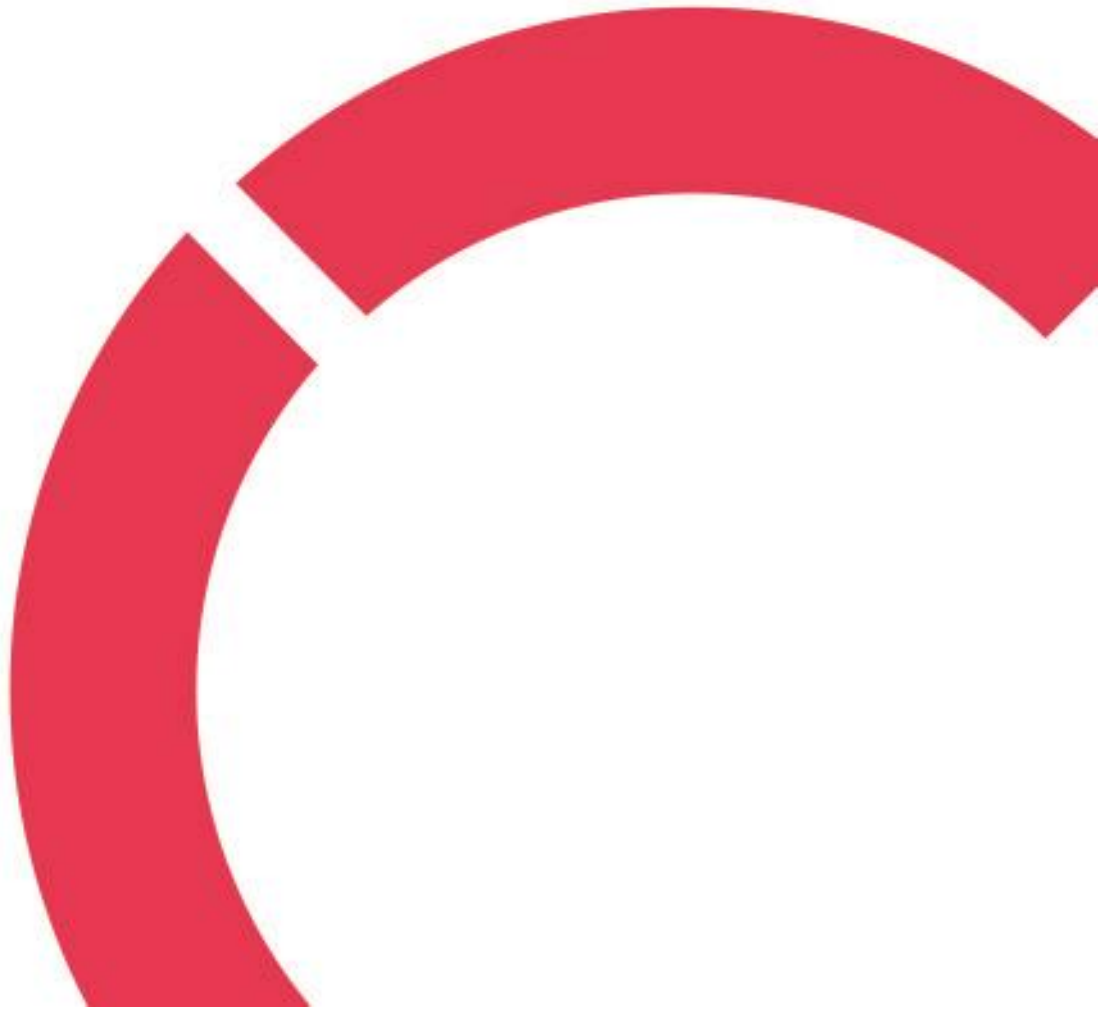


Jere Kalliokoski

IMUSARJAN SUUNNITTELU OM648-MOOTTORIIN

Hyvin virtaava imusarja vaativaan käyttöön

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus
Toukokuu 2024**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2024	Tekijä/tekijät Jere Kalliokoski
Koulutus Insinööri (AMK), Konetekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi IMUSARJAN SUUNNITELU OM648-MOOTTORIIN		
Työn ohjaaja Mika Kumara		Sivumäärä 37 + 3
Työelämäohjaaja -		
<p>Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja valmistettiin imusarja Mercedes-Benzin OM648-moottoriin. Merkittävä tehonnosto ja vakiota pienempi moottoritila synnyttivät tarpeen uudelle imusarjalle. Valmiita kilpailukäyttöön sopivia imusarjoja ei kyseiseen moottorimalliin ole. Täten oli aiheellista suunnitella ja valmistaa sellainen.</p> <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin suunnittelun eri vaiheisiin. Imusarjan suunnittelu pyrittiin yhdistämään teoriaan. Suunnittelussa luotiin erilaisia imusarjamalleja, joille tehtiin virtaussimulaatioita. Virtaussimulaatioita analysoitiin ja virtausteknisiltä ominaisuuksilta mielekkäin imusarja valittiin edelleen kehitettäväksi.</p> <p>Valitulle imusarjamallille tehtiin lujuustarkastelut ja tarvittavat vahvistukset rakenteeseen. Lopuksi mallin mukainen imusarja valmistettiin alumiinista.</p> <p>Opin projektin aikana paljon uusia toimintoja SolidWorksissä, kehityin simulointien luomisessa ja sain käsitystä ilman käyttäytymisestä imusarjassa.</p>		
Asiasanat 3D-mallintaminen, 3D-skannaus, CFD, FEM, ilmanvirtaus, imusarja, moottori,		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2024	Author Jere Kalliokoski
Degree programme Mechanical Engineering		
Name of thesis DESIGN OF THE INTAKE MANIFOLD FOR THE OM648 ENGINE		
Centria supervisor Mika Kumara	Pages 37 + 3	
Instructor representing commissioning institution or company -		
<p>In this thesis, an intake manifold for the Mercedes-Benz OM648 engine was designed and manufactured. A significant power increase and a smaller-than-standard engine bay created the need for a new intake manifold. There are no ready-made intake kits suitable for competition use for that engine model. Thus, it was appropriate to plan and manufacture one.</p> <p>The thesis explored the different stages of planning. The aim was to connect the design of the intake manifold with theory. Different intake manifold models were created in the design, for which flow simulations were performed. Flow simulations were analyzed and the intake manifold with the most meaningful flow technical properties was selected for further development.</p> <p>The selected intake manifold model was tested for strength and the necessary reinforcements were added to the structure. Finally, the intake manifold was made from aluminum based on the model.</p> <p>During the project, I learned a lot of new functions in SolidWorks, improved in creating simulations and got an idea of the behavior of air in the intake manifold.</p>		
<p>Key words 3D modeling, 3D scanning, airflow, CFD, engine, FEM, intake manifold</p>		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

Ahtoilma

Ilma, jonka turboahdin pumppaa kohti imusarjaa.

Ahtoputki

Putket, jotka vievät turbon pumppaaman ilman välijäähdyttimelle ja sieltä edelleen imusarjalle.

Blacksmokeracing

Kokkolalainen driftingiä harrastava tiimi. Kuuluisa farmarikorimallista ja OM648-dieselmoottorista

Blender

Ilmainen kolmiulotteisen mallinnuksen ohjelmisto. Blenderillä onnistuvat muun muassa 3D-mallinnus, animointi ja renderöinti.

CFD-simulointi

Virtauslaskentaa eli kaasujen ja nesteiden virtauksen simulointia (engl. Computational Fluid Dynamics).

Drifting-käyttö

Driftingissä moottoria kuormitetaan rajusti. Driftingiä ajetaan asfaltilla pitävillä renkailla, joten luisassa pitäminen vaatii autolta paljon tehoa koko vedon ajan.

DWG-tiedosto

Kaksi- tai kolmiulotteinen vektorimuotoinen graafinen tiedostomuoto. Erona dxf-tiedostoon ovat saatavuus ja yhteensopivuus.

DXF-tiedosto

Kaksi- tai kolmiulotteinen vektorimuotoinen graafinen tiedostomuoto (engl. Drawing eXchange Format.)

FEM-laskenta

Tietokoneen lujuuslaskentamenetelmä, joka perustuu elementtimenetelmään (engl. Finite Element Method)

Imuputki

Imusarjasta sylinterikanteen johtava putki, on sama kuin primääriputki, ensiöputki tai runneri

Kokoojakammio

Imusarjan osa, joka jakaa ilman tasaisesti imuputkille, on sama kuin plenumi tai painekotelo

SolidWorks

Mekaniikkasuunnitteluohjelmisto, joka sisältää tilavuus- ja pintamallinnustyökalut. SolidWorksiä käytetään erilaisten koneiden, laitteiden ja komponenttien suunnitteluun.

STL-tiedosto

Tiedosto, joka koostuu sarjasta linkitettyjä kolmioita, jotka kuvaavat 3D-mallin pintageometriaa.

Stroukattu

Stroukkaaminen tarkoittaa iskunpituuden lisäämistä.

Vapaavirtausmalli

Simulaatio, jossa ilma virtaa vapaasti imusarjan läpi. Imukanavia ei suljeta ja avata imuventtiilin toiminnan mukaan.

Tig-hitsauskone

Suojakaasuhitsausmenetelmä, jossa valokaari palaa sulamattoman elektrodin ja työkappaleen välissä suojakaasun ympäröimänä.

Transient simulaatio

Simulaatio, jossa imukanavien ilmanvirtaus mukaillee aitoa moottorin toimintaa. Imukanavaa avataan ja suljetaan imuventtiilin aukiolon mukaan sytytysjärjestyksessä. Sylinterit täyttyvät vuoron perään.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

JOHDANTO	1
1 KATSAUS PROJEKTIIN JA TEORIA	3
1.1 Imusarjan toiminta.....	4
1.2 Teoriaa imusarjan muotoilusta.....	4
1.3 Teoriaa kokoojakammioista.....	6
1.4 Teoriaa imuputkista	8
1.5 Imuputken pään muoto	10
2 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT	12
2.1 Koko, muoto ja tilavuus	12
2.2 Materiaali.....	13
2.3 Hinta, valmistettavuus ja asennettavuus	13
2.4 3D-skannaus	13
2.5 3D-suunnittelu	14
3 SUUNNITTELU	15
3.1 Imusarjan mallinnus	15
3.1.1 Imusarjan laipan mallinnus	15
3.1.2 Imusuppilot	16
3.1.3 Imuputket.....	16
3.1.4 Kokoojakammio.....	17
3.2 Imuputkien ominaistaajuuden laskenta	19
3.3 Koesovitus.....	20
4 VIRTAUSSIMULAATIO JA LUJUUSTARKASTELUT	21
4.1 Vapaavirtausmalli	21
4.2 Transient-simulaatio	25
4.3 Kuormitusten tarkastelu	28
4.4 Harmoninen ja dynaaminen värähtely	31
5 IMUSARJAN VALMISTUS	33
5.1 Osien valmistus.....	33
5.1.1 Levyosat	33
5.1.2 Kokoojakammion reunat.....	33
5.1.3 Imuputket.....	33
5.2 Kasaus ja hitsaaminen.....	34
6 ARVIOINTI JA POHDINTA	35
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	36
LÄHTEET	37
LIITTEET	

KUVIOT

KUVIO 1. Dieselmootorin imusarjan osat.....	5
KUVIO 2. Mootorin tilavuushyötysuhde 4- ja 6-sylinterisessä moottorissa.	6
KUVIO 3. Kokoojakammion tilavuuden vaikutus moottorin toimintaan.....	7
KUVIO 4. Imuputken halkaisijan vaikutus tilavuushyötysuhteeseen.	8
KUVIO 5. Imuputken pituuden vaikutus tilavuushyötysuhteeseen.....	9
KUVIO 6. Putkiprofiili ilman pyöristystä	10
KUVIO 7. Putkiprofiili pyöristettynä yksinkertaisella säteellä	11
KUVIO 8. Putkiprofiili elliptisesti muotoillulla päädyllä	11
KUVIO 9. Sylinterikohtaiset massavirrat imusarjassa ilman ohjaavia levyjä	22
KUVIO 10. Kokonaismassavirta imusarjassa ilman ohjaavia levyjä.....	22
KUVIO 11. Sylinterikohtaiset massavirrat, kun ilmaa ohjailaan yksinkertaisilla levyillä	24
KUVIO 12. Kokonaismassavirta, kun ilmaa ohjailaan yksinkertaisilla levyillä.....	24
KUVIO 13. Transient-simulaatio imusarjalle, jossa imusuppilot ovat 30 mm koholla kokoojakammion pohjasta.....	27
KUVIO 14. Transient simulaatio imusarjalle, jossa imusuppilot ovat kokoojakammion pohjalla.....	28

KUVAT

KUVA 1. Creality CR Scan-01 3D-skanneri	14
KUVA 2. 3D-skannerilla luotu kolmiulotteinen malli moottoritulasta.	14
KUVA 3. Imusarjan laipan 3D-malli.....	15
KUVA 4. Imusuppilon 3D-malli	16
KUVA 5. 3D-mallin rakentelua SolidWorksissä.....	17
KUVA 6. Kokoojakammion pohja	17
KUVA 7. Kokoojakammion ulkokuori.....	18
KUVA 8. Keskeltä täyttyvän kokoojakammion malli.	18
KUVA 9. Imusarja koesovitettuna moottoritulasta.....	20
KUVA 10. Imusarjan virtausradat imusarjassa ilman ohjaavia levyjä.	21
KUVA 11. Imusarjan virtausradat, kun ilmaa ohjailaan yksinkertaisilla levyillä.	23
KUVA 12. Sylinterikohtaiset virtausradat transient simulaatiossa.	26
KUVA 13. Väreillä havainnollistetut Von Mises-jännitykset, kun imusarjan sisäpintoihin on kohdistettu 5bar paine.....	29
KUVA 14. Von Mises jännitykset, kun vahvikeprikat lisätty.....	30
KUVA 15. Imusarjan siirtymät väreillä havainnollistettuna.....	30
KUVA 16. Imusarjan värähtelytaajuuden selvittäminen	31
KUVA 17. Imusarjan jännitykset dynaamisen värähtelyn aikana.....	32
KUVA 18. Imusarjan putkiosien sapluunat 3D-tulostettuina.....	34
KUVA 19. Imusarjan viimeinen sovitus ennen lopullista hitsaamista.	34

TAULUKOT

TAULUKKO 1. OM648-mootorin tiedot.	3
---	---

JOHDANTO

Tämän toiminnallisen opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja valmistaa moottorin imusarja. Toiminnallisessa opinnäytetyössä näkyy tutkiva ja kehittävä ote (Vilkkä & Airaksinen 2003, 79). Opinnäytetyön perustana käytetään keskeistä kirjallisuutta aiheesta.

Moottori, johon imusarja tulee, on Mercedes-Benzin kuusisylinterinen 3.2litrainen OM648-rivimoottori. Vakiona se tuottaa 204 hv, mutta viritettynä tavoitteellinen teho on 600 hv. Tämä tehonnosto vaatii virtausteknisesti parempaa imusarjaa. Moottori ei ole alkuperäisessä autonkorissaan. Moottori on siirretty Mercedes-Benz E(S210) -korista Nissan 200sx -koriin. Vakioimusarja ei mahtuisi olemaan omalla paikallaan. Markkinoilta ei löydy kyseiseen moottorimalliin valmista imusarjaa kilpailukäyttöön. Täten on aiheellista suunnitella ja valmistaa tähän imusarja.

Imusarjan suunnittelussa kiinnostavat sen virtaustekniset ominaisuudet. Rakennan kolme eri imusarjamallia ja simuloin niiden virtausteknisiä- ja lujuusominaisuuksia. Aluksi käyn läpi suunnittelun perusteena käytettävää teoriaa. Tästä imusarjasta halutaan toimiva ja kestävä vaatimaan käyttöön, joten suunnittelu täytyy perustua tietoon. Käytän prosessissa apuna alan kirjallisuutta.

Kun teoria on selvää, alan suunnittelemaan. Moottori on sovitettu toiseen autonkoriin, joten on hyvä käyttää apuna 3D-skanneria. Sillä saadaan 3D-malli tilasta, johon imusarjan tulee sopia. Skannaan konehuoneen, jossa moottori on paikoillaan, ja käsittelen 3D-mallin skannerin omalla ohjelmalla STL-muotoon. 3D-mallin siirtelyyn ja imusarjan sovittamiseen käytän Blenderiä.

Imusarjan osat suunnittelen SolidWorksillä. Opintoissani olen käyttänyt pääasiassa SolidWorksiä, joten sen käyttö alkaa olla luontevaa. SolidWorksillä onnistuu myös virtaussimulaatio ja lujuustarkastelut, joita tässäkin työssä hyödynsin.

Pyrin muotoilemaan imusarjan niin, että se sopii annettuun tilaan, ei sisällä jyrkkiä mutkia, on litratilavuudeltaan ohjearvoissa ja on miellyttävän näköinen. Suunnittelussa olennaista on myös valmistettavuus, asennettavuus ja valmistuskustannukset. Imusarja tehdään alumiinista levy- ja putkiosista. Niiden leikkaaminen ja taivuttaminen on halpaa verrattuna valamiseen tai koneistamiseen.

Imusarjat simuloidaan vapaavirtausmallina ja transient-simulaatiolla. Virtaussimulaatiolla pyrin selvittämään eri kokoojakammioiden erot, imusuppiloiden parhaan sijainnin ja ilmaa ohjaavien läppien merkityksen. Virtausteknisiltä ominaisuuksilta mieleisimmästä imusarjasta teen lujuustarkastelut ja tarvittavat muokkaukset rakenteeseen. Valmiin imusarjamallin levyosat teetetään laserleikkausta tekevässä yrityksessä. Putkiosat hankitaan ja leikataan itse. Putkiosien leikkausta helpotetaan 3D-tulostetuilla sapluunoilla. Osat hitsataan yhteen tig-hitsauskoneella.

1 KATSAUS PROJEKTIIN JA TEORIA

Suunnittelen ystävälleni imusarjan Mercedesen turboahdettuun 3.4litraiseen OM648-dieselmoottoriin, joka on siirretty Nissan 200sx s13 -koriin. (TAULUKKO 1.) Alkuperäinen imusarja on ulkoisesti liian suuri, sen painekotelon tilavuus on liian pieni ja virtaavuus heikko suurille tehoille. Moottorin tuottama teho halutaan kolminkertaistaa.

TAULUKKO 1. OM648-moottorin tiedot (mukaillen Auto-data.net)

Valmistaja	Mercedes-Benz
Tuotanto	2002-2006
Kokoonpano	Rivi 6
Iskutilavuus	3222ccm ³ (stroukattuna 3370ccm ³)
Sylinterin reikä	88mm
Männän isku	88,3mm (stroukattuna 92,4mm)
Lohko	Valurauta
Sylinterikansi	Alumiini
Polttoainejärjestelmä	Yhteispaineruiskutus
Polttoainetyyppi	Diesel
Moottorin teho	204 hv
Vääntömomentti	500Nm
Edeltäjä	OM613

Suunnittelen imusarjan käyttäen 3D-skannausta ja 3D-mallinnusta. Valmistuksessa hyödynnän myös 3D-tulostusta. Ystävänä kokoa ja hitsaa imusarjan. Jos imusarjasta tulee toivotun kaltainen, on meillä aikomus tehdä myyntiin pieni erä. Seuraavassa käydään teoriaa, johon imusarjan suunnittelu perustuu.

1.1 Imusarjan toiminta

Nelitahtimoottorin virittämisessä imuilman virtaukseen eli moottorin sisäänhengitykseen sylinterikanalle saakka on syytä perehtyä. Moottorin tehokkuuden kannalta imuilman virtausreitillä tulisi olla mahdollisimman vähän minkäänlaisia virtausvastuksia, jotta sylinterit saataisiin aina imutahdin aikana niin täyteen ilmaa kuin suinkin mahdollista. Jos vakiomoottorin imuilmaputkistossa on virtausvastuksia, voidaan olla varmoja siitä, että viritysastetta nostettaessa kyseinen kohta vastustaa entistä enemmän. Olipa viritysaste mikä hyvänsä, ylimääräisen virtausvastuksen poistaminen vaikuttaa aina positiivisesti moottorin toimintaan. (Bell 2007, luku 2.1.) Ilmanpaine, lämpötila ja kosteus vaikuttavat moottorin toimintaan, mutta kuuluvat enemmän imuilman oton ja ilmanjäähdyttimen suunnitteluun. Tässä työssä keskitytään imusarjaan.

Imusarjan ”virittämisen” perusmekanismi on tuottaa korkea paine imuventtiiliin niin, että massavirtaus sylinteriin lisääntyy tietyllä moottorin kierrosluvulla. Erityisesti on tärkeää, että imuventtiilin luona pidetään yllä korkeaa painetta männän alakuolokohdan aikaan ja juuri ennen imuventtiilin sulkeutumista. Tämä mahdollistetaan hyvin virtaavilla imukanavilla ja hyödyntämällä sylinterin imuputken avoimesta päästä heijastuvaa paineaaltoa. Imusarjan toimintaan vaikuttavat myös kokoojakammion koko ja muoto sekä imuilman tuloaukon sijainti. (Winterbone & Pearson 1999, 14.)

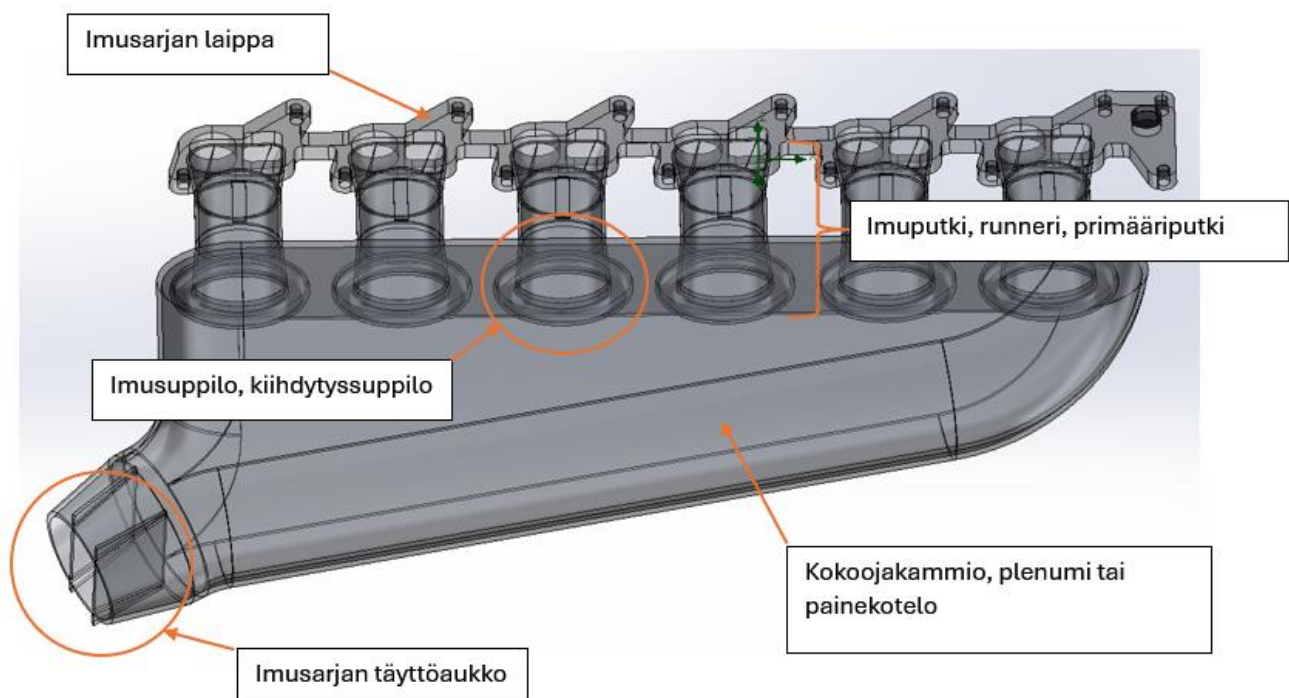
Osa lähdeaineistosta on yli 20 vuotta vanhaa ja siitä käy ilmi, että imusarjan toimintaa on simuloitu jo tuolloin. Todenmukaisen virtausmallin kehittäminen on yleensä vaativa tehtävä, mutta tekniikka on kehittynyt tuon jälkeen huimasti ja virtauksen simuloinnissa voidaan käyttää yhä yksityiskohtaisempia fysikaalisia teorioita (Suvanto 2003, 354). Nykyajan tietokoneella menee simulaation laskemiseen murto-osa siitä ajasta, mitä siihen meni 20 vuotta sitten. Käytetään hyväksi tietokoneen laskukykyä ja tehdään lukuisia simulointeja kokoojakammion toiminnasta tämän opinnäytetyön aikana.

1.2 Teoriaa imusarjan muotoilusta

Auton moottoritila sanelee usein ehtoja imusarjan muotoilulle. Tässä projektissa moottoritila skannataan ja täten saadaan suunnitteluvaiheessa 3D-mallia sovitettua moottoritilaan. Autovirittäjien keskuudessa imusarjan ulkonäkö on myös tärkeä prioriteetti. OM648-moottorissa polttoaine ruiskutetaan hienona sumuna suoraan sylinteriin, joten polttoaineen sekoittumisesta imuilmaan ei tarvitse huolehtia muotoilussa.

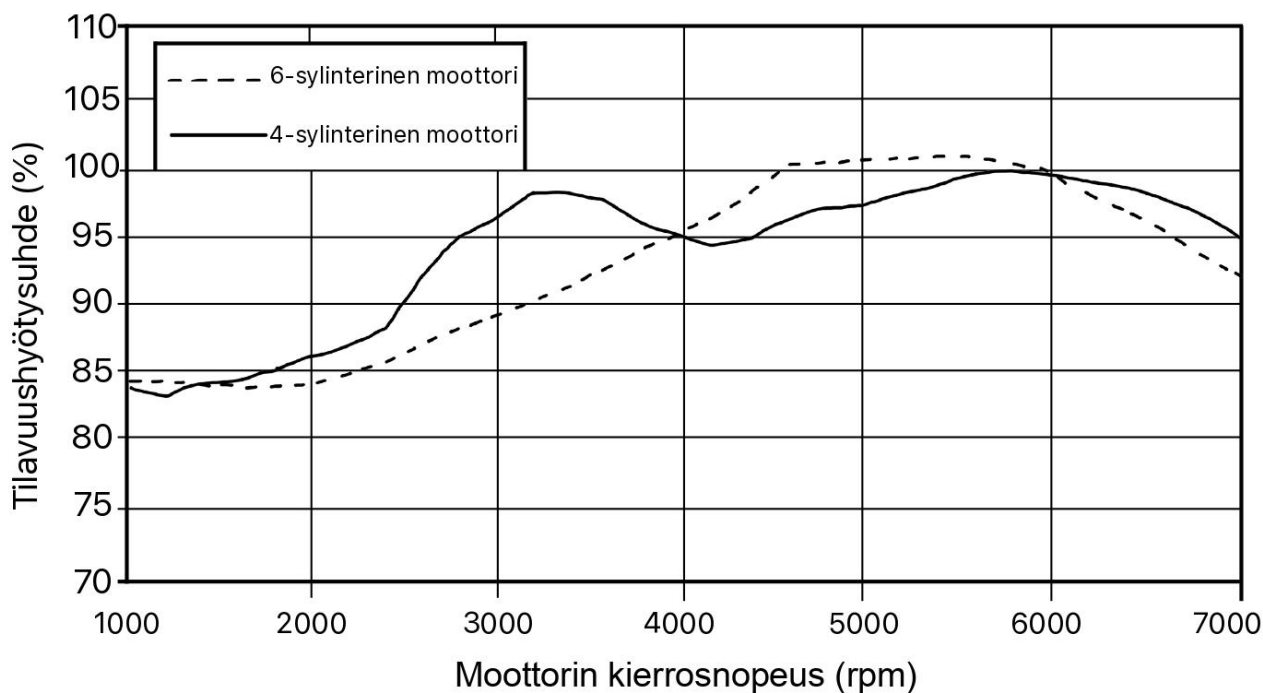
Imusarjan muotoilussa tulee ottaa huomioon ilman virtauksen aiheuttama inertia ja pyörteilyt. Ilma halua jatkaa tasaisessa liiketilassa, ellei siihen vaikuta ulkoisia voimia. Ilman kulkureitin tulee olla jouheva, ilman ylimääräisiä porrastuksia ja teräviä reunoja. Nesteiden ajatteleminen auttaa ymmärtämään, miten ilma virtaa. Yleisesti ottaen ilma virtaa aivan kuten vesi. Äkilliset suunnanmuutokset aiheuttavat turbulenssia, joka rajoittaa virtaustilavuutta. Virtaus tulee pyrkiä pitämään mahdollisimman laminaarina. (How air flows.)

Imusarjaa muotoiltaessa voidaan keskittyä moottorista saataviin hyviin ominaisuuksiin esimerkiksi ottamalla huomioon venttiilien jaksottaisen avautumisen ja sulkeutumisen aikaansaamat painevärähtelyt, joita voidaan käyttää hyväksi sylinterien sisäänhengityksessä. Imusarja koostuu imusarjan laipasta, kunkin sylinterin omasta imuputkesta, joita voidaan pitää sylinterikannen imukanavien jatkeina, ja näiden imuputkien toisessa päässä olevasta imuilman kokoojakammioista (KUVIO 1). Kokoojakammiossa on usein ahtopaineanturi, jonka mittaaman tiedon mukaan polttoaineensyöttöä ja moottorin käyntiä säädetään. Kokoojakammio voi olla puhekielessä esimerkiksi painekotelo tai plenumi. Kaasuläppäkotelo ja polttoainesuuttimia ei dieselmoottorin imusarjassa ole pois lukien uudemmat dieselmoottorit, joihin on sovellettu kaasuläppä. (Bell 2007, Luku 2.14.)



KUVIO 1. Dieselmoottorin imusarjan osat

Käyttämäni aineiston mittaukset on tehty pääosin 4-sylinterisellä moottorilla, jonka yksikammioinen imusarja käyttäytyy hieman eri tavalla kuin 6-sylinterinen moottori yhdellä kammiolla. Täten kuvioita 2–4 ei voida suoraan verrata 6-sylinteriseen moottoriin, mutta kuvioista käyvät ilmi muutosten trendit. 4-sylinterisen moottorin tilavuushyötysuhdekäyrässä on kaksi huippua, kun 6-sylinterisen käyrässä on vain yksi (KUVIO 2).



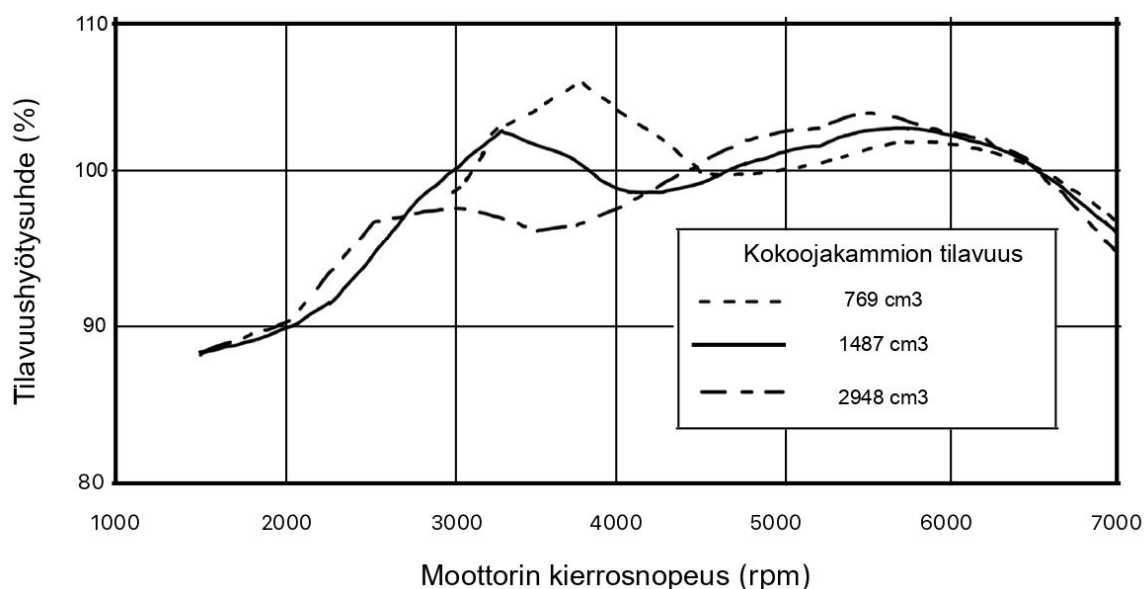
KUVIO 2. Moottorin tilavuushyötysuhde 4- ja 6-sylinterisessä moottorissa (mukaiillen Winterbone & Pearson 2000, 442)

1.3 Teoriaa kokoojakammioista

Kokoojakammion tulisi ihannetapauksessa toimia niin, että se kaikissa olosuhteissa jakaisi imuilman tasasuuruksena kunkin sylinterin imuputkelle ja että ilman virtaus tapahtuisi mahdollisimman vapaasti. Sopiva kokoojakammion tilavuus on 0,8–1,5-kertaa moottorin tilavuus. (Bell 2007. Luku 2.15.)

Kokoojakammion sopivasta tilavuudesta on ristiriitaista tietoa. Itse olen kuullut, että kokoojakammion tilavuus tulisi olla 1,7–2,5-kertainen moottorin iskuilavuuteen nähden. Sopivan kokoojakammion tilavuuden määrittelyssä tulee ottaa huomioon käytettävä polttoaine. Dieselmootoreissa käytetään usein korkeampaa ahtopainetta ja ilman kokonaismassavirta on suurempi.

Selvää on, että kokoojakammion tilavuudella on vaikutusta moottorin toimintaan (KUVIO 3). Kyseisessä mittauksessa moottori oli 4-sylinterinen 1.6 litran iskutilavuudella ja siinä mitattiin tilavuushyötysuhdetta erikokoisilla kokoojakammioilla muuttamatta muita tekijöitä. Mittauksessa on käytetty huomattavan erikokoisia kokoojakammioita, jotta vaikutukset on saatu selkeästi näkyviin. Suuri kokoojakammio on huonoin alhaisilla kierrosnopeuksilla ja paras korkeilla kierrosnopeuksilla. Pieni tilavuukokoojakammio on päinvastoin paras alhaisilla kierrosnopeuksilla ja huonoin korkeilla kierrosnopeuksilla. Isolla kokoojakammioilla saadaan paras huipputeho. Keskikokoinen kokoojakammio on hyvä kompromissi. Kuviossa 2 keskikokoinen kokoojakammio on hieman moottorin iskutilavuutta pienempi.



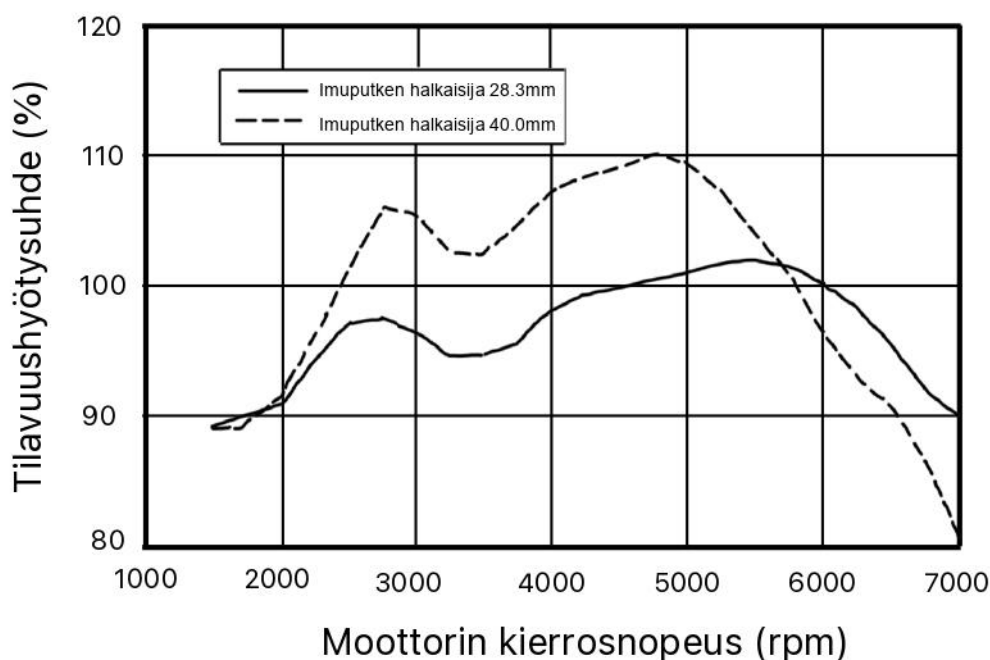
KUVIO 3. Kokoojakammion tilavuuden vaikutus moottorin toimintaan (mukaillen Winterbone & Pearson 1999, 171)

Kokoojakammiot rakennetaan usein niin, että imuilma tulee sisään kotelon päädystä. Imuilmapiputken on luontevaa mennä kotelon päädystään, koska etenkin turboahdetuissa moottoreissa imuilmaa jäähdytetään ja jäähdytin sijaitsee moottorin edessä, josta on lyhin matka kotelon päädystään. Kunkin sylinterin imuputken etäisyys kokoojakammion imuilma-aukosta eroaa ja on mahdollista, että sylinterit eivät täyty tasaisesti. Tällaiset kokoojakammiot toimivat kuitenkin jopa hämmästyttävän hyvin. Merkittävät

sylinterikohtaiset erot tulevat esiin vasta kun viritystasetta nostetaan runsaasti. Tavanomaisissa huippuviritteisten moottoreiden tutkimustuloksissa ilmantuloaukkoa lähinnä olevien sylintereiden täytös on 3–5 prosenttia keskiarvoa alhaisempi ja kaukaisimpien sylintereiden täytös on 5–7 prosenttia keskiarvoa korkeampi. Ääritapauksissa sylinterikohtaiset erot saattavat aiheuttaa moottorivaurion. Kokoojakammio ei siis ole yhdentekevä osa virittämisessä, mutta vieläkin merkityksellisempi rooli on sylinterikanteen johtavilla imuputkilla. (Bell 2007. Luku 2.15.)

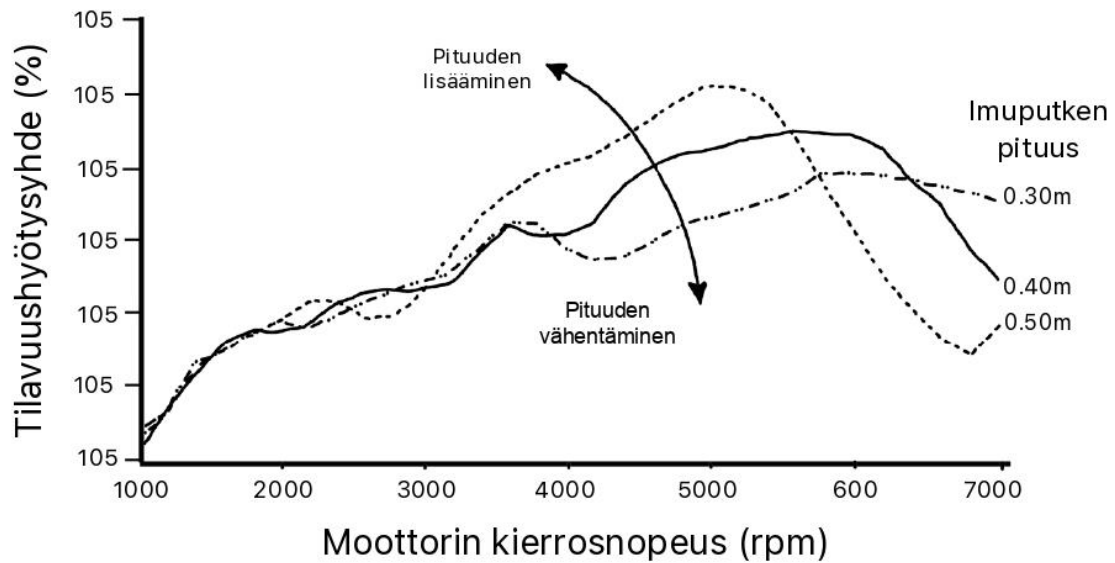
1.4 Teoriaa imuputkista

Imuputken halkaisijalla ja pituudella on vaikutusta moottorin toimintaan. Imuputken halkaisijan kasvattaminen nostaa tilavuushyötysuhdekäyrää lähes koko kierrosnopeusalueella (KUVIO 4).



KUVIO 4. Imuputken halkaisijan vaikutus tilavuushyötysuhteeseen. Mukailten (Winterbone 1999, 174)

Hyvä perussääntö imuputkien mitoituksessa on se, että mitä lyhyemmät ja suuremmalla halkaisijalla imuputket ovat, sitä suurempi on moottorin huipputeho ja sitä korkeammalla käyntinopeudella se esiintyy. Vastaavasti imuputkien läpimitan pienentäminen ja imuputkien pidentäminen parantavat moottorin tehokkuutta ja vääntöominaisuuksia alemmilla pyörintänopeuksilla (KUVIO 5). (Bell 2007, Luku 2.15.)



KUVIO 5. Imuputken pituuden vaikutus tilavuushyötysuhteeseen (mukaillen Winterbone & Pearson 2000, 441)

Moderneissa henkilöauton moottoreissa on muuttuvapituuksista imusarjaa. Etenkin vapaasti hengittämissä moottoreissa sillä voidaan parantaa hyötysuhdetta. Moottoriurheilun parissa en ole havainnut muuttuvapituuksista imusarjaa, vaikka joudutaankin tekemään kompromissi ja valitsemaan millä kierrosalueella toimiva imusarja hankitaan. Moottorin rakennuksessa on useita muita tekijöitä, joita muuttamalla moottorin toiminta saadaan halutun kaltaiseksi, joten monimutkaiselle imusarjalle ei nähdä tarvetta.

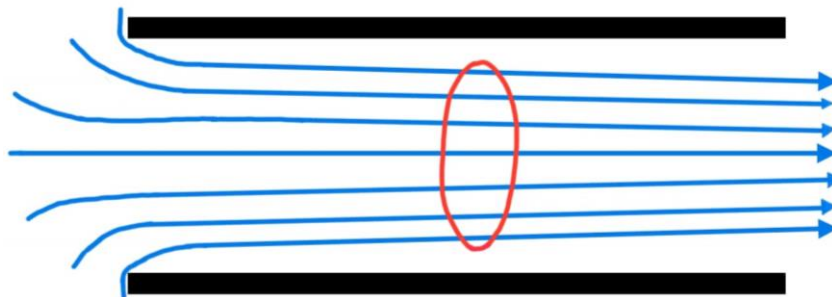
Imusarjan toiminnassa voidaan pyrkiä hyödyntämään kaasun värähtelyn resonanssia kaasunvaihdossa. Kun mäntä liikkuu alaspäin imuvaiheen aikana, yläpuolinen tilavuus kasvaa, jolloin sylinterin paine pyrkii laskemaan. Tämä aiheuttaa paineaallon, joka heijastuu imuputken avoimesta päästä takaisin. Kun tämä paineaalto saapuu juuri oikeaan aikaan imuventtiilille, saadaan sylinteriin entistä parempi täytös. Imuputkelle on laskettavissa luonnollinen taajuus, jolla paineaallot heijastuvat. Imuputki voidaan mitoittaa niin, että paineaallon vaikutus on halutulla, mutta suhteellisen kapealla pyörintänopeusalueella. Tätä kutsutaan Helmholtz-resonaattoriksi ja ”inertiaviritykseksi”. Turboahdetuissa moottoreissa turboahdtimeen pumppaama massavirta on lineaarisempaa kuin vapaasti hengittämissä, joten resonanssin hyöty ei ole yhtä merkittävää (Winterbone & Pearson 1999, 14.)

$$f = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{F}{LV}\right)} \quad (1)$$

Helmholtzin resonaattorin laskentakaavassa ilmapatsaan värähtelytaajuus f voidaan laskea äänennopeuden α , putken poikkipinta-alan F , putken pituuden l ja sylinteritilavuuden V avulla. (Winterbone & Pearson 1999, 161).

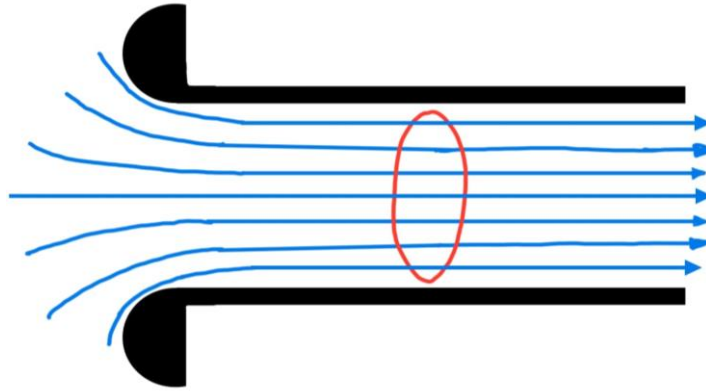
1.5 Imuputken pään muoto

Imuputken pään muotoilulla voidaan parantaa imuputkien tehollista poikkipinta-alaa. Ilmamassan virtausnopeus kasvaa, kun se siirtyy kokoojakammion suuresta tilavuudesta imuputkeen. Virtaus haluaa seurata imuputken päässä putken pintaa, mutta inertian vaikutuksesta ”irtoaa” putken seinämästä, jos putken päässä on terävä reuna tai mutka liian pienellä pyöristyksellä. Tämä aiheuttaa imuputkeen vena contracta-alueen eli imuputken suuaukon sisäreunassa paikallaan pysyvä ilmassa tukkii ilman kulua ja näin pienentää putken tehollista poikkipinta-alaa (KUVIO 6). Sama ilmiö toistuu kaikkialla imuilman reitin terävissä reunoissa ja kulmissa. Kuvion 6 kaltainen suora pääty ei ole hyvä imuputkeksi. (The right bellmouth 2012).



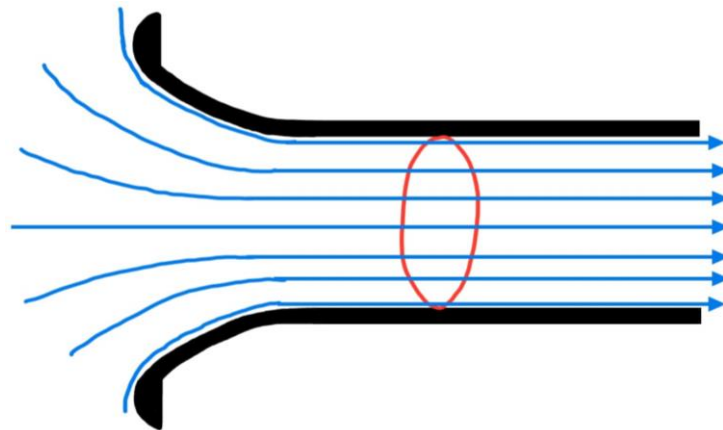
KUVIO 6. Putkiprofiili ilman pyöristystä (mukaillen Blair & Cahoon)

Yksinkertaistettuna imuputken pääty voidaan pyöristää yksinkertaisella säteellä tai pääty voidaan muotoilla elliptisesti. Tutkimuksissa elliptinen päädyn muoto on osoittautunut parhaimmaksi. Valmistusteknisistä ja taloudellisista syistä usein päädytään kuitenkin yksinkertaiseen säteeseen. Imuputken päädyn muotoilun vuoksi sitä kutsutaan imusuppiloksi tai kiihdytysuppiloksi. Kuviossa 7 putken sisäreunoihin ei muodostu merkittävää hitaan ilmassan aiheuttamaa tukosta. Yksinkertaisella säteellä pyöristetyn putken ilmassavirta on noin 16 % suurempi kuin putkessa ilman pyöristystä (KUVIO 7). (Blair & Cahoon).



KUVIO 7. Putkiprofiili pyöristettynä yksinkertaisella säteellä (mukaiillen Blair & Cahoon)

Tutkimuksissa osoitetaan, että parhaat mitat elliptiselle imusuppilolle saadaan, kun imusuppilon korkeus ja imuputken halkaisija ovat samansuuruiset sekä imusuppilon sisääntulohalkaisija on 2,13 kertaa imuputken halkaisija. Tällöin imusuppilon kulmasäteen suuruus olisi hyvä olla 0,08 kertaa sisääntulohalkaisija. Elliptisen imusuppilon hyöty suhteessa yksinkertaisesti pyöristettyyn imusuppiloon on noin 4 % suurempi ilmamassavirta (KUVIO 8). (Blair & Cahoon).



KUVIO 8. Putkiprofiili elliptisesti muotoillulla päädyllä (mukaiillen Blair & Cahoon)

2 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT

Tässä projektissa imusarja suunnitellaan OM648-moottoriin, jonka teho aiotaan kolminkertaistaa. Moottoria kehitetään soveltumaan drifting-käyttöön, jossa siltä vaaditaan paljon tehoa. Ajaessa moottoria käytetään varsin korkeilla kierrosnopeuksilla. On selvää, että moottorin ”hengitystä” tulee parantaa. Imusarjan suunnittelu on osa moottorin muutostöitä, mutta ei suinkaan ainoa. Imusarjan toivotaan toimivan hyvin 3 000–6 000 rpm välillä ja mahdollistavan hyvän huipputehon. Maksimaalinen ahtopaine tulee olemaan vakion 1,35 bar sijaan noin 4 bar. Nämä tavoitteet vaativat kestävän imusarjan alhaisella virtausvastuksella.

2.1 Koko, muoto ja tilavuus

Moottoritila antaa omat ehtonsa imusarjan muotoilulle. Imusarjan tilaa rajaavat kyseisessä moottoritilassa ainakin öljynsuodatin, öljynlauhdutin, runkoaisa ja jarrutehostin. Mielestäni tässä kohteessa imusarjalle on tilaa melko hyvin. 3D-skannattu tila helpottaa suunnittelua ja koesovittamista, koska voidaan olla varmoja sopivuudesta ennen varsinaisen osan valmistamista.

Muotoa määrittää ilmavirran tyypillinen kulku. Mutkien tulee olla jouhevia ja ylimääräisiä porrastuksia ei tulisi olla, jotta välttyään pyörteiltä ja ilman kulkua ahdistavilta hitaan virtauksen aiheuttamilta tulpilta. Toinen muotoa määrittelevä tekijä on valmistusmenetelmä. Imusarja tehdään levy- ja putkiosista. 4-tuumainen alumiiniputki antaa sopivaa pyöreyttä imusarjan kokoojakammionle. Lisäksi muotoon vaikuttaa suunnittelijan mielikuvat, näkemykset ja kokemukset erilaisista imusarjoista.

Imusarjalta toivotaan hyvää huipputehoa ja toimivuutta korkeilla kierroksilla, joten aiemmin esitellyn teorian nojalla imusarjan tilavuudeksi tavoitellaan noin 2 kertaa moottorin sylinteritilavuus. Tilavuus nähdään 3D-mallista, kun malli on valmis. Moottoritilassa taaimman sylinterin imuputkelle ei ole paljoa tilaa, joten imuputkista tehdään melko lyhyet ja paksut. Niiden pitäisi olla virtausvastukseltaan pienet ja näin ollen toimia korkeilla kierrosnopeuksilla. Rajallisen tilan vuoksi imuputkia ei voida mitoittaa vapaasti. Voimme kuitenkin laskea, millä kierrosalueella toteutunut imuputki toimii optimaalisesti.

2.2 Materiaali

Yleinen henkilöauton imusarjan valmistusmateriaali on nykyään muovi. Muovi on halpaa, sitä on helppo työstää ja sillä on hyvä paino-lujuus-suhde. Yksittäiskappaleita saa jopa 3D-tulostettua kotio-oloissa. Sopiiko se kuitenkin vaativaan käyttöön? Lujuudessa ja lämmönkestossa muovi häviää alumiinille, jos materiaalin tilavuus otetaan huomioon. Alumiini taitaakin olla toiseksi yleisin imusarjan valmistusmateriaali. Se on kevyttä, lujaa ja sen työstömenetelmät ovat kehittyneet ja yleistyneet. Imusarjoja valmistetaan alumiinista valamalla, koneistamalla ja hitsaamalla levy- ja putkiosista. Näistä viimeisin on edullisin ja siksi valikoitui valmistusmenetelmäksi tähän imusarjaan. Alumiinista on kokemusta ja tietoa, että sillä tarvittavat ominaisuudet saadaan aikaan.

2.3 Hintaa, valmistettavuus ja asennettavuus

Varsinaista budjettia tälle imusarjalle ei olla laadittu. Tiedossa on, että levy- ja putkiosista materiaalikustannukset ovat edulliset. Imusarjaa suunniteltaessa on hyvä miettiä imusarjan valmistettavuutta. Pyritään minimoimaan työvaiheet, jotta imusarjan valmistus olisi mahdollisimman yksinkertainen. SolidWorksistä löytyy hyvä työkalu levyosien suunnitteluun. Otetaan suunnittelussa huomioon myös asennettavuus. Tavoitteena on, että imusarja asettuu paikalleen helposti ja kaikki pultit on mahdollista asentaa ja kiristää hyvin. Asennettavuutta voidaan tutkailla asettamalla imusarjan 3D-malli skannattuun moottoritilaan.

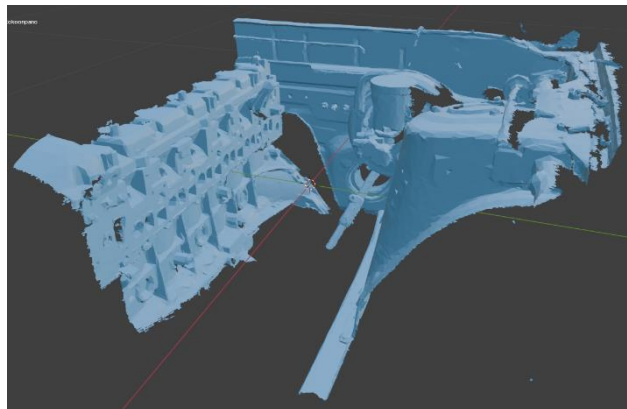
2.4 3D-skannaus

3D-skannaus on nykyaikainen menetelmä, jolla saadaan 3D-ympäristöön luotua aidonkokoinen tila. 3D-skannerin tarkoitus on tuottaa dataa kohteen muodosta ja ulkonäöstä (3D-CAD Solutions). 3D-skannaus tulee kyseeseen moniulotteisissa ja hankalasti mitattavissa kohteissa. 3D-skannaus on hyvä vaihtoehto, jos käytettävissä oleva tila on rajallinen ja suunnittelu vaatii tarkkuutta. Kelpo 3D-skannerien hinnat ovat tulleet alaspäin ja ovat harrastelijan hankittavissa. Minulla on Creality CR Scan 01 (KUVA 1), jonka mainostettu tarkkuus on 0,1 mm. Tästä en mene takuuseen, mutta tarkkuus on riittävä juuri tällaisiin kohteisiin. Kyseisen skannerin hinta on markkinoilla 600–700 €. Skanneri on kevyt pienikokoinen käsin kannateltava laite. Laitetta liikutetaan hitaasti ja seurataan kohteen pintaa noin

800 mm etäisyydellä. Crealityllä on oma tietokoneohjelma, jolla skannaus käsitellään niin, että saadaan muodostuneesta pistepilvestä ehjä pinta. Skannasin kyseisellä skannerilla Nissan 200sx moottoritalan, johon on sovitettuna Mercedes-Benzin OM648-moottori. Näin saatiin tila, johon imusarjan tulee sopia. Tähän 3D-ympäristöön imusarjamallia on helppo koesovittaa (KUVA 2).



KUVA 1. Creality CR Scan-01 3D-skanneri



KUVA 2. 3D-skannerilla luotu kolmiulotteinen malli moottoritalasta.

2.5 3D-suunnittelu

3D-suunnittelu toteutetaan SolidWorks-ohjelmalla. SolidWorks on 3D-suunnitteluohjelma, joka on laajasti käytössä ympäri maailmaa. Käyttöliittymä on mielestäni selkeä ja perustoiminnot voi oppia kohtalaisen nopeasti. Laajuutensa takia SolidWorksistä oppii joka päivä jotain uutta. Siihen löytyy kattavasti ohjeita ja ohjevideoita netistä. Opinnoissani 3D-suunnittelussa olen käyttänyt pääasiassa kyseistä ohjelmistoa, joten sen osaan parhaiten. Mallinnan imusarjan osissa siten kuin se toteutetaan ja yhdistelen osat kokonaisuudeksi. Imusarjakokonaisuuksia sovitan Blender-ohjelmistossa konehuoneeseen. Oman kokemukseni mukaan Blenderissä on helpoin liikutella kappaleita haluamallaan tavalla.

3 SUUNNITTELU

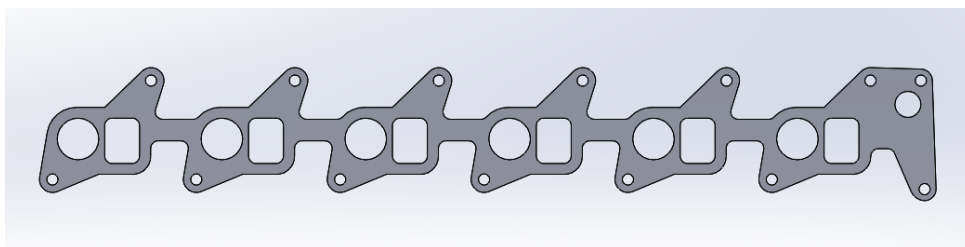
Suunnittelu sisältää useita eri vaiheita. Siinä kokeillaan ja visioidaan monenlaisia ratkaisuja sekä käydään vuoropuhelua asiakkaan kanssa. Pyritään pitämään mielessä kaikki tärkeimmät tavoitteet, kuten valmistettavuus, kustannukset, asennettavuus, virtausominaisuudet, kestävyys ja ulkonäkö. Näiden tavoitteiden rajoissa voidaan sopivaa kompromissia. Suunnittelijan ajatuksenjuoksu on luovaa ja sitä voi olla haastava kuvailla. Pyrin parhaani mukaan esittämään suunnittelun vaiheet eri vaihtoehtoiseen ja ratkaisuineen. Imusarjamallin 3D-suunnittelu etenee yhtäaikaisesti virtaussimuloinnin ja lujuustarkasteluiden kanssa.

3.1 Imusarjan mallinnus

Luodaan imusarjasta kolmiulotteinen malli, josta saadaan piirustukset, mitat ja mallit kaikille tarvittaville osille. Kolmiulotteiselle mallille voidaan tehdä virtaussimulaatiot ja lujuustarkastelut SolidWorksissä. Lujuustarkastelua varten asetetaan imusarjalle materiaali.

3.1.1 Imusarjan laipan mallinnus

Imusarjan mallinnus on luonteva aloittaa imusarjan laipasta, koska sen muoto on tiedossa (KUVA 3). Käytin mallinnuksessa apuna moottorin alkuperäistä imusarjaa. Laipan paksuus valittiin aiemman kokemuksen pohjalta. 10 mm paksu alumiinilaippa on todettu hyväksi imusarjoissa. Lujuustarkastelussa tämä vielä varmistuu. SolidWorksissä tästä laipan 3D-mallista mallista saadaan helposti oikeassa muodossa oleva tiedosto laser- tai plasmaleikkurille. Kaksiulotteisille leikkauksille käytettävät yleiset tiedostomuodot ovat DXF (Drawing Interchange Format) ja DWG (lyhenne sanasta Drawing).



KUVA 3. Imusarjan laipan 3D-malli

3.1.2 Imusuppilot

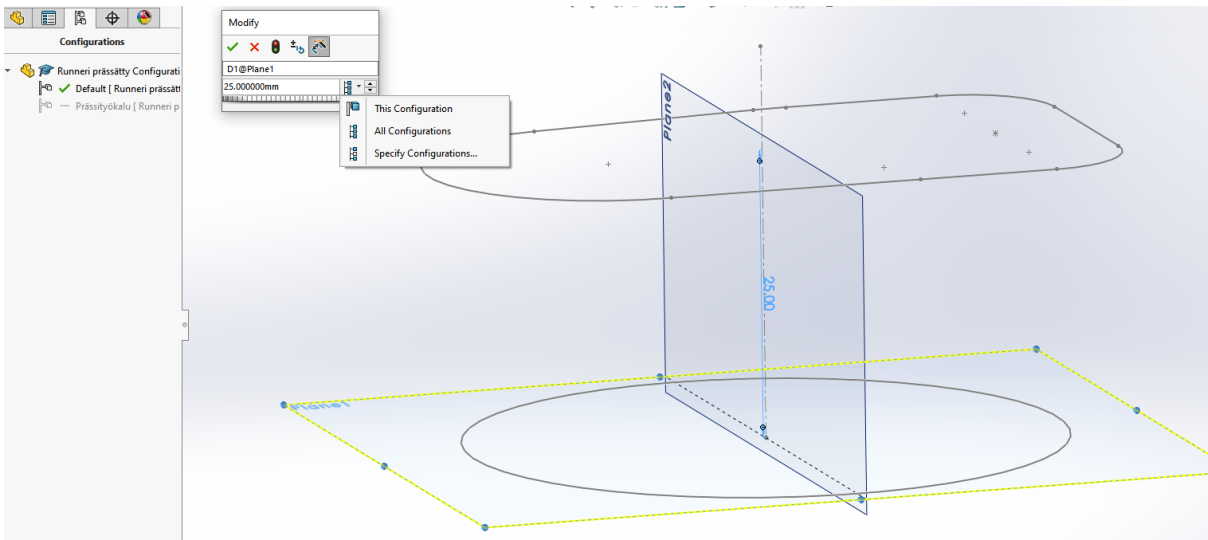
Valmiit sopivat imusuppilot löydettiin edullisesti nettikaupasta, joten mallinsin ne oikean osan mittojen mukaan (KUVA 4). Imusuppilot on tehty alumiiniputkesta, jonka sisähalkaisija on 46 mm ja seinämävahvuus 2 mm. Seinämävahvuus arveluttaa, mutta lujoustarkastelussa selviää riittääkö se. Näiden imusuppiloiden sisääntuloaukkoa on levennetty kartiotyökalulla ja imusuppilon reuna on pyöristetty. Tämän imusuppilon malli on geometrisesti jotain elliptisen ja yksinkertaisesti pyöristetyn imusuppilon väliltä ja voidaan olettaa, että toimivuus on myös niiden väliltä.



KUVA 4. Imusuppilon 3D-malli

3.1.3 Imuputket

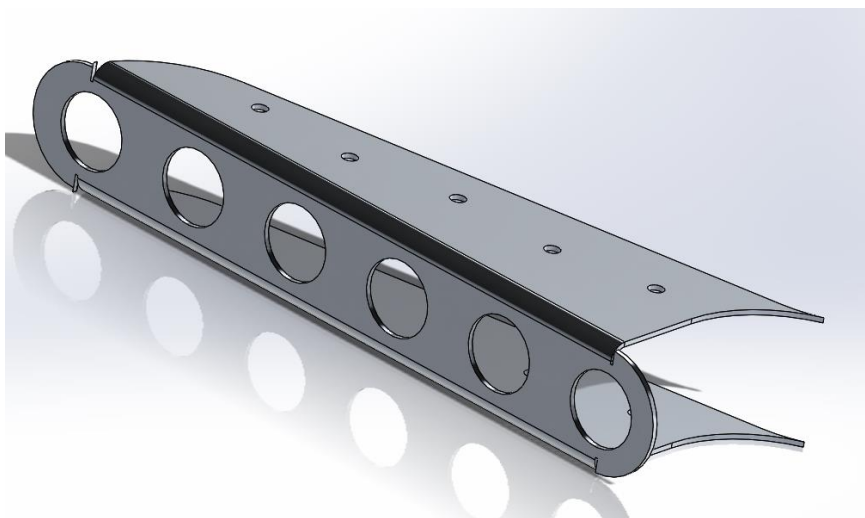
Imusarjan laipan ja imusuppiloiden väliin mallinsin lyhyen putken, joka prässäämällä sopisi toisesta päästä imukanavien muotoon. Imuputket ovat alumiiniputkea 46 mm sisähalkaisijalla ja 2 mm seinämävahvuudella. Putken poikkipinta-ala on tällöin lähellä moottorin imukanavien poikkipinta-alaa ja putki saadaan muotoiltua imukanavien muotoon. On tärkeää rakentaa kolmiulotteinen malli niin, että sen mittoja voidaan muuttaa jälkeenpäin (KUVA 5). Ei suinkaan ole poikkeuksellista, että mittoja muutetaan useaan kertaan suunnittelun aikana. Imuputken tarkka pituus ei ole tässä vaiheessa tiedossa. Imuputken ja imusuppilon yhteispituudeksi tuli lopulta 110 mm. Tällöin koko imukanavan pituus imuventtiililtä kokoojakammioon on 210 mm.



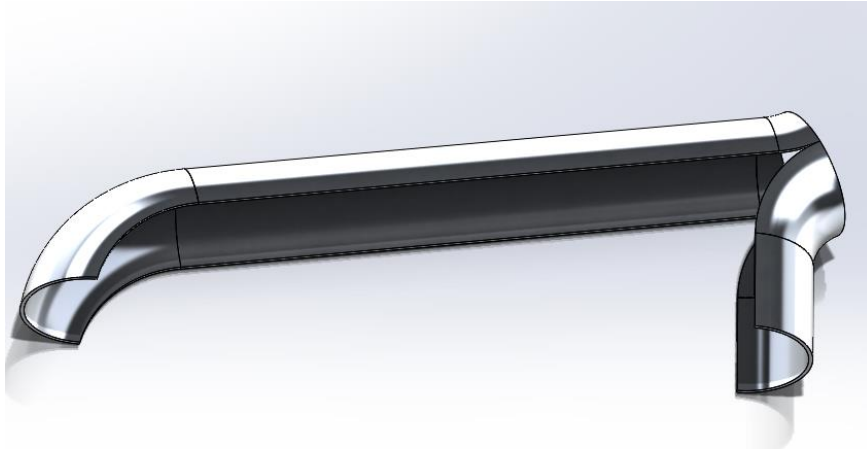
KUVA 5. 3D-mallin rakentelua SolidWorksissä

3.1.4 Kokoojakammio

Kokoojakammio tehtiin osista. Aluksi mallinsin kokoojakammion pohjan, johon tein sopivalla jaolla reiät imusuppiloille. Päädyn muotoilin 4 tuuman putken muotoon, jonka jälkeen lisäsin särmäykset ja vedin reunoja 200 mm ulospäin. Tässä vaiheessa aloin rakentamaan kokoonpanoa, johon kiinnitin valmiina olevat osat. Kokoonpanopuolella sain piirrettyä tämän levymallin kyljet tarkasti putkista tehtävien kotelon ulkokuorien mukaan. Kokoojakammion paksuudeksi valittiin taas aiemman tiedon pohjalta 4 mm. Lujuustarkastelu osoittaa, riittääkö paksuus. Suunnitteluvaiheessa kokoojakammioista oli eri malleja. Kuvassa 6 on lopullinen malli



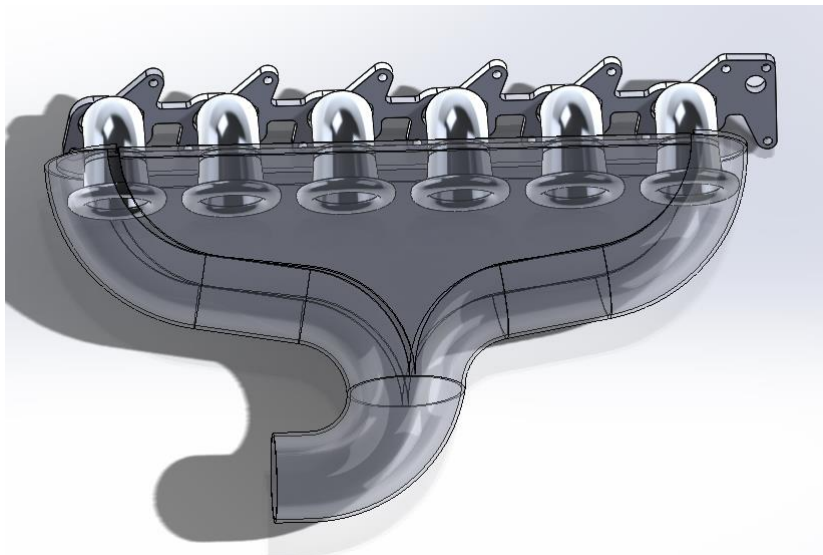
KUVA 6. Kokoojakammion pohja



KUVA 7. Kokoojakammion ulkokuori

Kokoojakammion ulkokuoren mallinsin 4” alumiiniputken puolikkaan poikkileikkauksen ja ohjaavien käyrien avulla ”sweep”- työkalulla (KUVA 7).

Tavoitteena oli sylinterikohtaisesti tasaiset virtaukset, joten ensiksi mallinsin imusarjan, jonka täyttö tulisi kokoojakammion keskeltä (KUVA 8). Tällaisia keskeltä täyttyviä kammioita on jonkin verran näkynyt moottoriurheilun parissa. Tilanpuutteen vuoksi en saanut tästä sen muotoista kuin halusin. Ahtoilmaputken reititys meni haastavaksi ja täyttöaukon jälkeen kammio laajeni liian jyrkästi tasaista virtausta ajatellen. Virtaussimulaatiossa havaitsin, että ahtoilmaputken tulosuunta huomioiden ilma haluaa painautua kammion takaosaan. Tässä vaiheessa päätimme kokeilla toista imusarjamallia.



KUVA 8. Keskeltä täyttyvän kokoojakammion malli

Rakensin yleisemmän mallin, jossa ahtoilma tulee kammion päädyistä ja täyttöaukko on suunnattu sylinteriä kohti. Tästä imusarjasta tein kaksi eri kokoa, joista virtausvastukseltaan pienempi ja sylinterikohtaisilta paineiltaan tasaisempi imusarjakoko valittiin. Imusarjat olivat paksuudeltaan 89 mm ja 100 mm. Saman kappaleen mallintaminen eri mitoilla on sujuvaa tekemällä eri konfiguraatioita SolidWorksillä.

Simulointien perusteella 100 mm paksu kokoojakammio osoittautui sopivammaksi, joten se valittiin edelleen kehitettäväksi. Seuraavaksi kokeilin, minkälainen vaikutus on imusuppiloiden sijainnilla. Tein imusarjamallin, jossa imusuppilot ovat kotelon pohjalla ja toisen mallin, jossa imusuppilot ovat 30 mm irti kotelon pohjasta. Näitä simuloitiin ja simuloitteja analysoitiin.

Ahtoputket tehdään 3” alumiiniputkesta, joten imusarjan täyttöaukon halkaisijakin tulee olla 3”. Mallinsin myös osan ahtoputkea, koska juuri ennen kokoojakammiota oleva 120 asteen mutka vaikuttaa simulointituloksiin. Lopullisen imusarjan ulkomitat ovat 310 mm x 675 mm x 110 mm. Rakennetun 3D-mallin tilavuus nähdään helposti SolidWorksistä ”Check geometry” toiminnolla. Lopullisen kokoojakammion tilavuudeksi tuli 7178 cm³, joka on 2,13-kertaa moottorin sylinteritilavuus.

3.2 Imuputkien ominaistajuuden laskenta

Lasketaan toteutuneen imuputken pituuden mukaan kierrosnopeus, jolla heijastunut paineaalto on oikealla hetkellä imuventtiilin luona ja mahdollistaa paremman sylinterin täytöksen. Käytetään Helmholtzin resonaattorin johdettua muotoa, josta ratkaisuksi saadaan kierrosnopeus [rpm].

$$n = \frac{15a}{\pi} \sqrt{\left(\frac{F_p}{l_p V_c}\right)}, \quad (2)$$

Kaavassa 2 kierrosnopeus n saadaan laskettua äänennopeuden α , imuputken poikkipinta-alan F_p , imuputken pituuden l_p ja sylinterin tilavuuden V_c avulla.

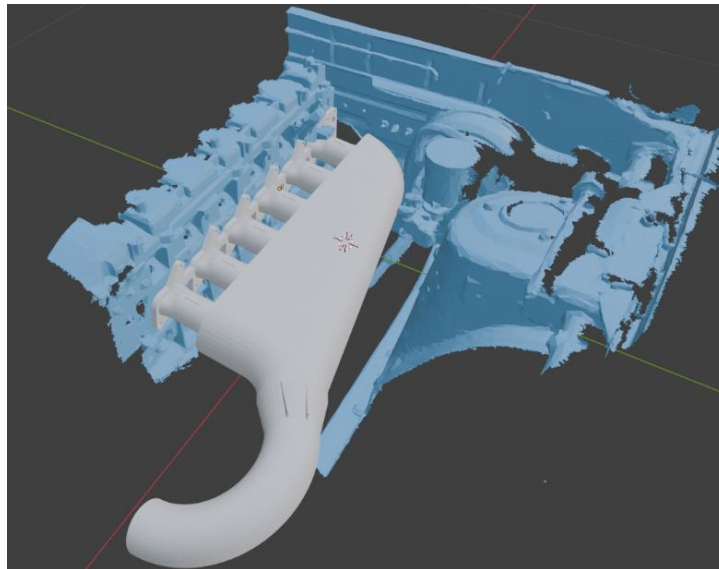
Jolloin,

$$n = \frac{15 \times 343 \frac{m}{s}}{\pi} \times \sqrt{\frac{1,661 \times 10^{-3} m^2}{0,21 m \times 0,562 \times 10^{-3} m^3}} = 6144 \text{ rpm} \quad (3)$$

Imukanavien paineaallot osuvat imuventtiilille oikeaan aikaan, kun moottorin kierrosluku on noin 6150rpm. Vaikuttaa siis siltä, että hyödyimme näiden imuputkien ominaistajuuksista. Paineaaltojen tehostava vaikutus ei ollut meille välttämätön, mutta tämä oli positiivinen tulos. Korkeilla kierrosnopeuksilla tyypillisesti dieselmoottorin hyötysuhde laskee, joten on toivottavaa, että imusarja toimii hyvin silloin.

3.3 Koesovitus

Tässä vaiheessa oli hyvä varmistaa, että imusarja sopii paikalleen. Vein SolidWorksistä 3D-tiedoston Blenderiin ja asettelin imusarjan oikealle paikalleen (KUVA 9). Tarkistin, että imusarja ei osu mihinkään. Imusarja on hyvin lähellä jarrutehostinta, öljynsuodatinta ja öljynlauhdutinta, mutta ne eivät estä asentamasta imusarjaa paikalleen ylhäältäpäin oikealle sijalleen. Imusarjan pultit saadaan asennettua hyvin. Ylemmät pultit ovat selkeästi näkyvissä ja alemmat pultit pystytään asentamaan imuputkien välistä.



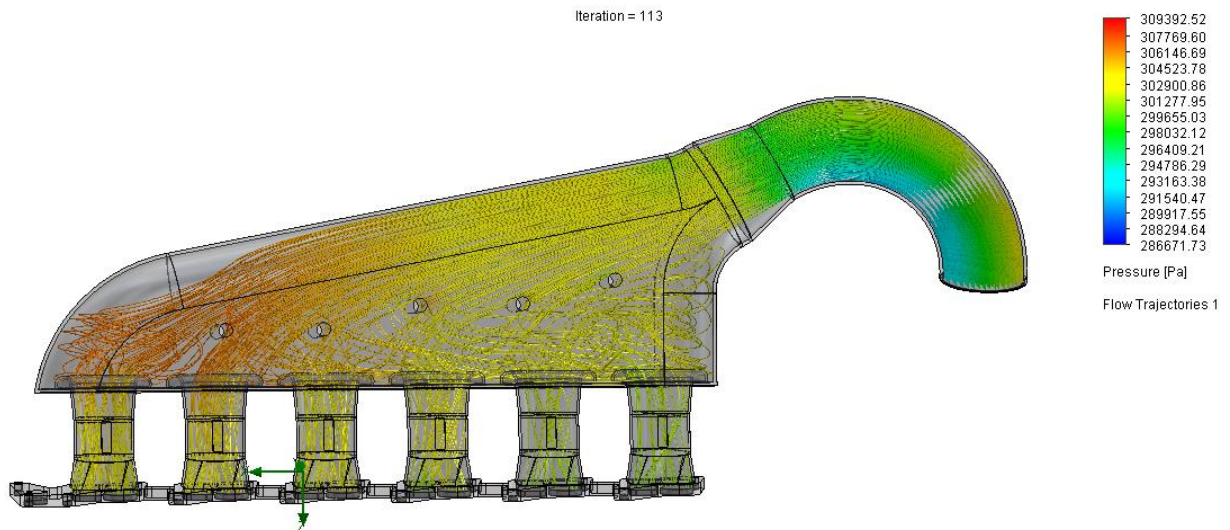
KUVA 9. Imusarja koesovitetuna moottoritilaan

4 VIRTAUSSIMULAATIO JA LUJUUSTARKASTELUT

Kun on saatu valmiita 3D-malleja imusarjoista, voidaan niiden virtausteknisiä ominaisuuksia tutkia CFD simuloinnilla. SolidWorksillä on sille oma ”flow simulation” työkalu. Tutkitaan kokoojakammion toimintaa ja imusuppiloiden sijainnin vaikutusta toimintaan. Onko hyötyä, jos imusuppilot ovat koholla kammion pohjasta?

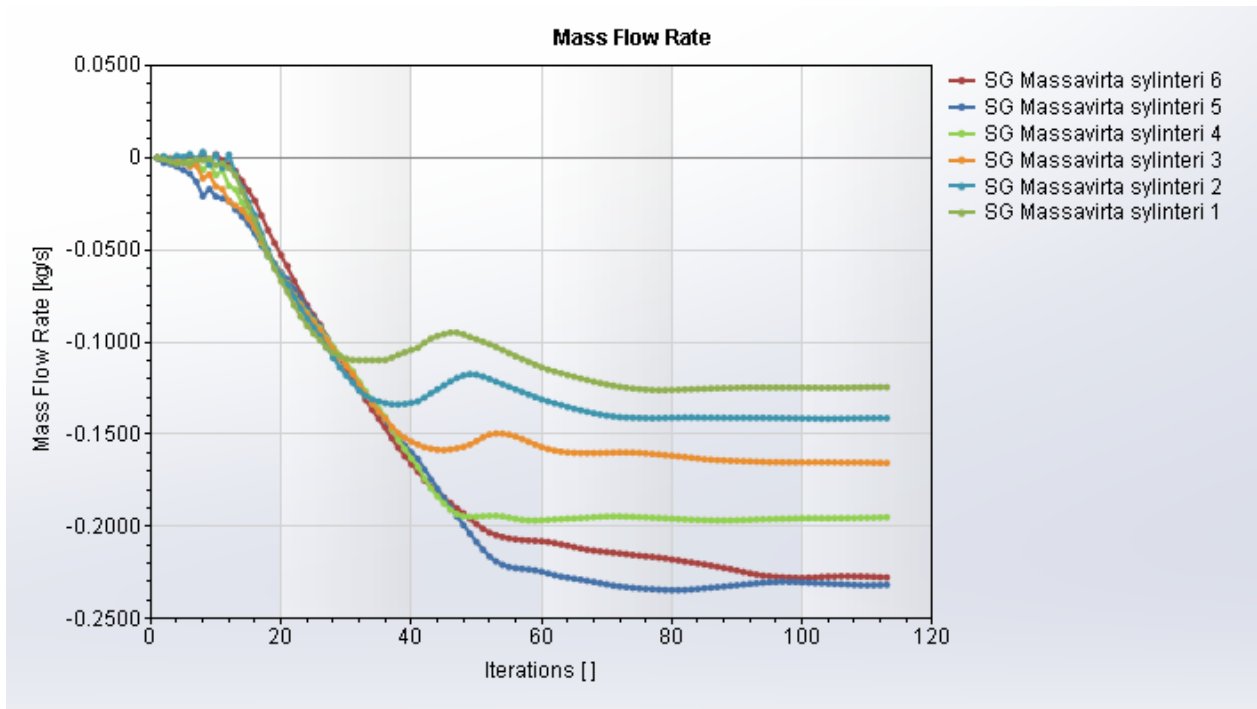
4.1 Vapaavirtausmalli

Vapaavirtaussimulaatiossa kaikkien primääriputkien päät ovat auki ja ilma virtaa vapaasti ulos imusarjasta. Vapaavirtaussimulaation voi toteuttaa useammalla tavalla. Ahtoputkeen ja imuputkiin voidaan asettaa esimerkiksi tietty paine tai massavirta. Suoritin simulointeja molemmilla tavoilla: niin, että virtaus aiheutetaan paine-erolla ja niin, että virtaus aiheutetaan ”puhaltamalla” ilmaa sisään ahtoputkeen. Blacksmokeracingin 800hv tuottavan vastaavan moottorimallin maksimaalinen ilman massavirta on 1.1 kg/s. Kokeilemalla löysin ahtoputkelle painearvon 310 kPa ja imuputkien sisäpäähän 300 kPa, joilla toteutuu noin 1 kg/s massavirta. Kuvien 14–19 simuloinnit on suoritettu näillä arvoilla.



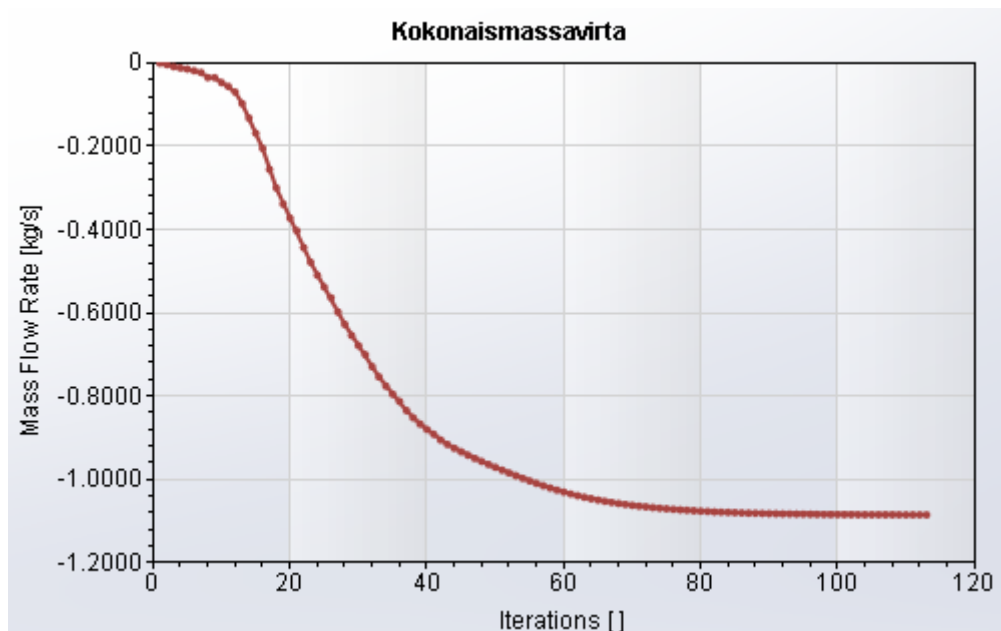
KUVA 10. Imusarjan virtausradat imusarjassa ilman ohjaavia levyjä

Imusarjan virtausradat esitetty ohuina nauhoina, joiden väri havainnollistaa ilmanpainetta kussakin kohtaa (KUVA 10). Ilma kulkee kokoojakammion takareunaa ja virtaa ulos imusarjasta pääosin sylindereiden 4–6 imuputkista.



KUVIO 9. Sylinterikohtaiset massavirrat imusarjassa ilman ohjaavia levyjä

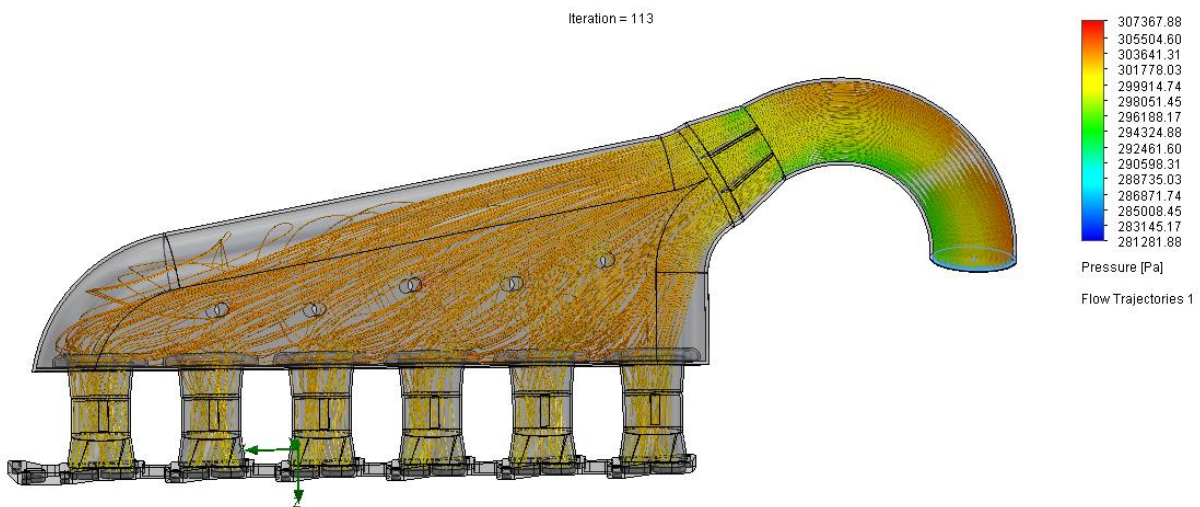
Kunkin imuputken ilmassavirta esitetty käyrällä (KUVIO 9). Sylinterikohtaiset massavirrat eroavat toisistaan merkittävästi. Sylinterin 1 massavirran keskiarvo on 0.125 kg/s, mikä on vain 54 % sylinterin 5 massavirran keskiarvosta 0.232 kg/s.



KUVIO 10. Kokonaismassavirta imusarjassa ilman ohjaavia levyjä

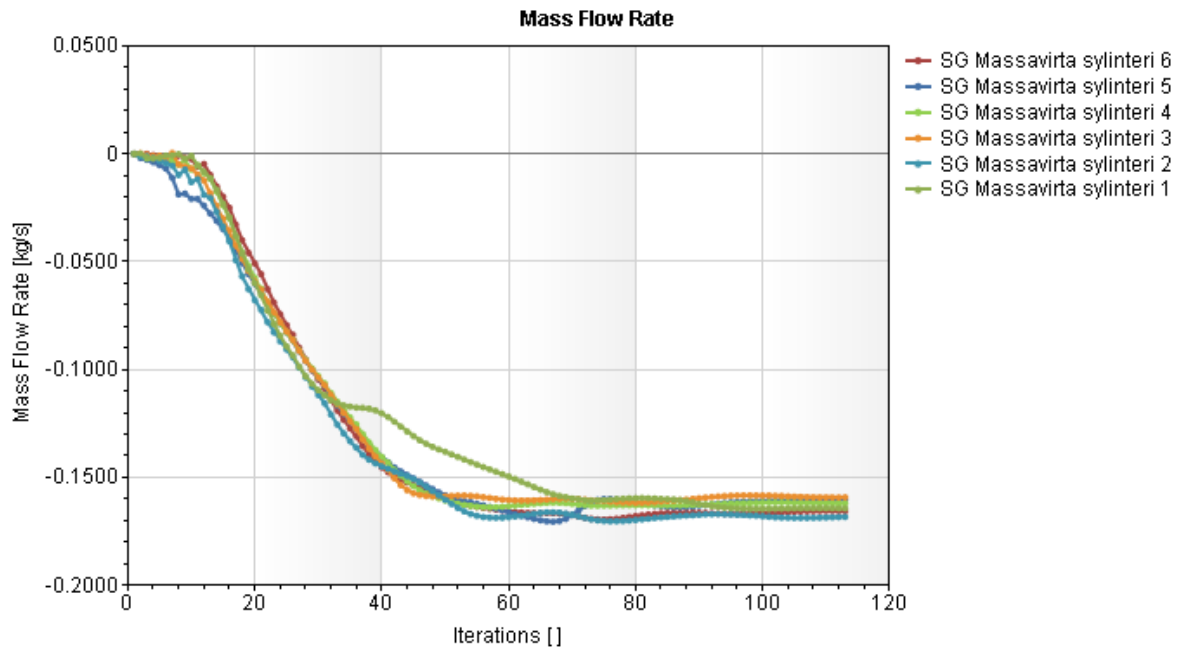
Imusarjan kokonaismassavirta esitetty käyrällä (KUVIO 10). Imusarjan kokonaismassavirran keskiarvo on 1.083 kg/s.

Kokoojakammion toiminta haluttiin ehdottomasti tasaisemmaksi. Halusin kokeilla, miten imusarja käyttäytyy, jos lisää juuri ennen painekoteloä ahtoputkeen ilmaa ohjaavat levyt ja simuloidaan muuten samoilla ehdoilla. Tein useita simuloiteja ja säädin levyjen paikkaa tulosten mukaan aina niin, että ilman virtaus lisääntyisi sinne, missä massavirran keskiarvo on pienin.



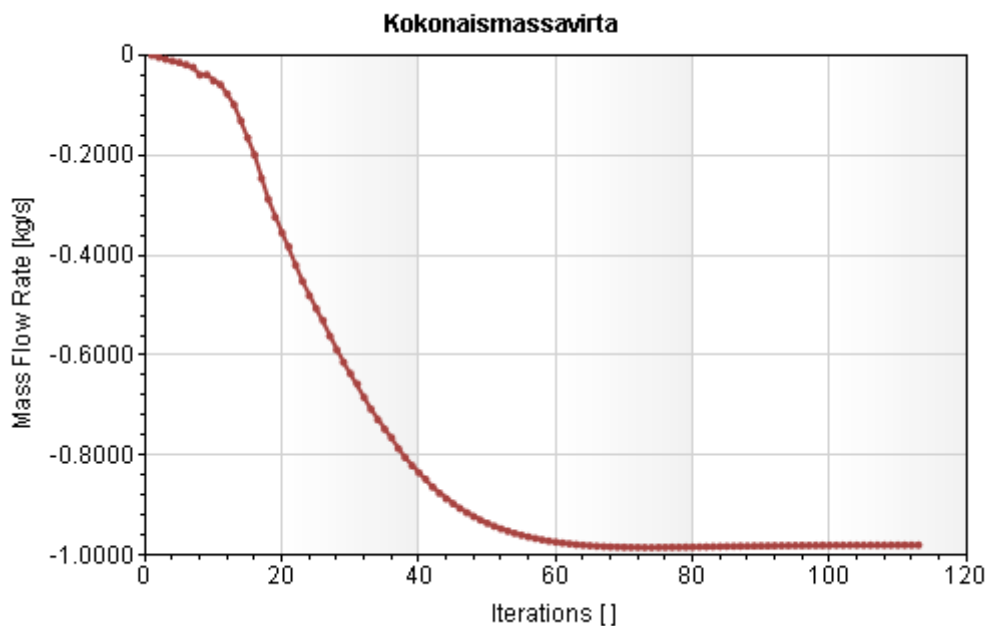
KUVA 11. Imusarjan virtausradat, kun ilmaa ohjaillaan yksinkertaisilla levyillä

Imusarjan virtausradat esitetty ohuina nauhoina (KUVA 11). Väri kuvastaa ilmanpainetta kussakin kohdassa. Nyt virtausradat täyttävät kokoojakammion ja kulkevat tasaisesti ulos jokaisen sylinterin imuputkesta.



KUVIO 11. Sylinterikohtaiset massavirrat, kun ilmaa ohjaillaan yksinkertaisilla levyillä

Kunkin sylinterin imuputken ilmamassavirrat esitetty käyrällä (KUVIO 11). Sylinterikohtaiset massavirrat ovat lähes samansuuruisia. Sylinterin 3 imuputken massavirran keskiarvo on pienin ja sylinterin 2 imuputken massavirran keskiarvo on suurin. Pienimmän ja suurimman keskiarvon välinen ero on 5,4 %. Vaikuttaa siltä, että ilmaa ohjaavat levyt ehdottomasti lisäävät imusarjaan.

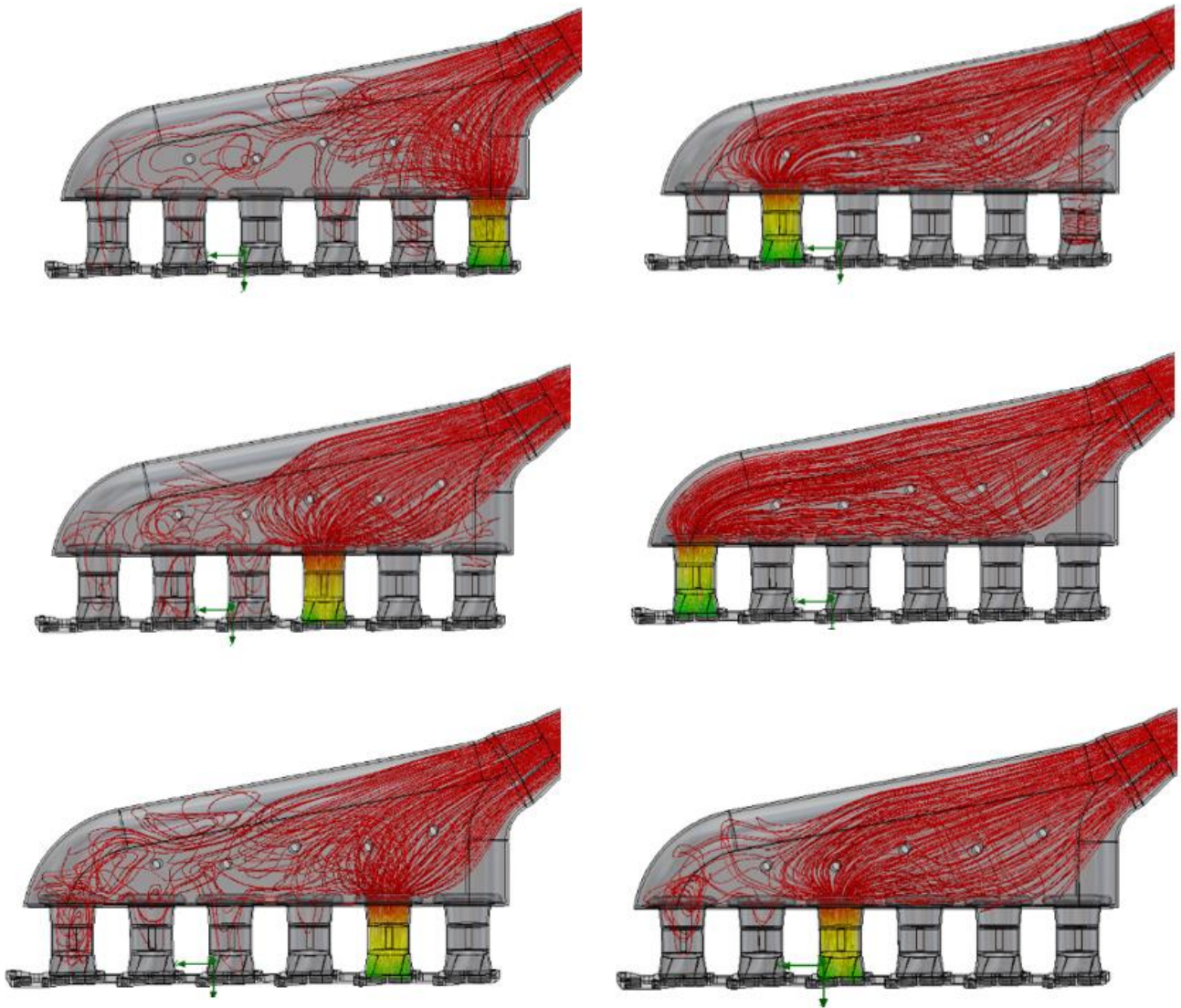


KUVIO 12. Kokonaismassavirta, kun ilmaa ohjaillaan yksinkertaisilla levyillä

Imusarjan kokonaismassavirta esitetty käyrällä (KUVIO 12). Kokonaismassavirran keskiarvo on 0.982 kg/s, mikä on 9,3 % pienempi kuin kokonaismassavirran keskiarvo ilman ilmaa ohjaavia levyjä. On loogista, että ilmaa ohjaavat levyt aiheuttavat virtausvastusta. Onko siitä tässä tapauksessa enemmän hyötyä kuin haittaa. Sitä voisi tutkia vielä enemmänkin.

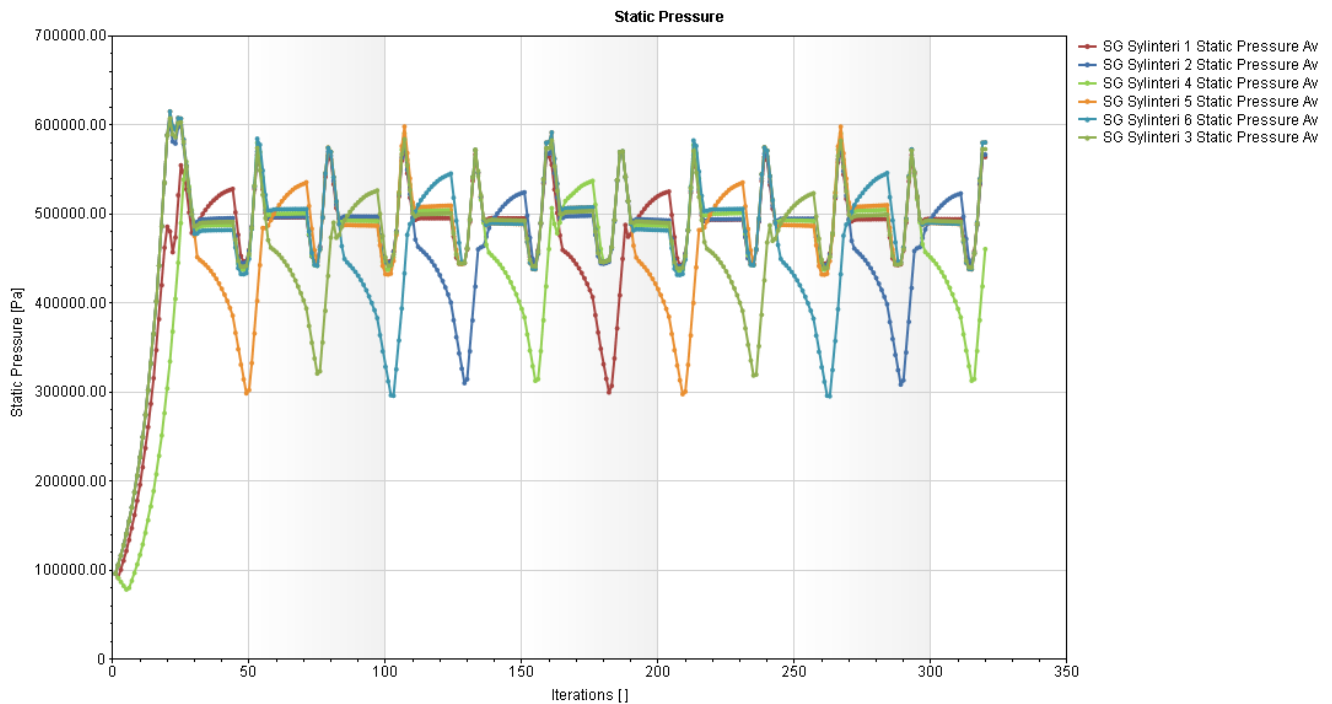
4.2 Transient-simulaatio

Vapaavirtaussimulaatiot antavat jonkinlaisen kuvan, miten ilma virtaa imusarjassa. Imusarjan todellista ja monimutkaisempaa toimintaa kuvaa paremmin transient-simulaatio, jossa jokaisen primääriputken päädyn ehdot säädetään sytytysjärjestyksen ja venttiilin aukioloajan mukaan. Tein ensiksi samantyyllisiä simulaatioita, joita löysin netistä. Niissä oikean sytytysjärjestyksen mukainen imutahti primääriputkiin saatiin aikaan primääriputken paine-ehdoilla. Tämä ei toiminut turboahdetun imusarjan toiminnassa, sillä paine-ehto ei estänyt ilmaa virtaamasta väärään suuntaan silloin kun tietyn primääriputken imutahti ei ollut päällä. Päätin tekoälyn avulla luoda aikaperusteisen arvojoukon, jossa primääriputkelle määritettiin ilman massavirta aidon tilanteen kaltaisesti sykleissä. Simuloinnissa käytetty data löytyy liitteistä. Tässä simulaatiossa ei saatu massavirran eroja selville, sillä se oli nyt datassa säädetty kaikkiin samaksi, mutta pyrin arvioimaan imusarjan toimintaa tutkimalla ilmanpainetta. Suoritin tätä simulaatiota kolmelle eri imusarjamallille.



KUVA 12. Sylinterikohtaiset virtausradat transient simulaatiossa

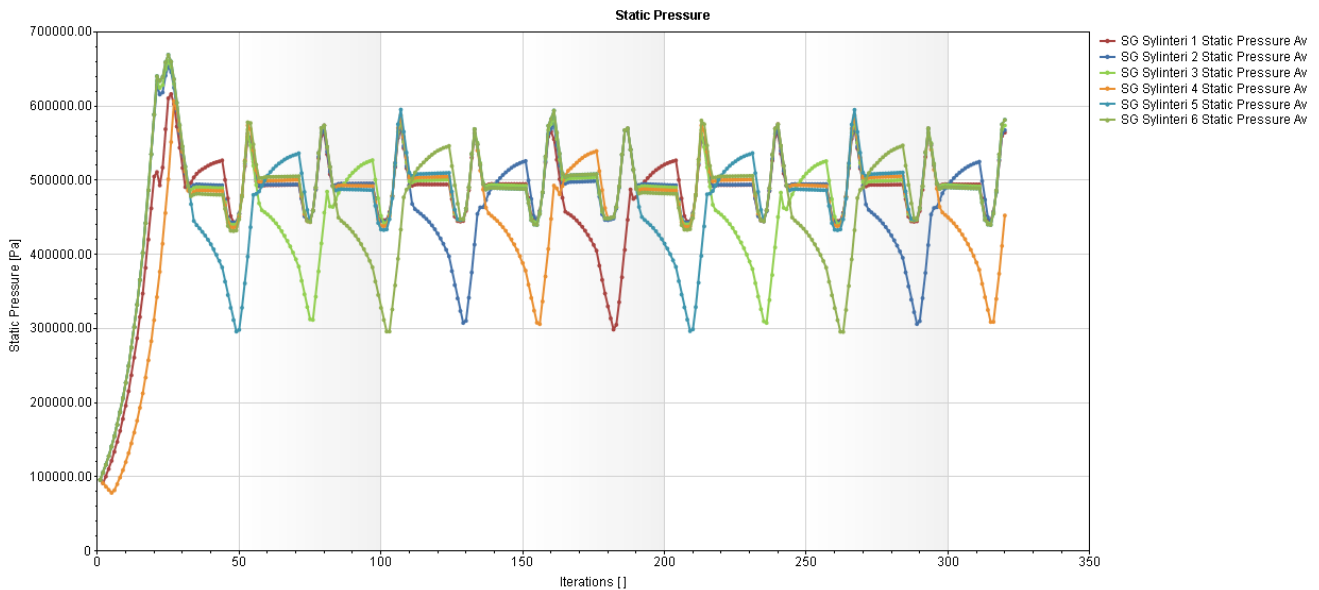
Sylinterikohtaiset virtausradat on esitetty ohuina nauhoina (KUVA 12). Väri kuvastaa painetta. Näiden virtausratojen perusteella voidaan tutkia kokoojakammion ja imusuppilon toimintaa. Transient simulaatiossa virtausradat vaihtelevat sylinteriltä toiselle sylintereiden sytytysjärjestyksen mukaan. OM648-moottorissa sytytysjärjestys on 1–5–3–6–2–4.



KUVIO 13. Transient-simulaatio imusarjalle, jossa imusuppilot ovat 30 mm koholla kokoojakammion pohjasta

Sylinterikohtaiset paineet imuputken sisäpäässä kuvattuina käyrillä simulaatiossa, jossa imusarjan imusuppilot ovat 30 mm koholla kokoojakammion pohjasta ja ilmaa virtaa imusarjan läpi keskimäärin 0.6 kg/s (KUVIO 13). Ilman massavirta on ajoitettu kunkin sylinterin imuputken sisäpäähän aidon tilanteen kaltaisesti, kun moottorin kierrosnopeus on 6000 rpm. Ilman massavirta ajoittuu imuventtiilin aukioajalle ja massavirran arvoista muodostuu alaspäin aukeavan paraabelin käyrä. Olennaista kuvan 21 käyrissä on paineenalenema kunkin sylinterin imuputkessa imutahdin aikana ja niiden arvot suhteessa toisiinsa. Tässä imusarjassa kohotetuilla imusuppiloilla osa imuputkista toimii tosi hyvin ja massavirta saadaan aikaan pienemmillä paineenalenemilla kuin muissa. Tässä imusarjassa on kuitenkin jonkin verran eroja eri sylinterien välillä. Sylinterien 1, 5 ja 6 käyrien piikit käyvät alempana kuin muiden sylinterien vastaavat. Käyrien piikin kärjen arvojen maksimaalinen ero oli 0,26 bar.

Samanlainen simulaatio suoritettiin imusarjalle, jonka paksuus oli 89 mm. Paineen vaihtelu oli suurempaa kuin edellisen simulaation 100 mm paksuissa imusarjoissa. Käyrien piikit kävivät noin 0,4 bar alempana ja maksimaalinen ero oli 0,27 bar eri sylinterien välillä.



KUVIO 14. Transient simulaatio imusarjalle, jossa imusuppilot ovat kokoojakammion pohjalla

Sylinterikohtaiset paineet imuputken sisäpäässä kuvattuina käyrillä simulaatiossa, jossa imusarjan imusuppilot ovat kokoojakammion pohjalla (KUVIO 14). Kaikissa simulaatioissa on samat reunaehdot, sillä vain imusarjamalli vaihtuu. Tämän imusarjamallin toiminta on huomattavan tasaista. Sylinterikohtaisia paineita kuvaavat käyrät ovat melko yhdenmukaisia. Maksimaalinen ero käyrien piikkien välillä on 0,12 bar.

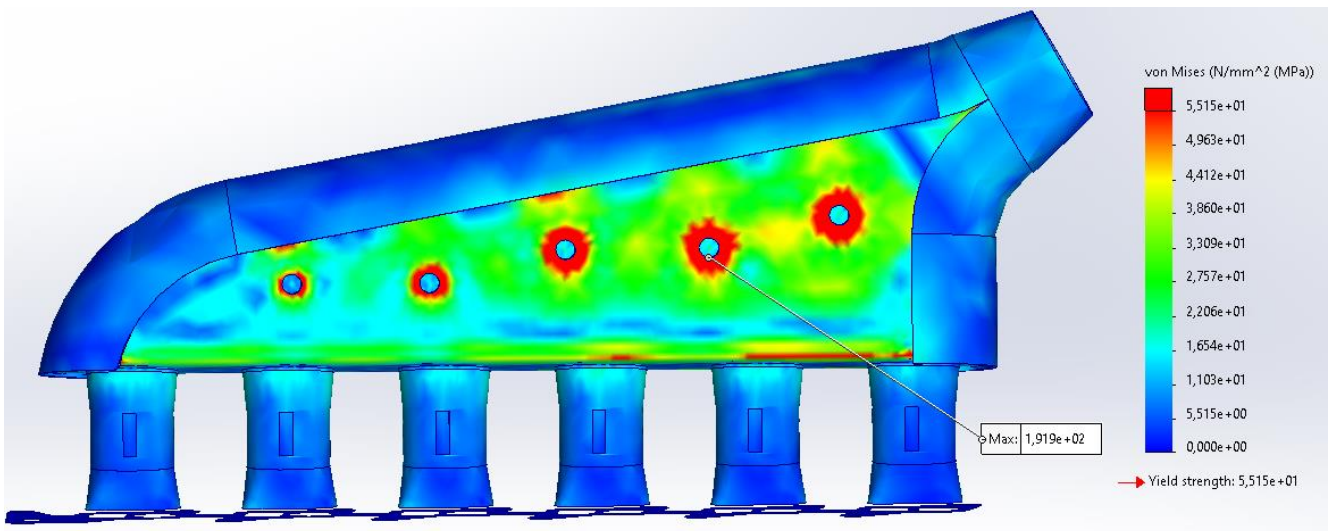
Polttoaineensyöttö jokaiseen sylinteriin on tasainen, eikä sitä säädellä, joten valitaan imusarjamalli, jossa sylinterikohtaisesti tasaisin toiminta. Oletetaan, että tämä mahdollistaa puhtaamman palamisen ja tasaisemman sylinterikohtaisen voimantuoton ja näin ollen vaikuttaa moottorin kestävyys. Valitaan 100 mm paksu imusarja, jossa imusuppilot ovat kokoojakammion pohjalla.

Turboahdetun moottorin imusarjan simuloiminen on todella haastavaa. Juuri yhtään vakio reunaehto ei ole. Moottorin tulisi toimia useilla eri kierrosalueilla, joten ilmavirran suuruusluokka vaihtelee. Turbon tuotto ei ole tasainen eikä se ole tiedossa. Sylinterin paine imutahdilla ei ole tiedossa. Simulointitulokset ovat suuntaa antavia. Teen seuraavaksi lujuustarkastelut valitulle imusarjalle.

4.3 Kuormitusten tarkastelu

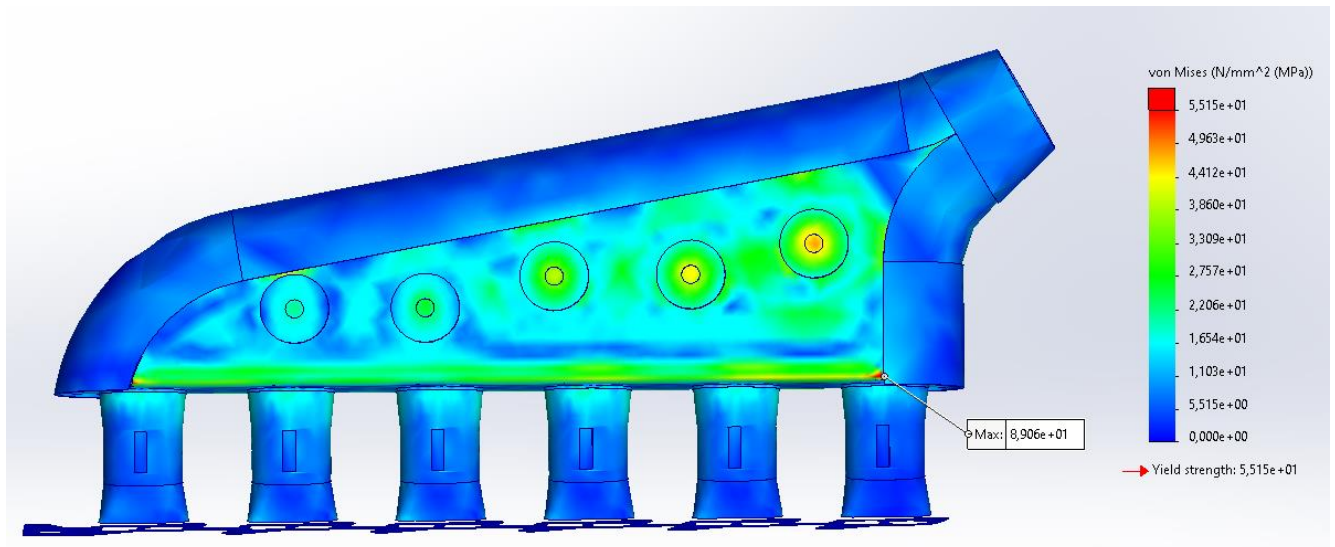
Kuormitusten tarkastelu on tärkeä osa mekaanista suunnittelua. On kohteita, joissa ei ole varaa rikkoutumisiin. On tiedossa, että erilaisia imusarjoja on pullistunut ja vaurioitunut. Tämä ei välttämättä ole

vaarallista, mutta on aina ikävää, jos rikkoutuminen keskeyttää ajopäivän. Tarkastelin imusarjan kuorimituksia SolidWorks FEM-simuloinnilla, missä tietokoneohjelma tekee lujuuslaskennan. Imusarjan tulee ensinnäkin kestää suuri sisäinen paine. Todennäköinen maksimipaine imusarjassa on noin 4 bar, mutta käytetään tarkastelussa arvoa 5 bar. Lujuustarkastelua varten asetetaan materiaaliksi 6061 alumiini, mikä on yleinen alumiiniputkissa.



KUVA 13. Väreillä havainnollistetut Von Mises-jännitykset, kun imusarjan sisäpintoihin on kohdistettu 5bar paine

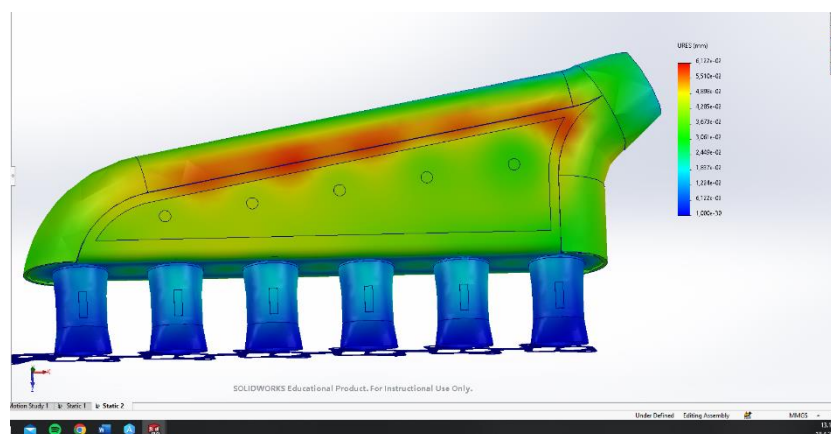
Joitakin muutoksia rakenteeseen täytyi tehdä. Aluksi imusarjassa oli vain kolme vahviketappia, jotka estävät imusarjaa pullistumasta. Tarkastelin Von Mises jännityksiä, jotta jännitykset eivät ylittäisi myötörajaa missään kohtaa. 6061 alumiinin myötöraja on 55,15 MPa ja murtoraja on 124 MPa. Kolmella vahviketapilla myötöraja ja murtorajakin ylittyi. Lisäsin kaksi vahviketappia, mutta silti tappien juuressa myötöraja ylittyi (KUVA 13). Imusarjakotelon suora levy pääsee pullistumaan sen verran, että vahviketappien juuressa oleva hitsisauma rasittuu liikaa. Suunnittelin suoralle levyosuudelle vahviketappien tai vaihtoehtoisesta vahvikeprikat (KUVA 14).



KUVA 14. Von Mises jännitykset, kun vahvikeprikat lisätty

Vahvikeprikat lisätty vahviketappien juureen. Nyt Von Mises jännitykset ylittävät myötörajan paikallisesti imusarjan etukulmassa kohdassa, johon en saanut järkevästi lisättyä malliin hitsaussaumaa. Todellisuudessa siinä on hitsaussauma, joka jakaa jännityksiä laajemmalla alueelle. Muualla imusarjassa jännitykset pysyvät alle myötörajan. Oletan tarkastelun perusteella, että imusarjan etukulma ja koko imusarja kestää siihen kohdistuvan paineen.

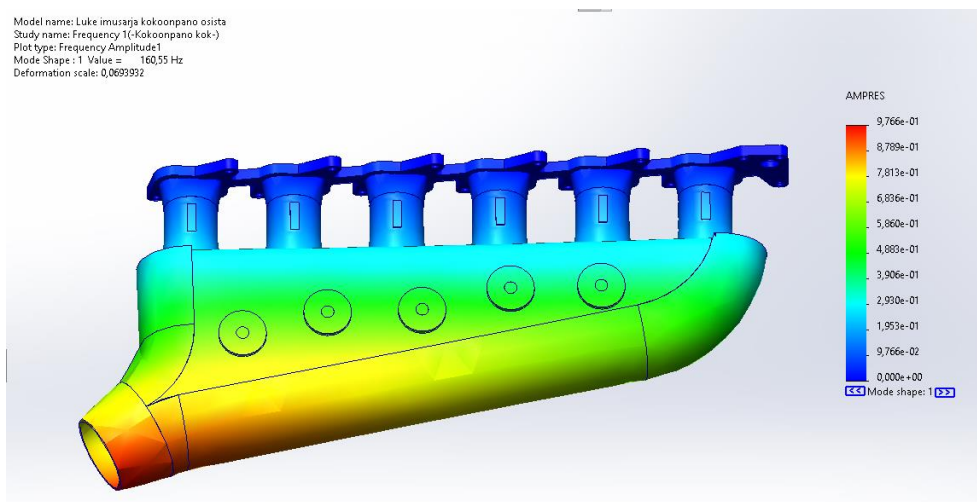
Lisäksi tarkastelin imusarjan suurimman muodonmuutoksen arvoa ja paikkaa. Imusarja ”pullistuu” eli materiaaliin tulee muodonmuutosta paineen vaikutuksesta. Suurimmat siirtymät ovat pitkän suoran hitsaussauman juuressa, mutta tappien määrällä ja sopivalla sijoittelulla imusarjan suurin siirtymä on vain 0,15 mm (KUVA 15). Suurimman siirtymän kohtaan ei näytä tulemaan liikaa jännityksiä, joten pysyviä muutoksia materiaaliin ei pääse syntymään.



KUVA 15. Imusarjan siirtymät väreillä havainnollistettuna

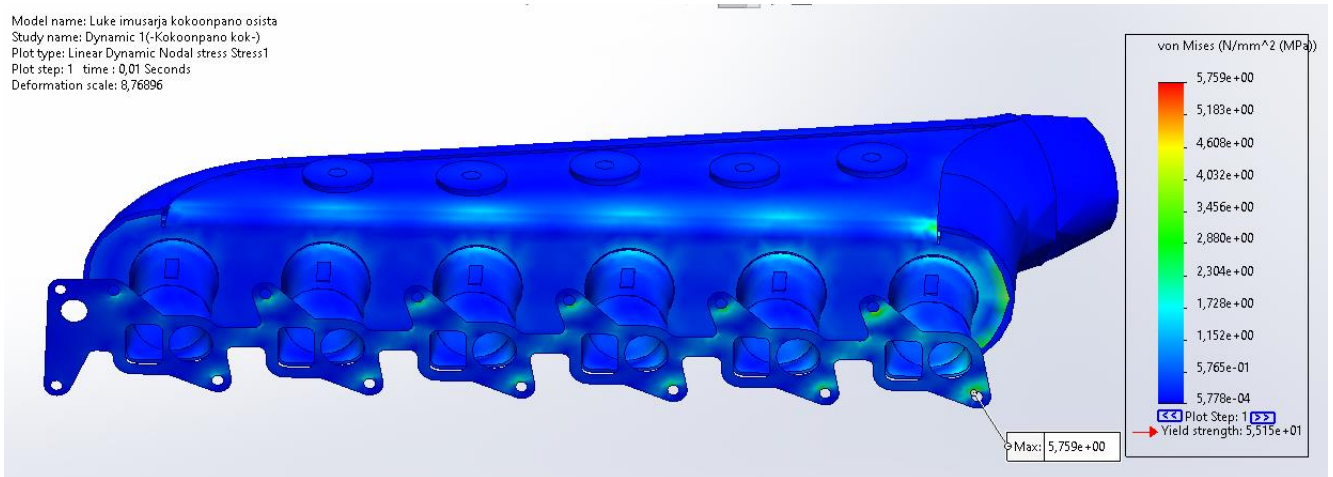
4.4 Harmoninen ja dynaaminen värähtely

Auton moottorissa esiintyy paljon värähtelyä. Värähtelyt aiheutuvat osien muodonmuutosten ja kuorimitusten jaksottaisuuden keskinäisestä suhteesta. Moottorin yleinen värähtelyn taajuus moottorin kokonaisuutena vaihtelee välillä 180–250 Hz ja amplitudi vaihtelee välillä 0.25 mm-0.8 mm (Measurement of engine vibration phenomena). Resonanssia syntyy, jos yksittäisen osan ominaistajuus on sama kuin siihen vaikuttavan ulkoisen voiman vaihtelun taajuus. Tarkastelin imusarjan ominaistajuutta sekä jännityksiä, kun imusarja laitetaan värähtelemään eri taajuuksilla. Imusarjan ominaistajuuden olisi hyvä olla moottorin värähtelytaajuuden ulkopuolella, jotta resonanssia ei synny.



KUVA 16. Imusarjan värähtelytaajuuden selvittäminen

Tämän imusarjan alin ominaistajuus on 160,55 Hz. Se on moottorin yleisen värähtelytaajuuden ulkopuolella, vaikkakin melko lähellä. Toiseksi alin ominaistajuus on 607,39 Hz, mikä on jo reilusti yli moottorin yleisen värähtelytaajuuden. Ottaen huomioon moottorin kierrosnopeuden vaihtelun, oletetaan, että pitkäkestoista resonanssia ei synny. Värähtely vaikuttaa eniten kokoojakammion etupäässä, mihin ahtoputki kiinnitetään (KUVA 16). Ahtoputki kiinnitetään joustavasti imusarjaan, joten se vaimentaa värähtelyä. Kiinnityksen vaimennuksen vaikutusta ei tiedetä tarkkaan, joten en ottanut sitä mukaan simulaatioon.



KUVA 17. Imusarjan jännitykset dynaamisen värähtelyn aikana

Laitoin imusarjan värähtelemään kiinnityspisteestään 10 mm primääriputkien suuntaisesti taajuudella 160,55 Hz (KUVA 17). Maksimaalinen jännitys imusarjassa kohdistui kiinnityspisteen juureen ja oli 5,759 MPa, joka on noin 10 % alumiinin myötölujuudesta. Tein samanlaisen simulaation pystysuunnassa eli imusarjan laipan lyhyen sivun suuntaisesti. Tällöin maksimaalinen jännitys oli 29,02 MPa (53 %) ja kohdistui imuputken hitsaussauman juureen. 10 mm siirtymä värähtelyssä on tarkoituksella liioiteltu. Näiden simulointien pohjalta oletetaan, että imusarja kestää värähtelyt.

5 IMUSARJAN VALMISTUS

Nyt kun on rakennettu imusarjasta 3D-malli, jonka muotoiluun sekä virtaus- ja lujuusteknisiin ominaisuuksiin oltiin tyytyväisiä, niin voitiin valmistaa imusarja.

5.1 Osien valmistus

Helppo ja edullinen valmistettavuus olivat suunnittelun tavoitteita. Alusta alkaen oli selvää, että imusarja tullaan valmistamaan levy- ja putkiosista.

5.1.1 Levyosat

Imusarjan laippa ja kokoojakammion pohja teetettiin ohutlevystä laserilla leikattuna. Ystävieni särmäsi kokoojakammion tekemäni teknisen piirustuksen mukaan. Leikkauskuvat ja tekninen piirustus ovat liitteissä.

5.1.2 Kokoojakammion reunat

Kokoojakammion ulkoreunat tehtiin putkiosista. Yhteen koteloon tarvittiin yksi 4 tuuman 90 asteen alumiiniputkikulma sekä 53 cm suoraa 4 tuuman alumiiniputkea 4 mm seinämällä. Alumiiniputket leikattiin ja halkaistiin itse oikeaan muotoon. Tein sapluunat 3D-tulostimella leikkaamista helpottamaan (KUVA 18).

5.1.3 Imuputket

Imusuppilot ostettiin valmiina. Ne on tehty prässäämällä alumiiniputkesta, koska sorvatut tai koneistetut imusuppilot olisivat huomattavasti kalliimmat. Lyhyet imuputket tehtiin itse alumiiniputkesta. Niiden toinen pää tuli sopia imukanavien muotoon ja toinen pää piti olla pyöreä. Mallinsin imuputken prässäämistä varten sopivat työkalut SolidWorksillä ja tulostin ne 3D-tulostimella PLA-muovista. Prässäystyökalut toimivat hyvin.



KUVA 18. Imusarjan putkiosien sapluunat 3D-tulostettuina

5.2 Kasaus ja hitsaaminen

Imusarja koottiin hitsaamalla osat yhteen tig-hitsauskoneella. Lopulta imusarjan valmistuksessa oli melko paljon eri työvaiheita, mutta 3D-tekniikan avulla valmistuksesta tehtiin helpompaa. Osista saatiin mittatarkat sapluunoiden ja laserleikkauksen vuoksi. Kokoonpanohitsauksen välissä imusarjaa sovitettiin paikoilleen ja se sopi moottoritilaan juuri niin kuin se oli suunniteltukin (KUVA 19).



KUVA 19. Imusarjan viimeinen sovitus ennen lopullista hitsaamista

6 ARVIOINTI JA POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tuloksena on valmis imusarja vaativaan käyttöön sekä valmis 3D-malli, jos imusarjaa tekee myyntiin tai kehittää edelleen. Imusarjan suunnittelu ja valmistus on myös kattavasti raportoitu. Opinnäytetyössä selviää mitä tietoa ja ohjelmia suunnittelu vaatii sekä millaisiin simulointituloksiin päästiin.

Suunnittelu onnistui mielestäni hyvin. Tässä tapauksessa asiakas oli ystäväni, joten yhteistyö oli saumatonta. Raportoin hänelle välituloksista ja yhdessä päätettiin ratkaisut ja suunnittelun suuntaviivat. Aiheena imusarja oli kiinnostava ja teknisesti sopivan haastava. Jokaisessa suunnitteluvaiheessa opin joitain uusia keinoja ja työkaluja. Työmäärä imusarjan suunnittelussa on suuri, jos imusarjan kaikki ominaisuudet halutaan tarkoin tutkia.

Tässä projektissa tein varmasti yli sata erilaista simulointia. Se oli hyvin opettavaista ja mielenkiintoista. Turboahtimella varustetun moottorin imusarjan simulointi on todella haastavaa, koska muuttujia on paljon. Hieman yksinkertaistaen on mahdollista saada hyviä arvioita imusarjan toimivuudesta. Ottaen huomioon kokemukseni määrän simuloimisesta SolidWorksillä, jätetään niihin virheen mahdollisuus. Simulointitulokset vaikuttivat kuitenkin loogisilta ja voin niiden perusteella valmistaa kyseisen imusarjan. Koekäytön jälkeen voi olla mahdollista myydä imusarjoja muillekin.

Imusarja ei ole vielä päässyt testiin, mutta luottavaisin ja odottavaisin mielin odotamme ensitestejä. Tässä vaiheessa vaikuttaa, että saavutimme tavoitteet pääpiirteittäin. Imusarja on kookas, jouheva ja virtausvastus on alhainen. Ulkonäkö miellyttää ja simulointien perusteella kokoojakammion pitäisi jaksaa ilmaa tasaisesti kaikille sylintereille. Lujuustarkastelun perusteella imusarjan pitäisi kestää sille tarkoitettu käytössä.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Imusarjan suunnittelu oli projektina kiehtova, opettavainen ja haastava. Lopullinen työmäärän paljous yllätti. Hyvän imusarjamallin rakentaminen ja simuloiminen jokaisen muutoksen jälkeen aina uudelleen oli työlästä. Opin projektin aikana paljon uusia toimintoja SolidWorksissä, kehityin simulointien luomisessa ja sain käsitystä ilman käyttäytymisestä imusarjassa. Projektin raportoinnin ja tulosten kirjaamisen tekisin toisin ja tarkemmin, jos vastaavan projektin toteuttaisin uudelleen. Nyt seurasin turhan kiivaasti intoani hypätä jo seuraavaan vaiheeseen 3D-suunnittelussa. Ehkä aiheen rajaisin tarkemmin tiettyyn vaiheeseen. Työmäärä oli suuri ja täten yksittäiseen vaiheeseen ei ollut aikaa perehtyä tarkemmin. Esimerkiksi pelkästä virtaussimulaatiosta olisi varmasti löytynyt opinnäytetyön verran tutkittavaa, jos siihen olisi syventynyt. Mielestäni onnistuin luomaan silti eheän kokonaisuuden. Tästä opinnäytetyöstä saa varmasti hyvän käsityksen imusarjan suunnittelusta ja valmistuksesta.

Imusarjaa olisi tietenkin voinut tutkia enemmänkin. Nyt vertailin keskenään suunnittelemani imusarjoja. Vertailuun voisi lisätä vakio imusarjan, jotta näkisi imusarjan toiminnan suhteessa alkuperäiseen. Olisi myös hienoa tehdä tehomittauksia autoon suunnittelemani imusarjalla ja alkuperäisellä imusarjalla, jotta näkisi simulointitulosten luotettavuuden ja imusarjojen erot todellisuudessa. Tehomittauksiin meillä on jo suunnitelmissa mennä.

LÄHTEET

3D-CADSOLUTIONS. 3D-skanneri. Saatavissa: <https://www.an-cadsolutions.fi/3d-laitteet-ja-materiaalit/3d-skanneri/>. Viitattu 6.5.2024

Auto-data.net. 2003 Mercedes-Benz E-class T-modell E 320 CDI 5G-TRONIC. Saatavissa: <https://www.auto-data.net/en/mercedes-benz-e-class-t-modell-s211-e-320-cdi-204hp-5g-tronic-12928>
Viitattu: 14.5.2024

Bell, A. G. 2007. Nelitahtimoottorin virittäminen. Suom. E. Mauno. Helsinki: Alfamer Oy.

Blair, G.P. & Cahoon, W.M. Special Investigation: Desing of an intake bellmouth. Saatavissa: http://www.profblairandassociates.com/pdfs/RET_Bellmouth_Sept.pdf. Viitattu 6.5.2024.

How Air Flows. Bankspower. Saatavissa: https://official.bankspower.com/tech_article/how-air-flows/
Viitattu 6.5.2024

Measurement of engine vibration phenomena. SAE International. Saatavissa: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/250005/>. Viitattu 6.5.2024.

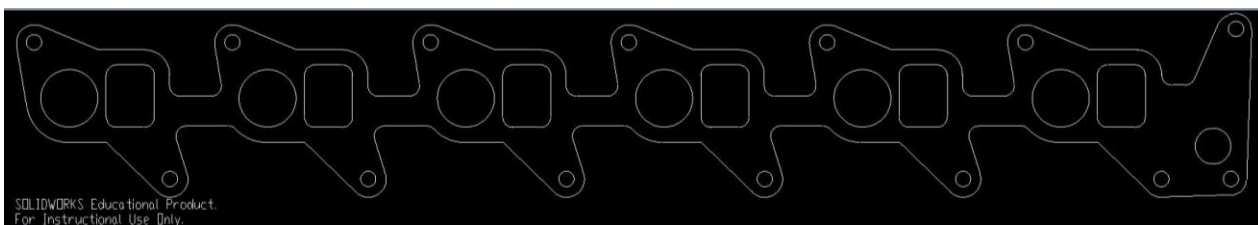
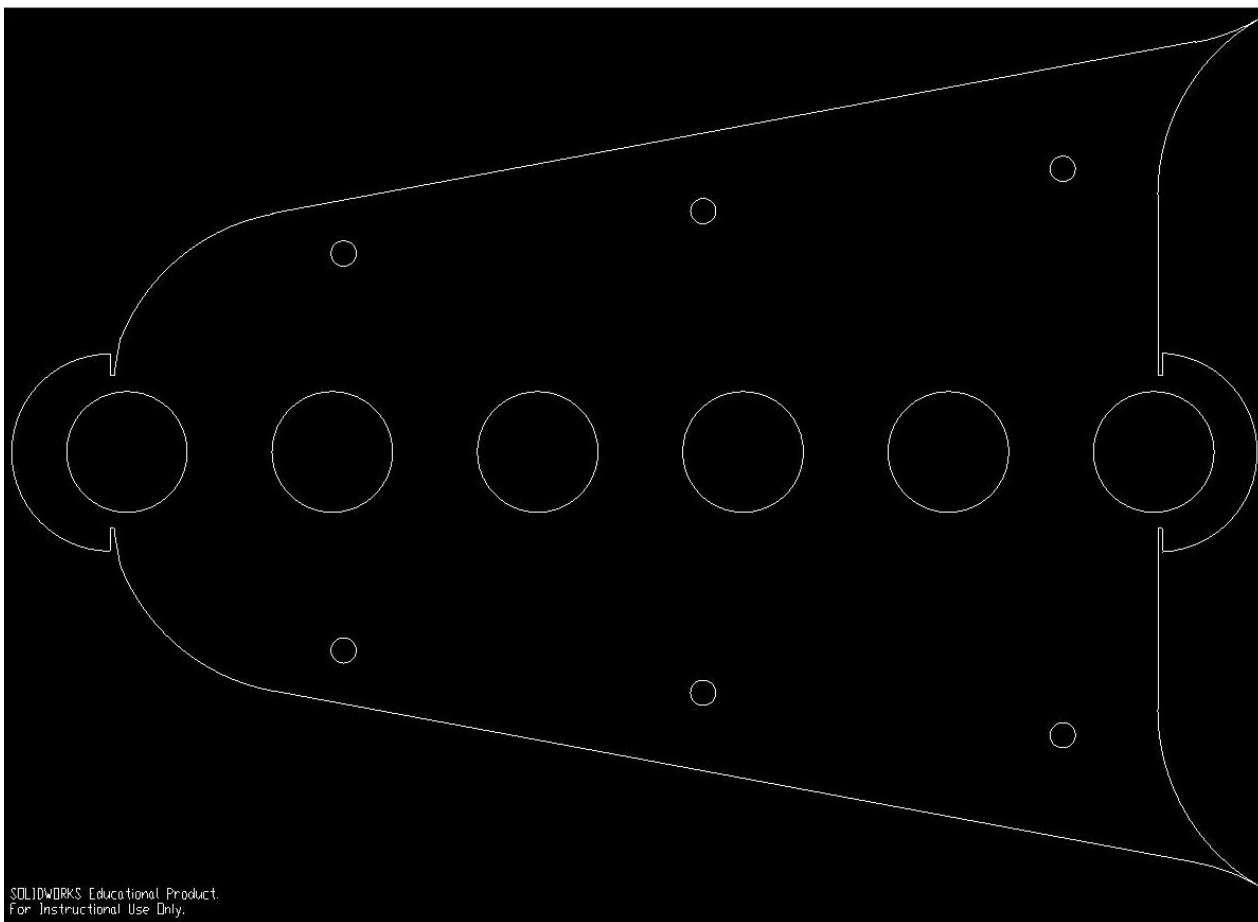
Suvanto, K. 2003. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing.

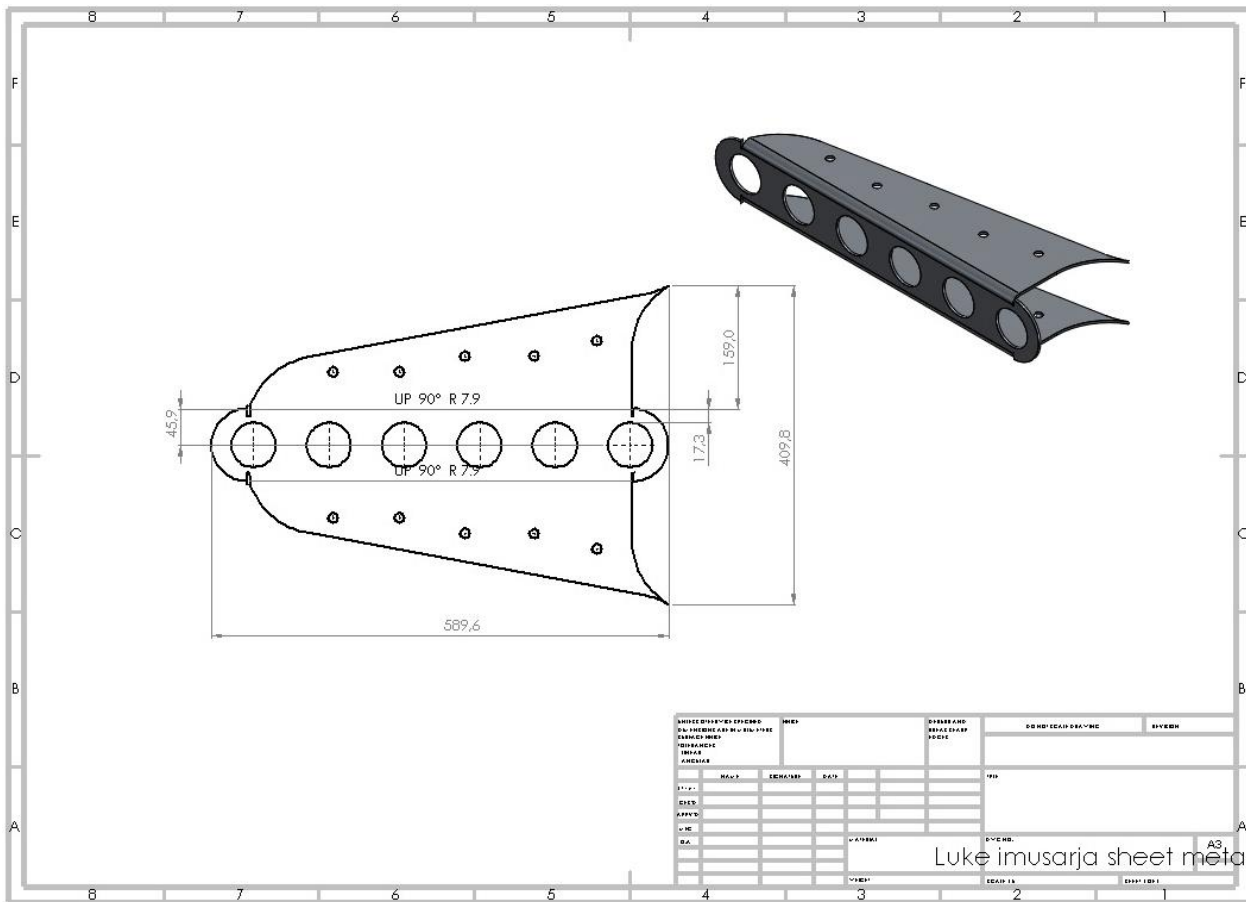
The Right Bellmouth. Performance by Integrated Engineering. Saatavissa: <https://performance-byie.com/blogs/ie-auto-blog/the-right-bellmouth>. Viitattu 6.5.2024.

Vilkka, H. & Airaksinen, T. 2003. Toiminnallinen opinnäytetyö. Helsinki: Tammi.

Winterbone, D.E. & Pearson, R.J. 1999. Design Techniques for Engine Manifolds. London: Professional Engineering Publishing.

Winterbone, D.E. & Pearson, R.J. 2000. Theory Of Engine Manifold Desing: Wave Action Methods for IC Engines. London: Professional Engineering Publishing.





SUOMEN SUOMEN SUOMEN				SUOMEN		SUOMEN		SUOMEN	
SUOMEN SUOMEN SUOMEN				SUOMEN		SUOMEN		SUOMEN	
SUOMEN SUOMEN SUOMEN				SUOMEN		SUOMEN		SUOMEN	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

A3

Luke imusarja sheet metal

Transient-simulaatiossa käytetty data.

Kohta	Aika	Kampiakselin asteet	Syl1, massavirta (kg/s)	Syl2, m \bar{c}	Syl3, m \bar{c}	Syl4, ma	Syl5, ma	Syl6, ma
0	0	0	0.0000	0	0	1.0145	0	0
1	0,0001	4,5	0.0634	0	0	0.9511	0	0
2	0,0003	9	0.1268	0	0	0.8877	0	0
3	0,0004	13,5	0.1902	0	0	0.8243	0	0
4	0,0005	18	0.2536	0	0	0.7609	0	0
5	0,0006	22,5	0.3170	0	0	0.6975	0	0
6	0,0008	27	0.3805	0	0	0.6341	0	0
7	0,0009	31,5	0.4439	0	0	0.5707	0	0
8	0,001	36	0.5073	0	0	0.5073	0	0
9	0,0011	40,5	0.5707	0	0	0.4439	0	0
10	0,0013	45	0.6341	0	0	0.3805	0	0
11	0,0014	49,5	0.6975	0	0	0.3170	0	0
12	0,0015	54	0.7609	0	0	0.2536	0	0
13	0,0016	58,5	0.8243	0	0	0.1902	0	0
14	0,0018	63	0.8877	0	0	0.1268	0	0
15	0,0019	67,5	0.9511	0	0	0.0634	0	0
16	0,002	72	1.0145	0	0	0.0000	0	0
17	0,0021	76,5	1.0779	0	0	0	0	0
18	0,0023	81	1.1414	0	0	0	0	0
19	0,0024	85,5	1.2048	0	0	0	0	0
20	0,0025	90	1.2682	0	0	0	0	0
21	0,0026	94,5	1.3316	0	0	0	0	0
22	0,0028	99	1.3950	0	0	0	0	0
23	0,0029	103,5	1.3316	0	0	0	0	0
24	0,003	108	1.2682	0	0	0	0	0
25	0,0031	112,5	1.2048	0	0	0	0	0
26	0,0033	117	1.1414	0	0	0	0	0
27	0,0034	121,5	1.0779	0	0	0	0.0000	0
28	0,0035	126	1.0145	0	0	0	0.0634	0
29	0,0036	130,5	0.9511	0	0	0	0.1268	0
30	0,0038	135	0.8877	0	0	0	0.1902	0
31	0,0039	139,5	0.8243	0	0	0	0.2536	0
32	0,004	144	0.7609	0	0	0	0.3170	0
33	0,0041	148,5	0.6975	0	0	0	0.3805	0
34	0,0043	153	0.6341	0	0	0	0.4439	0
35	0,0044	157,5	0.5707	0	0	0	0.5073	0
36	0,0045	162	0.5073	0	0	0	0.5707	0
37	0,0046	166,5	0.4439	0	0	0	0.6341	0
38	0,0048	171	0.3805	0	0	0	0.6975	0
39	0,0049	175,5	0.3170	0	0	0	0.7609	0
40	0,005	180	0.2536	0	0	0	0.8243	0
41	0,0051	184,5	0.1902	0	0	0	0.8877	0
42	0,0053	189	0.1268	0	0	0	0.9511	0

43	0,0054	193,5	0.0634	0	0	0	1.0145	0
44	0,0055	198	0.0000	0	0	0	1.0779	0
45	0,0056	202,5	0	0	0	0	1.1414	0
46	0,0058	207	0	0	0	0	1.2048	0
47	0,0059	211,5	0	0	0	0	1.2682	0
48	0,006	216	0	0	0	0	1.3316	0
49	0,0061	220,5	0	0	0	0	1.3950	0
50	0,0063	225	0	0	0	0	1.3316	0
51	0,0064	229,5	0	0	0	0	1.2682	0
52	0,0065	234	0	0	0	0	1.2048	0
53	0,0066	238,5	0	0	0.0000	0	1.1414	0
54	0,0068	243	0	0	0.0634	0	1.0779	0
55	0,0069	247,5	0	0	0.1268	0	1.0145	0
56	0,007	252	0	0	0.1902	0	0.9511	0
57	0,0071	256,5	0	0	0.2536	0	0.8877	0
58	0,0073	261	0	0	0.3170	0	0.8243	0
59	0,0074	265,5	0	0	0.3805	0	0.7609	0
60	0,0075	270	0	0	0.4439	0	0.6975	0
61	0,0076	274,5	0	0	0.5073	0	0.6341	0
62	0,0078	279	0	0	0.5707	0	0.5707	0
63	0,0079	283,5	0	0	0.6341	0	0.5073	0
64	0,008	288	0	0	0.6975	0	0.4439	0
65	0,0081	292,5	0	0	0.7609	0	0.3805	0
66	0,0083	297	0	0	0.8243	0	0.3170	0
67	0,0084	301,5	0	0	0.8877	0	0.2536	0
68	0,0085	306	0	0	0.9511	0	0.1902	0
69	0,0086	310,5	0	0	1.0145	0	0.1268	0
70	0,0088	315	0	0	1.0779	0	0.0634	0
71	0,0089	319,5	0	0	1.1414	0	0.0000	0
72	0,009	324	0	0	1.2048	0	0	0
73	0,0091	328,5	0	0	1.2682	0	0	0
74	0,0093	333	0	0	1.3316	0	0	0
75	0,0094	337,5	0	0	1.3950	0	0	0
76	0,0095	342	0	0	1.3316	0	0	0
77	0,0096	346,5	0	0	1.2682	0	0	0
78	0,0098	351	0	0	1.2048	0	0	0
79	0,0099	355,5	0	0	1.1414	0	0	0
80	0,01	360	0	0	1.0779	0	0	0.0000
81	0,0101	364,5	0	0	1.0145	0	0	0.0634
82	0,0103	369	0	0	0.9511	0	0	0.1268
83	0,0104	373,5	0	0	0.8877	0	0	0.1902
84	0,0105	378	0	0	0.8243	0	0	0.2536
85	0,0106	382,5	0	0	0.7609	0	0	0.3170
86	0,0108	387	0	0	0.6975	0	0	0.3805

87	0,0109	391,5	0	0	0.6341	0	0	0.4439
88	0,011	396	0	0	0.5707	0	0	0.5073
89	0,0111	400,5	0	0	0.5073	0	0	0.5707
90	0,0113	405	0	0	0.4439	0	0	0.6341
91	0,0114	409,5	0	0	0.3805	0	0	0.6975
92	0,0115	414	0	0	0.3170	0	0	0.7609
93	0,0116	418,5	0	0	0.2536	0	0	0.8243
94	0,0118	423	0	0	0.1902	0	0	0.8877
95	0,0119	427,5	0	0	0.1268	0	0	0.9511
96	0,012	432	0	0	0.0634	0	0	1.0145
97	0,0121	436,5	0	0	0.0000	0	0	1.0779
98	0,0123	441	0	0	0	0	0	1.1414
99	0,0124	445,5	0	0	0	0	0	1.2048
100	0,0125	450	0	0	0	0	0	1.2682
101	0,0126	454,5	0	0	0	0	0	1.3316
102	0,0128	459	0	0	0	0	0	1.3950
103	0,0129	463,5	0	0	0	0	0	1.3316
104	0,013	468	0	0	0	0	0	1.2682
105	0,0131	472,5	0	0	0	0	0	1.2048
106	0,0133	477	0	0	0	0	0	1.1414
107	0,0134	481,5	0	0.0000	0	0	0	1.0779
108	0,0135	486	0	0.0634	0	0	0	1.0145
109	0,0136	490,5	0	0.1268	0	0	0	0.9511
110	0,0138	495	0	0.1902	0	0	0	0.8877
111	0,0139	499,5	0	0.2536	0	0	0	0.8243
112	0,014	504	0	0.3170	0	0	0	0.7609
113	0,0141	508,5	0	0.3805	0	0	0	0.6975
114	0,0143	513	0	0.4439	0	0	0	0.6341
115	0,0144	517,5	0	0.5073	0	0	0	0.5707
116	0,0145	522	0	0.5707	0	0	0	0.5073
117	0,0146	526,5	0	0.6341	0	0	0	0.4439
118	0,0148	531	0	0.6975	0	0	0	0.3805
119	0,0149	535,5	0	0.7609	0	0	0	0.3170
120	0,015	540	0	0.8243	0	0	0	0.2536
121	0,0151	544,5	0	0.8877	0	0	0	0.1902
122	0,0153	549	0	0.9511	0	0	0	0.1268
123	0,0154	553,5	0	1.0145	0	0	0	0.0634
124	0,0155	558	0	1.0779	0	0	0	0.0000
125	0,0156	562,5	0	1.1414	0	0	0	0
126	0,0158	567	0	1.2048	0	0	0	0
127	0,0159	571,5	0	1.2682	0	0	0	0
128	0,016	576	0	1.3316	0	0	0	0
129	0,0161	580,5	0	1.3950	0	0	0	0
130	0,0163	585	0	1.3316	0	0	0	0

131	0,0164	589,5	0	1.2682	0	0	0	0
132	0,0165	594	0	1.2048	0	0	0	0
133	0,0166	598,5	0	1.1414	0	0.0000	0	0
134	0,0168	603	0	1.0779	0	0.0634	0	0
135	0,0169	607,5	0	1.0145	0	0.1268	0	0
136	0,017	612	0	0.9511	0	0.1902	0	0
137	0,0171	616,5	0	0.8877	0	0.2536	0	0
138	0,0173	621	0	0.8243	0	0.3170	0	0
139	0,0174	625,5	0	0.7609	0	0.3805	0	0
140	0,0175	630	0	0.6975	0	0.4439	0	0
141	0,0176	634,5	0	0.6341	0	0.5073	0	0
142	0,0178	639	0	0.5707	0	0.5707	0	0
143	0,0179	643,5	0	0.5073	0	0.6341	0	0
144	0,018	648	0	0.4439	0	0.6975	0	0
145	0,0181	652,5	0	0.3805	0	0.7609	0	0
146	0,0183	657	0	0.3170	0	0.8243	0	0
147	0,0184	661,5	0	0.2536	0	0.8877	0	0
148	0,0185	666	0	0.1902	0	0.9511	0	0
149	0,0186	670,5	0	0.1268	0	1.0145	0	0
150	0,0188	675	0	0.0634	0	1.0779	0	0
151	0,0189	679,5	0	0.0000	0	1.1414	0	0
152	0,019	684	0	0	0	1.2048	0	0
153	0,0191	688,5	0	0	0	1.2682	0	0
154	0,0193	693	0	0	0	1.3316	0	0
155	0,0194	697,5	0	0	0	1.3950	0	0
156	0,0195	702	0	0	0	1.3316	0	0
157	0,0196	706,5	0	0	0	1.2682	0	0
158	0,0198	711	0	0	0	1.2048	0	0
159	0,0199	715,5	0	0	0	1.1414	0	0
160	0,02	720	0	0	0	1.0779	0	0