyissä kohdissa radalla, joten ohjelmalla on luotu kolme eri tietojen mukaista formula-autoa. Tämän ohjelman puutteen vuoksi kierrosajoaikasimulaatiosta tulee monimutkaisempi ja epävarmempi kuin kiihdytysajoaikasimulaatiosta. Kolmen formula-auton tiedot saatiin CFD-simulaatioista, ja niiden otsapinta-ala on piirretty ja mitattu Ansys SpaceClaim -ohjelmalla.

4.2.1 Formulan tiedot

Simulaatiossa formula-auton kokonaismassa on 300 kg, joka koostuu itse formula-autosta ja kuljettajasta. Formula-auton massa on 220 kg ja kuljettajan massaksi on annettu 80 kg. Simulaatiossa ilman tiheys on vakioarvona 1,185 kg/m³, ja kitkan arvoksi on asetettu vakio 1,2. Muita vakioarvoja ovat vierintävastus 0,009 N ja renkaan säde 0,203 m. Formula-auton muuttuvat tekniset tiedot simulaatiota varten löytyvät alla olevasta taulukosta 3.

Taulukko 3. Formula-auton muuttuvat tekniset tiedot.

Formula	Ilmanvastus kerroin C_d	Noste kerroin C_L	Otsa pinta-ala m²
DRS Open	0,879	3,222	0,955
DRS Close	1,098	3,700	1,024

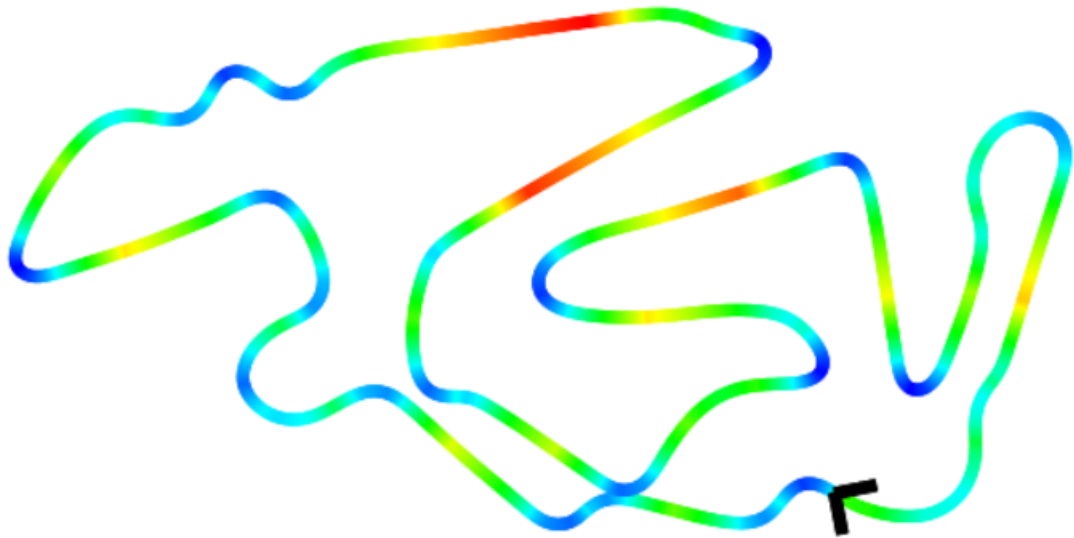
Formula-auton DRS-järjestelmän tila vaikuttaa taulukossa esitettyihin arvoihin, ja DRS-järjestelmän tila vaihtelee myös radalla ajettaessa. Koska näitä arvoja ei voi muuttaa kesken kierrosajoaikasimulaation, on simulaatio suoritettava yhdistämällä formulan tietoja.

4.2.2 Kiihdytysajoaikasimulaatio

Kiihdytysajoaikasimulaation tekeminen ja tulosten vertaaminen Optimum Lab -ohjelmalla on yksinkertaista, koska DRS-järjestelmän tila pysyy muuttumattomana. Kiihdytysajomatka on ainoastaan 75 metriä, ja se simuloitiin kahdesti takasiipi auki, että takasiipi kiinni -asennossa olevien formula-autojen tiedoilla. Kahden simulaation jälkeen kiihdytysajoaikoja verrattiin keskenään.

4.2.3 Kierrosajoaikasimulaatio

Ratasimulaatioluvun 4.2 alussa tuotiin esille Optimum Lap -ohjelman puute, joka monimutkaistaa kierrosajoaikasimulaatiota. Kierrosajoaikasimulaation suorittaminen samalla tavalla kuin kiihdytysajoaikasimulaation ei ole suositeltavaa. Takasiipi auki ajettaessa mutkat menevät hitaammin verrattuna tilanteeseen, jossa takasiipi on kiinni. Toisaalta takasiipi kiinni ajettaessa suorat osuudet ovat hitaampia kuin siipi auki ajettaessa. Negatiivista nostevoimaa tarvitaan lähinnä mutkissa pidon vuoksi, ja ilmanvastuksella on nopeuden kannalta vain vähäinen vaikutus mutkissa. Tämän tiedon perusteella on mahdollista yhdistellä kahta CFD-simulaation tulosta. Tällöin vain ilmanvastus aiheuttaa kierrosajoaikasimulaatiossa suorituskykyyn parantavaa virhettä, koska mutkissa ilmanvastus olisi suurempi. Kuva 13 esittää ratasimulaation radan mallin ja värispektrillä nopeudet eri kohdissa rataa.

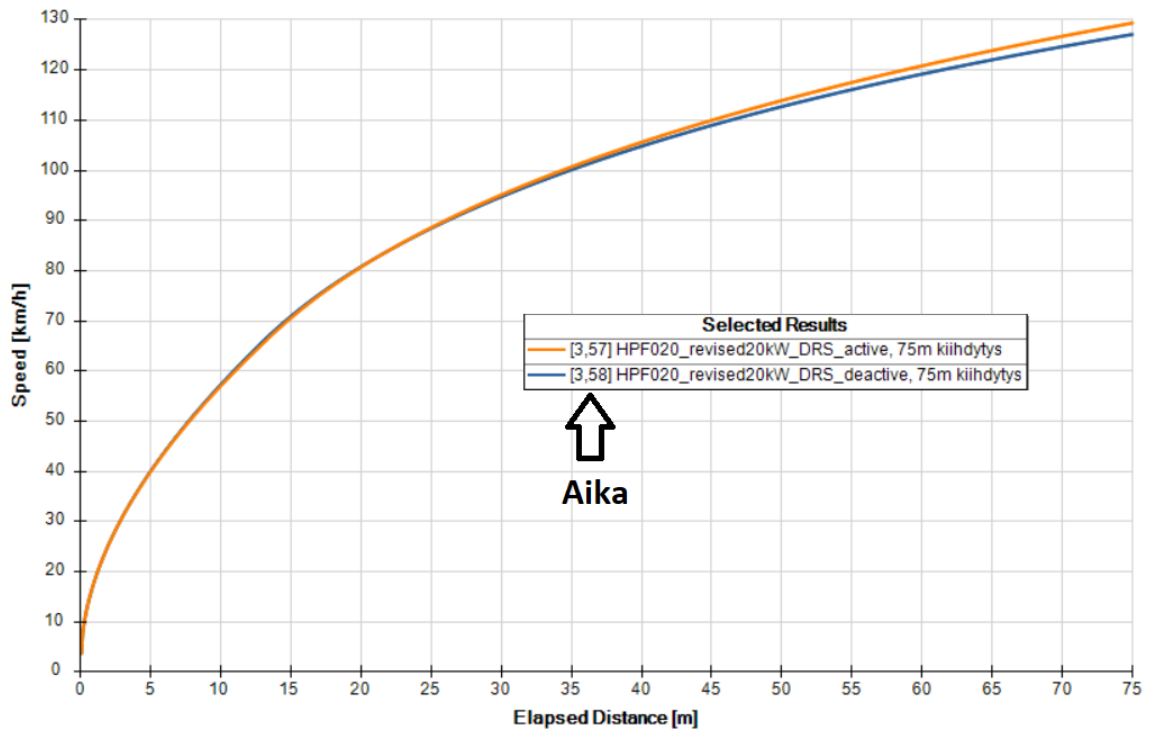


Kuva 13. Formula Student Germany Endurance -rata 2012.

Suoritettiin simulaatio kierrosajoajasta yhdellä formula-autolla, jossa käytettiin DRS kiinni -asennon negatiivisen nostevoiman kerrointa ja DRS auki -asennon ilmanvastusvoiman kerrointa taulukosta 3. Otsapinta-ala arvo säilytetään DRS kiinni -asennon mukaisena.

4.2.4 Tulokset

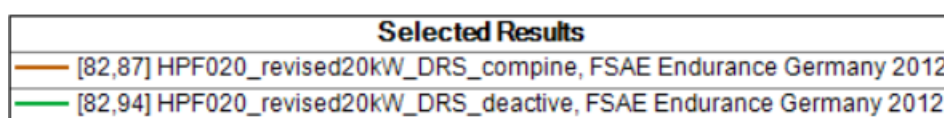
Kiihdytysajoaikojen tulokset näkyvät kuvasta 14. Y-akselilla on esitetty nopeuden muutos ja x-akselilla matkan muutos.



Kuva 14. Kiihdytysajoaika kuvaaja.

Oranssi viiva esittää formula-autoa, jossa takasiipi on auki ja sininen viiva formula-autoa, jossa siipi on kiinni. Kuvaajasta voidaan havaita, että takasiipi auki -asennossa formula-auto kulkee 0,01 sekuntia nopeammin 75 metrin suoran matkan kuin formula-auto, jossa takasiipi on kiinni. Nopeusero tulee ilmi vasta, kun nopeus ylittää 90 km/h, sillä aerodynaamisten voimien vaikutus kasvaa nopeuden neliön suhteessa.

DRS-järjestelmän kierrosajoaikasimulaation tuloksia verrattiin ratasimulaatioon, jossa takasiipi oli kiinni koko kierroksen ajan. Tulokset eivät ole kierrosajoajan osalta täysin tarkkoja, koska mutkissa ilmanvastus on pienempi kuin sen tulisi olla. Alla olevasta kuvasta 15 voidaan nähdä kierrosajoajat.



Kuva 15. Kierrosajoaika vertailu DRS-järjestelmällä ja ilman DRS-järjestelmää.

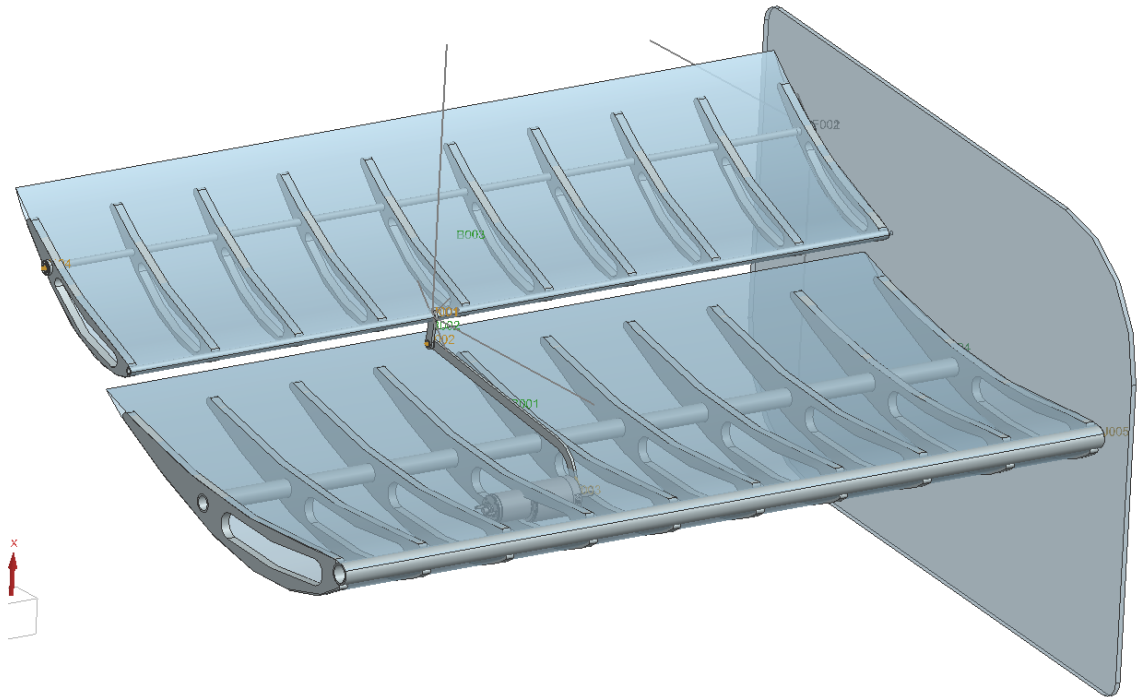
Ruskea viiva esittää kierrosajoaikaa DRS-järjestelmällä ja vihreä viiva tulosta ilman DRS-järjestelmää. Tulosten perusteella kierrosaika DRS-järjestelmällä on 0,07 sekuntia parempi kuin ilman DRS-järjestelmää. Tulos on kuitenkin epätarkka. Tämän perusteella DRS-järjestelmän hyöty näyttää erittäin vähäiseltä, mutta radalla tilanne voi muuttua.

4.3 Mekaaninen simulaatio

Mekaaninen simulaatio suoritettiin NX Motion -työkalulla, mutta sitä ennen luotiin takasiivestä 3D-malli NX-ohjelmalla. 3D-malli antaa hyvän kokonaiskuvan mahdollisesta fyysisestä toteutuksesta ja kokonaisuudesta. Simulaation tuloksista saatiin selville tarvittava vääntömomentti ja liikematka siiven avaamiseksi.

4.3.1 3D-malli takasiivestä

Takasiipi mallinnettiin kolmiulotteisen NX-ohjelman avulla, josta nähdään kaksielementtisen takasiiven ja DRS-järjestelmän rakenne. Takasiipeen kuuluvat pääsiipi, flap-siipi, päätylevyt, laakerit, vivut ja moottori. Alla olevasta kuvasta 16 nähdään takasiiven kokonaisuus.

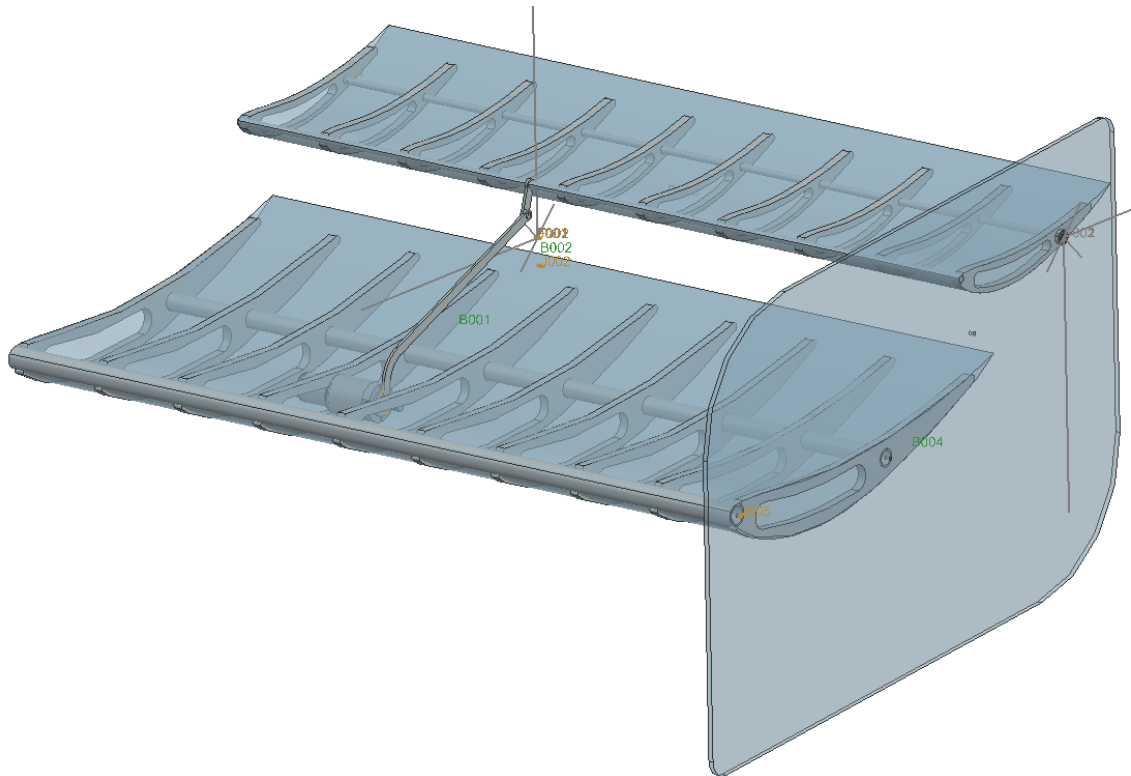


Kuva 16. NX-ohjelmalla tehty DRS-järjestelmän takasiiven 3D-malli.

Takasiiven siipien sisärakenne on hiilikuituputkista ja Rohacell-profiileista, jotka on päällystetty hiilikuituprofiileilla. Päätylevy on viiden millimetrin paksuinen ja sisältää Rohacell-levyn, joka on päällystetty hiilikuidulla. Päätylevyyn on kiinnitetty pääsiipi molemmista putkien päistä, ja flap-siipi on laakeroitu takimmaisen hiilikuituputken päistä. Pääsiiven sisään on sijoitettu valmistajan toimittama moottorin 3D-malli, joka mahtuu ja on kiinnitetty takasiiven alumiiniseen kannakkeeseen profiilin sisällä. Alumiinikannakkeeseen hitsataan mekaaniset stopparit päävivun liikeradan rajoittamiseksi, jotta vivut eivät pääse nurjahtamaan tai vaurioittamaan siipiä. Flap-siipeen ja pääsiipeen tehdään pienet reiät vipujen kohdalle, jotta vivut pääsevät liikkumaan. Päävivun ja välivivun yhdistää pultti, joka kulkee 3D-tulostettun muoviholkin läpi. Vivut valmistetaan samasta materiaalista samalla tavalla ja paksuudella kuin päätylevytkin takasiivessä.

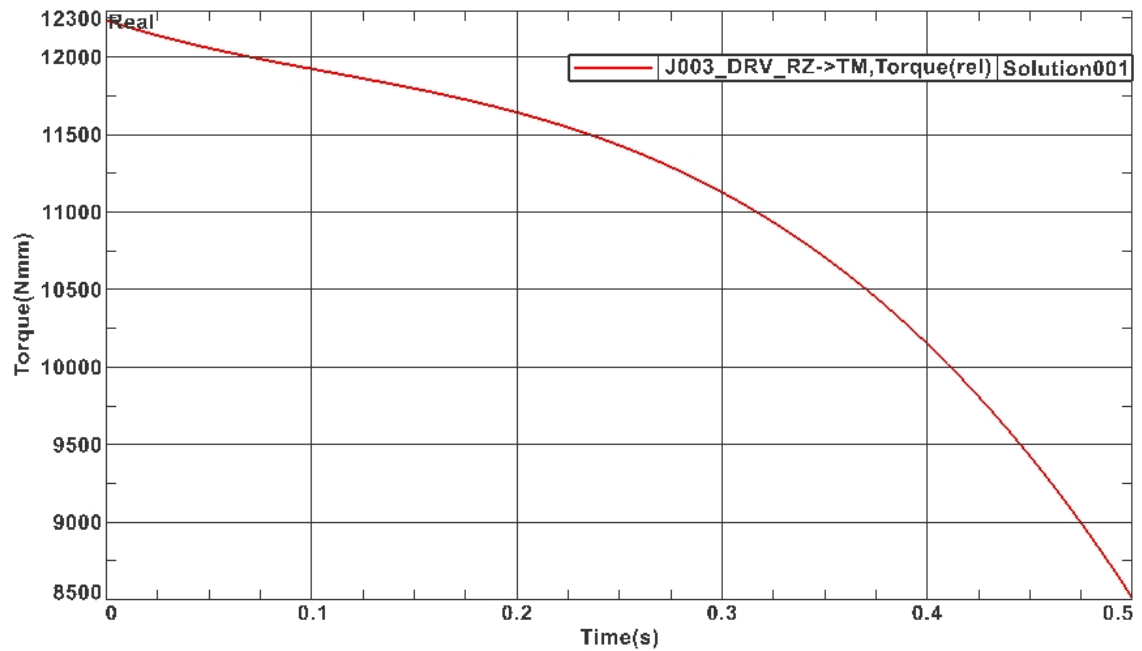
4.3.2 Tulokset

Edellisessä luvussa käytiin läpi DRS-takasiiven mekaaninen rakenne, joten voimme siirtyä tarkastelemaan NX Motion -työkalulla suoritettua dynaamista simulaatiota. Alla olevasta kuvasta 17 näkyy takasiipi auki-asennossa.



Kuva 17. DRS-takasiivelle tehty dynaaminen simulaatio.

Molemmista kuvista 16 ja 17 voidaan havaita harmaat voimanuolet. Näiden nuolien voiman suuruudet saatiin CFD-simulaatioista, jotka käytiin läpi luvussa 4.1.4. NX Motion -työkalun dynaamisessa simulaatiossa on määritetty vivut, nivelet, moottori ja runko. Moottorin akselin on pyörähdettävä noin 14 astetta saavuttaakseen flap-siiven koko avautumisliikkeen. Siiven avautumisaika on myös oltava nopea, jotta DRS-järjestelmä toimisi tehokkaasti. Nopean DRS-järjestelmän toiminnan kannalta aktivointiajaksi asetettiin 0,5 sekuntia. NX Motionin dynaamisen simulaation vääntömomentti suhteessa aktivointiaikaan näkyy kuvassa 18.



Page 1 of 1

Kuva 18. DRS-järjestelmän toimintaan vaadittava moottorin vääntömomentti.

Kuvaajasta voidaan havaita, että flap-siiven avautumisen alussa tarvitaan suurempaa vääntömomenttia kuin avautumisen lopussa. Avautumisen alussa vääntömomentti on 12,3 Nm ja avautumisajan lopussa 8,5 Nm.

5 Mekaaninen suunnittelu

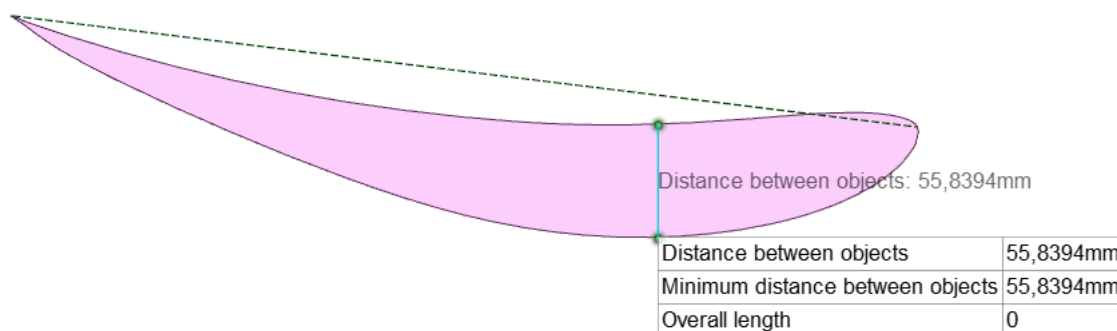
Mekaanisessa suunnittelussa käydään läpi, mitkä tavoitteet on asetettu DRS-järjestelmälle, ja millä tavoin päätöksiin on päädytty. DRS-järjestelmän tärkeimmät tavoitteet ovat seuraavat:

- kevyt
- yksinkertainen
- halpa
- tehokas.

Nämä tavoitteet huomioitiin siiven suunnittelussa, moottorin valinnassa, nivelmekanismin suunnittelussa ja laakeroinnin valinnassa. Päätöksiin vaikuttivat myös tilavuustekijät.

5.1 Moottoripaketti

Moottorin valinnassa määrävinä tekijöinä ovat saatavuus, paino, koko, hinta sekä riittävä vääntömomentti ja pyörintänopeus. Moottori sijoitetaan pääsiiven sisään, jotta välttyttäisiin mahdollisimman paljon turhalta ilmanvastukselta. Pääsiiven paksuimmassa kohdassa on 55 mm tilaa, joten moottoripaketin halkaisijan tai paksuuden on mahduttava tähän väliin. Alla oleva kuva 19 esittää pääsiiven ylä- ja alapinnan välisen etäisyyden.



Kuva 19. Siiven maksimipaksuus.

Moottoripaketin pituutta siiven sisällä ei rajoita suoranaisesti mikään fyysinen este, mutta sen pituuden rajoittaminen on suositeltavaa painon säästämiseksi. Tavoitteena oli valita mahdollisimman kevyt moottoripaketti, joka on rakenteeltaan yksinkertainen, jotta se ei lisää merkittävästi formula-auton kokonaispainoa ja siten huononna suorituskykyä.

5.1.1 Moottorityyppi

Moottorityypin valintaan vaikuttivat käyttövoima, koko, paino, vaihteiston saatavuus ja toimintavarmuus. Moottorityypin valinta käyttövoiman osalta oli selkeä, sähkö. Pneumaattisia tai hydraulisia järjestelmiä ei löydy formula-autosta valmiina, joten sellaisten suunnittelu sekä rakentaminen on monimutkaista ja epäedullista painon kannalta. Nykyisessä Formula Student -sähköformulassa on

valmiina 24 V:n matalajännitepuoli, jota käytetään DRS-järjestelmän käyttövoimana. Potentiaalisia sähkömoottoryyppejä on monia eri vaihtoehtoja:

- harjaton DC-moottori
- askelmoottori
- lineaarimoottori
- solenoidimoottori.

Näistä neljästä sähkömoottoryypistä jokainen tarjoaisi sopivan moottorin DRS-järjestelmälle. Lineaarimoottori ja solenoidimoottori eivät soveltuneet suunnitteleman nivelmekanismin kanssa lineaariliikkeen vuoksi. Askelmoottoreiden valinta kaatui niiden resonanssialttiuteen, joka voi aiheuttaa pyörintänopeus- ja askellusvirheitä.

Sähkömoottoryypiksi valikoitui harjaton DC-moottori vähäisen huoltotarpeen, tehokkuuden, suorituskyvyn ja kestävyiden takia. Lisäksi pienikokoisten harjattomien DC-moottoreiden ja vaihteistojen valikoima on laaja. (5.)

5.1.2 Moottoripaketin valinta

Moottorivaihtoehtoja valittaessa huomattiin, että pienikokoisten moottoreiden kyky tuottaa vääntömomenttia on vähäinen. Tämän ja tiedossa olevan vääntömomenttitarpeen vuoksi moottori tarvitsee vaihteiston ylennysvaihteella. Vaihteiston välityssuhde vaikuttaa moottorin vääntömomenttiin ja kierrosnopeuteen. Tämä tarkoittaa, että moottorilta saatavaa vääntömomenttia on kasvatettava, minkä seurauksena moottorin pyörimisnopeus vähenee. Tarvittavan välityssuhteen määrän voi laskea tässä tapauksessa kaavalla 6:

$$R = \frac{\text{Vaihteiston vääntömomentti}}{\text{Moottorin vääntömomentti}} \quad (6)$$

- R on vaihteiston välityssuhde.

Dynaamisesta simulaatiosta saadun tarvittavan vääntömomentin ja valitun moottorin maksimivääntömomentin avulla voidaan laskea tarvittava

välityssuhde kaavalla. Moottorivalmistajilla on tarjolla eri välityssuhdekokoja vaihdelaatikoille, tai ne valmistavat vaihdelaatikoita asiakkaiden toiveiden mukaan.

Moottorin valinnassa otetaan huomioon tarvittava vääntömomentti, moottorin pyörintänopeus, käyttöjännite ja vaihteiston saatavuus. NX-ohjelman dynaamisesta simulaatiosta saatiin selville tarvittava vääntömomentti. Moottorin pyörimisnopeuden on mahdollistettava flap-siiven 0,5 sekunnin avautumisaika. Dynaamisen simulaation avulla määritettiin, kuinka monta astetta moottoriakselin on käännettävä, kun flap-siipi liikkuu auki asentoon. Tämän selvittämisen jälkeen käytettiin kulmanopeuden kaavaa:

$$\omega = \frac{\alpha \times \frac{\pi}{180}}{t} \quad (7)$$

- ω on kulmanopeus.
- α on kulma asteena.
- t on aika.
- $\frac{\pi}{180}$ on kulman muutos radiaaneiksi.

Kulmanopeuden kaavaan sijoitettiin selvitetty moottoriakselin kulma ja flap-siiven avautumisaika. Kulmanopeuden arvoksi tuli 0,49 rad/s. Tämän jälkeen kulmanopeus muutettiin pyörintänopeudeksi, kierroksiksi minuutissa eli rpm (revolutions per minute), seuraavalla kaavalla:

$$n = \frac{\omega \times 60}{2 \times \pi} \quad (8)$$

- n on pyörintänopeus.

Kaavasta saatiin pyörintänopeudeksi 4,7 rpm, joten moottorin on pyörittävä tällä nopeudella saavuttaakseen 0,5 sekunnin avautumisajan. DRS-järjestelmän dynaamisesta simulaatiosta saatujen tarvittavan vääntömomentin ja

laskennallisesti saadun kulmanopeuden avulla voitiin laskea tarvittavan pyörimisliikkeen tehon määrä seuraavalla kaavalla:

$$P = M \times \omega \quad (9)$$

- P on teho.
- M on vääntömomentti.
- ω on kulmanopeus.

Kaavaan sijoittamalla dynaamisesta simulaatiosta saatu maksimivääntömomentti ja laskettu kulmanopeus saadaan mekaanisen pyörimisliikkeen tehoksi noin 6 W. Moottorin valinta onnistuu nyt selvitettyjen vääntömomentin, pyörimisnopeuden, käyttöjännitteen ja tehon avulla. Moottorin maksimivaatimukset löytyvät taulukosta 4.

Taulukko 4. Harjattoman DC-moottori paketin maksimivaatimukset.

BLDC-moottoripaketin maksimivaatimukset				
Koko	Vääntömomentti	Pyörimisnopeus	Käyttöjännite	Teho
50 Ø	12,3 Nm	4,7 rpm	24 V	6 W

Harjattoman DC-moottorin maksimivaatimusten avulla etsittiin netistä eri moottorinvalmistajia. Eri moottorinvalmistajia löytyi kohtalaisesti, ja valmistajilla oli useita eri mallivaihtoehtoja. Valittiin kolme valmistajavaihtoehtoa, jotka olivat Motion Tech, Constar ja Faulhaber. Näistä kolmesta moottorinvalmistajasta Faulhaber oli sopivin kattavan tiedon ja hyvän asiantuntijapalvelun vuoksi. Seuraava taulukko 5 näyttää valitun moottorin (liite 3) ja vaihteiston tiedot (liite 4) Faulhaber-valmistajalta.

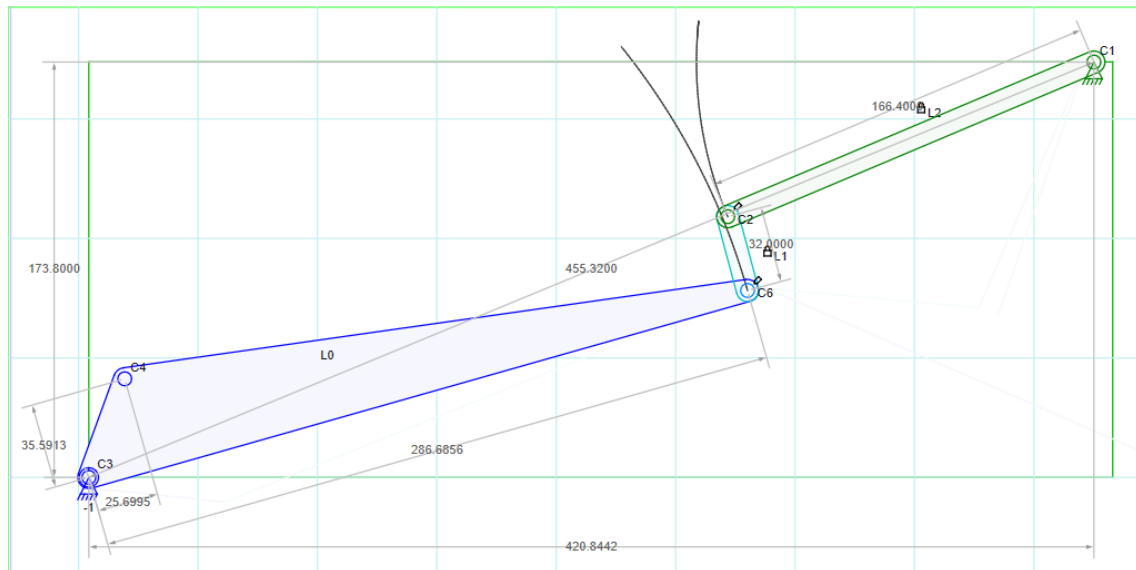
Taulukko 5. Valittu moottori ja vaihdelaatikko DRS-järjestelmälle.

Moottori					
Valmistaja	Malli	Koko mm	Maks.vään- tömomentti Nm	Nimellinen nopeus rpm	Paino kg
Faulhaber	3242X024CR	32Øx42	0,189	3690	0,175
Vaihdelaatikko					
Valmistaja	Malli	Koko mm	Maks. vään- tömomentti Nm	Välitys- suhde	Paino kg
Faulhaber	Series 42GPT	42Øx55.7	20,4	108	0,475

Valittu moottori ja vaihdelaatikko täyttävät moottoripaketin maksimivaatimukset, jotka näkyvät taulukosta 4. Moottoripaketin maksimivaatimusten mitoituksessa on hyvä käyttää turvakerrointa varmistaakseen järjestelmän toimivuuden. Sähkömoottoreissa käytetty turvakerroin on yleensä 1,3, eli noin 30 % maksimivaatimuksia suurempi. Valitun moottorin suorituskykyvaatimukset ovat noin tämän turvakertoimen verran. Faulhaber-asiantuntijapalvelu antoi moottoripaketin hinnaksi 750 €. Lisäksi Faulhaber-valmistajien sivulla on laskuri (liite 2), mikä tarjoaa sopivimman vaihtoehdon suorituskykyvaatimusten mukaan.

5.2 Nivelmekanismi

Nivelmekanismin suunnittelussa käytetään ohjelmaa nimeltä Linkage, jonka avulla voidaan simuloida nivelmekanismin liikeratoja ja liikkuvuutta. CFD-simulaatioissa saatiin selville, mihin flap-siipi sijoittuu pääsiiven suhteen, joten vipupisteiden koordinaatit olivat tiedossa. Alla olevassa kuvassa 20 näkyy Linkage-ohjelmalla tehty liikeratasimulaatio.



Kuva 20. Linkage-ohjelman liikeratasimulaatio.

Kuvassa 9 vihreä vipu kuvastaa flap-siipeä, ja musta viiva pisteestä C2 osoittaa aukeamisliikeradan. Sininen vipu kuvastaa päävipua, ja musta viiva pisteestä C6 näyttää päävivun liikeradan. Turkoosi vipu välissä toimii apuvipuna siiven avaamisessa. Vaikka sinisen päävivun ulkonäkö on 3D-mallissa erilainen, se toimii silti samalla tavalla. Piste C3 toimii simulaatiossa moottorina.

Linkage-ohjelman mekaanisesta simulaatiosta huomattiin, että nivelmekanismin liikeradat toimivat halutulla tavalla. Nivelmekanismin vapausasteiden määrä eli Degree of freedom (D.O.F) voidaan varmistaa myös laskennallisesti Kutzbachin kriteerin avulla 2D-tasossa:

$$M = 3(N - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (10)$$

- M on nivelmekanismin vapausasteiden määrä.
- N on vipujen ja rungon lukumäärä.
- j_1 on yhden vapausasteen liitosten lukumäärä.
- j_2 on kahden vapausasteen liitosten lukumäärä.

DRS-järjestelmän nivelmekanismin muuttujien määrä selviää kuvasta 20. N on neljä, j_1 on neljä ja j_2 on nolla. Sijoittamalla nämä muuttujien määrät Kutzbachin

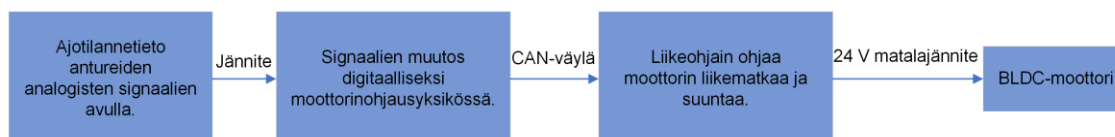
kaavaan saatiin vapausasteiden määräksi yksi. Tämä osoittaa, että nivelmekanismilla toimiva liikerata.

5.3 Laakerointi

Flap-siipi laakeroidaan molemmilta puolilta päätylevyn sisään, jolloin flap-siipi pääsee liikkumaan mahdollisimman sulavasti ilman kitkan vastusta. Päätylevyn paksuus on noin 5 mm, joten laakerin on oltava kapeaa mallia. Laakerityypiksi valitaan SKF W 618/8 -urakuulalaakerit niiden vähäisen kitkan ja aksiaali-voimien takia. Neulalaakerit ovat myös potentiaalinen vaihtoehto vähäisempien kitkanvoimien takia, mutta neulalaakerit ovat liian leveitä mahtuakseen päätylevyn sisään. (6.)

6 Elektroniikan suunnittelu

DRS-järjestelmän on tarkoitus toimia automaattisesti, joten formula-auton elektronisen ohjausjärjestelmän on tunnettava ajotilanne. Radan ajotilannetietoa mitataan antureista analogisesti, joka muunnetaan moottorinohjainlaiteella digitaalliseksi. DRS-järjestelmän elektroniikan osalta Faulhaber-valmistaja tarjoaa moottorille sopivan liikeohjaimen (liite 5). Liikeohjaimelle syötetään CAN-väylää pitkin formula-auton digitaaliset anturitiedot moottorinohjainlaitteelta, jotka ovat tarpeen DRS-järjestelmän automaattiseen ohjaukseen. Liikeohjain syöttää 24 V:n matalajännitettä DRS-järjestelmän moottorille ajotilanteen mukaan. DRS-järjestelmän elektroniikan toiminnan toteutuksen kokonaisuus näkyy kuvasta 21.

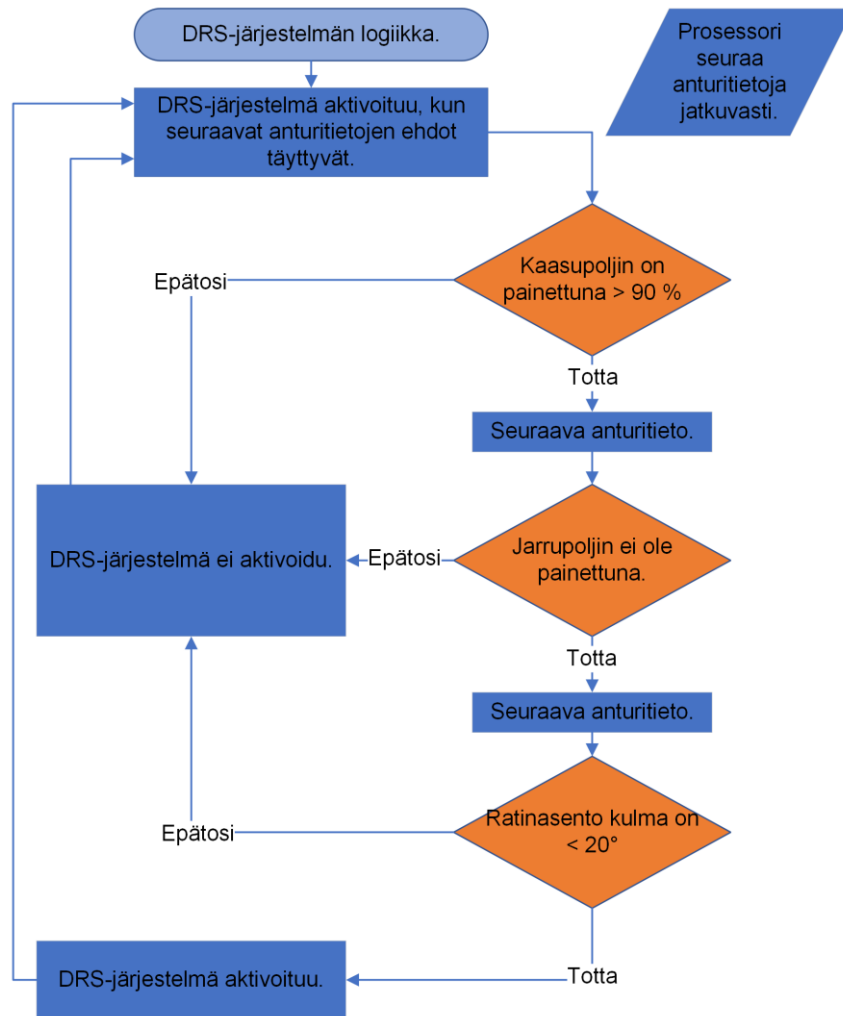


Kuva 21. Elektroniikan toteutus automaattiselle DRS-järjestelmälle.

Liikeohjain määrittää moottorin kulkusuunnan joko vasta- tai myötäpäivään. Moottorin vääntömomentin ja kierrosnopeuden määrää ei tarvitse liikeohjaimella rajoittaa. Faulhaber-valmistaja tarjoaa liikehallintaohjelmiston, jonka avulla voidaan säätää moottorin käyttäytymistä.

7 Ohjelmoinnin suunnittelu

DRS-järjestelmän ohjauslogiikka on suunniteltu siten, että takasiipi avautuu ja sulkeutuu automaattisesti formula-auton ajotilanteiden mukaan. Ajotilannetietoja voidaan lukea formula-auton eri antureista, jotka ohjaavat DRS-järjestelmän aktivointia. DRS-järjestelmän ohjaukseen tarvittavat anturitiedot sisältävät kaasupolkimen asennon, jarrupaineen ja ohjauspyörän asennon. Näille anturitiedoille on asetettu tietyt ehdot, joiden täytyessä DRS-järjestelmä aktivoituu.



Kuva 22. Vuokaavio DRS-järjestelmän logiikalle.

- Kaasupolkimenasento > 90 %.
- Jarrua ei ole painettu.
- Ratinasentokulma on < 20 %.

Jos jokin näistä ehdoista ei toteudu, DRS-järjestelmä ei aktivoi takasiipeä tai takasiipi sulkeutuu. Mikäli nämä ehdot eivät riitä varmistamaan DRS-järjestelmän optimaaliseen toimintaan, voidaan ohjauslogiikkaan lisätä muita anturitietoja ehtoineen. Lisättäviä anturitietoja voisivat olla esimerkiksi nopeus ja kiihtyvyys.

8 Yhteenveto

Työ keskittyy pääasiassa DRS-järjestelmän aiheuttamiin aerodynaamisten voimien muutoksiin, joita on tutkittu CFD-simulaatioiden avulla ja joihin käytettiin merkittävästi aikaa. Tarkempien tulosten saavuttaminen on mahdollista solujen määrää kasvattamalla ja niiden kokoa pienentämällä. Opinnäytetyössä käsitellään teoriaa ainoastaan aerodynamiikan osalta, koska aerodynamiikka on vähemmän tunnettua ja vaikeammin ymmärrettävissä.

Tutkiessa DRS-järjestelmän tarvetta formula-autolle huomattiin, että järjestelmä soveltuisi paremmin suurilla nopeuksilla ajaville ajoneuvoille. Formula Student -kilpasarjassa maksiminopeudet ovat suhteellisen pienet ja radat mutkaisia, joten DRS-järjestelmän tarve kilpasarjassa vähenee. Kierros- ja kiihdytysaika-simulaatioista selvitettyjen tulokset osoittivat DRS-järjestelmän vähäistä hyötyä. Työssä käytetyllä ohjelmalla ei saatu tarkkaa tietoa mutta suuntaa antavaa kyläkin. Työssä saavutettaisiin tarkempaa tietoa DRS-järjestelmän tuomasta edusta käyttämällä parempaa kierrosaikasimulaatio-ohjelmistoa.

DRS-järjestelmälle suunniteltiin uusi takasiipi, mikä lisäsi työmäärää CFD-simulaatioiden ja 3D-mallinnuksen osalta. Vaikka pääsiiven profiilimallin valinta oli onnistunut, samaa siipiprofiilia ei välttämättä olisi kannattanut käyttää flap-siivessä. CFD-simulaatiosta havaittiin flap-siivessä matalapaine puolella virtauksen irtoamista. Käyttämällä flap-siivessä pienemmällä kaarevuudella olevaa siipiprofiilia olisi mahdollisesti voitu saada ilmavirtaus pysymään paremmin siiven matalapainepinnalla, mikä olisi puolestaan voinut lisätä negatiivista nostevoimaa.

Mekaaninen suunnittelu on olennainen osa opinnäytetyötä. Mekaanisessa suunnittelussa keskityttiin nivelmekanismin toimivuuteen ja dynaamiseen suorituskykyyn. Vipujen mitoitus perustuu aiempaan tietämykseen, joten tarkempaa lujuuslaskentaa ei nähty tarpeelliseksi vipujen osalta. Tämä nopeutti suunnitteluprosessia.

Opinnäytetyön osalta ohjelmoinnin ja elektroniikan suunnittelutyö on tehty pääpiirteittäin. Ohjelmointi osuus olisi voinut sisältää koodin kirjoittamisen ja elektroniikka osuus väyläviestinnän toiminnan toteuttamisen. Elektroniikan ja ohjelmoinnin osalta ymmärrän vain perusteet, joten näiden osa-alueiden perusteellinen perehtyminen ja kattava suunnittelu DRS-järjestelmän osalta olisi vienyt paljon aikaa.

DRS-järjestelmän suunnittelun tavoitteet saavutettiin. Vipumekanismista tuli yksinkertainen ja kevyt yhden liikutettavan siipielementin ansiosta. Moottorin valinnassa saavutettiin pieni koko ja paino kattavan etsinnän ansiosta. Suorituskyvyiltään moottoripaketti on sopivasti turvakertoimella mitoitettu varman toiminnan turvaamiseksi. Muilla moottorityypeillä DRS-järjestelmän suunnitelman moottoripaketti voisi olla kevyempi, mutta sen varmatoimisuus saattaisi heikentyä. Opinnäytetyössä suoritettujen kattavien simulaatioiden ansiosta DRS-järjestelmän suunnitelmasta pystyttiin tekemään kokonaisuudeltaan tavoitteisiin nähden toimiva. Mikäli DRS-järjestelmä rakennettaisiin tämän suunnitelman pohjalta, budjetiksi arvioitaisiin noin 1000 €.

Lähteet

- 1 Formula Student organisaatio. Verkkoaineisto. Formula SAE. <<https://fsaeonline.com/>>. Luettu 10.3.2023.
- 2 Formula Student historia. Verkkoaineisto. Institution of mechanical engineers. <<https://imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>>. Luettu 15.3.2023.
- 3 Metropolia Motorsport -tiimi. Verkkoaineisto. Metropolia. <<https://www.metropolia.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hankkeet/metropolia-motorsport>>. Luettu 17.3.2023.
- 4 Katz, Joseph. 1996. Race Car Aerodynamics, Designing for Speed. Cambridge: Bentley Publishers.
- 5 Harjaton DC moottori. 2021. Verkkoaineisto. DigiKey. <<https://www.digikey.fi/fi/articles/how-to-quickly-start-a-brushless-dc-motor-control-design-using-highly-integrated-ics>>. Päivitetty 11.2.2021. Luettu 5.1.2024.
- 6 Laakerit. Verkkoaineisto. SKF. <<https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%20618%2F8-2Z>>. Luettu 25.11.2023.

CFD-simulaatioiden laskentatulokset

Simulation - HPF023RWing			From tabl	CFD-Pos	Input dat	Calculated
Speed [m/s]	15					
Frontal area [m ²]	1,024	vanha 1,031				
Air density [kg/m ³]	1,205					
Wheelbase [m]	1,5300					
Radiators		Force [N]	Torq. arm [m]	Mass flow		
Front-Radiator (X-dir)	0,00		0	0 kg/s		
Front-Radiator (Z-dir)	0,00		0			
Rear-Radiator (X-dir)	0,00		0			
Moment around y-axis [Nm]	0,00					
	no radiator	with radiator				
Z (Lift)	-513,4	-513,4				
X (Drag)	152,4	152,4				
Moment around Y-axis [Nm]	-54,7	-54,7				
<i>Looking from left, positive moment is clockwise</i>						
drag	Forces (N)					
front wing	12,512297					
inverted wing	-0,32674671			New endplate		
rear wing	21,390708			New flapsetup		
chassis	41,753336					
tire pads	0,1336308					
front wheel	1,1973858					
rear wheel	-0,46444841					
total	76,2					
Lift	Forces (N)					
front wing	-96,501229					
inverted wing	3,5112288					
rear wing	-70,170474					
chassis	-96,552684					
tire pads	0,000238056					
front wheel	1,7191803					
rear wheel	1,2947248					
total	-256,7					
Moment around Y-axis	Torque (Nm)					
front wing	-135,19541					
inverted wing	3,4279678					
rear wing	80,701737					
chassis	23,07837					
tire pads	0,000312289					
front wheel	1,6446695					
rear wheel	-1,0120709					
total	-27,4					
Lift and drag coe						
C _L						-3,700
C _D						1,098
L/D ratio						-3,369
Front / rear lift co						
C _{PM}						-0,258
C _{LF}						-2,108
C _{LR}						-1,592
Aerodynamic lift						
Front						-292
Rear						-221
% Front						56,96 %

Kuva 1. Formula-auton CFD-tulokset DRS-järjestelmä ei-aktiivisena eli takasiipi kiinni.

Simulation - HPF023RWing			From tabl	CFD-Pos	Input dat	Calculated
Speed [m/s]	15					
Frontal area [m ²]	0,955	vanha 1,031				
Air density [kg/m ³]	1,205					
Wheelbase [m]	1,5300					
Radiators		Force [N]	Torg, arm [m]	Mass flow		
Front-Radiator (X-dir)	0,00	0	0 kg/s			
Front-Radiator (Z-dir)	0,00	0				
Rear-Radiator (X-dir)	0,00	0				
Moment around Y-axis [Nm]	0,00					
	no radiator	with radiator				
Z (Lift)	-416,9	-416,9				
X (Drag)	113,7	113,7				
Moment around Y-axis [Nm]	-152,3	-152,3				
<i>Looking from left, positive moment is clockwise</i>						
drag	Forces (N)					
front wing	12,31103			New endplate		
inverted wing	-0,33679184			New flapsetup		
rear wing	7,3552374					
chassis	37,020864					
tire pads	0,11641676					
front wheel	1,110096					
rear wheel	-0,71640329					
total	56,9					
Lift	Forces (N)					
front wing	-94,67609					
inverted wing	3,5160757					
rear wing	-30,93708					
chassis	-89,019669					
tire pads	0,000190388					
front wheel	1,5629414					
rear wheel	1,1182636					
total	-208,4					
Moment around Y-axis	Torque (Nm)					
front wing	-132,64822					
inverted wing	3,4307785					
rear wing	31,26691					
chassis	21,215134					
tire pads	0,000293673					
front wheel	1,5043672					
rear wheel	-0,93433146					
total	-76,2					
Lift and drag coe						
C _L						-3,222
C _D						0,879
L/D ratio						-3,666
Front / rear lift co						
C _{PH}						-0,769
C _{LF}						-2,380
C _{LR}						-0,841
Aerodynamic lift						
Front						-308
Rear						-109
% Front						73,88 %

Kuva 2. Formula-auton CFD-tulokset DRS-järjestelmä aktiivisena eli takasiipi auki.

Moottoripaketin tietosivut

Solution details for
3242X024CR + 42GPT 108:1



Your comments

Your Requirements

Motor & Add-on products preselection

FAULHABER Motor series	3242X024CR
FAULHABER Gearheads or Linear actuators	All
FAULHABER Encoder series	Without encoder

Global settings

Ambient temperature	22	°C
Available diameter, max.	100	mm
Available length (with screw) max.	800	mm
Available supply voltage, max.	24	V
Available current, max.	10	A
Battery mode	no	
Efficiency, min.	5	%
Mounting type	30	%
Mounting type BXT	30	%
Encoder: Steps per revolution, min.	16	i

Your entries

Calculation mode	Speed and torque
Operation type	Intermittent operation
Load transmission	Direct rotational

Load speed	Load torque	Time
5 min ⁻¹	13.000 mNm	1 s
Time off		10 s
Cycles		1

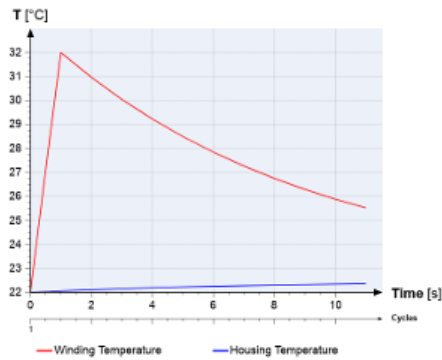
Results of the Load Calculation

Load current (max.)	3,77	A
Load voltage (max.)	22,13	V
Winding temperature	31,99	°C
Housing temperature	22,36	°C
Required Speed (Motor)	538,31	min ⁻¹
Required load torque (Drive system)	13	Nm
Required load speed	5	min ⁻¹
Output power	6,81	W
Efficiency (over all)	8,13	%

Overall Dimensions

Diameter	42	mm
Length (with screw)	100,9	mm
Mass	650	g

Temperature diagram



Motor Characteristic Data

Nominal voltage	24	V
Terminal resistance	5	Ω
Torque constant	41,3	mNm/A
No load speed	5.300	min ⁻¹
Stall torque	189	mNm
Speed constant	231	min ⁻¹ /V
Rotor inductance	0,54	mH
Slope of n-M curve	28	min ⁻¹ /mNm
Rotor inertia	26	gcm ²
Mechanical time constant	7,5	ms
Efficiency max.	73	%

Gearhead Characteristic Data

Housing material	stainless steel	
Geartrain material	stainless steel	
Backlash at no load	0,4	°
Bearings on output shaft	ball bearings, preloaded	
Shaft load, max. radial	310	N
Shaft load, max. axial	230	N
Shaft press fit force, max.	250	N
Number of gear stages	3	
Reduction ratio	108	:1
Calculated reduction	107.6625	:1
Continuous torque	15,5	Nm
Intermittent torque	20	Nm
Mass	475	g
Efficiency, max.	80	%
Gearshaft diameter	12	mm
Gearhead diameter	42	mm

Drive Electronics

Motion Controllers	MC 3603 S
	MC 5004 P
	MC 5005 S
	MC 5010 S
Speed Controllers (Standard programming adapter for configuration necessary)	SC 2402 P
	SC 2804 S
	SC 5004 P
	SC 5008 S

Link to your calculation

<https://www.faulhaber.com/en/drive-calculator/fdc/showDetail/362146/30272-30475/>

Moottorin tietosivut

DC-Micromotors

Graphite Commutation

41 mNm

30 W

Series 3242 ... CR

Values at 22°C and nominal voltage	3242 G	012 CR	018 CR	024 CR	036 CR	048 CR	
1 Nominal voltage	U_N	12	18	24	36	48	V
2 Terminal resistance	R	1,27	2,73	5	10,5	19,7	Ω
3 Efficiency, max.	η_{max}	72	70	73	71	73	%
4 No-load speed	n_0	5 200	5 300	5 300	5 500	5 400	min^{-1}
5 No-load current, typ. (with shaft \varnothing 5 mm)	I_0	0,234	0,157	0,117	0,081	0,058	A
6 Stall torque	M_N	181	196	189	202	193	mNm
7 Friction torque	M_f	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	mNm
8 Speed constant	k_n	464	304	231	156	116	min^{-1}/V
9 Back-EMF constant	k_E	2,15	3,29	4,33	6,42	8,58	$\text{mV}/\text{min}^{-1}$
10 Torque constant	k_M	20,6	31,4	41,3	61,3	82	mNm/A
11 Current constant	k_I	0,049	0,032	0,024	0,016	0,012	A/mNm
12 Slope of n-M curve	$\Delta n/\Delta M$	28,7	26,4	28	26,7	28	$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$
13 Rotor inductance	L	135	310	540	1 220	2 200	μH
14 Mechanical time constant	T_m	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	ms
15 Rotor inertia	J	25	27	26	27	26	gcm^2
16 Angular acceleration	α_{max}	73	73	74	75	75	$\cdot 10^3 \text{rad}/\text{s}^2$
17 Thermal resistance	R_{th1} / R_{th2}	2,5 / 9				K/W	
18 Thermal time constant	τ_{th1} / τ_{th2}	17 / 660				s	
19 Operating temperature range:							
– motor		-30 ... +125				°C	
– winding, max. permissible		+155				°C	
20 Shaft bearings		ball bearings, preloaded					
21 Shaft load max.:							
– with shaft diameter		5				mm	
– radial at 3 000 min^{-1} (3 mm from bearing)		50				N	
– axial at 3 000 min^{-1}		5				N	
– axial at standstill		50				N	
22 Shaft play:							
– radial	\leq	0,015				mm	
– axial	$=$	0				mm	
23 Housing material		steel, black coated					
24 Mass		175				g	
25 Direction of rotation		clockwise, viewed from the front face					
26 Speed up to	n_{max}	6 000				min^{-1}	
27 Number of pole pairs		1					
28 Magnet material		NdFeB					
Rated values for continuous operation							
29 Rated torque	M_N	40	41	41	41,7	41	mNm
30 Rated current (thermal limit)	I_N	2,5	1,7	1,3	0,89	0,65	A
31 Rated speed	n_N	3 580	3 690	3 690	3 900	3 780	min^{-1}

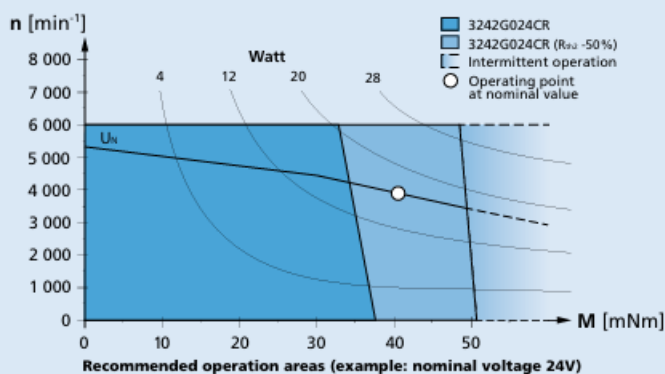
Note: Rated values are calculated with nominal voltage and at a 22°C ambient temperature. The R_{th2} value has been reduced by 25%.

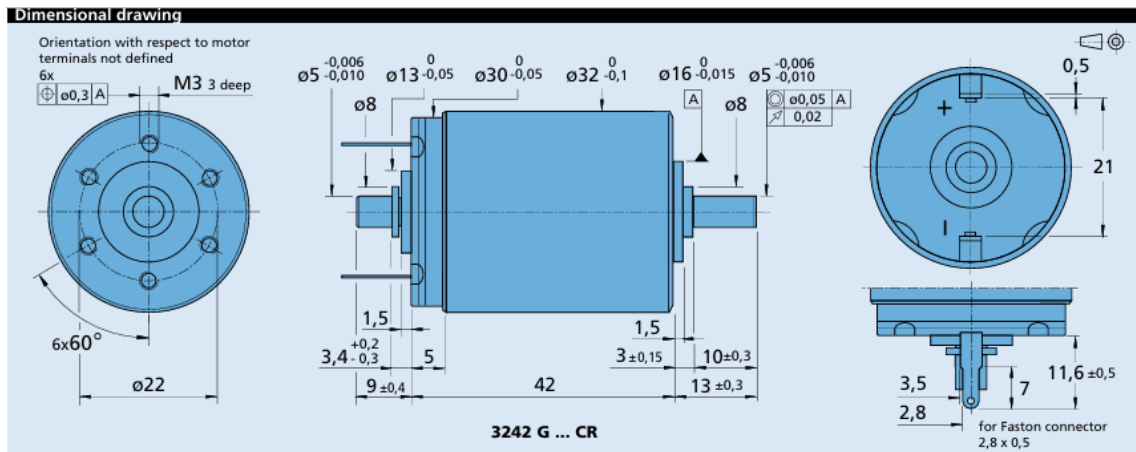
Note:

The diagram indicates the recommended speed in relation to the available torque at the output shaft for a given ambient temperature of 22°C.

The diagram shows the motor in a completely insulated as well as thermally coupled condition (R_{th2} 50% reduced).

The nominal voltage (U_N) curve shows the operating point at nominal voltage in the insulated and thermally coupled condition. Any points of operation above the curve at nominal voltage will require a higher operating voltage. Any points below the nominal voltage curve will require less voltage.





Options

Example product designation: **3242G012CR-158**

Option	Type	Description
U	Single Leads	For motors with single leads (PTFE), length 160 mm, red (+) / black (-)
158	Shaft end	No second shaft end

Product combination

Precision Gearheads / Lead Screws	Encoders	Drive Electronics	Cables / Accessories
32GPT 32/3R 38/1 38/1 S 38/2 38/2 S 42GPT 32L ... TL 32L ... ML 32L ... SB	IE3-1024 IE3-1024 L IERS3-500 IERS3-500 L IER3-10000 IER3-10000 L	SC 2402 P SC 2804 S SC 5004 P SC 5008 S MC 3603 S MC 5004 P MC 5005 S MC 5010 S	MBZ To view our large range of accessory parts, please refer to the "Accessories" chapter.

Vaihdelaatikon tietosivut

Planetary Gearheads

18 Nm

High Torque

10 000 min⁻¹

Series 42GPT

Values at 22°C

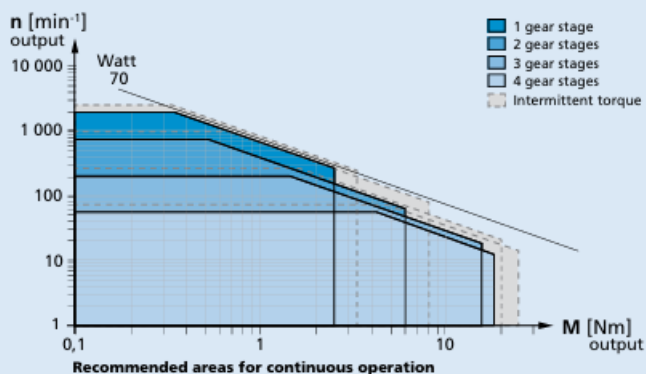
Number of gear stages	1	1	2	2	2	3	4	4
Reduction ratio ¹⁾ (rounded)	3:1	3,6:1 4,5:1 6,6:1	9:1	11:1	14:1 16:1 20:1 24:1 30:1 44:1	41:1 49:1 59:1 72:1 89:1 108:1 131:1 158:1 196:1	178:1 215:1 267:1 323:1 401:1 474:1 588:1 862:1	711:1 1 042:1 1 294:1
Continuous torque, max.	Nm 2,5	2,5	6	6	6	15,5	18	15
Intermittent torque, max.	Nm 3,3	3,3	8	8	8	20	25	20
Peak torque	Nm 4	4	11,5	11,5	11,5	25	34	30
Continuous input speed, max.	min ⁻¹ 5 000	7 000	5 000	7 000	9 000	10 000	10 000	10 000
Intermittent input speed, max.	min ⁻¹ 7 000	9 000	8 000	8 000	12 000	13 000	13 000	13 000
Continuous output power, max.	W 60	60	37	37	37	26	20	20
Intermittent output power, max.	W 90	90	56	56	56	39	30	30
Efficiency, max.	% 93	93	86	86	86	80	74	74
Input inertia with pinion, max.	gmm ² 2 000	1 330	2 000	2 000	920	920	400	355
Torsional stiffness, typical	Nm ² 14	14	22	22	22	22	22	22
Backlash, at no-load, typical	° 0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Shaft load, max.:								
- radial (15 mm from mounting face)	N 200	200	280	280	280	310	390	390
- axial	N 170	170	200	200	200	230	250	250
Shaft press fit force, max.	N 250	250	250	250	250	250	300	300
Shaft play:								
- radial (15 mm from mounting face)	mm ≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,07
- axial	mm = 0	= 0	= 0	= 0	= 0	= 0	= 0	= 0
Length without motor L2	mm 30,8	30,8	43,2	43,2	43,2	55,7	68,1	68,1
Mass without motor and flange	g 275	275	375	375	375	475	575	575
Operating temperature range	°C -30 ... +120							
Direction of rotation, drive to output	=							
Housing material	stainless steel							
Geartrain material	stainless steel							
Bearings on output shaft	ball bearings, preloaded							

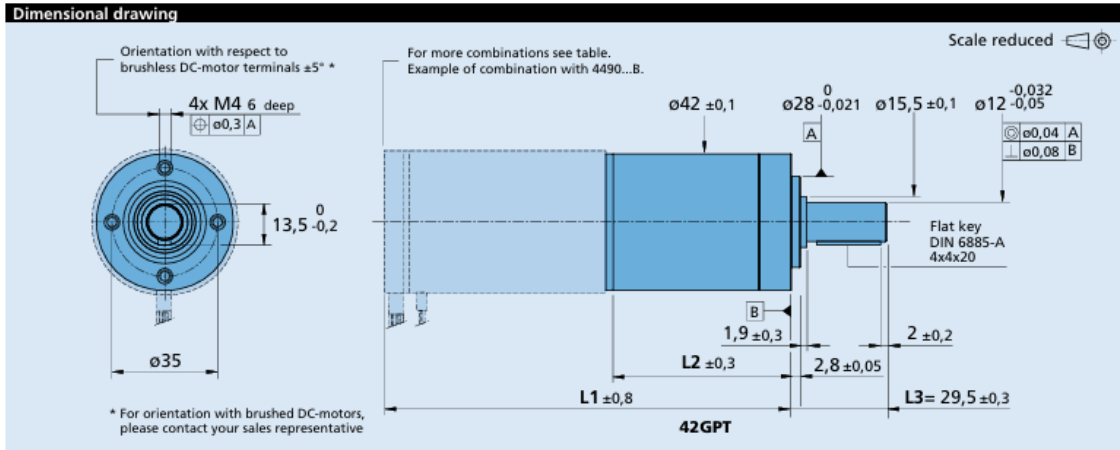
¹⁾ The reduction ratios are rounded, the exact values are available on request or at www.faulhaber.com.

Note:

The display shows the range of possible operation points of the drives at a given ambient temperature of 22°C.

The diagram indicates the recommended output speed in relation to the available torque at the output shaft.





Options

Example product designation: **42GPT 158:1 KS2KL1**

Option	Type	Description
KS2	Output shaft	Longer round plain shaft, L3= 40 mm
KS4	Output shaft	Shaft diameter 10 mm with DIN 6885-A keyway and mating key with dimensions 4x4x18 mm, L3= 26 mm (compatible with 44/1)
KS7	Output shaft	Shaft with 20 mm single flat shape and M5 axial threaded hole, L3= 29,5 mm
KS9	Output shaft	Standard shaft (DIN 6885-A keyway and mating key with dimensions 4x4x20 mm) and with M5 axial threaded hole, L3= 29,5 mm
KP1	Ingress Protection	Gearhead with IP54 ingress protection rating (to be combined with specific protected motor)
KL1	Ambient conditions	Low temperature range of -55°C ... +100°C
KL2	Ambient conditions	Vacuum down to 10 ⁻⁵ Pa @ 22°C
KL3	Ambient conditions	Temperature range of -55°C ... +150°C and vacuum down to 10 ⁻⁶ Pa @ 60°C
KC1	Cable orientation	Motor cable/wires or terminals oriented at 15° CCW vs gearhead front threads
KC2	Cable orientation	Motor cable/wires or terminals oriented at 30° CCW vs gearhead front threads
KC3	Cable orientation	Motor cable/wires or terminals oriented at 45° CCW vs gearhead front threads
KC4	Cable orientation	Motor cable/wires or terminals oriented at 60° CCW vs gearhead front threads
KC5	Cable orientation	Motor cable/wires or terminals oriented at 75° CCW vs gearhead front threads

Note: Specified values may differ from the standard values depending on the option. Please consult your sales representative for further information.

Product combination

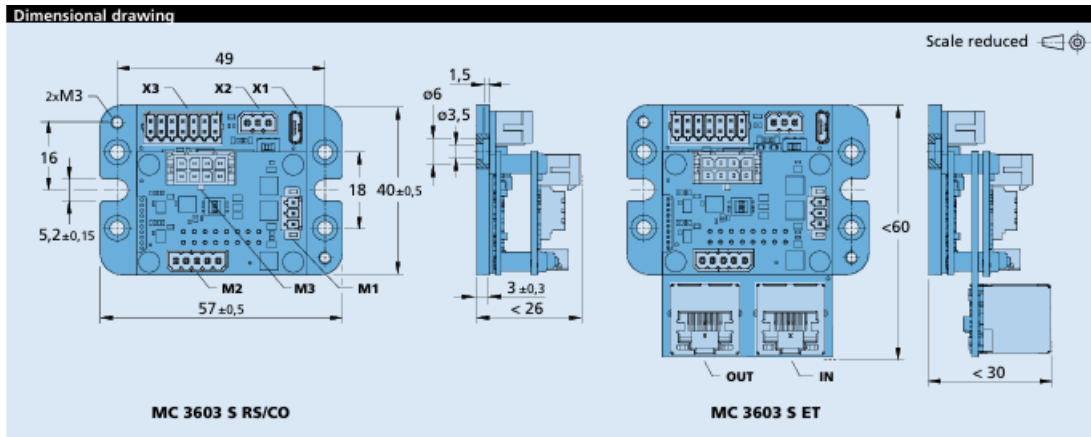
Number of gear stages	1	2	3	4
L2 [mm] = length without motor	30,8	43,2	55,7	68,1
L1 [mm] = length with motor	76,0	88,4	100,9	113,3
3242X...CR	91,0	103,4	115,9	128,3
3272X...CR	106,0	118,4	130,9	143,3
3863X...CR	98,0	110,4	122,9	135,3
3890X...CR	124,0	136,4	148,9	161,3
3242X...BX4	78,2	90,6	103,1	115,5
3268X...BX4	104,2	116,6	129,1	141,5
3274X...BP4	108,0	120,4	132,9	145,3
3564X...B	98,0	110,4	122,9	135,3
4221X...BXTH	56,0	68,4	80,9	93,3
4221X...BXTR	55,2	67,6	80,1	92,5
4490X...B	124,0	136,4	148,9	161,3
4490X...BS	124,0	136,4	148,9	161,3

Liikeohjaimen tietosivut

Motion Controllers

V3.0, 4-Quadrant PWM
with RS232, CANopen or EtherCAT interface

MC 3603 S			
Values at 22°C		MC 3603 S	
Power supply electronic	U_e	6 ... 36	V DC
Power supply motor	U_{mot}	0 ... 36	V DC
PWM switching frequency	f_{swm}	100	kHz
Efficiency electronic	η	95	%
Max. continuous output current	I_{cont}	3	A
Max. peak output current ¹⁾	I_{max}	9	A
Standby current for electronic (@ $U_e=24V$)	I_{st}	RS / CO: 0,05 ET: 0,08	A
Operating temperature range		-40 ... +85	°C
Mass		RS / CO: 45 ET: 68	g
<p>¹⁾ S2 mode for max. 5s</p>			
Interfaces		MC 3603 S RS/CO	MC 3603 S ET
Configuration from Motion Manager 6.7		RS232 / USB	RS232 / USB
Fieldbus		RS232 / CANopen	EtherCAT
Basic features			
<ul style="list-style-type: none"> ■ Control of brushless, DC- and linear motors ■ Supported sensor systems: absolute encoders, incremental encoders (optical or magnetic), Hall sensors (digital or analog), tachometers ■ Positioning resolution when using analog Hall sensors as position encoder: 4096 increments per revolution ■ 3 digital inputs, 2 digital outputs, 2 analog inputs, flexible configuration ■ Setpoint specification via fieldbus, quadrature signal, pulse and direction or analog inputs ■ Optional stand-alone operation via application programs in all interface versions 			
Range of functions			
Operating modes		PP, PV, PT, CSP, CSV, CST and homing acc. to IEC 61800-7-201 or IEC 61800-7-301 as well as position-, speed- and torque control via analog setpoint or voltage controller	
Speed range for brushless motors with number of pole pairs 1		0 min ⁻¹ ... 30 000 min ⁻¹ with sinusoidal commutation (optionally to 60 000 min ⁻¹ with block commutation)	
Application programs		Max. 8 application programs (BASIC), one of which is an autostart function	
Additional functions		Touch-probe input, connection of a second incremental encoder, control of a holding brake	
Indicator		LEDs for displaying the operating state Trace as recorder (scope function) or logger	
Motor types		DC, BL- and linear motors	



Options and connection information

Example product designation: **MC 3603 S ET 6889**

Option	Type	Description	Connection	
			Function	Description
6889	Encoder combination	For DC-Motors with Encoder IE2, IEH2, IEH3, IEH3L	X1	USB configuration interface USB micro connector
6890	Encoder combination	For DC-Motors with Encoder IE3, IER3, IERS3, IE3L, IER3L, IERS3L	X2	Fieldbus RS 232 or CANopen
			X3	Input/Output Motor and electronic power supply, analog and digital input/output
			M1	Motor phases Brushless or DC-Motors
			M2	Hall sensors Digital or analog
			M3	Encoder Absolute or incremental
			IN	Fieldbus EtherCAT IN
			OUT	Fieldbus EtherCAT OUT

Note: For details on the connection assignment, see device manual for the MC 3603. For details on Encoder connections and functions see device manual MC 3603.

Product combination

DC-Motors	Brushless DC-Motors	Linear DC-Servomotors	Cables / Accessories
1319 ... SR 1331 ... SR 1336 ... CXR 1516 ... SR 1524 ... SR 1717 ... SR 1724 ... SR 1727 ... CXR 1741 ... CXR 2224 ... SR 2232 ... SR 2237 ... CXR 2342 ... CR 2642 ... CR 2642 ... CXR 2657 ... CR 2657 ... CXR 2668 ... CR 3242 ... CR	3257 ... CR 1218 ... B 1226 ... B 1628 ... B 1645 ... BHS 1660 ... BHT 2036 ... B 2057 ... B 2214 ... BXT H 2232 ... BX4 2250 ... BX4 2444 ... B 3056 ... B 3216 ... BXT H 3242 ... BX4 3268 ... BX4 4221 ... BXT H	LM 1247 ... 11 LM 1483 ... 11 LM 2070 ... 11	An extensive range of accessories is available for the products of the MC 3603 controller series. Furthermore, connection cables are available for controller and motor supply, sensors and interfaces as well as connector sets for the motor and supply side. To view our large range of accessory parts, please refer to the „Accessories“ chapter.