

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma  
Auto- ja korjaamotekniikka

Tutkintotyö

Joni Kaiterniemi

**YAMAHA R6 -MOOTTORIN MUUTTAMINEN  
FORMULA STUDENT -KÄYTTÖÖN**

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 2008

Tekn. Lis. Tauno Kulojärvi  
TAMK Formula Student Ry

# TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikka

Auto- ja korjaamotekniikka

Kaiterniemi, Joni

Yamaha R6 -moottorin muuttaminen Formula Student-käyttöön

Tutkintotyö

62 sivua, 1 liite

Työn ohjaaja

Tekn. Lis. Tauno Kulojärvi

Työn teettäjä

TAMK formula Student Ry

Maaliskuu 2008

Hakusanat

imujärjestelmän suunnittelu, pakojärjestelmän suunnittelu, nokka-akselien suunnittelu, paineaaltojen käyttäytyminen, formula student

## TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa Yamaha R6 -moottorin muutokset Formula Student-käyttöön. Formula Student on maailmanlaajuinen opiskelijoille tarkoitettu kilpaluokka, jossa kilpaillaan pienellä omavalmisteisella formulatyyllisellä autolla. Ajosuoritusten lisäksi kilpailussa arvostellaan auton suunnittelu- ja rakenneratkaisut, sekä valmistuksen kustannustehokkuus ja tiimin kyky markkinoida autoa mahdolliselle valmistajalle. Moottorin suurin sallittu iskutilavuus on  $610 \text{ cm}^3$  ja ilma tulee johtaa moottoriin halkaisijaltaan 20 mm imuilmankuristimen kautta.

Moottorin kierrosnopeusalueita laskettiin huomattavasti ja moottorin toiminnasta haluttiin joustavampaa. Moottorin toiminnan muuttamiseksi suunniteltiin uusi imujärjestelmä sääntöjen mukaisella imuilmankuristimella, sekä uusi pakojärjestelmä ja nokka-akselit. Suunnittelussa käytettiin Ricardo Wave-moottorisimulointiohjelmaa.

Työssä keskityttiin erityisesti paineaaltojen käyttäytymisen tutkimiseen moottorin imu- ja pakojärjestelmässä. Imu- ja pakojärjestelmä suunniteltiin siten, että paineaaltojen käyttäytyminen tehostaa moottorin toimintaa halutulla kierrosnopeusalueella. Imujärjestelmästä valmistettiin kaksi eri versiota, joilla tullaan testaamaan imusarjan geometrian vaikutuksia moottorin toimintaan. Testi-imujärjestelmissä on myös mahdollisuus muuttaa ensiöputken pituuksia ja kokoojakammion tilavuutta ja mitata moottorin vääntömomentti eri vaihtoehdoilla. Näin voidaan varmistaa moottorisimuloinnin tulokset. Valmistus ja testaus on osittain rajattu tämän työn ulkopuolelle, koska työtä ei ole saatu täysin päätökseen.

# TAMPERE POLYTECHNIC

Automobile and Transport Engineering

Automobile and Garage Engineering

Kaiterniemi, Joni

Modifications of Yamaha R6 -engine for Formula Student usage

Engineering Thesis

62 pages, 1 appendice

Thesis Supervisor

Lic. Tech. Tauno Kulojärvi

April 2008

Keywords

intake system design, exhaust system design, camshaft design, pressure wave activity, formula student

## ABSTRACT

The purpose of this work was to design and fulfill modifications of Yamaha R6 -engine needed for Formula Student -usage. Formula Student is a national competition for student to compete with a small formula style race car. In competition besides the performance of the car also design, cost and marketing are evaluated. The engines displacement is restricted to maximum of 610 cm<sup>3</sup> and all air to the engine must pass through a circular 20 mm air intake restrictor. The engines power band was reduced and we wanted more flexibility to the behavior of the engine. To reach these goals we redesigned the intake system, exhaust system and valve timing. For simulation and tuning we used engine simulation software Ricardo Wave. In this work we focused specially to study the pressure wave activity inside engine manifolds. Engine manifolds were designed so that pressure wave activity heightens performance in particular engine speed range. There are going to be built two test versions of the intake manifold to test the influence of manifold geometry to engine performance. There is also a possibility to vary the length of the intake runners and volume of plenum chamber to ensure engine simulation results. Part of fabrication and testing is defined out of this work because it is unfinished.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Formula Student -projektia. Tampereen ammattikorkeakoulun Formula Student -projekti alkoi kehittyä syksyllä 2006, ja joulukuussa 2006 perustettiin TAMK Formula Student Ry projektin hallintaa ja rahoitusta varten. Tiimin ensimmäinen tavoite oli osallistua Formula Student 2007 kilpailun luokkaan kolme, jossa arvostellaan ainoastaan auton suunnitelmat. Suunnitelmat saatiin tiukasta aikataulusta huolimatta valmiiksi ja kilpailusta saatiin tärkeää kokemusta projektin päätavoitetta eli Formula Student 2008 luokkaa 1 varten. Luokassa 1 kilpailaan valmiilla omavalmisteisella autolla suunnittelu-, kustannus-, markkinointi- ja ajo-osuuksissa.

Vuoden 2008 auton suunnittelu aloitettiin syksyllä 2007. Projektin eri osa-alueisiin valittiin 2-4 hengen työryhmät. Itse kuulun moottoriryhmään. Työt jaettiin edelleen ryhmän sisällä pienempiin kokonaisuuksiin. Projektin suuri työmäärä yllätti varmasti jokaisen tiimin jäsenen ja haluan kiittää muutamaa tiimiläistä, joiden työpanos on tehnyt auton valmistumisesta mahdollista. Kiitän suunnittelupäällikkö Marko Mantyniemeä ja alustavastaava Esa Huhtamäkeä hienosta työstä niin suunnittelussa, valmistuksessa, kuin käytännön järjestelyissä. Kiitän myös Anssi Alataloa terävistä kommentteista ja avusta PR -asioissa, sekä avusta moottorin simuloinnissa ja osien valmistuksessa. Lisäksi haluan esittää erityiskiitokset Tia Suurhaskolle matemaattisesta avusta ja kärsivällisyydestä.

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT .....	3
ALKUSANAT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO .....	5
1 JOHDANTO.....	6
2 LÄHTÖKOHDAT FORMULA STUDENT -MOOTTORIN SUUNNITTELUSSA .....	6
2.1 Formula Student -moottoria koskevat säännöt .....	6
2.2 Formula Student -moottorin suunnitteluperusteet .....	7
3 MOOTTORIN VALINTA JA MUUTOKSET .....	8
4 MOOTTORIN IMUJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET .....	8
4.1 Imusarja .....	9
4.1.1 Paineaaltojen käyttäytyminen imusarjassa /2/ .....	11
4.1.2 Imusarjan ensiöputket.....	17
4.1.3 Kokoojakammio .....	17
4.2 Kuristin.....	19
4.3 Kaasuläppä .....	19
5. PAKOJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET .....	20
5.2 Pakosarjatyypit /9/ .....	20
5.2.1 Pakosarja 4-1-kokoojalla .....	21
5.2.2 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla .....	22
5.1 Paineaaltojen käyttäytyminen pakosarjassa.....	22
5.3 Pakosarjan mitoitus .....	24
6. NOKKA-AKSELIEN SUUNNITTELUPERUSTEET.....	26
7. MOOTTORISIMULAATIO RICARDO WAVE -OHJELMALLA .....	28
7.1 Imusarjan optimointi .....	29
7.1.1 Imukanavan pituus.....	30
7.1.2 Imukanavan halkaisija .....	32
7.1.3 Kokoojakammion tilavuus.....	34
7.2 Pakosarjan optimointi .....	35
7.2.1 Pakosarja 4-1-kokoojalla .....	36
7.2.2 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla 360° yhdistetyillä ensiöputkilla .....	41
7.2.3 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla 180° yhdistetyillä ensiöputkilla .....	47
7.2.4 Pakosarjatyypin valinta moottorisimuloinnin tulosten pohjalta .....	49
7.3 Nokka-akselien optimointi .....	50
8. VALMISTUS .....	54
8.1 Imusarja .....	54
8.2 Pakosarja.....	58
8.3 Nokka-akselit.....	59
9. TYÖSSÄ SAAVUTETUT TULOKSET JA KEHITYSNÄKYMÄT .....	59
LÄHDELUETTELO .....	62

## 1 JOHDANTO

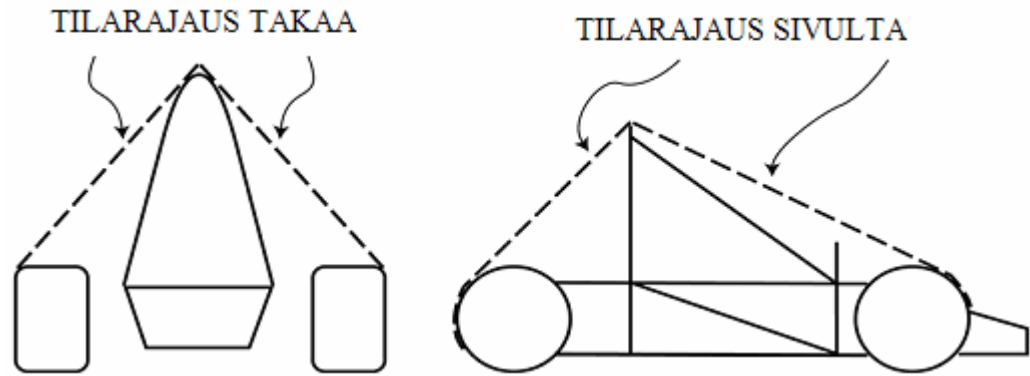
Tämä työ käsittelee moottorin imu- ja pakojärjestelmän suunnittelua ja valmistusta sekä nokka-akselien suunnittelua. Suunnittelussa käytetään avuksi moottorisimulointiohjelmaa ja keskitytään erityisesti paineaaltojen käyttäytymisen tutkimiseen. Työn tavoite on muuttaa moottorin ominaisuuksia sopivaksi Formula Student -kilpailuun, erityisesti kokemattomille kuljettajille. Moottorin vääntömomenttikuvaajasta pyritään saamaan mahdollisimman laaja ja suoraviivainen. Tämä tekee moottorista anteeksiantavaisemman esimerkiksi vaihtenvaihtoajankohdan suhteen. Pakojärjestelmästä on rajattu pois äänenvaimennus, koska sen suunnittelu on vielä kesken, ja lopulliset rakennevalinnat tehdään vasta käytännön melumittauksen perusteella. Työn lopullisia tuloksia ei käsitellä kokonaisuudessaan, koska valmistus on kesken ja testejä ei ole vielä päästy aloittamaan.

## 2 LÄHTÖKOHDAT FORMULA STUDENT -MOOTTORIN SUUNNITTELUSSA

### 2.1 Formula Student -moottoria koskevat säännöt

Formula Student -moottorin valinta ja rakentaminen on melko vapaata. Sääntöjen tehtävä on pitää autojen suorituskyky toisiinsa nähden tasaisena ja järkevissä rajoissa. Säännöissä on myös paljon turvallisuuteen liittyviä määräyksiä.

Moottorin täytyy olla nelitahtinen ja suurin sallittu iskutilavuus on  $610 \text{ cm}^3$ . Polttoaineena saa käyttää bensiiniä RON98 tai bensiinin ja etanolin sekoitusta E85. Sylinteriluku on vapaa. Ilma tulee johtaa moottoriin yhden kaasuläpän ja sitä seuraavan pyöreän imuilmankuristimen kautta. Käytettäessä RON98 bensiiniä kuristin on halkaisijaltaan 20 mm ja käytettäessä E85 sekoitusta halkaisija on 19 mm. Moottorin ahtaminen on sallittua, mutta tällöin kaasuläppä ja imukuristin tulee sijoittaa ahtimen imupuolelle. Imu- ja polttoaineensyöttöjärjestelmä tulee sijoittaa turvakaaren ja renkaiden rajaaman tilan sisään kuvan 1 mukaisesti. Moottorin melu ei saa ylittää 110 desibeliä. /1/



Kuva 1 Imu- ja polttoaineensyöttöjärjestelmän tilarajaus /1/

## 2.2 Formula Student -moottorin suunnitteluperusteet

Tärkeimmät Formula Student -moottorin ominaisuudet ovat keveys, pieni koko, luotettavuus, suorituskyky ja pieni polttoaineen kulutus. Keveys on tärkeä ominaisuus kilpa-autoille, mutta Formula Student -luokassa tämä korostuu entisestään. Autot ovat hyvin pieniä ja muutaman kilon säästö moottorissa on prosentuaalisesti huomattava. Painavalla autolla on mahdoton menestyä kilpailun pääasiassa jatkuvaa kiihdytystä, jarrutusta ja kaarreajoa olevilla radoilla. Ajo-ominaisuuksien parantamiseksi tulisi painopisteen olla mahdollisimman alhaalla. Auton takaosa rakentuu moottorin ja voimansiirron ympärille, joten myös moottorin pieni koko on tärkeää. Rungon takaosassa säästetään painoa ja muiden komponenttien sijoittelu on vapaampaa. Kilpailun suurimmat osapisteet on mahdollista saada kilpailun viimeisenä ajettavasta kestävyysajosta. Kilpailussa on käytännössä mahdoton menestyä, jos tapahtuu keskeytys esim. moottorivaurion takia. Moottorin täytyy olla kestävä ja käytettävien osien luotettavia, eivätkä moottoriin tehtävät muutokset saa vaikuttaa liikaa sen luotettavuuteen. Kestävyysajossa mitataan myös polttoaineenkulutus, ja pienestä kulutuksesta saa lisäpisteitä. Mutkaisilla ja hitailla radoilla vaaditaan moottorilta vääntömomenttia laajalla kierrosnopeusalueella jo alakierroksilta lähtien ja nopeaa kaasuun reagointia. Kuljettajat ovat opiskelijoita ja suurin osa hyvin kokemattomia kilpakuljettajia. Moottorin ominaisuuksien tulee olla riittävän joustavia. Tämä myös puoltaa laajan ja tasaisen vääntömomenttikuvaajan tavoittelemista. Moottorin tehokasta käyttöä helpottaa myös niin sanottu korkea vääntömomenttisisitekeys eli momentinnousu. Tällainen moottori on anteeksiantavampi esimerkiksi vaihtenvaihtoajankohdan suhteen.

### 3 MOOTTORIN VALINTA JA MUUTOKSET

Moottoriksi valittiin Yamahan R6 vuosimallia 2006. Tärkeimmät tiedot ja ominaisuudet on lueteltu seuraavassa taulukossa:

**Taulukko 1** Yamaha R6 moottorin tiedot

moottorityyppi	4-sylinterinen rivimoottori, 4-tahtinen, 16-venttiilinen DOHC
iskutilavuus	599 cm <sup>3</sup>
iskunpituus/poraus	(67 X 42,5) mm
teho	132 hv/15200 1/min
vääntömomentti	65 Nm/11500 1/min
puristussuhde	12,8:1
massa	n. 52 kg
sytytysjärjestys	1-2-4-3

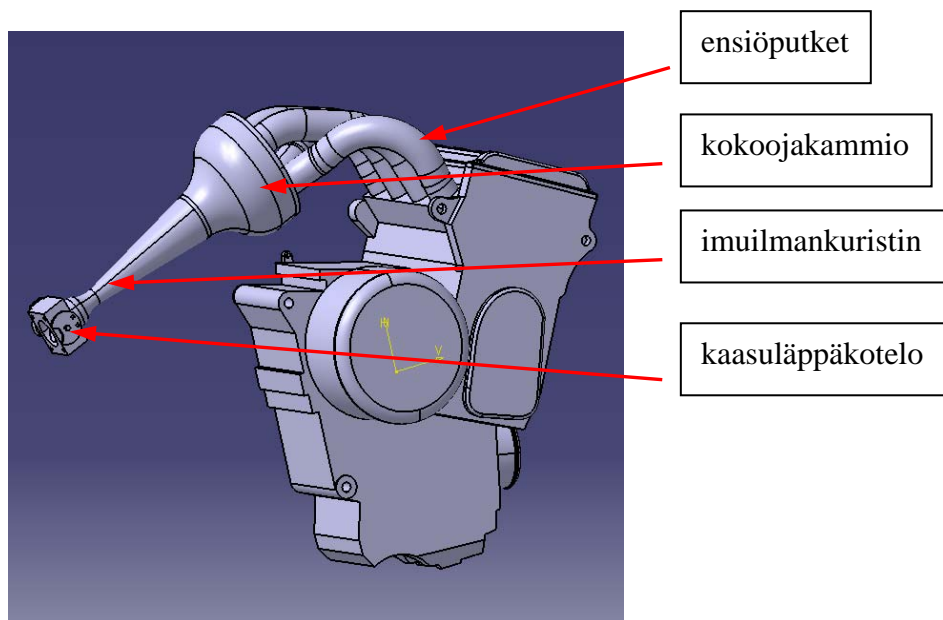
Moottori on erittäin korkeavirtiteinen. Kierrosnopeusalue ulottuu 17000 1/min asti. Sylinterikannen kanavat ja palotilat ovat muodoltaan ja pinnanlaadultaan moitteettomat. Moottorin kierrosnopeusalueutta joudutaan laskemaan huomattavasti, koska korkealla kierrosnopeudella ilman virtausnopeus imuilmakuristimen kohdalla saavuttaa äänennopeuden. Korkean virtausnopeuden aiheuttaman suuren virtausvastuksen vuoksi moottorin tuottama teho laskee voimakkaasti viimeistään 13000 1/min kierrosnopeuden jälkeen. Moottorin huippumomentti pyritään saamaan noin 8000 1/min kierrosnopeudelle. Moottorin imu- ja pakosarjat sekä nokka-akselit optimoidaan uudelle kierrosnopeusalueelle. Moottoriin asennetaan myös säädettävä moottorinohjaus, suunnitellaan uusi jäähdytysjärjestelmä ja lisätään voitelujärjestelmään paineakku.



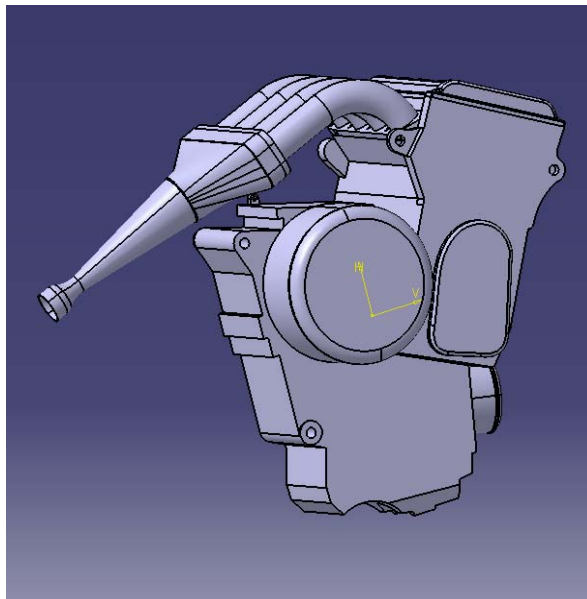
## 4 MOOTTORIN IMUJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET

### 4.1 Imusarja

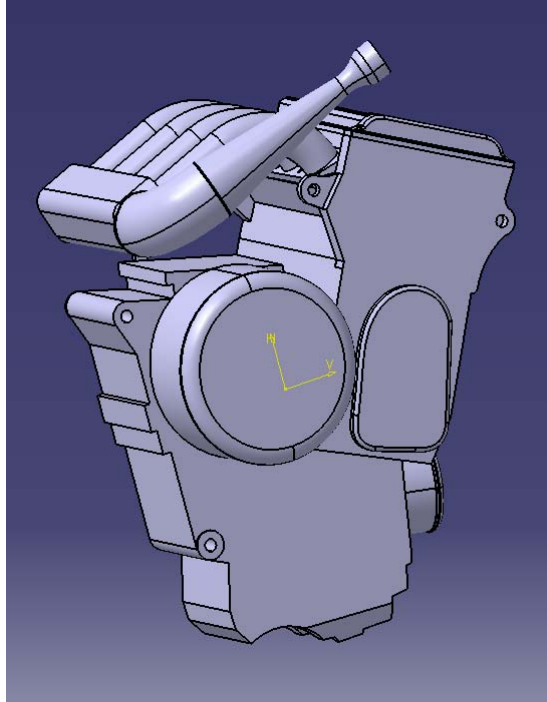
Imusarjatyypit voidaan jakaa kolmeen osaan muotoilunsa puolesta. Eri imusarjatyypit, kuten myös kaikki muut valmistettavat osat, mallinnettiin Catia V5R18 3D-ohjelmalla. Kuvan 2 mukaisessa imusarjassa ilma johdetaan ensiöputkiin nähden symmetrisesti kokoojakammion keskeltä, kuvan 3 imusarjassa ilma johdetaan kokoojakammioon sen keskeltä ja kuvan 4 imusarjassa sen sivusta. Eri osien nimitykset on merkattu kuvaan 2.



**Kuva 2** Imusarjatyppi 1



**Kuva 3** Imusarjatyppi 2

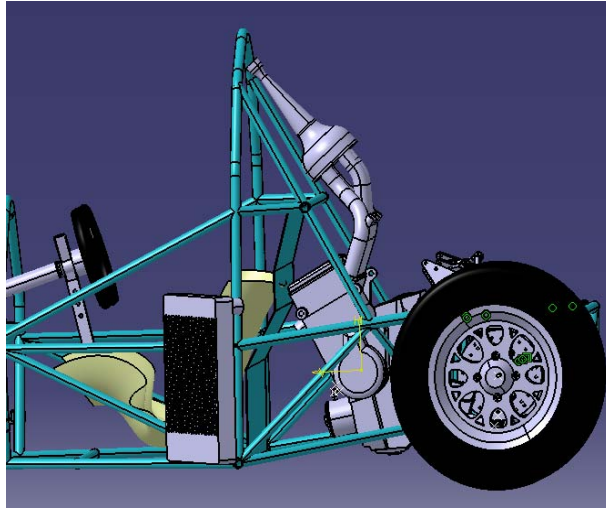


**Kuva 4** Imusarjatyyppi 3

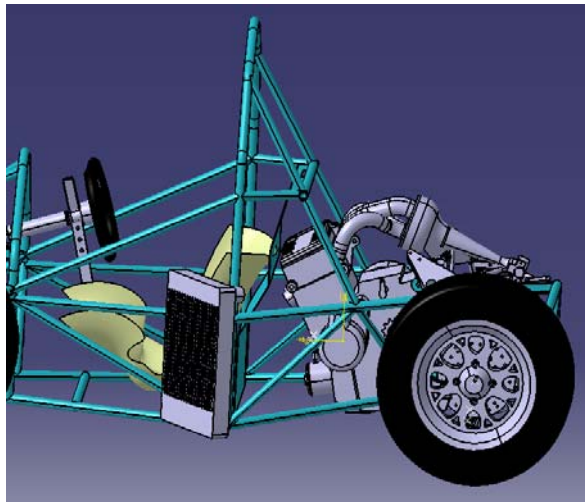
Imusarjan muoto tulisi olla sellainen, että siinä syntyisi mahdollisimman pieni painehäviö, ja ilma jakaantuisi mahdollisimman tasaisesti eri sylinterien kesken. Tyypin 1 imusarja mahdollistaa tasaisimman ilmatäytöksen sylinterien kesken. Huonoiten ilma jakaantuu tyypin 3 imusarjassa, jossa ilma pyrkii voimakkaammin ilman sisääntulon vastakkaisella puolella oleviin sylintereihin. Epätasainen ilmatäyttö vaikuttaa sylintereiden välisiin seossuhteisiin, joka laskee moottorin suorituskykyä, ja voi pahimmillaan johtaa moottorivaurioon. Tilanne voidaan korjata käyttämällä sekventiaaliruiskutusta ja sylinterikohtaista polttoaineen säätöä, mutta käytettävässä moottorinohjauksessa ei ole mahdollisuutta sylinterikohtaiseen säätöön. Tyypin 1 imusarjassa myös painehäviö jää pienimmäksi. Suurin painehäviö tapahtuu tyypin 2 imusarjassa, äkillisimmän poikkipinta-alan muutoksen vuoksi, jolloin ilmavirtaus irtoaa seinämästä ja syntyy haitallista turbulenssia./4/

Imusarjan ensiöputkiin täytyy tehdä mutkat, jotta imusarja mahtuu sääntöjen määrämien tilan sisäpuolelle. Imusarjassa tapahtuvan painehäviön minimoimiseksi imusarja kannattaisi suunnata ylöspäin kuvan 5 mukaisesti, jolloin mutkan kulmaksi tulisi noin  $55^\circ$ . Tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, koska kuljettajan pää-tuen kiinnitys tulee imusarjan tielle. Imusarja täytyy suunnata taaksepäin, jolloin mutkien astekulmaksi tulee noin  $90^\circ$  (kuva 6). Näin painehäviö muodostuu hie-

man suuremmaksi, mutta samalla auton painopiste laskee hieman imusarjan painon siirtyessä alemmas.



**Kuva 5** Ylöspäin suunnattu imusarja

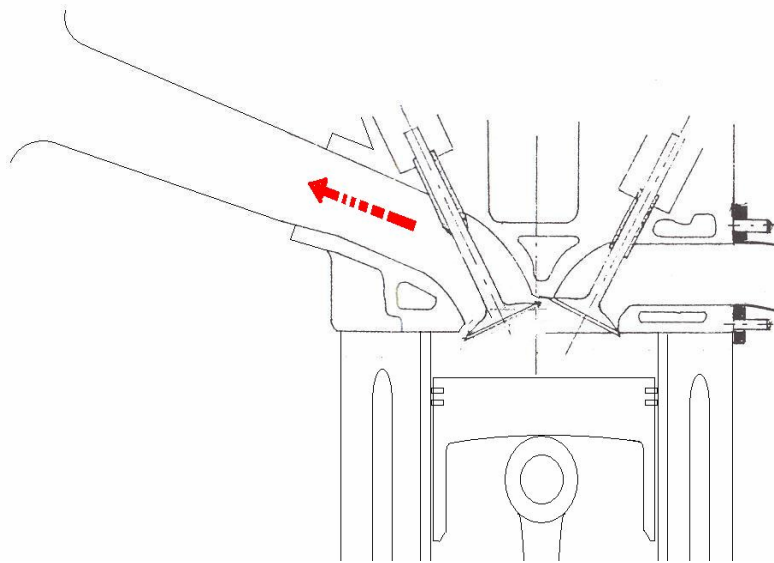


**Kuva 6** Taaksepäin suunnattu imusarja

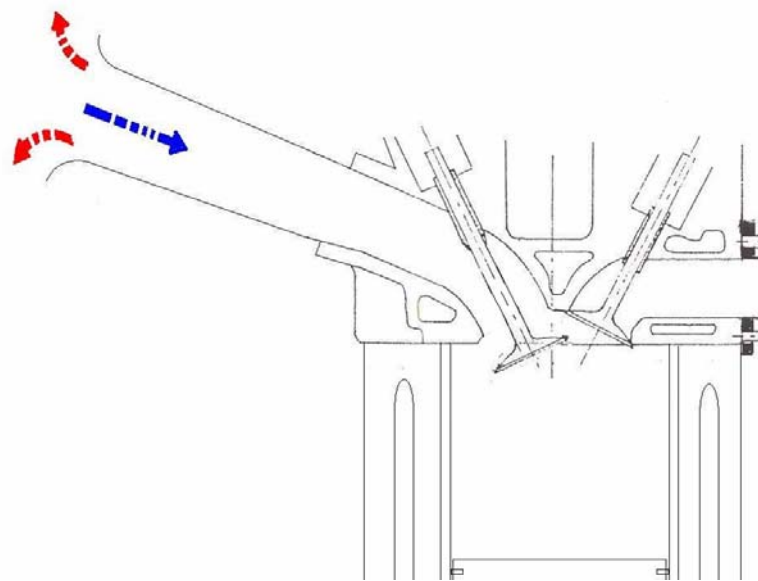
#### 4.1.1 Paineaaltojen käyttäytyminen imusarjassa /2/

Imusarjan paine sen eri osissa vaihtelee voimakkaasti moottorin työkierron aikana. Nopeat painevaihtelut aikaansaavat äänennopeudella eteneviä paineaaltoja. Perusnäkökohta imusarjan suunnittelussa on aikaansaada korkeapaineinen tiivistysaalto imuventtiilille siten, että massavirta sylinteriin kasvaa halutulla moottorin kierrosnopeudella. Tätä kutsutaan paineaaltohtamiseksi.

Paras hyöty tiivistysaalosta saadaan, jos se saapuu venttiilille imutahdin alakuolokohdan ja venttiilin sulkeutumisen välisenä aikana. Tällöin paine toimii ylöspäin suuntaavan männän voimaa vastaan ja sylinterin täytös kasvaa. Täytössuhde voi kasvaa tiivistysaalton vaikutuksesta huomattavasti yli sadan prosentin. Paineaalto syntyy imutahdin alussa, kun männän alaspäin suuntautuva liike aiheuttaa äkillisen paineen alenemisen imukanavassa imuventtiilin kohdalla (kuva 7). Tämä matalapaineinen harvennusaalto etenee imusarjan ensiöputkea pitkin kohti kokoojakammiota. Ensiöputken avoimen pään saavutettuaan paineaalto jakautuu koko imusarjaan, mutta ääniaallon tavoin harvennusaalto aiheuttaa myös vastakkaiseen suuntaan ensiöputkea kulkevan tiivistysaalton (kuva 8). Tämän tiivistysaalton huippukohdan ajoitus edellä mainitulla tavalla saa aikaan täytössuhteen nousun.

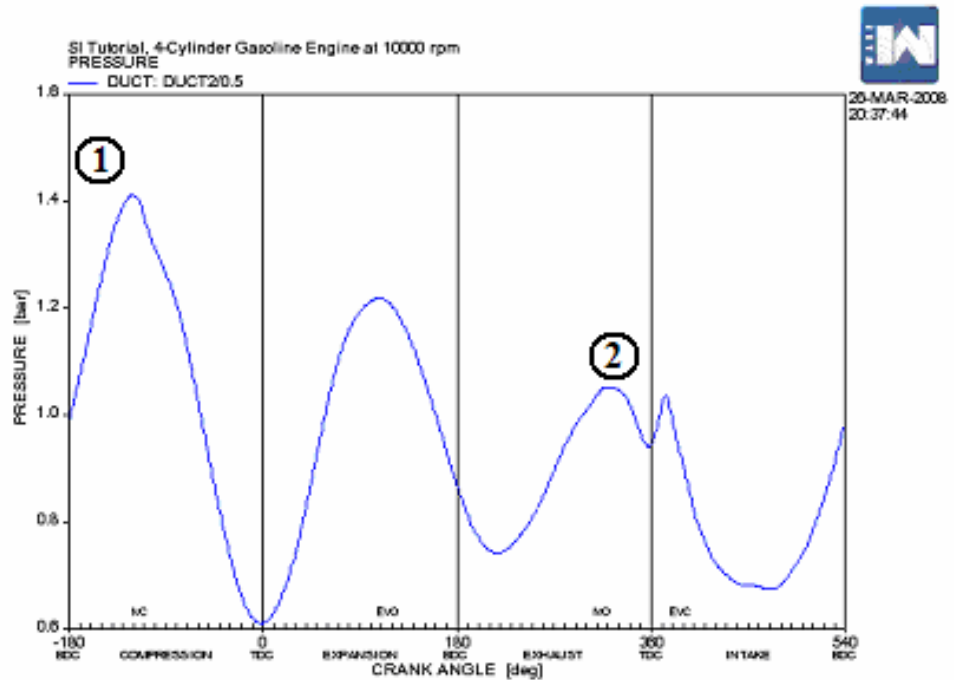


**Kuva 7** Harvennusaallon syntyminen imuventtiilin auetessa



**Kuva 8** Tiivistysaallon syntyminen harvennusaallon saapuessa kokoojakammioon

Tiivistysaallon kohta on merkitty numerolla 1 imukanavan painekuvaajaan (kuva 9). Paine kuvaaja on luotu moottorisimulointiohjelmalla, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 7. Vaaka-akselille on merkattu venttiilien avautumis- ja sulkeutumiskohdat (IVO= imuventtiilin avautuminen, EVC= pakoventtiilin sulkeutuminen, IVC = imuventtiilin sulkeutuminen, EVO = pakoventtiilin avautuminen). Tiivistysaalloa ei yleensä pysty näkemään aallon huippuna painekuvaajassa, koska paine kasvaa luonnostaan voimakkaasti imuventtiilin sulkeutuessa. Tämä näkyy jyrkänä huippuna kuvaajassa imuventtiilin sulkeutumisen kohdalla. Ainoa keino on tarkkailla paineen arvoa ennen venttiilin sulkeutumista yläkuolokohdan jälkeen. Kierrosluvun täsmätessä tiivistysaallon kanssa paineen arvo kasvaa yläkuolokohdan ja venttiilin sulkeutumisen välillä.



Kuva 9 Imukanavan painekuvaaja

Suoran putken värähtelytaajuuden mukaan laskettuna imusarjan viritystaajuus noudattaa seuraavaa yhtälöä:

$$f = \frac{a}{2l}, \quad (1)$$

jossa  $f$  = imusarjan viritystaajuus[Hz],  
 $a$  = äänen nopeus[m/s],  
 $l$  = imusarjan ensiöputken pituus[m].

Yleisesti on tiedossa, että myös imusarjan ensiöputken halkaisijalla voidaan vaikuttaa viritystaajuuteen. Tarkasteltaessa imusarjan, avonaisen imuventtiilin ja sylinterin muodostamaa yhdysputkien ja tilavuuksien yhdistelmää havaitaan, että kyseessä on paljon monimutkaisempi systeemi kuin yhtälö 1 ottaa huomioon. Systeemiä voidaan tarkastella Helmholtzin resonaattorin avulla, josta saadaan ratkaistua taajuus seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}, \quad (2)$$

jossa  $f$  = taajuus[Hz],  
 $a$  = äänennopeus[m/s],  
 $A$  = yhdysputken halkaisija[m],  
 $V$  = sylinterin tilavuus[m<sup>3</sup>],  
 $l$  = yhdysputken pituus[m].

Jos paineaalto mitoitetaan imutahdin alakuolokohtaan, voidaan imusarjan viritys-  
kierrosnopeus laskea Helmholtzin resonanssiin perustuen seuraavan yhtälön mu-  
kaisesti:

$$n = \frac{15a}{\pi} \sqrt{\frac{F_p}{l_p V_c}}, \quad (3)$$

jossa  $n$  = virityskierrosnopeus[1/min],  
 $F_p$  = ensiöputken poikkipinta-ala[m<sup>2</sup>],  
 $l_p$  = ensiöputken ja imukanavan pituuksien summa[m],  
 $V_c$  = keskimääräinen sylinterin tilavuus[m<sup>3</sup>].

Yhtälö saadaan käyttökelpoisempaan muotoon, kun siitä ratkaistaan imukanavan  
pituus  $l_p$ :

$$l_p = \frac{15^2 a^2 F_p}{n^2 \pi^2 V_c} \quad (4)$$

Massavirta sylinteriin saadaan kasvamaan myös, jos tiivistysaalto saapuu juuri,  
kun imuventtiili on aukeamassa. Tämä paineaalto saa alkunsa imuventtiilin sul-  
keutuessa. Virtaavan seoksen inertian takia venttiilin sulkeutuessa sen taakse syn-  
tyy äkillinen korkeapaine, joka aikaansaa imusarjan ensiöputkia ylöspäin etenevän  
tiivistysaallon. Aalto heijastuu kokoojakammioista harvennusaaltona kulkien kohti  
suljettua venttiiliä, johon törmätessään se heijastuu jälleen kohti kokoojakammio-

ta. Virityskierrosnopeuden täsmätessä ja harvennusaallon heijastuessa avonaisesta kokoojakammion päästä korkeapaineaaltona imuventtiilin tulisi olla juuri aukeamassa uudestaan, ja imutapahtuma käynnistyy korkeapaineisena. Tämä kuitenkin edellyttää, että imuventtiili sulkeutuu ilmavirtauksen sylinteriin päin ollessa vielä voimakas. Toisin sanoen imuventtiili sulkeutuu ihannetapausta aikaisemmin, eli imuventtiili sulkeutuu ennen kuin männän ylöspäin suuntautuva voima voittaa seoksen sylinteriin päin suuntautuvan inertian voiman ja seoksen virtaus pysähtyy.

Paineaalto ei häviä vaan säilyttää taajuutensa ja toistuu kerta-aaltona. Samalla paineaallon voimakkuus pienenee. Yleensä mitoituksessa käytetään toista tai kolmatta kerta-aaltoa, koska usein on mahdotonta käyttää niin pitkää imukanavaa, että voitaisiin hyödyntää ensimmäinen painehuippu. Kerta-aalloille mitoittaminen tuo pienemmän tilantarpeen lisäksi myös muita etuja. Kerta-aallolle mitoitus pienentää aaltojen välimatkaa, jolloin imusarjan tehokkaaseen toimintaan ei muodostu niin suuria katvealueita aaltojen välille. Näin moottorin kierrosnopeusalueelle saadaan sopimaan useita kerta-aaltoja eli imusarja toimii ihanteellisesti usealla kierrosnopeudella. Imusarjan toiminta-alue on laajempi, koska pulssit ovat lähempänä toisiaan. Lisäksi lyhyempi imukanava aiheuttaa vähemmän virtausvastusta. Tiivistysaalto on merkitty kuvan 9 imukanavan painekuvaajaan numerolla 2. Kyseisellä kierrosnopeudella toinen kerta-aalto osuu venttiilin avautumisen kohdalle.

Ensimmäiselle tiivistysaallolle mitoittaessa paineaalto kulkee ensiöputken pituuden neljä kertaa, joten yhtälö 1 saadaan seuraavaan muotoon:

$$f = \frac{a}{4l} \quad (5)$$

Imukanavan pituus saadaan ratkaistua johtamalla yhtälö 5 seuraavaan muotoon:

$$l = \frac{60a}{4n} \quad (6)$$

Tehtäessä mitoitus kerta-aalloille jaetaan kanavan pituus haluttujen kerta-aaltojen lukumäärällä.



#### 4.1.2 Imusarjan ensiöputket

Imusarjan ensiöputkien mitoituksessa käytettiin hyväksi paineaaltojen käyttäytymistä. Yhtälön 4 mukaisesti 8000 1/min kierrosnopeudelle laskettuna imukanavan pituudeksi saadaan 500 mm:

$$l_p = \frac{15^2 \cdot \left(330 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 0,000962m^2}{8000 \text{ rpm}^2 \cdot \pi^2} = 0,5m$$

Yhtälön 6 mukaisesti 8000 1/min kierrosluvulle laskettuna imukanavan pituudeksi saadaan 620 mm:

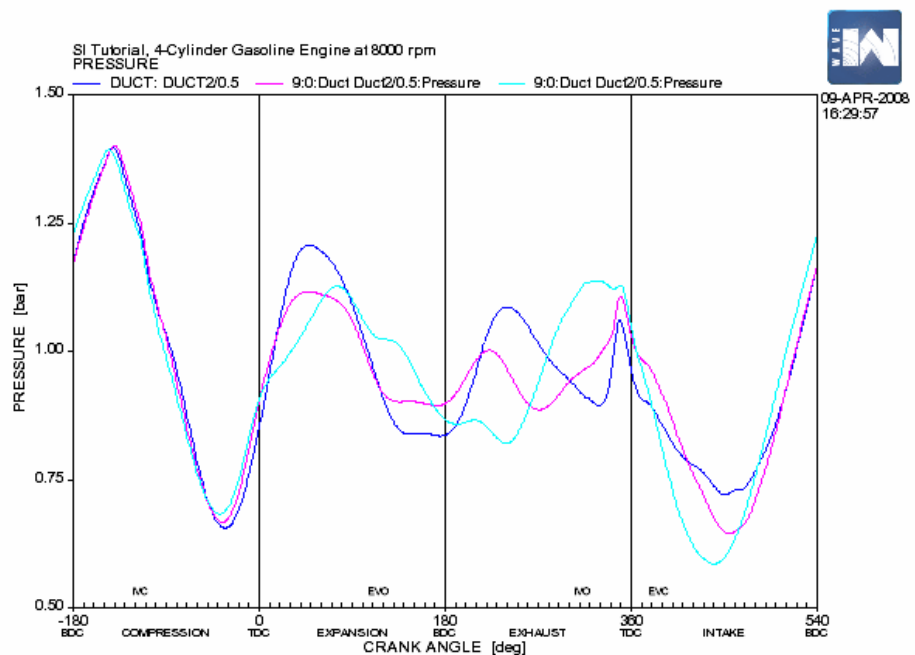
$$l = \frac{60 \cdot 330 \frac{m}{s}}{4 \cdot 8000 \text{ rpm}} = 0,62m$$

Helmholtzin resonanssiin perustuva kaava 4 ottaa huomioon imukanavan halkaisijan. Tämän takia kaavaa 4 pidetään luotettavampana ja sen antama tulos valittiin mitoitusperusteeksi. Moottorin simulointi aloitettiin käyttäen ensimmäistä paineaaltoa, jolloin imukanavan pituus on 500 mm. Putkien halkaisijat valittiin imukanavan halkaisijan 35 mm mukaisiksi.

#### 4.1.3 Kokoojakammio

Kokoojakammio kontrolloi painenvaihtelua sylintereiden kesken. Tilavuudeltaan suuri kokoojakammio vaimentaa painevärähtelyjä, jolloin niiden vaikutus sylinterien kesken pienenee, ja tilavuuden pienentäminen vastaavasti tehostaa vaikutusta. Tämä voidaan havaita kuvassa 10 olevista imukanavan painekuvaajista. Sinisessä kuvaajassa kammion tilavuus on suurin ja värähtely on melko tasaista vaimenevaa

aaltoliikettä, imuventtiilin aukeamisesta johtuvaa heilahdusta lukuun ottamatta. Punaisessa kuvaajassa tilavuutta on pienennetty 50 %, mutta se ei vaikuttanut värähtelyn tasaisuuteen huomattavasti. Vihreässä kuvaajassa tilavuutta on pienennetty edelleen 50 %, jolloin havaitaan selviä epäjatkuvuuskohtia värähtelyssä. Yleensä suurella kokoojakammiolla saadaan korkeampi huipputeho, mutta kaasuun reagointi ja huippumomentti saattavat kärsiä. Kammiossa oleva suuri ilmamäärä lähtee hitaammin liikkeelle venttiilin auetessa, mutta virtauksen pysähtyminen kestää vastaavasti pidempään. Tästä on apua imutahdin loppuosassa, alakuolokohdan jälkeen, kun ilma ahtautuu sylinteriin männän liikettä vastaan. Imukuristimen takia seoksen massavirta sylinteriin ja samalla ahtautuminen männän liikettä vastaan pienenevät. Suurella kokoojakammiolla ja sitä kautta suurella ilman massalla saadaan massavirtaa kasvatettua, ja sylinterin täytös kasvaa erityisesti kierrosnopeusalueen alkupäässä.

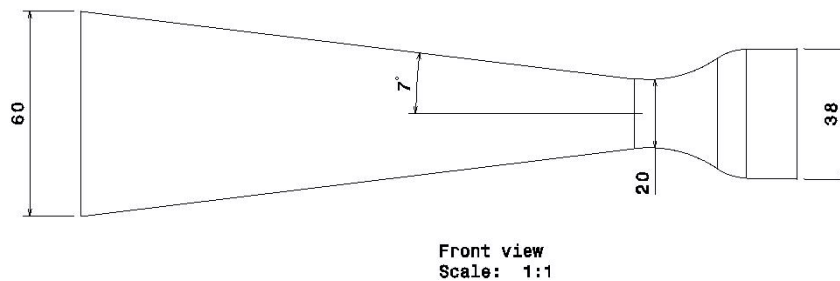


**Kuva 10** Imukanavan painekuvaajat eri kokoojakammion tilavuuksilla

## 4.2 Kuristin

Kuristinosan muotoilulla pyritään saamaan siinä tapahtuva painehäviö minimiin. Saavuttaessa kaasuläpältä kuristimelle imukanava supistuu 38 mm:stä 20 mm:iin kuvan 11 mukaisesti. Supistuksen tulee tapahtua sulavasti ja siten, että ennen kuristusta on laajasäteinen pyöristys. Kuristuskohdan jälkeen on hyödyllistä laskea virtausnopeutta reduusorin avulla. Ilmavirtauksen saapuessa kokoojakammioon virtauspinta-ala kasvaa nopeasti, mikä aiheuttaa virtausnopeuden suhteessa kasvavan painehäviön. Reduusorin laajenemiskulman tulee olla riittävän pieni, enintään  $7^\circ$ . Muuten virtaus voi irrota seinämästä, jolloin syntyy turbulenssia ja virtausvastus kasvaa. /5/

Laajenemiskulmaksi valittiin  $7^\circ$ , jotta kuristimesta tulee mahdollisimman lyhyt, ja imujärjestelmä saadaan mahtumaan vaadittuun tilaan.



**Kuva 11.** Imuilman kuristimen piirustukset

## 4.3 Kaasuläppä

Kaasuläpän mitoitus on kompromissi virtausvastuksen minimoimisen ja ajettavuuden välillä. Pieni kaasuläppä aiheuttaa enemmän virtausvastusta, mutta moottorin toimintaa on helpompi kontrolloida läpi koko kierrosnopeusalueen. Suurella kaasuläpällä virtauspinta-ala voi kasvaa pienelläkin kaasuläpän avautumalla niin

suureksi, että moottorin kierrosnopeus karkaa haluttua suuremmaksi. Suositeltu virtausnopeus on välillä 55–85 m/s. Ihanteellinen kaasuläpän halkaisija  $d$  voidaan laskea moottorin tarvitseman ilmamäärän ja virtausnopeuden perusteella seuraavan yhtälön mukaisesti: /6/

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot V}{\pi \cdot v}}, \quad (9)$$

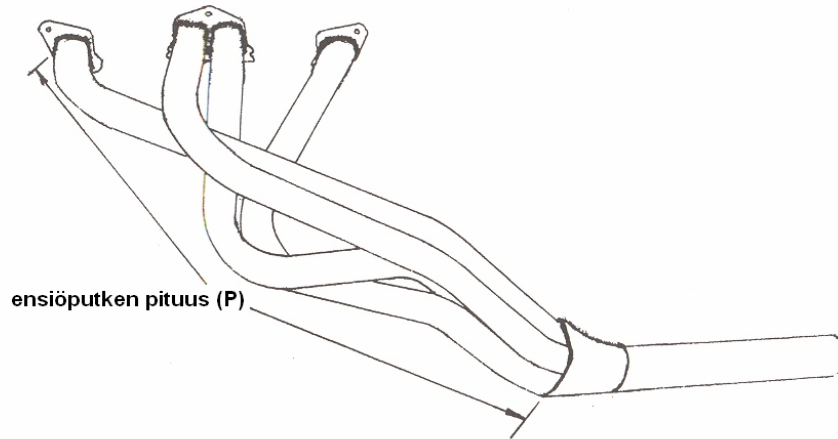
jossa  $n$  = maksimitehon kierrosnopeus[1/s],  
 $V$  = moottorin iskutilavuus[m<sup>3</sup>],  
 $v$  = virtausnopeus[m/s].

Laskutoimituksessa virtausnopeudeksi valittiin 60 m/s ja tulokseksi saatiin 37,14 mm. Laskutoimitus ei ota huomioon itse kaasuläpän aiheuttamaa virtausvastusta, joten tulos pyöristetään ylöspäin 38 mm:iin.

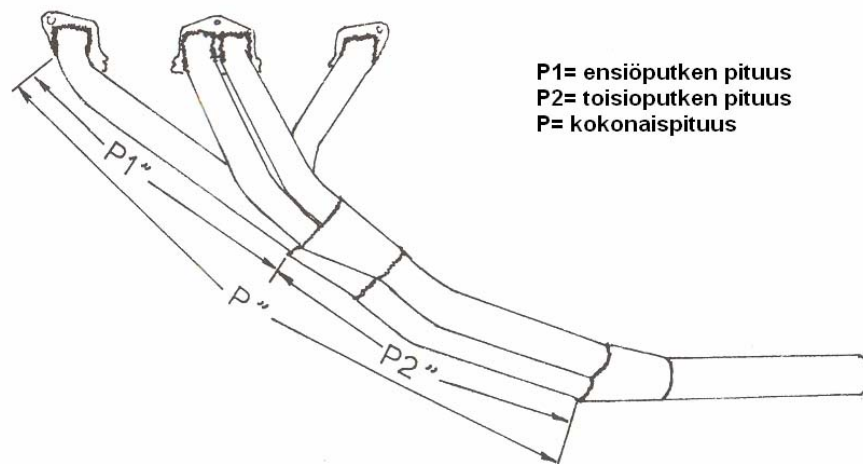
## 5. PAKOJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUPERUSTEET

### 5.2 Pakosarjatyypit /9/

Puhuttaessa monisylinterisestä moottorista, etenkin jos sylintereitä on enemmän kuin kolme, on väistämätöntä, että sytytysjärjestyksessä peräkkäin olevien sylinterien pakoventtiilien aukioloajat menevät päällekkäin. Jos pakokanavat yhdistetään hyvin pian lyhyellä pakosarjalla, seuraavana vuorossa oleva sylinteri joutuu avautumaan edellisen sylinterin aiheuttamaa painetta vastaan. Tämän takia on edullista käyttää melko pitkiä ensiöputkia. Ensiöputket kannattaa kuitenkin yhdistää, koska syntyviä paineaaltoja ja niiden heijastuksia voidaan käyttää hyväksi sylinterin tyhjentämisessä palokaasuista. Näin paineaalloista saatava hyöty jakaantuu laajemmalle kierrosnopeusalueelle. Ensiöputket voidaan yhdistää toisiinsa eri tavoin. Yleisimmät yhdistämistavat nelisylinterisessä moottorissa ovat yhdistää kaikki neljä ensiöputkea samaan yhteiseen kokoojakammioon (Kuva 12, 4-1-pakosarja) tai yhdistää putket ensin kahden ryhmiin ja lopuksi yhteen (Kuva 13, 4-2-1 -pakosarja).



Kuva 12 Pakosarja 4-1-kokoojalla /9/



Kuva 13 Pakosarja 4-2-1 -kokoojalla /9/

### 5.2.1 Pakosarja 4-1-kokoojalla

4-1-tyyppisellä pakosarjalla vääntömomenttialue on yleensä melko korkeilla kierroksilla ja moottorista saadaan suuri huipputeho. Vääntömomenttialue jää kuitenkin samalla kapeaksi. /9/ Momenttialuetta voidaan laajentaa niin sanotuilla porrastetuilla ensiöputkilla eli putkien halkaisijaa suurennetaan hieman esimerkiksi ensiöputkien puolenvälin jälkeen. Putken halkaisijalla vaikutetaan virtausnopeuteen. Sitä kautta ihanteellinen virtausnopeus saavutetaan putkissa eri kierrosnopeudella. /7/ Putkistossa liikkuvat korkeapaineiset paineaallot saattavat jossain tapauksissa aiheuttaa palokaasujen karkaamisen takaisin sylinterin suuntaan. Porrastetuilla ensiöputkilla sylinterin suuntaan syntyvä porras vähentää myös tätä erittäin haitallista palokaasujen sekoittumista tuoreeseen seokseen. /9/

### 5.2.2 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla

4-2-1 -tyyppisellä pakosarjalla vääntömomenttialue on yleensä laajempi kuin 4-1-tyyppisellä, mutta huipputehossa ja väännössä hävitään. /9/ Ensiöputket voidaan yhdistää kahdella tavalla. Yhdistämällä 360 kampiakselin astetta erillään olevien poistotahtien ensiöputket saadaan pakopulssien välinen kanssakäyminen minimiin. Yhdistämällä 180 kampiakselin astetta erillään olevat poistotahtit pakopulssit saapuvat peräkkäin. Tällöin pulssit saattavat häiritä toisiaan, mutta oikein mitoitettuna edellä purkautuvan pakopulssin jäljessä tuleva imu saadaan käytettyä hyväksi seuraavan sylinterin poistotahtissa. Maksimimomentti laskee yleensä hieman, mutta momenttialueesta tulee vieläkin laajempi /7/.

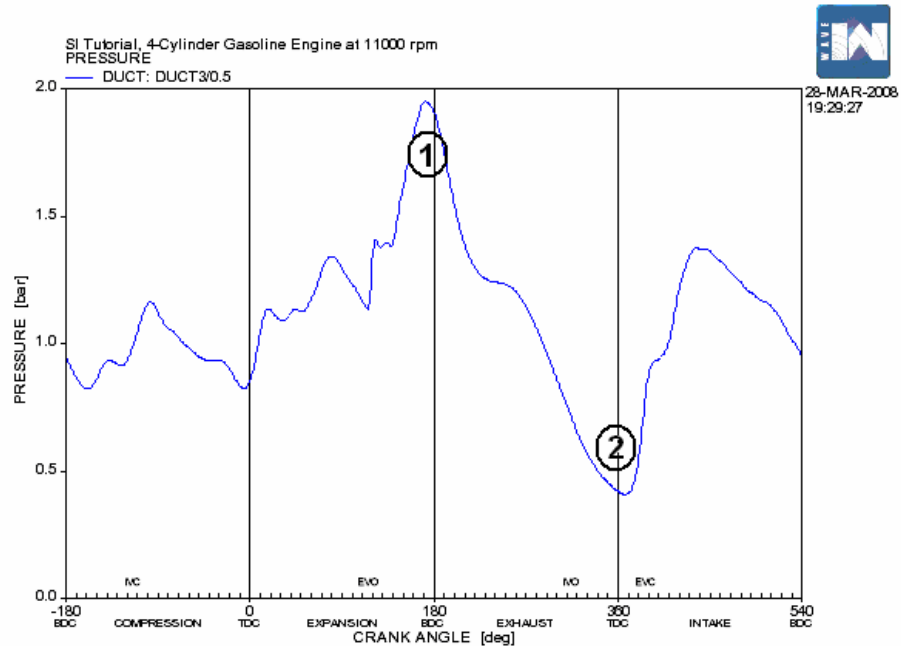
### 5.1 Paineaaltojen käyttäytyminen pakosarjassa

Palokaasujen täyttämän sylinterin ja ulkoilmaan avoimen pakoputkiston välillä on suuri paine-ero. Pakoventtiilin auetessa palokaasut purkautuvat äkillisesti ulos sylinteristä. Äkillinen palokaasujen purkautuminen aikaansaa äänennopeudella etenevän korkeapaineisen tiivistysaallon. Paineaallon saavuttaessa ulkoilman pakoputken päässä tai pakoputkistossa olevan virtauspinta-alaa selvästi suuremman poikkipinta-alan muodostaman tilavuuden heijastuu vastakkaiseen suuntaan harvennusaalto. Pakosysteemin toimiessa optimaalisesti tämän paineaallon tulisi saapua takaisin pakoventtiilille imu- ja pakoventtiilin yhtäaikaisen aukiolon eli overlappin aikana. Näin se imee pakokaasut mahdollisimman tehokkaasti ulos sylinteristä. Sylinterin täytössuhteen kannalta on erittäin tärkeää, ettei kuumia ja paljon tilaa vieviä palokaasuja jää sylinteriin tuoreen seoksen sekaan. /8/

Paineaallon voimakkuus ja siten myös heijastuvan alipaineaallon voimakkuus kasvaa pakokaasujen virtausnopeuden mukana. Pakosarjan mitoituksessa on kuitenkin otettava huomioon myös liian suuren virtausnopeuden aikaansaama haitallinen vastapaine. Erityisesti suurilla moottorin kierroksilla virtausnopeus saattaa kasvaa liian suureksi ja pakoputkisto alkaa ”ahdistaa”, jolloin paineaalloista saatava hyöty menetetään. On olemassa ihanteellinen pakokaasujen virtausnopeus, jolla

alipaineaalto muodostuu voimakkaana kuitenkin kokonaispaineen nousematta liikaa. /7/

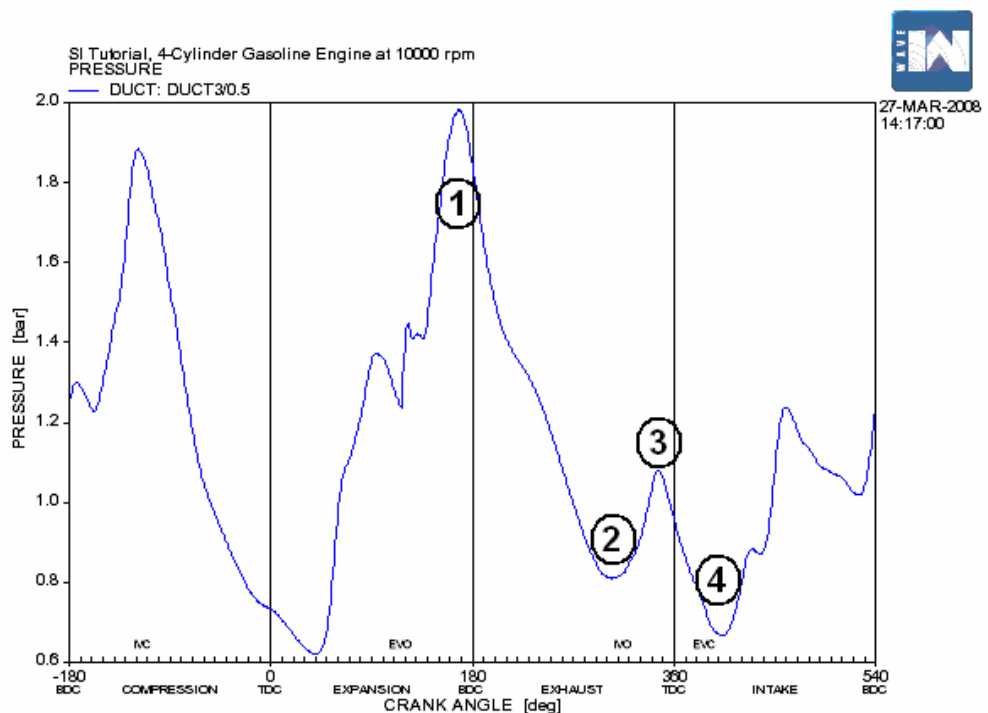
Kuvassa 14 on esitetty pakokanavan painekuvaaja kammenkulman funktiona, joka on mitattu heti venttiilin jälkeen. Kyseinen moottori on varustettu 4-1-tyyppisellä pakosarjalla. Pakoventtiilin auetessa ja pakokaasujen purkautuessa ulos sylinteristä paine nousee äkillisesti. Painehuippu on merkattu kuvaajaan numerolla 1. Tiivistysaalton saavuttaessa kollektorin osa aallosta heijastuu takaisin alipaineaaltona. Alipaineaalto on merkattu kuvaajaan numerolla 2. Kuvaajan tapauksessa harvennusaalto saapuu juuri oikeaan aikaan eli overlapin aikana. Pakosarja toimii ihanteellisesti juuri tällä kierrosnopeudella.



**Kuva 14** Pakosarjan pakokanavan painekuvaaja 4-1-tyyppisellä pakosarjalla

Kuvassa 15 on esitelty vastaava kuvaaja 4-2-1 -tyyppisellä pakosarjalla. Jälleen tiivistysaalto on merkattu numerolla 1 ja sitä seuraava harvennusaalto numerolla 2. Seuraava painehuippu poikkeaa kuitenkin 4-1-pakosarjan vastaavasta. Kohdatessaan ensiöputkien yhdistymiskohdan jakaantuu tiivistysaalto kahteen osaan. Toinen jatkaa matkaansa pitkin toisioputkea, joka kollektorin kohdatessaan aiheuttaa numerolla 2 merkatun harvennusaallon. Toinen osa kulkee pitkin toista ensiöputkea kohti suljettua venttiiliä ja heijastuu siitä takaisin aiheuttaen painehui-

pun, joka on merkattu kuvaajaan numerolla 3. Painehuippu kesken overlapiin ei ole toivottavaa, mutta juuri se saa aikaan tämän tyyppisen pakosarjan laajan virityskierrosluvun. Suljetulta venttiililtä heijastuneesta korkeapaineaallostaa osa kulkee pitkin toisioputkea kollektoriin ja heijastuu takaisin harvennusaaltona, joka on merkattu kuvaajaan numerolla 4. Harvennusaaltokohtia on siis kaksi, jonka ansiosta 4-2-1 -pakosarja toimii laajemmalla kierrosnopeusalueella kuin 4-1-tyyppinen, mutta niiden välissä olevan tiivistysaallon takia virityskierrosnopeusalueen keskellä toiminta on heikompaa.



Kuva 15 Pakosarjan pakokanavan painekuvaaja 4-2-1 -tyyppisellä pakosarjalla

### 5.3 Pakosarjan mitoitus

Pakosarjan oikean mitoituksen hakeminen vaatii aina käytännön testausta esimerkiksi tehodynamometrissä. Parhaisiin tuloksiin päästään, jos käytössä on painemittaus, jolla voidaan mitata paine pakoventtiilin läheisyydessä kammenkulman funktiona. Vain tällä tavoin nähdään, kuinka paineaallot todellisuudessa kulkevat pako-



putkistossa. Lähes yhtä hyvin tuloksiin päästään tehokkaalla moottorisimulointiohjelmalla. Laskukaavoja pakosarjan mitoittamiseen löytyy alan kirjallisuudesta, ja niiden avulla saadaan lähtökohta testausta varten. Paineaaltojen liikkeiden laskemisen tekee vaikeaksi niiden nopeuden suuri riippuvuus lämpötilasta ja monimutkaisten pakosarjojen paineaaltojen yhteisvaikutukset. Pakokaasujen lämpötila vaihtelee suuresti eri moottorikonstruktioiden välillä, ja pakokaasut jäähtyvät myös voimakkaasti paisuessaan kohti ulkoilmaa. Paineaaltojen etenemisnopeus alenee sylinteristä poispäin mentäessä ja suurenee niiden palatessa takaisin.

Formulan pakosarjaa varten laskettiin kaavoilla 10–13 alustavat mitat moottorisimulointia varten. Kaavoissa käytetyt symbolit viittaavat kuvissa 11 ja 12 käytettyihin symboleihin. Mitat laskettiin sekä 4-1, että 4-2-1 -tyyppiselle pakosarjalle. Näitä tuloksia käytetään lähtökohtana tietokoneavusteisessa moottorisimuloinnissa.

Ensiöputken pituudet 4-1-tyyppisellä pakosarjalla lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P = \frac{850 \cdot ED}{n} - 3 \quad (10)$$

jossa  $P$  = ensiöputken pituus[”]

$ED$  =  $180^\circ$ +pakovernttiilin avautuminen asteina EAKK

$n$  = virityskierrosnopeus[1/min]

Pakovernttiilin avautumisen selvittämiseksi pakonokka-akseli mitattiin astelevyn ja mittakellon avulla. Pakovernttiilin aukioloajaksi saatiin  $287^\circ$ . Nokka-akselien aukioloaika tullaan muuttamaan noin  $20^\circ$  pienemmäksi, joten kaavassa käytetään arvoa  $267^\circ$ . Pakonokka-akselin ajoitus on taulukon 2 mukainen. Pakovernttiilin avautumisasteiksi saadaan  $58^\circ$ . Pakosarjan virityskierrosnopeudeksi valitaan 8000 1/min. Näillä lähtöarvoilla pakosarjan pituudeksi saadaan 566 mm.

Ensiöputken halkaisija sekä 4-1-tyyppiselle että 4-2-1 -tyyppiselle pakosarjalle lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$ID = \sqrt{\frac{V}{(P+3) \cdot 25}} \cdot 2,1 \quad (11)$$

jossa  $ID$  = ensiöputken halkaisija["]  
 $V$  = yhden sylinterin iskutilavuus[cm<sup>3</sup>],  
 $P$  = ensiöputken pituus["].

Yhden sylinterin iskutilavuus on 149,75 cm<sup>3</sup>. Näillä lähtöarvoilla ensiöputken halkaisijaksi saadaan 26 mm. Pakokanavan ulostulon halkaisija on 30 mm, joten ensiöputken tulee olla vähintään tämän kokoinen.

Toisioputken halkaisija 4-2-1 -tyyppiselle pakosarjalle lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$ID_2 = 0,93 \cdot \sqrt{ID^2 \cdot 2} \quad (12)$$

jossa,  $ID_2$  = Toisioputken halkaisija["]

4-2-1 -tyyppisen pakosarjan toisioputken halkaisijaksi saadaan 34 mm.

Ensiöputken pituuden tulee olla vähintään 381 mm. Primääriputken pituus 4-2-1 -pakosarjassa lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P_2 = P - P_1 \quad (13)$$

4-2-1 -tyyppisen pakosarjan toisioputken pituudeksi saadaan 185 mm.

## 6. NOKKA-AKSELIEN SUUNNITTELUPERUSTEET

Venttiilien avautumis- ja sulkeutumisajoituksella on suuri vaikutus moottorin tehoalueeseen. Perinteisessä nelitahtimoottorissa venttiilien ajoitus määräytyy nokka-akselin ja venttiilikoneiston mittojen mukaan. Merkitsevimmät nokka-akselin arvot ovat venttiilin aukioloajan ilmaiseva asteluku ja venttiilin nosto. Myös nokka-akselin ajoitusta muuttamalla voidaan vaikuttaa suuresti moottorin ominaisuuksiin. /9/ Jotta valitun Yamahan moottorin vääntömomenttialuetta saataisiin alemmille kierroksille, päätettiin nokka-akselit suunnitella uudestaan. Moottorin kierrosnopeusalue alenee noin 4000 1/min alkuperäisestä, joten venttiilien aukioloaika täytyy pienentää huomattavasti. Nokka-akselien arvot optimoidaan moottorisimulaatio-ohjelmalla. Nokka-akselien alkuperäiset arvot on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2** Alkuperäisten nokka-akselien arvot /10/

imuventtiilin ajoitus (0,15 mm nousulla)	
avautuminen EYKK	47°
sulkeutuminen JAKK	71°
aukioloaika	298°
pakoventtiilin ajoitus (0,25 mm nousulla)	
avautuminen EAKK	67°
sulkeutuminen JYKK	29°
aukioloaika	276°
imuventtiilin nosto	8,5 mm
pakoventtiilin nosto	7,7 mm

Nokka-akselin toimiessa optimaalisesti imuventtiili sulkeutuu juuri ennen, kuin männän ylöspäin suuntautuva voima kääntää virtauksen suunnan, jolloin seosta ei pääse karkaamaan takaisin imukanavaan. Pakoventtiilin tulee myös sulkeutua juuri ennen, kuin alaspäin suuntaavan männän imu kääntää virtauksen suunnan, jotta pakokaasuja ei karkaa takaisin sylinteriin. Pakokaasujen karkaaminen on erittäin haitallista, koska se vie tilaa tuoreelta seokselta ja hidastaa palotapahtumaa. Moottorin virtausominaisuudet muuttuvat kierrosluvun ja kuormituksen mukaan. Siksi venttiilikoneiston optimaalinen toiminta koko moottorin kierrosnopeusalueella vaatisi venttiilien toiminnan muuttamista moottorin tarpeiden mukaisiksi. Perin-

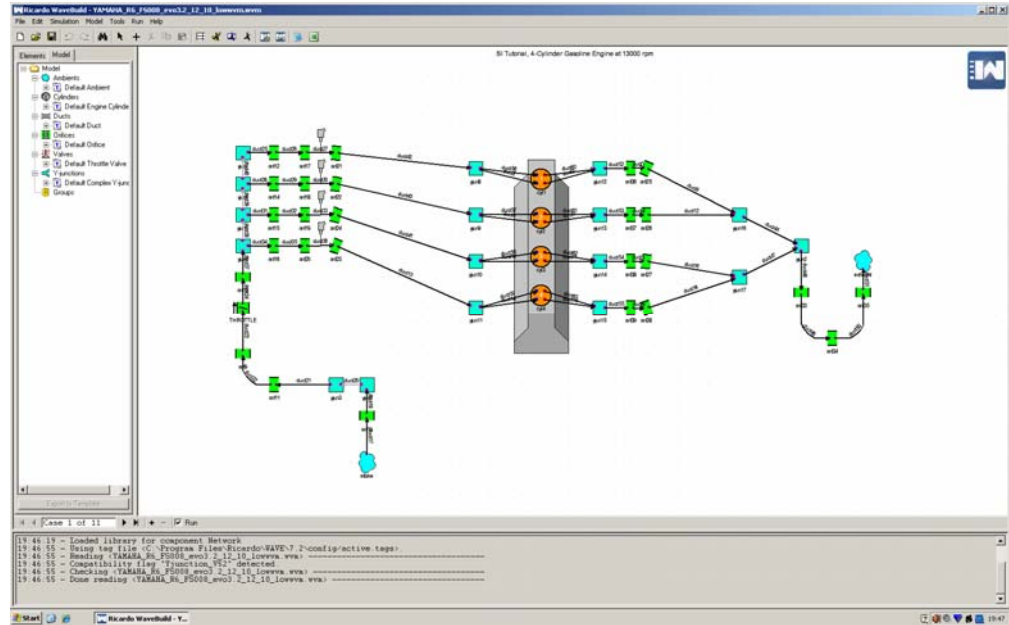
teisen kiinteästi toimivan nokka-akselin arvojen valinta on aina kompromissi, johon vaikuttavat muun muassa haluttu moottorin kierrosnopeusalue ja käyttötarkoitus. /9/

Käytettävään Yamahan moottoriin ei ole saatavana valmiina halutunlaisia nokkaakseleita. Tämän vuoksi muutostyö toteutetaan hiomalla alkuperäiset akselit uuteen muotoon. Nokan kylkeä hiottaessa kyljet lähenevät toisiaan ja huippukohta kaventuu. Tämän takia astelukua voi pienentää vain noin 20°.

## **7. MOOTTORISIMULAATIO RICARDO WAVE -OHJELMALLA**

Ricardo Wave on tietokoneavusteinen koodi, joka on kehitetty analysoimaan paineaaltojen dynamiikkaa, massavirtoja ja energiahäviöitä putkissa, kammioissa ja erilaisten systeemien ja koneiden yhdysputkistoissa. Ricardo Waven 1D-koodi pystyy käsittelemään useimpien kaasujen ja nesteiden virtaus- ja termodynamiikkaa. /3/

Virtausmalli luodaan käyttäen komponenttikirjastosta löytyviä rakennusosia, kuten sylintereitä, mäntäkompressoreita, turboahtimia, mekaanisia ahtimia ja turbiineja sekä pumppuja (kuva 16). Komponentit yhdistetään käyttäen putkia, kammioita ja putkiyhtymiä. Nämä ominaisuudet tekevät ohjelman tehokkaaksi työkaluksi polttomoottoreiden toiminnan simulointiin. /3/



Kuva 16 Ricardo Wave ohjelmaan luotu virtausmalli

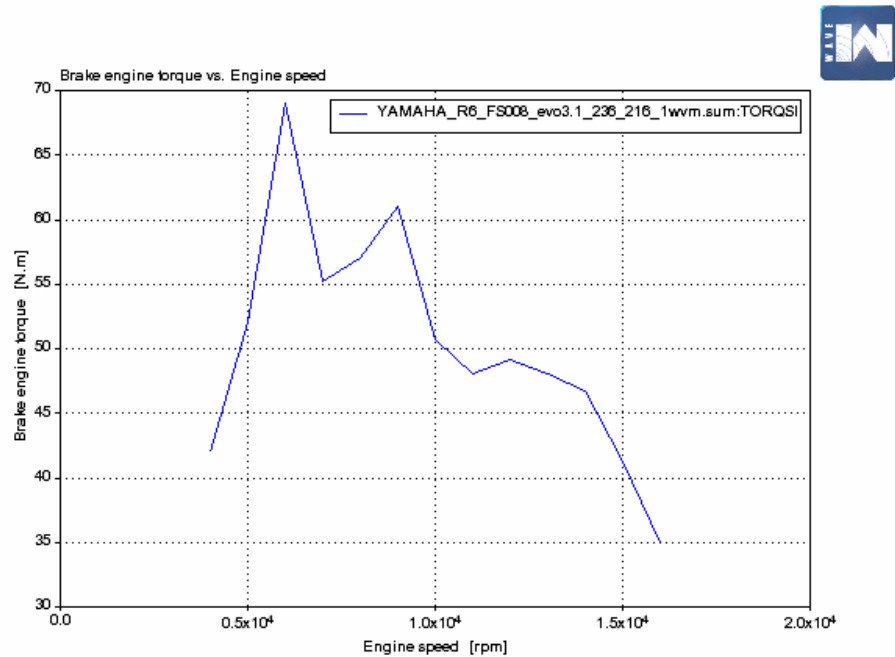
Työssä ei käydä läpi itse ohjelman käyttöä vaan keskitytään ohjelmalla saatujen tulosten käyttämiseen suunnittelussa. Ricardo Wave -ohjelmassa on hyvät ohjeet ja harjoitustehtävät sähköisessä muodossa, joiden avulla oppii ohjelman peruskäytön. Tähän täytyy kuitenkin varata riittävästi aikaa, koska uudelta käyttäjältä menee yhden moottorisimulaatiomallin tekemiseen noin 30 työtuntia.

### 7.1 Imusarjan optimointi

Imusarjan optimoinnissa käytettiin lähtökohtana laskemalla saatuja tuloksia. Ricardo Wave -ohjelman tulostenkäsittelyosiossa on mahdollisuus tarkastella imuventtiilillä vallitsevaa painetta kammenkulman funktiona. Vertaamalla saatua kuvaajaa imuventtiilin aukioloon voidaan imusarjan parametrit säätää luvussa 4.1.1 kuvatulla tavalla optimaaliseksi halutulle kierrosluvulle. Muutosten vaikutukset nähdään vääntömomenttikuvaajasta.

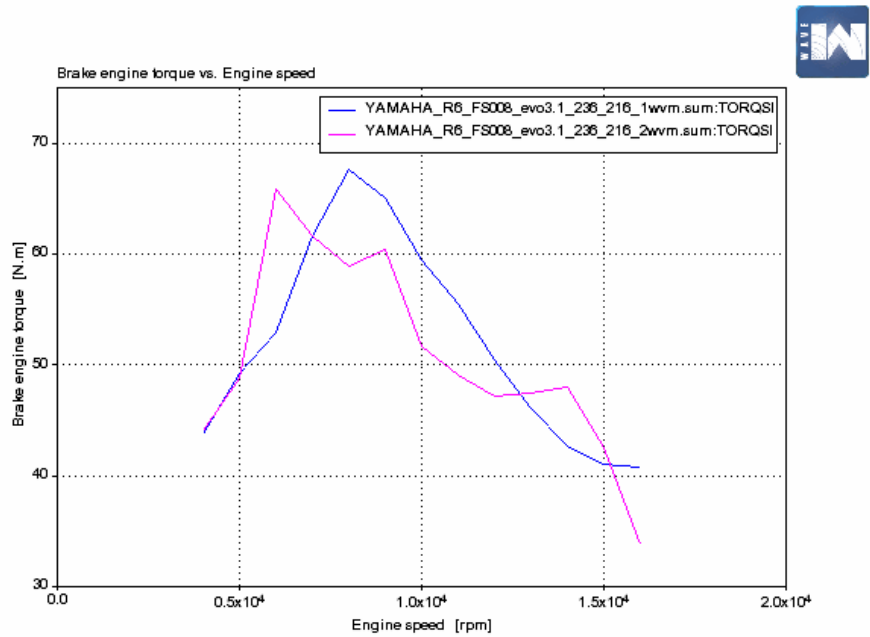
### 7.1.1 Imukanavan pituus

Kuvassa 19 on esitetty imuventtiilin painekuvaaja kierrosnopeudella 8000 1/min, kun imukanavan pituus on alustavien laskujen mukainen 500 mm (sininen kuvaaja). Momenttikuvaaja vastaavalla imukanavan pituudella on kuvassa 17.

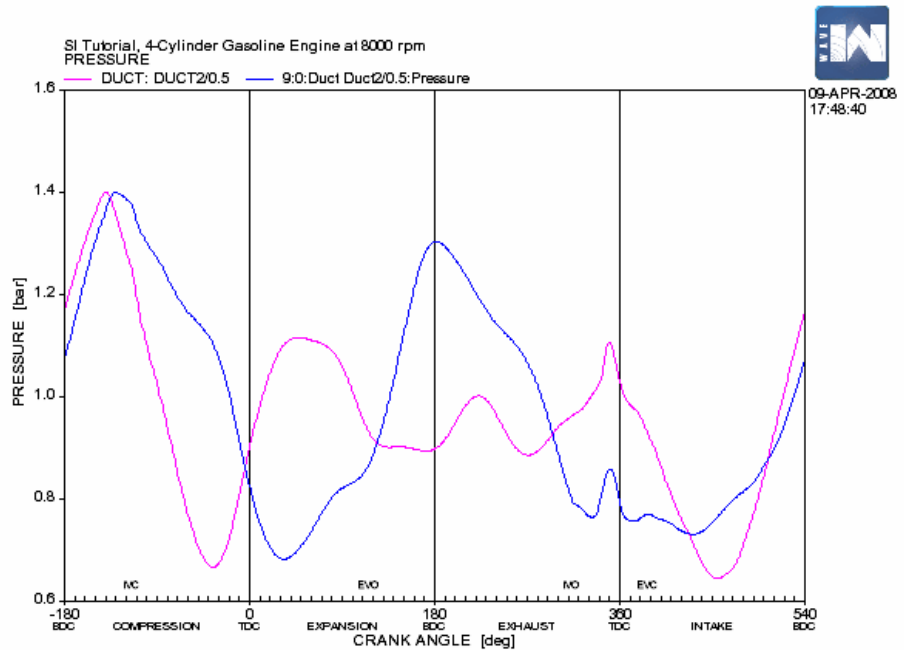


**Kuva 17** Vääntömomenttikuvaaja pituudeltaan 500 mm imukanavilla

Suurin vääntömomentti saavutetaan jo 6000 1/min kohdalla, joten imukanavaa täytyy lyhentää. Imukanavaa lyhennettiin 25 mm portaissa. Paras vaikutus halutulle kierrosnopeusalueelle saavutettiin 325 mm pitkällä imukanavalla. Tällöin paineaalto on 8000 1/min kohdalla voimakkaimmillaan juuri ennen imuventtiilin sulkeutumista, ja maksimimomentti saavutetaan tällä kierrosnopeudella (kuva 18). Tiivistysaalto osuu kohdalleen myös venttiilin avautumisen kanssa (kuva 19, punainen kuvaaja).



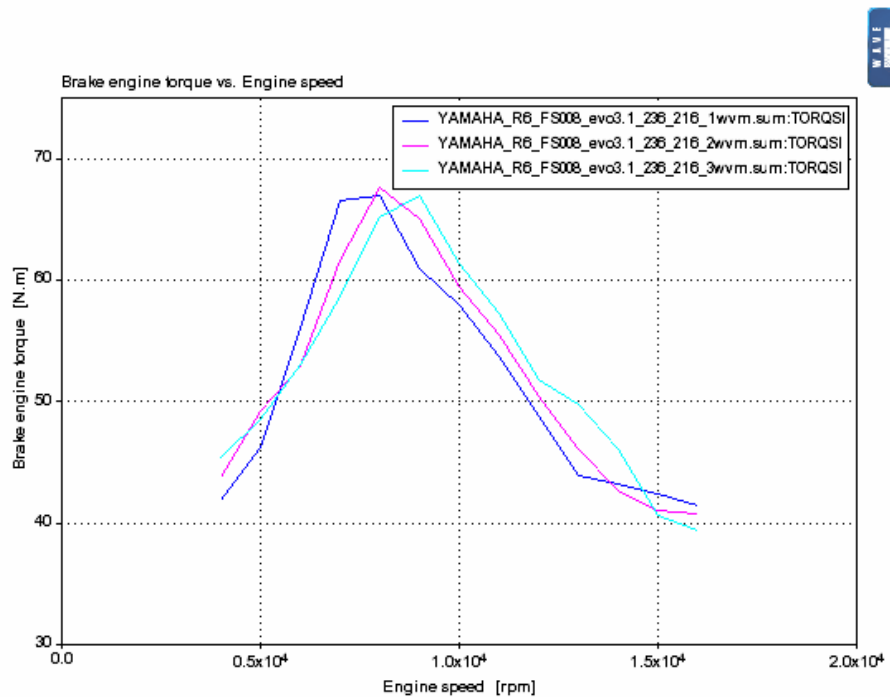
Kuva 18. Vääntömomenttikuvaajat optimoiduilla pituudeltaan 325 mm imukanavilla (sininen) verrattuna laskelmilla saatuihin 500 mm imukanaviin (punainen)



Kuva 19. Imukanavan painekuvaajat optimoiduilla pituudeltaan 325 mm imukanavilla (punainen) verrattuna laskelmilla saatuihin 500 mm imukanaviin (sininen)

## 7.1.2 Imukanavan halkaisija

Lähtökohtaisesti imusarjan ensiöputken halkaisija määräytyy imukanavan halkaisijan mukaan, ellei kanavaa suurennetta hiomalla tai pienennetä täytehitsaamalla. Tässä tapauksessa moottorin kierrosnopeusalue alenee alkuperäisestä, joten kyseeseen tulisi imukanavan pienentäminen. Tätä ei kuitenkaan katsottu tarpeelliseksi. Imusarjan ensiöputken halkaisijan vaikutusta testattiin kuitenkin tekemällä sen loppuosaan loiva kavennus tai laajennus, jolloin putken ja kanavan väliin ei jää pykälää. Seinämien väliset kulmat pysyivät kohtuullisina, joten virtaus ei irtoa seinämästä ja kulman vaikutus on merkityksetön. Kanavan halkaisija sylinterikanavassa on 35 mm. Moottoria simuloitiin halkaisijaltaan 30 (punainen kuvaaja), 35 (sininen kuvaaja) ja 40 mm (vihreä kuvaaja) ensiöputken halkaisijoilla. Vaikutukset nähdään kuvassa 20 esitetyistä moottorin vääntömomenttikuvaajista.

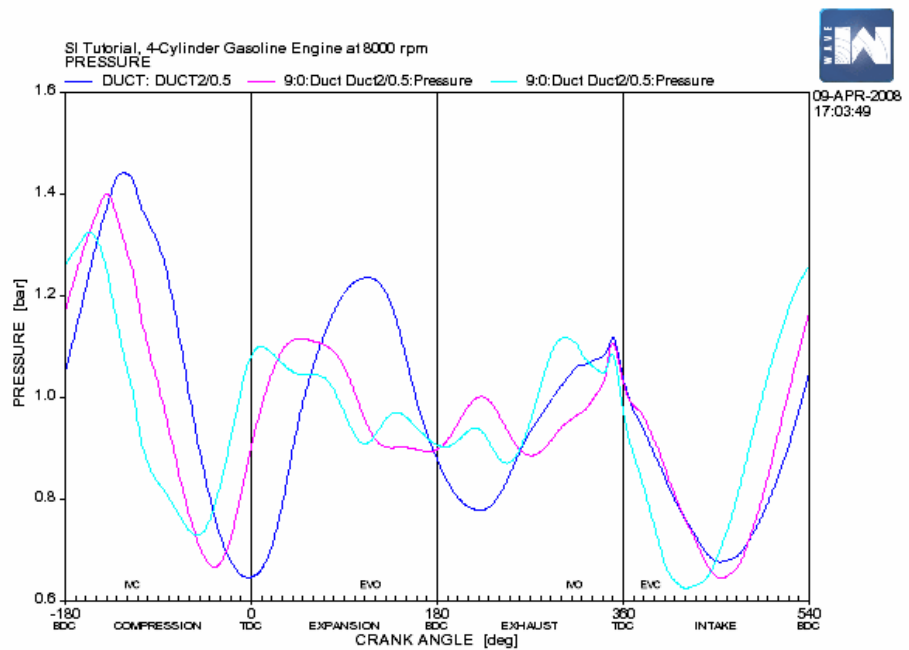


**Kuva 20** Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri ensiöputken halkaisijoilla

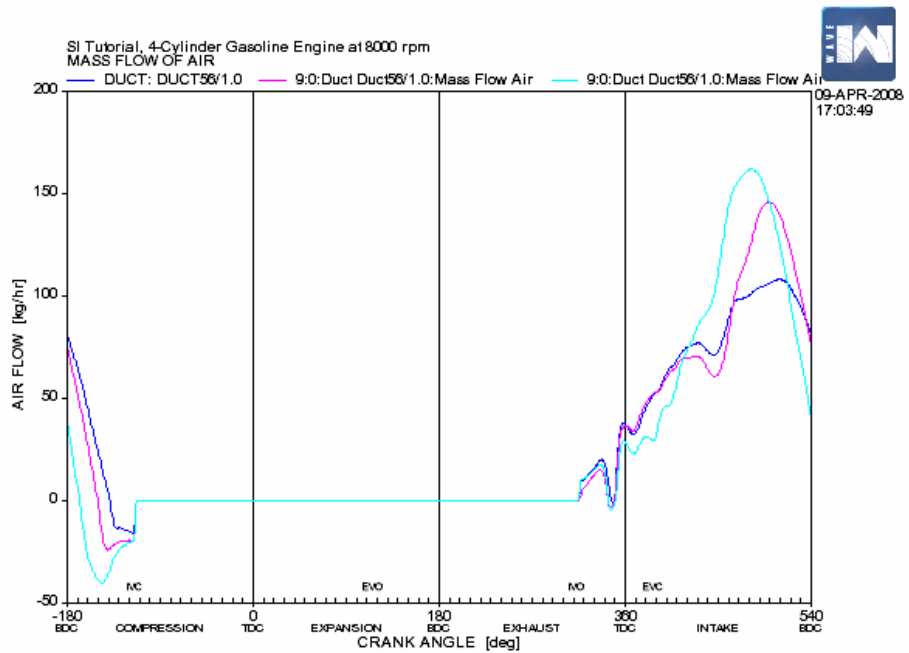
Halkaisijan suurentaminen siirtää momenttialuetta ylemmille kierroksille. Syy tähän nähdään imuventtiilin paine- ja massavirtakuvaajista (kuva 21 ja 22). Moottorin kierrosnopeus kuvaajien tilanteessa on 8000 1/min. Tiivistysaalto saapuu par-



haiten kohdalleen punaisen (35 mm) kuvaajan tapauksessa. Suuremmalla putken halkaisijalla aalto kulkee nopeammin ja saapuu imuventtiilille liian aikaisin. Tämä voidaan nähdä myös massavirtakuvaajasta, jossa vihreä kuvaaja saavuttaa huippuarvonsa aikaisessa vaiheessa ja imutapahtuman lopussa virtaus karkaa väärään suuntaan. Halkaisijaltaan 30 mm ensiöputkella tiivistysaallon huippu tulee hieman liian myöhään. Tällöin massavirran huippuarvo jää pieneksi, mutta aivan imutapahtuman loppu on muita vahvempi, ja seoksen karkaaminen on muita pienempää.



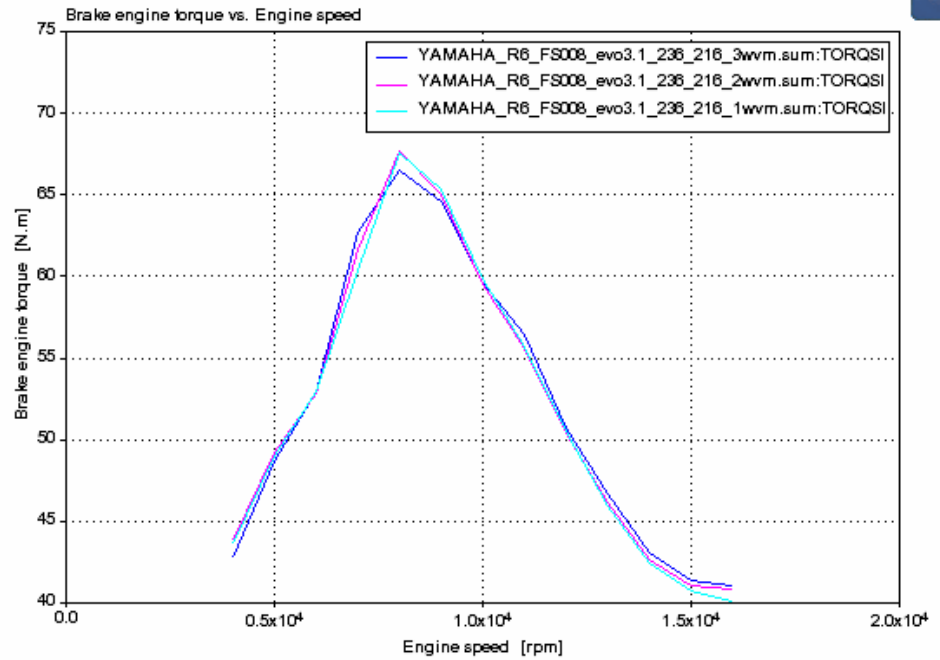
**Kuva 21** Imuventtiilin painekuvaajat eri ensiöputken halkaisijoilla kierrosnopeudella 8000 1/min



**Kuva 22** Imuventtiilin massavirtakuvaajat eri ensiöputken halkaisijoilla kierrosnopeudella 8000 1/min

### 7.1.3 Kokoojakammion tilavuus

Kokoojakammion tilavuuden vaikutusta kokeiltiin kolmella eri vaihtoehdolla. Moottorin vääntömomenttikuvaajat on esitetty kuvassa 23. Vihreä kuvaaja on pienimmällä tilavuudeltaan 1 dm<sup>3</sup> kammiolla, punainen kuvaaja on 2 dm<sup>3</sup> kammiolla ja sininen kuvaaja 3 dm<sup>3</sup> kammiolla. Imupuolelta kuristetussa moottorissa kokoojakammion tilavuuden kasvattaminen lisää yleensä alakierrosten momenttia. Tämä pitää kuvaajien perusteella paikkansa myös tässä tapauksessa. Kokoojakammion tilavuuden vaikutukset vääntömomenttiin ovat kuitenkin melko pieniä. Merkittävämpänä ominaisuutena Formula Student -käytössä voidaan pitää kaasuun reagointia, joka paranee kammion kokoa pienennettäessä. Tämän vuoksi päätettiin käyttää tilavuudeltaan noin 1 dm<sup>3</sup> kokoista kokoojakammiota.



Kuva 23 Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri kokoojakammion tilavuuksilla

## 7.2 Pakosarjan optimointi

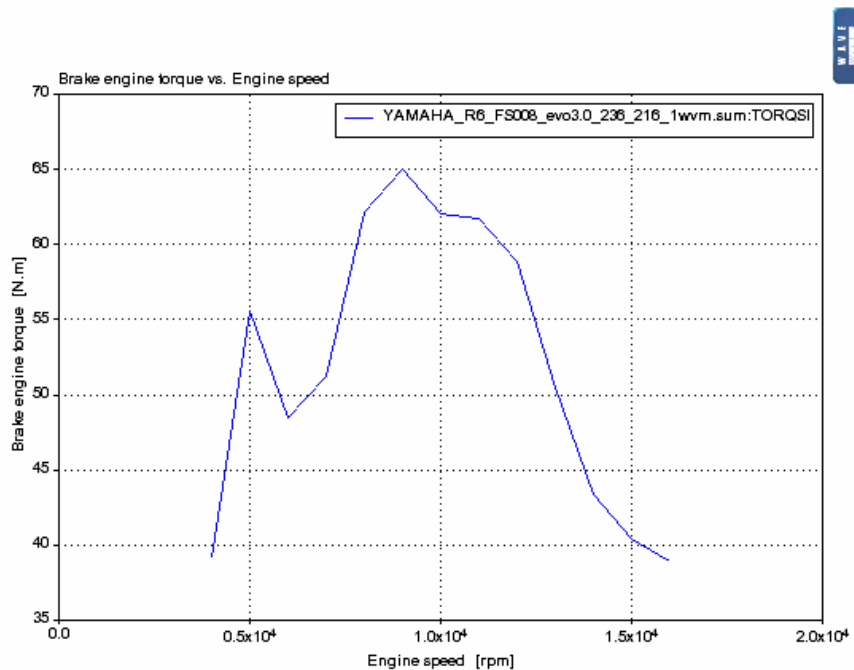
Pakosarjan mitoituksessa käytettiin lähtökohtana laskemalla saatuja arvoja. Ricardo wave -ohjelmaan luotiin kolme eri mallia:

- 4-1-tyyppisellä pakosarjalla
- 4-2-1 -tyyppisellä pakosarjalla pakotapahtumat 360° erillään
- 4-2-1 -tyyppisellä pakosarjalla pakotapahtumat 180° erillään

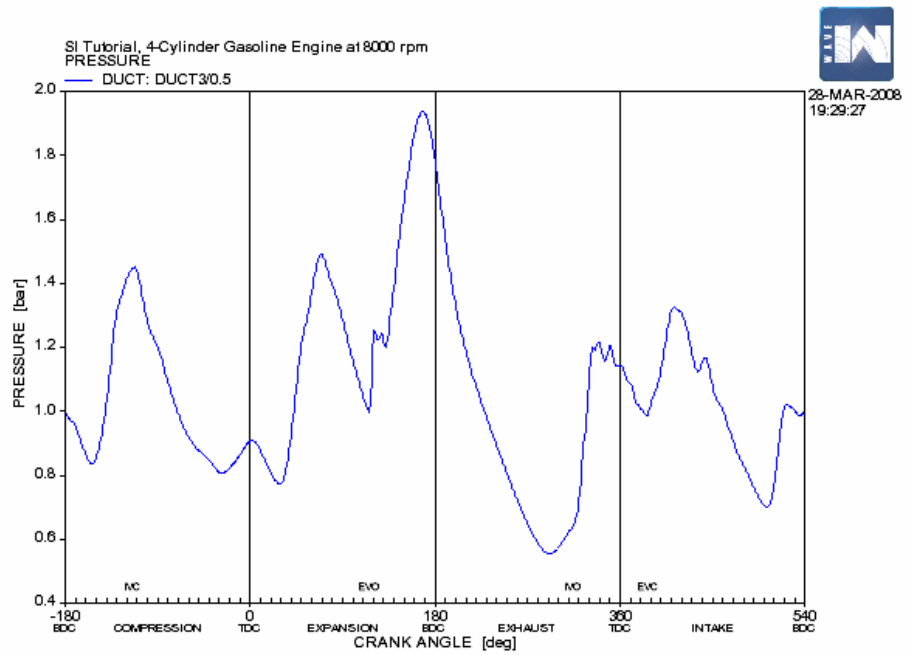
Pakosarjan suunnittelussa käytettiin apuna pakokanavan painekuvaajia. Muutosten vaikutukset nähdään vääntömomenttikuvaajia vertailemalla.

## 7.2.1 Pakosarja 4-1-kokoojalla

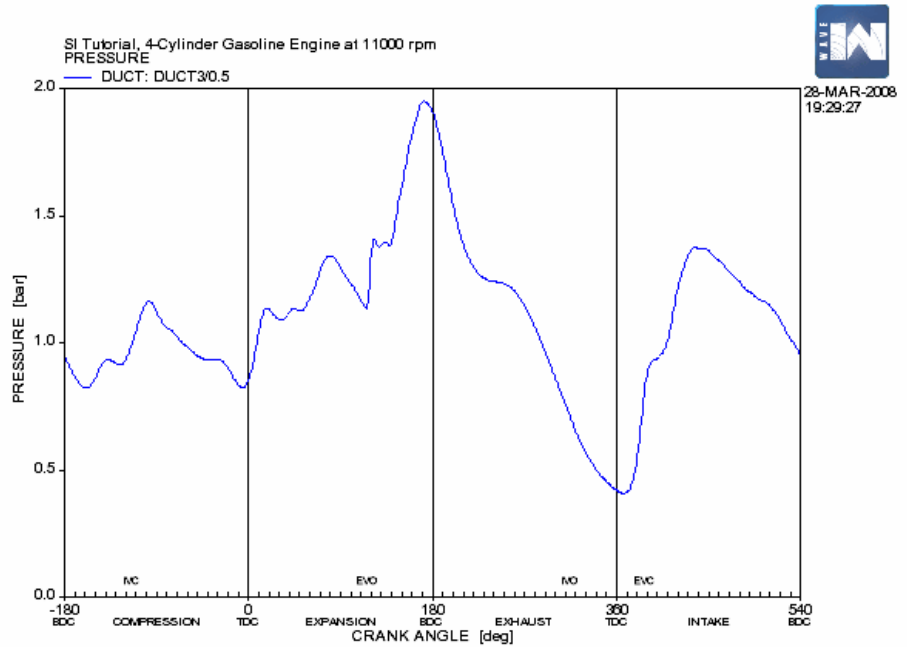
Kuvassa 24 on esitetty vääntömomenttikuvaaja laskelmilla saadulla 566 mm pakokanavan pituudella. Pakoventtiilin painekuvaajasta kierrosnopeudella 8000 1/min (kuva 25) nähdään, että alipaineaalto saapuu liian aikaisin ja paine ehtii kohota takaisin noin 1,2 barin tasolle overlapiin ajaksi. Kuvasta 26 nähdään, että alipaineaalto saapuu ihanteellisesti 11000 1/min kierrosnopeudella. Pakokanavan pituutta tulee kasvattaa, jotta paineaallon vaikutus saadaan halutulle 8000–9000 1/min alueelle. Pakokanavan pituutta kasvatettiin noin 50 mm portaissa ja ihanteellinen toiminta saavutettiin 650 mm pituisella pakokanavalla. Tällöin alipaineaalto kierrosnopeudella 8000 1/min on voimakkaimmillaan overlapiin aikana (kuva 27). Momenttikuvaajasta (kuva 28) nähdään, että momentti kasvaa välillä 7000–9000 1/min kierrosnopeudella, mutta yläkierroksilla hävitään hieman. 6000 1/min kohdalla oleva notkahdus johtuu ylipaineaallosta, joka saapuu pakoventtiilille juuri venttiilien yhtäaikaisen aukiolon aikana (kuva 29). Pakokaasuja jää sylinteriin ja sylinterin täytös laskee.



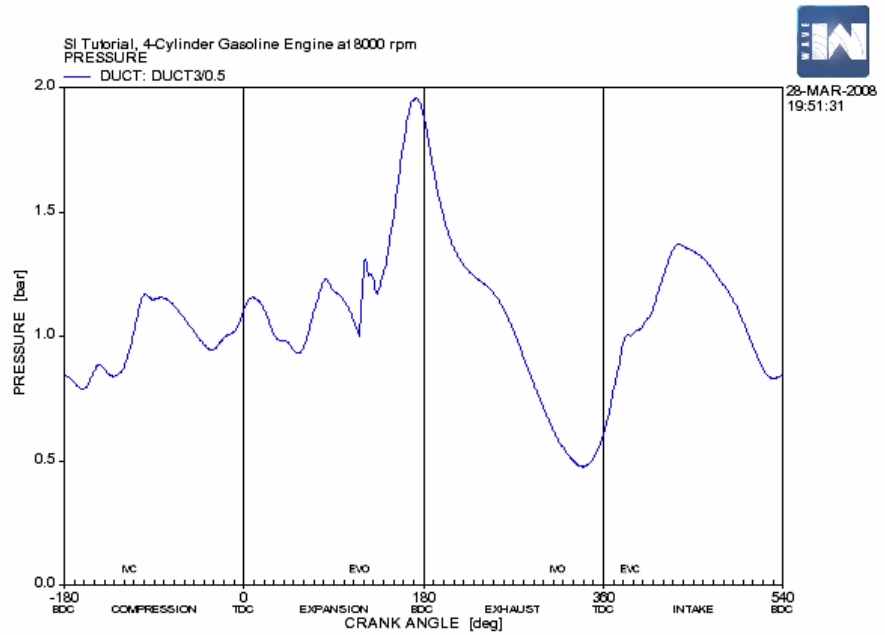
**Kuva 24** Momenttikuvaaja pituudeltaan 566 mm pakokanavilla



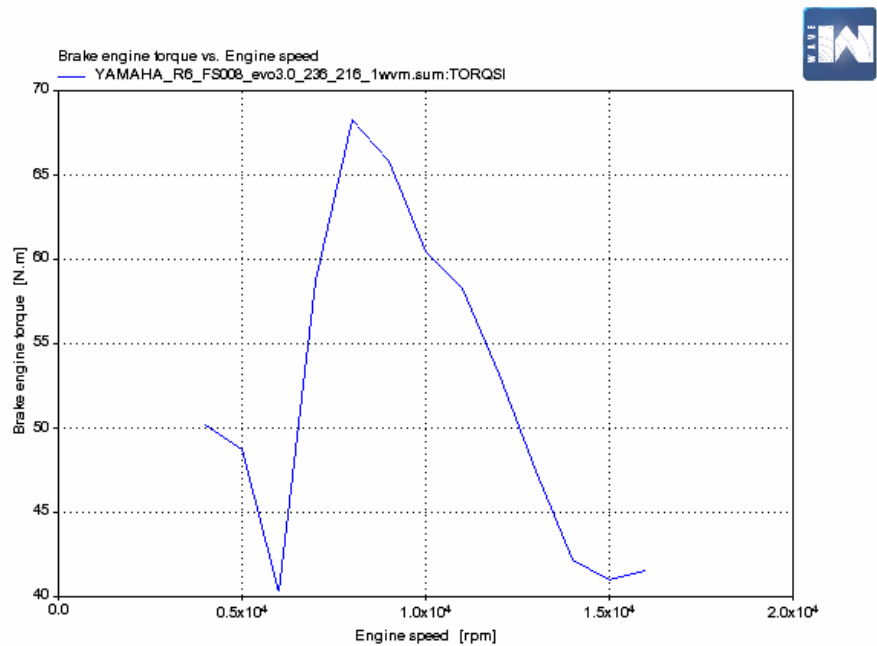
**Kuva 25** Pakokanavan painekuvaaja pituudeltaan 566 mm pakokanavilla 8000 1/min



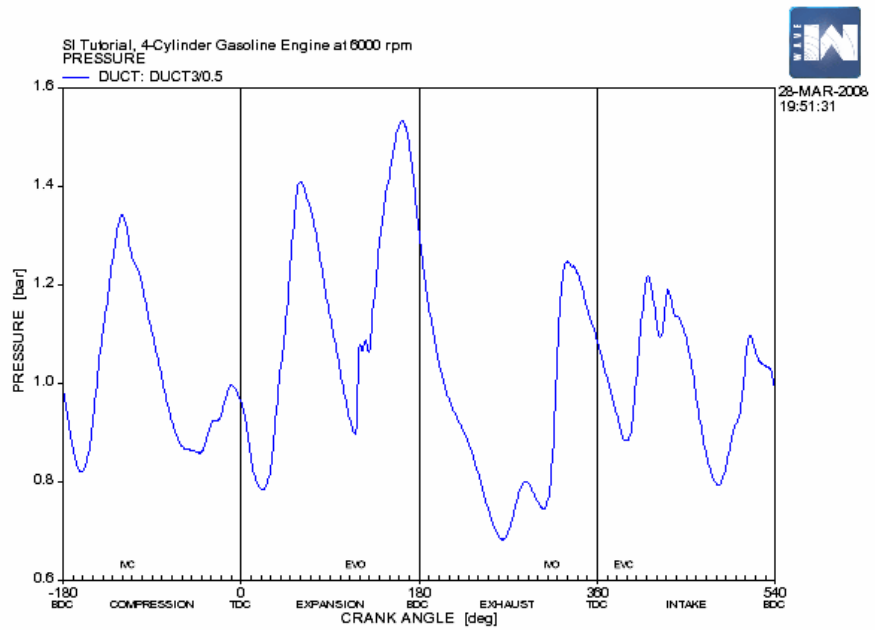
**Kuva 26** Pakokanavan painekuvaaja pituudeltaan 566 mm pakokanavilla 11000 1/min



Kuva 27 Pakokanavan painekuvaaja optimoiduilla pituudeltaan 650 mm pakokanavilla 8000 1/min

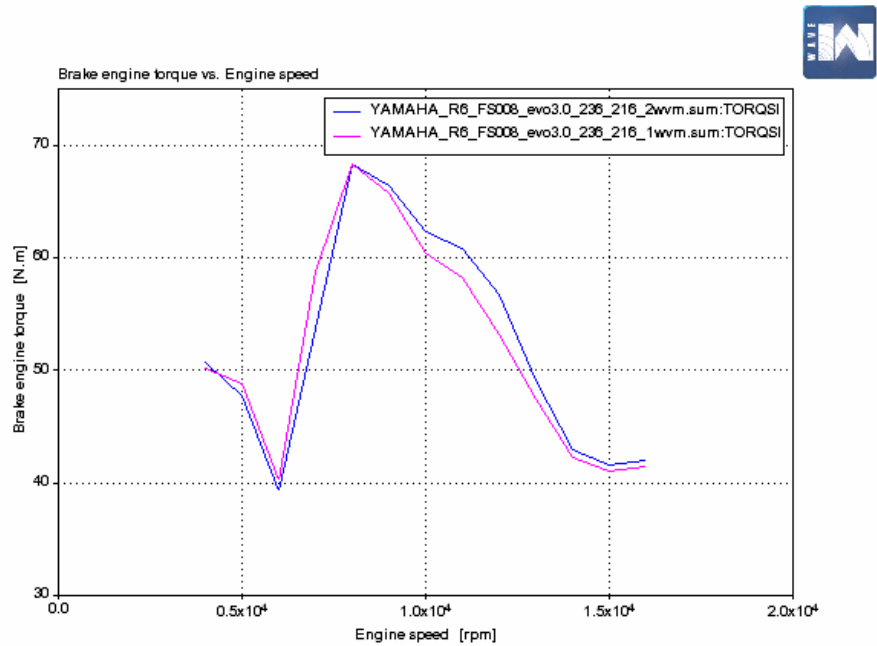


Kuva 28 Momenttikuvaaja optimoiduilla pituudeltaan 650 mm pakokanavilla



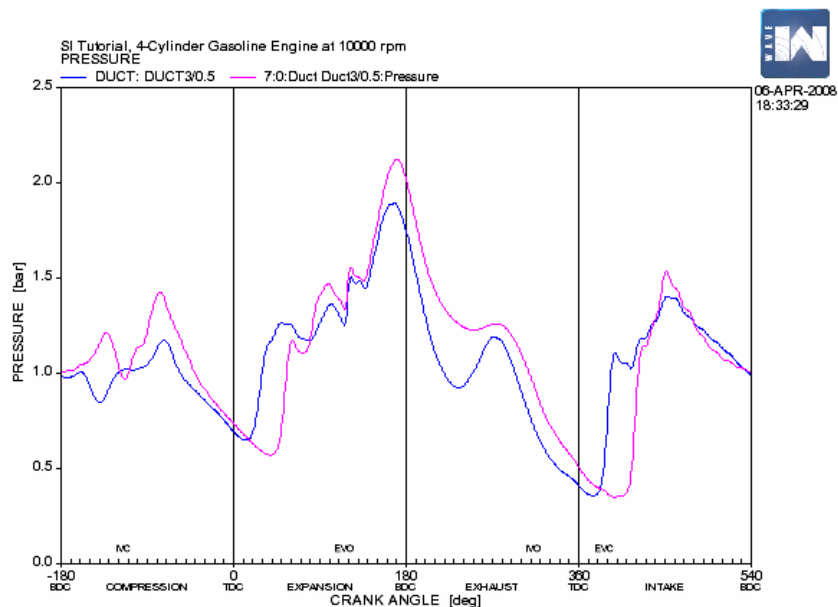
**Kuva 29** Pakokanavan painekuvaaja optimoiduilla 650 mm pakokanavilla 6000 1/min

Pakosarjan putkien halkaisija optimoitiin samaa periaatetta käyttäen. Kuvassa 30 on esitetty moottorin momenttikuvaajat kahdella eri ensiöputken halkaisijalla.



**Kuva 30** Vääntömomenttikuvaajat 30 mm (punainen kuvaaja) ja 35 mm (sininen kuvaaja) ensiöputken halkaisijoilla

Suurimmat erot tapahtuvat 10000 1/min yläpuolella. Suurempi 35 mm putkisto on selvästi tehokkaampi yläkierroksilla. Kuvassa 31 on esitetty pakokanavan painekuvaajat 10000 1/min kierrosnopeudella. Sininen kuvaaja on paine 35 mm putkella ja punainen kuvaaja pienemmällä 30 mm putkella. Suuremmassa putkessa alipaineaalto saapuu hieman aikaisemmin, jonka ansiosta se toimii paremmin yläkierroksilla. Myös kokonaispaine pakotahdin aikana on alhaisempi eli virtausvastus on pienempi. Väännössä ei hävitä huomattavasti alakierroksilla, joten ensiöputken halkaisijaksi valittiin 35 mm.



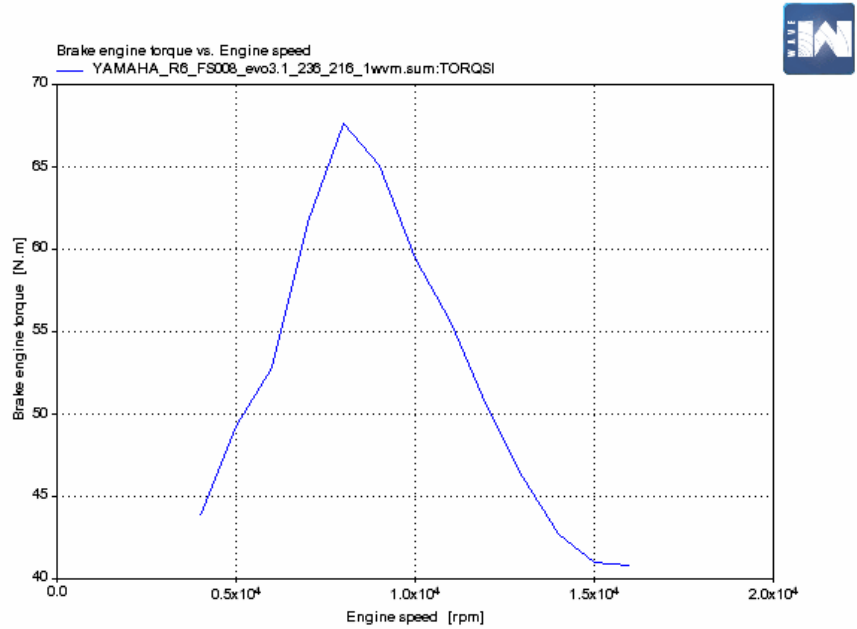
**Kuva 31** Pakokanavan painekuvaajat 30 mm (punainen kuvaaja) ja 35 mm (sininen kuvaaja) ensiöputken halkaisijoilla kierrosnopeudella 10000 1/min

Kollektorinjälkeisen putken halkaisijaa testattiin välillä 40–50 mm, mutta muutoksilla ei ollut huomattavaa merkitystä pakosarjan toimintaan. Putken halkaisijana päätettiin käyttää helpommin saatavilla olevaa halkaisijaltaan 50 mm putkea.

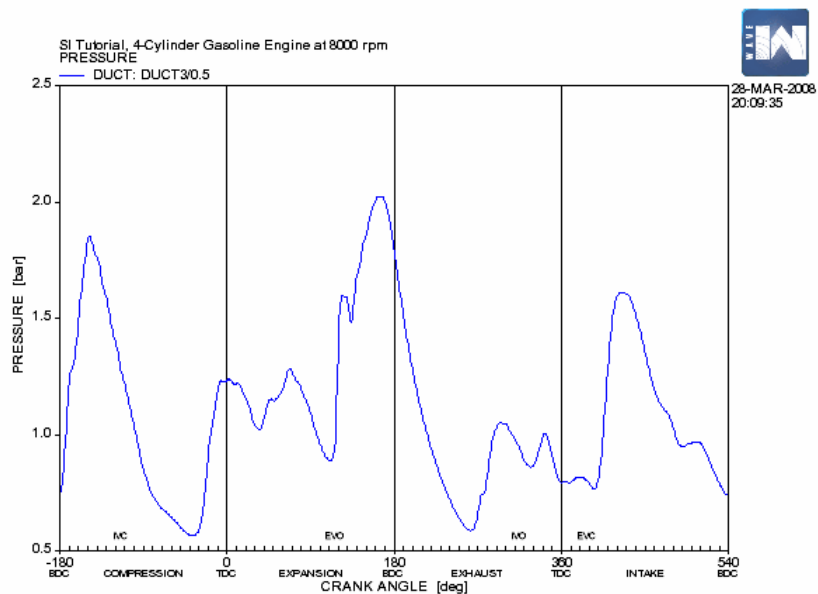


### 7.2.2 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla 360° yhdistetyillä ensiöputkilla

Kuvassa 32 on esitetty vääntömomenttikuvaaja alustavilla laskelmilla saaduilla 381 mm ensiökanavan ja 185 mm toisiokanavan pituudella.

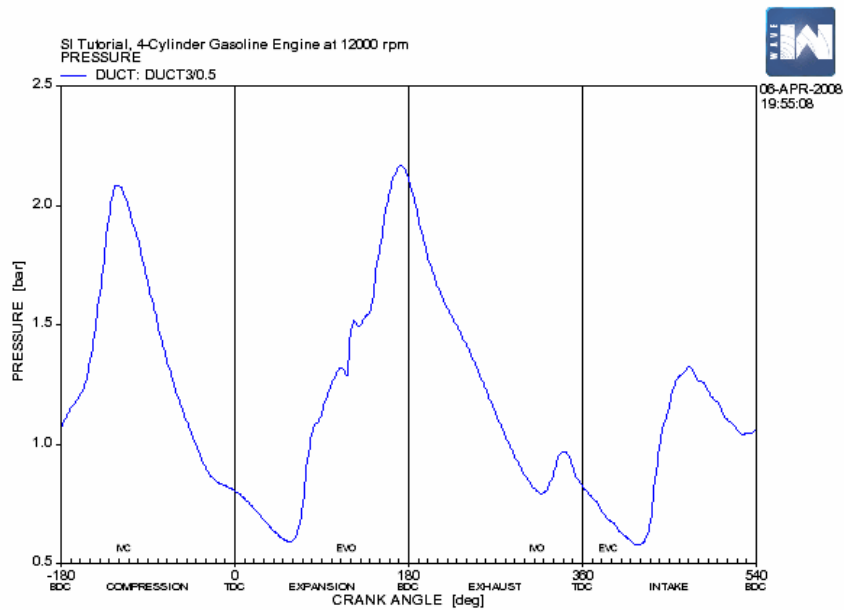


**Kuva 32** Vääntömomenttikuvaaja alustavilla laskelmilla saaduilla arvoilla



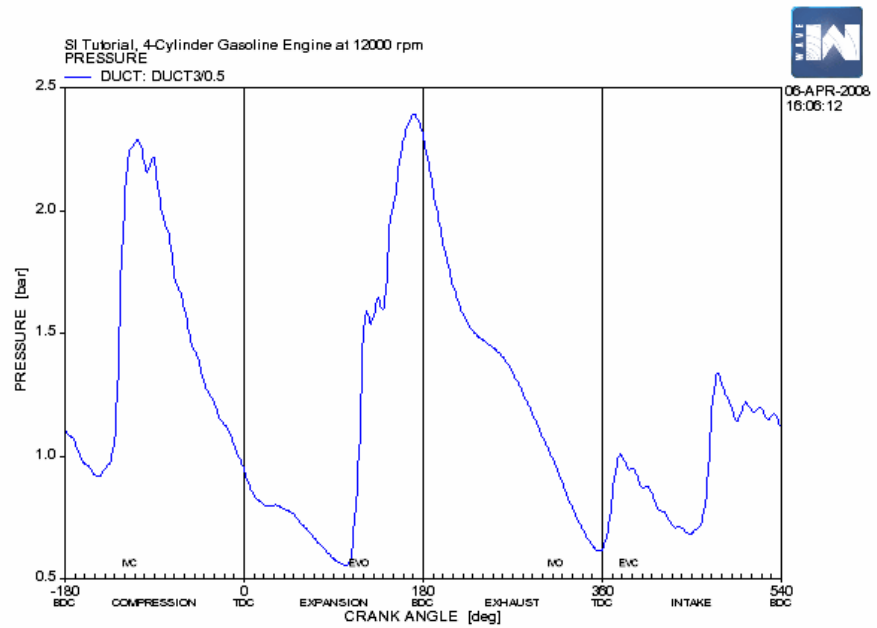
**Kuva 33** Pakokanavan painekuvaaja alustavilla laskelmilla saaduilla arvoilla 8000 1/min

Painekuvaajan perusteella pakosarjan mitoitus on melko lähellä oikeaa (kuva 33). Vääntömomenttialueen laajuutta pitäisi hieman parantaa. Kuvassa 34 olevasta 12000 1/min painekuvaajasta nähdään, kuinka ensiöputkesta heijastuva painepulssi alkaa korkeilla kierroksilla saapua takaisin pakoventtiilille juuri overlapiin aikana. Asian korjaamiseksi ensiöputken pituutta lähdettiin kasvattamaan, jotta korkeapaineaalto saapuisi vasta pakoventtiilin sulkeuduttua.

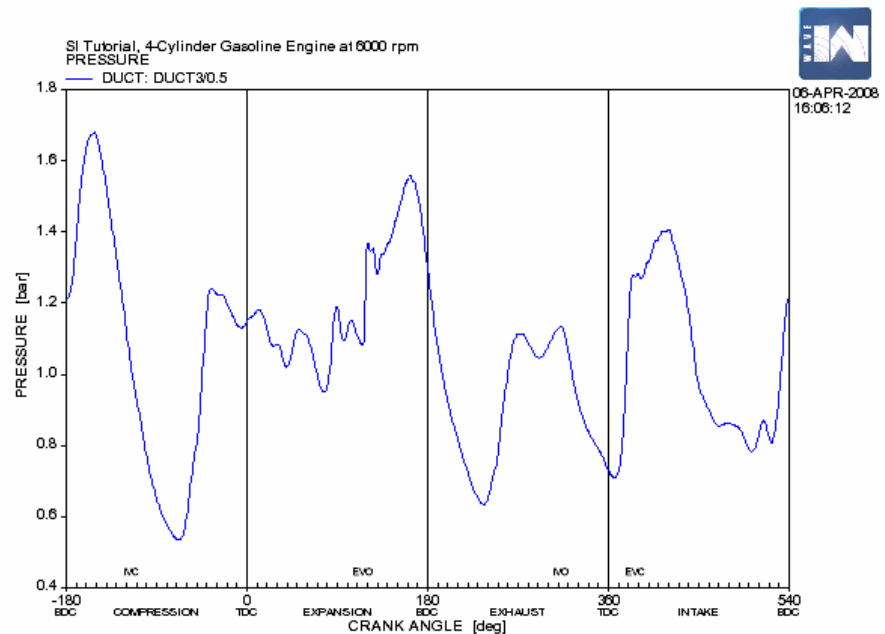


**Kuva 34** Pakokanavan painekuvaaja kierrosnopeudella 12000 1/min

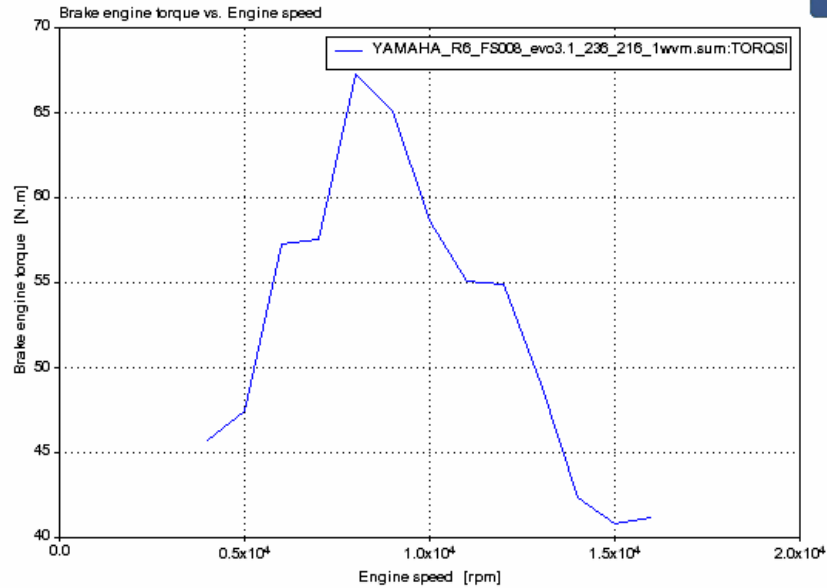
Ensiöputken pituus kasvatettiin 460 mm:iin, jolloin ensimmäinen alipaineaalto osuu kohdalleen 12000 1/min kierrosnopeudella (kuva 35). Kuvasta 36 nähdään, että toisioputkesta heijastuva toinen harvennusaalto osuu overlapiin kohdalle kierrosnopeudella 6000 1/min, joten vääntömomenti nousee myös tällä kierrosnopeudella. Vääntömomenttikuvaaja optimoidulla ensiöputken pituudella on esitetty kuvassa 37.



**Kuva 35** Pakokanavan painekuvaaja optimoidulla ensiökanavan pituudella kierrosnopeudella 12000 1/min

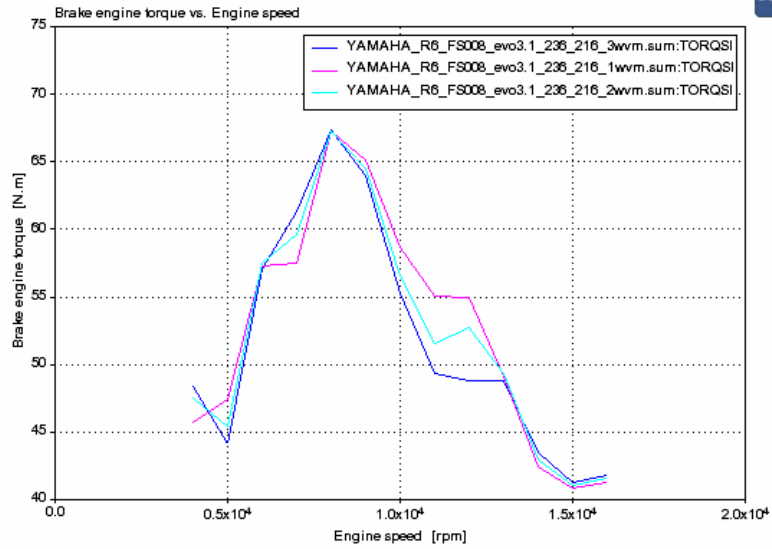


**Kuva 36** Pakokanavan painekuvaaja optimoidulla ensiökanavan pituudella kierrosnopeudella 6000 1/min

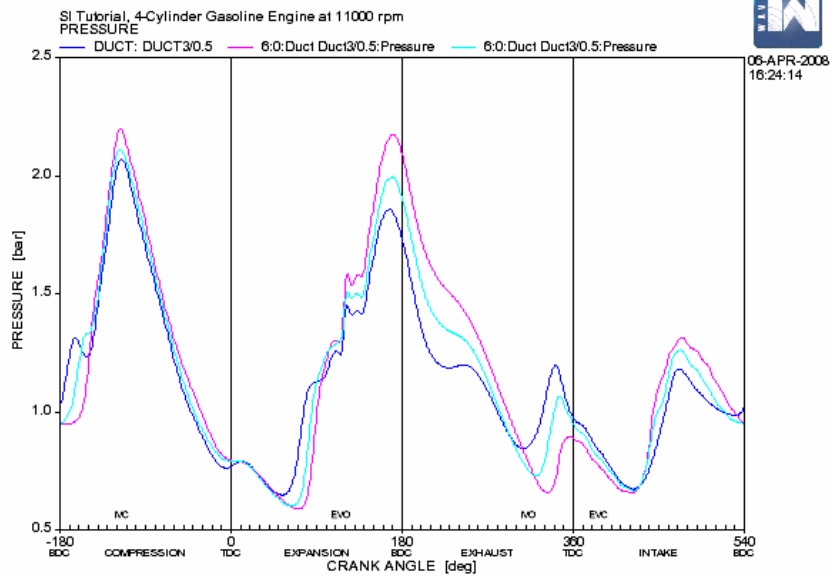


**Kuva 37** Moottorin vääntömomenttikuvaaja optimoidulla ensiöputken pituudella

Ensiöputken halkaisijan vaikutusta testattiin 2,5 mm portaissa lähtien 30 mm pakokanavan halkaisijasta. Halkaisijan muutoksen vaikutukset vääntökuvaajassa näkyvät erityisesti 10000 1/min yläpuolella (kuva 38). Normaalista poiketen halkaisijaltaan pienin 30 mm putki (punainen kuvaaja) toimii parhaiten yläkierroksilla. Syy löytyy pakokanavan painekuvaajasta kierrosnopeudella 11000 1/min (kuva 39), josta voidaan nähdä, että halkaisijaltaan suuremmissa putkissa alipaineaalto saapuu hieman liian aikaisin ja alipaineaalto on myös heikompi. Pakokaasujen virtausnopeus suuremmissa putkissa on liian alhainen eikä paineaalto synny riittävän voimakkaana.



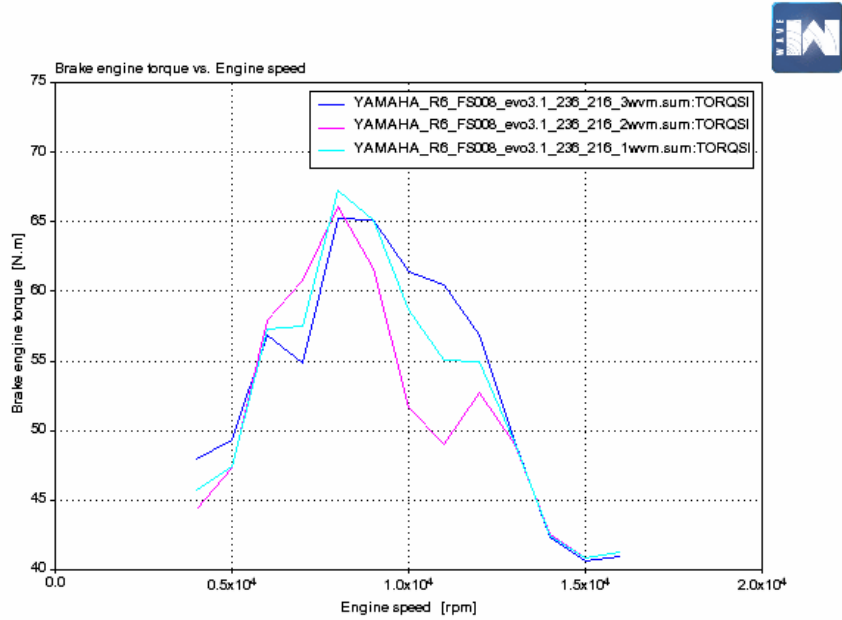
**Kuva 38** Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri ensiöputken halkaisijoilla



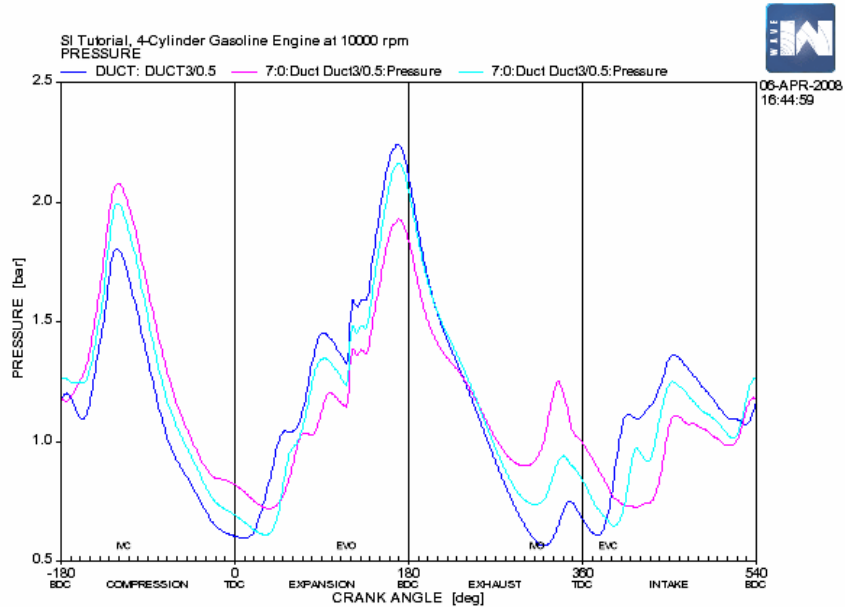
**Kuva 39** Pakokanavan painekuvaajat eri ensiöputken halkaisijoilla kierrosnopeudella 11000 1/min

Toisioputken halkaisijan vaikutuksia testattiin 30 mm (punainen kuvaaja), 35 mm (vihreä kuvaaja) ja 40 mm (sininen kuvaaja) putkilla (kuva 40). Toisioputken halkaisijalla on suurempi vaikutus vääntömomenttikuvaajaan kuin ensiöputken halkaisijalla. Pakokanavan painekuvaajasta voidaan nähdä, että toisioputken halkaisi-

jan vaikutus on myös täysin erityyppinen kuin ensiöputken. Sylinterin tyhjentämistä avustavat harvennusaallot syntyvät toisioputkien jälkeisestä kollektorista ja niiden voimakkuus riippuu pääasiassa toisioputken halkaisijasta.



**Kuva 40** Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri toisioputken halkaisijoilla

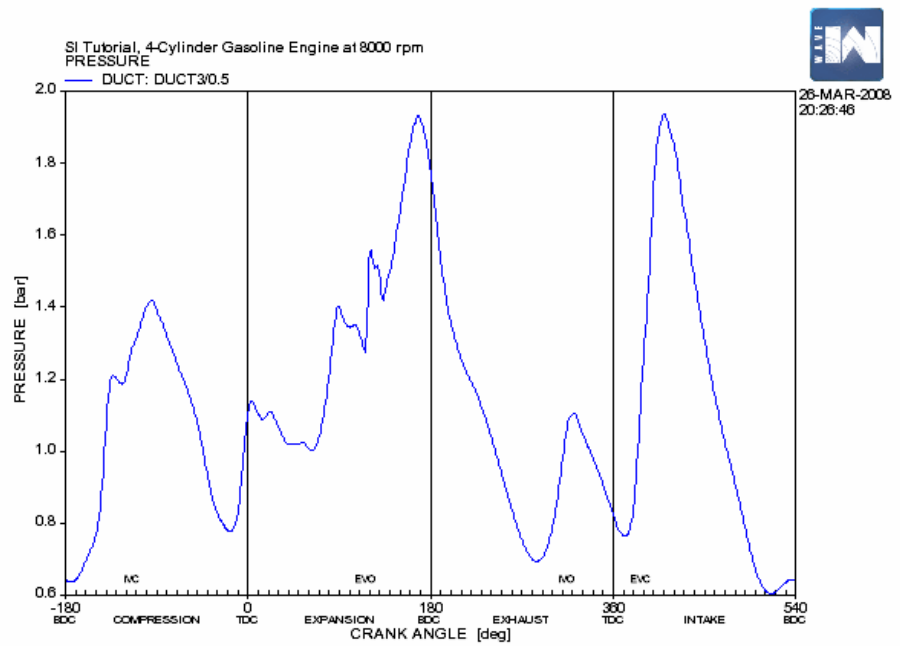


**Kuva 41** Pakokanavan painekuvaajat kierrosnopeudella 10000 1/min eri toisiokanavan halkaisijoilla

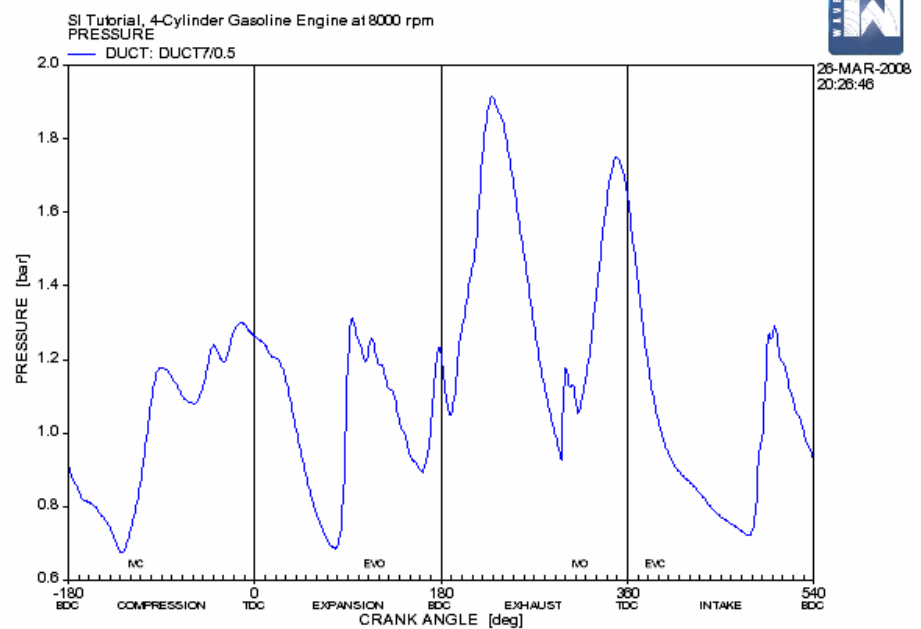
Paras valinta yläkierrosten väännön puolesta olisi halkaisijaltaan 40 mm toisioputki, mutta ongelmana on 6000 1/min kierrosnopeudella tapahtuva notkahdus momenttikuvaajassa. Moottorin käytön kannalta olisi toivottavaa että siitä saatava momentti olisi suoraviivaista käytettävällä kierrosnopeusalueella. Esimerkiksi kiihdytettäessä ulos mutkasta pidon rajamailla voi notkahdus momenttikuvaajassa aiheuttaa pidon menetyksen. Tämän takia valitaan toisioputken halkaisijaksi 35 mm, jolloin momenttikuvaajasta tulee suoraviivaisempi ja myös huippumomentti on hieman suurempi.

### 7.2.3 Pakosarja 4-2-1 -kokoojilla 180° yhdistetyillä ensiöputkilla

Yhdistettäessä 180° toisistaan erillään olevat palotapahtumat pakoventtiilien painekuvaajat eivät ole kaikki symmetrisiä. Sytytysjärjestyksen ollessa 1-2-4-3 yhdistetään sylinterien 1 ja 2, sekä 3 ja 4 ensiöputket toisiinsa. Tällöin sylinterien 1 ja 4, sekä 2 ja 3 painekuvaajat ovat symmetriset. Pakosarjaa suunniteltaessa tulee ottaa kumpikin painekuvaaja huomioon. Muilta osin suunnittelu- ja simulointityö vastaavat luvussa 7.2.2 esitettyä. Pakokanavan painekuvaajat optimoiduilla arvoilla on esitetty kuvissa 42 ja 43. Ensiöputken pituutta kasvatettiin 381 mm:stä 480 mm:iin ja toisioputken pituutta 185 mm:stä 255 mm:iin. Ensiöputken halkaisijaa kasvatettiin 26 mm:stä 30 mm:iin. Toisioputken halkaisija 34 mm pysyi käytännössä samana, mutta se pyöristettiin lähimpään saatavilla olevaan putkikokoon 35 mm.



**Kuva 42** Sylinterien 1 ja 4 pakokanavan painekuvaajat optimoidulla pakosarjalla

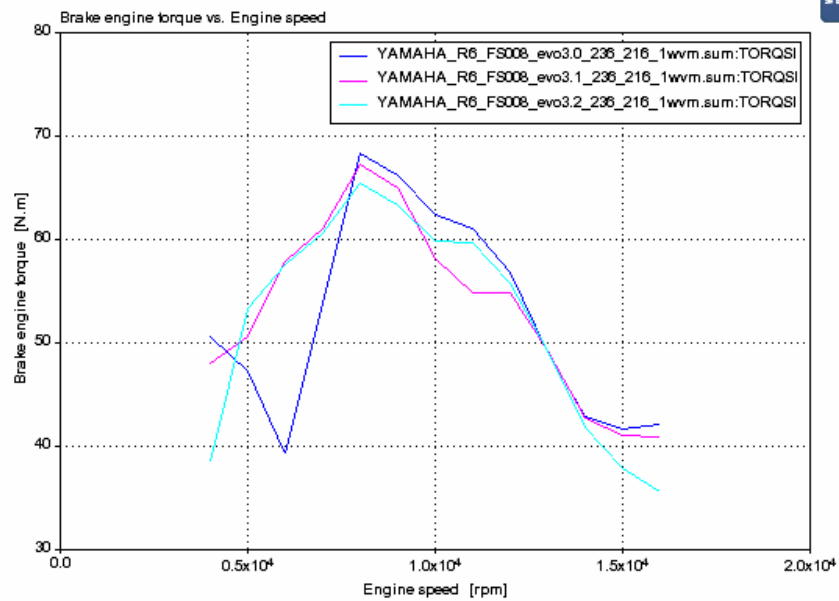


**Kuva 43** Sylinterien 2 ja 3 pakokanavan painekuvaajat optimoidulla pakosarjalla



## 7.2.4 Pakosarjatyypin valinta moottorisimuloinnin tulosten pohjalta

Kaikkien simuloitujen pakosarjatyypin moottorin vääntömomenttikuvaajat on esitetty kuvassa 44, jossa sininen kuvaaja on 4-1-pakosarjalla, punainen kuvaaja on 4-2-1 360° yhdistetyillä ensiöputkilla ja vihreä kuvaaja 4-2-1 180° yhdistetyillä ensiöputkilla.

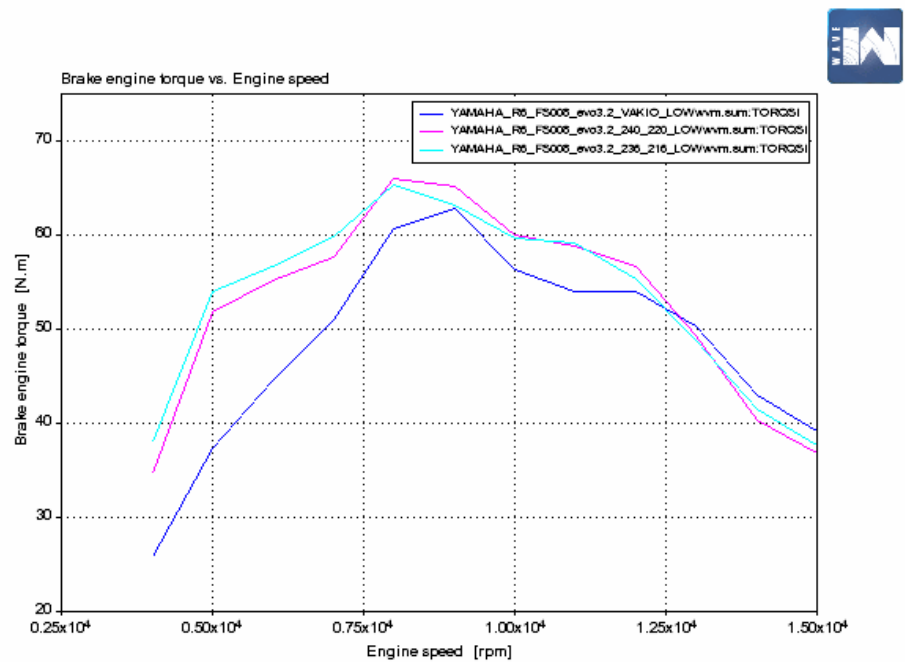


**Kuva 44** Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri pakosarjavaihtoehdoilla

Parhaiten halutut ominaisuudet saavuttaa 4-2-1 -tyyppinen pakosarja 180° yhdistetyillä ensiöputkilla. Huippuvääntö on vaihtoehdoista alhaisin, mutta momenttialueen laajuus ja momenttikuvaajan suoraviivaisuus katsotaan merkitsevämmäksi tekijäksi.

### 7.3 Nokka-akselien optimointi

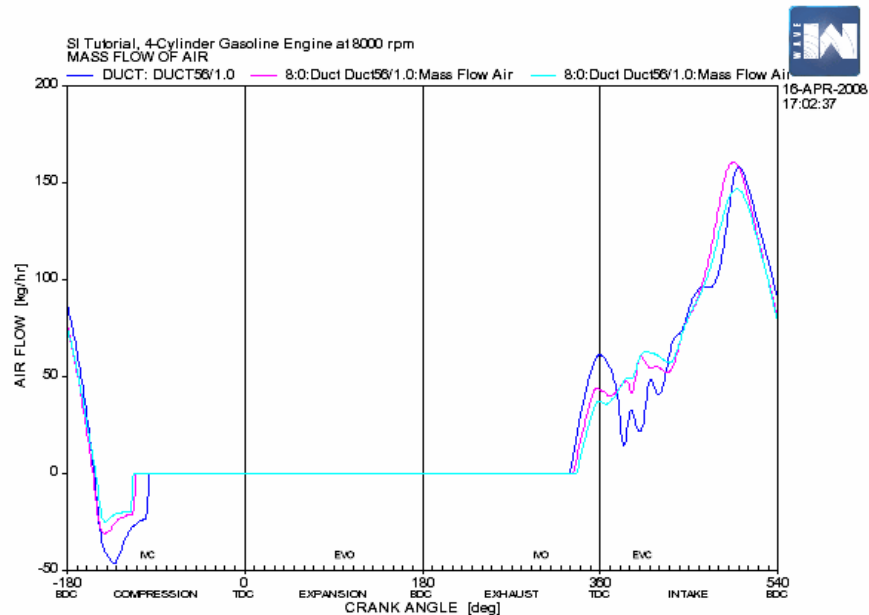
Nokka-akselien optimointi aloitettiin mallintamalla ohjelmaan erilaisia nokka-akseleita sekä imu- että pakopuolelle. Nokka-akselien uudet profiilit laskettiin Excel-kaaviota apuna käyttäen alkuperäisten nokkien muodosta asteita vähentäen. Nokka-akselien suunnittelussa täytyi ottaa huomioon alkuperäisten profiilien rajallinen hiomavara. Venttiilin nosto määritellään venttiilin halkaisijan perusteella. Venttiilien koko ei tässä tapauksessa muutu, joten venttiilin nosto pidetään alkuperäisessä arvossaan. Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri nokka-akselivaihtoehdoilla on esitetty kuvassa 45.



**Kuva 45** Moottorin vääntömomenttikuvaajat eri nokka-akselivaihtoehdoilla

Sininen kuvaaja on saatu käyttämällä alkuperäisiä nokka-akseleita. Punaisessa kuvaajassa alkuperäisistä venttiilin aukioloasteista on vähennetty 15°, jolloin imuventtiilin aukioloajaksi 1 mm nostolla tulee 240° ja pakoventtiilin aukioloajaksi 220°. Vihreässä momenttikuvaajassa asteita on vähennetty edelleen 4°, jolloin imuventtiilin aukioloajaksi 1 mm nostolla tulee 236° ja pakoventtiilin aukioloajaksi 216°.

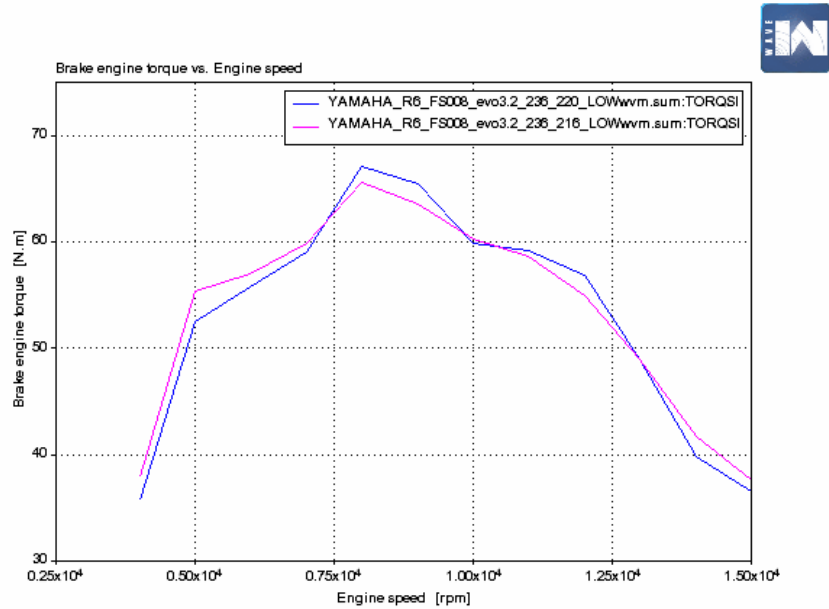
Parhaan käsityksen nokka-akselin toiminnasta saa tarkkailemalla imu- ja pakokanavan massavirtaa kammenkulman funktiona. Kuvassa 46 on esitetty massavirran kuvaajat imukanavassa eri nokka-akselivaihtoehdoilla moottorinkierrosnopeudella 8000 1/min. Imukanavan virtaus ehtii kaikilla vaihtoehdoilla kääntyä väärään suuntaan, ja seosta karkaa takaisin imukanavaan ennen venttiilin sulkeutumista. Seoksen karkaaminen loppuu hiotuilla nokka-akseleilla noin 13000 1/min kierrosnopeuden kohdalla. Nokka-akselin ajoitus on jo nyt melko aikainen, joten imunokan aukioloajan pitäisi olla vieläkin pienempi. Tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, koska nokan profiilia ei voi hioa enempää.



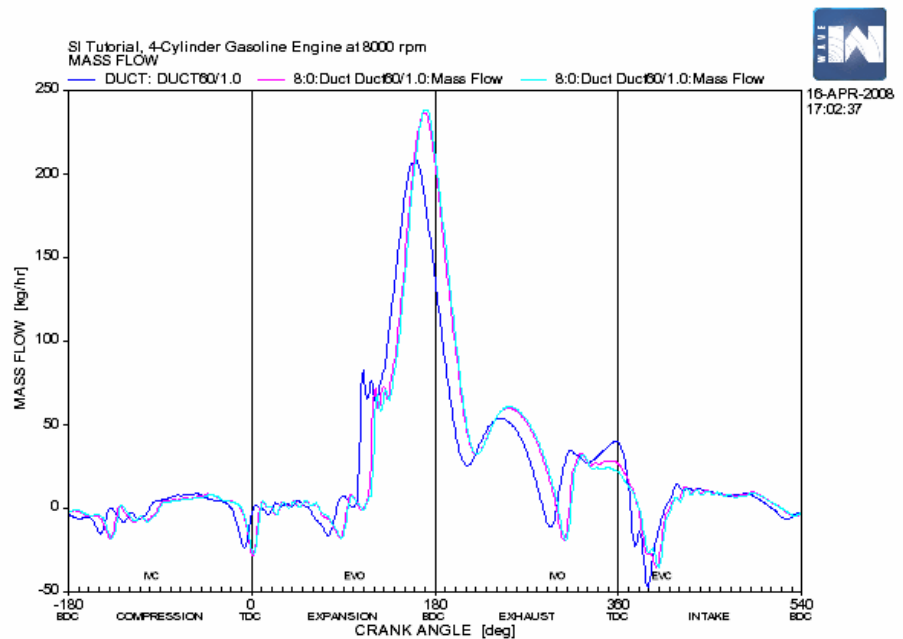
**Kuva 46** Imukanavan massavirtakuvaajat eri nokka-akselivaihtoehdoilla

Pakokanavan massavirta ei ehdi kääntymään takaisinpäin hiotuilla nokkavaihtoehdoilla enää 7000 1/min jälkeen, mikä viittaa siihen, että pakonokka voisi olla jyrkempi. Moottoria simuloitiin käyttäen 263-asteista imunokkaa ja 220-asteista pakonokkaa. Tuloksena vääntömomenti laski hieman 7000 1/min kierrosnopeuden alapuolella, mutta sen yläpuolella vääntömomenti kasvoi selvästi (kuva 47). Pakokanavan massavirta ei edelleenkään kääntynyt merkittävästi takaisinpäin (ku-

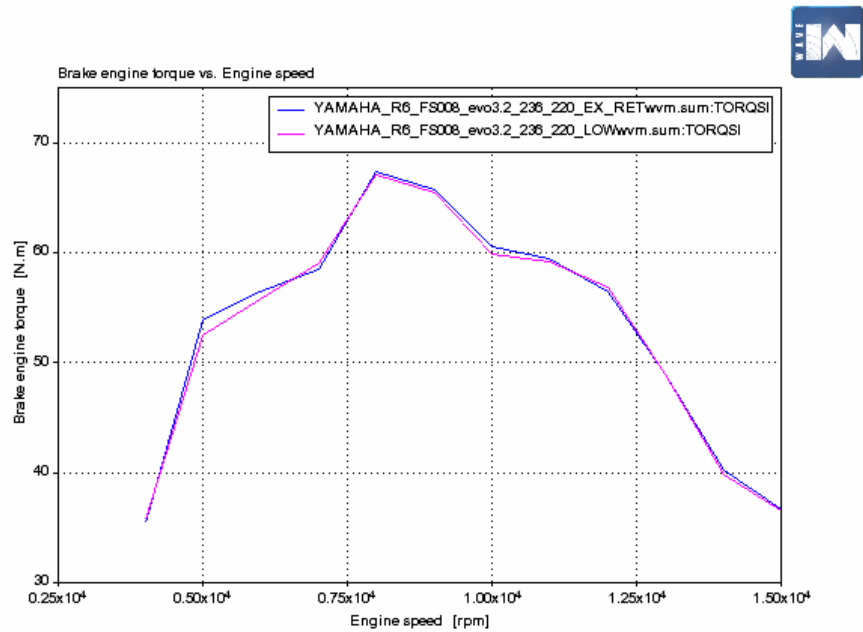
va 48), joten nokan ajoitusta päätettiin myöhäistää 5°. Tuloksena vääntömomentti kasvoi koko kierrosnopeusalueella (kuva 49).



Kuva 47 Pakonokka-akselin jyrkentämisen vaikutus vääntömomenttikuvaajaan

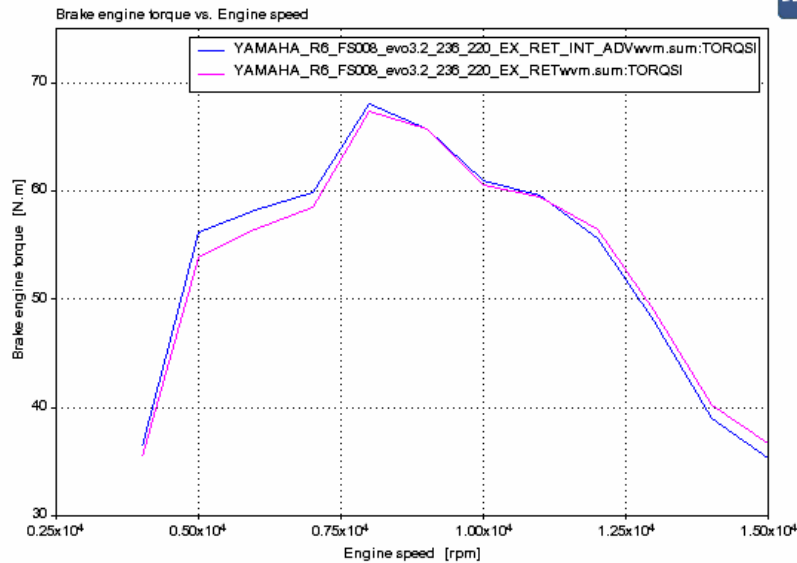


Kuva 48 Pakokanavan massavirta eri nokka-akselivaihtoehdoilla 8000 1/min



**Kuva 49** Pakonokka-akselin ajoituksen myöhäistämisen vaikutus momenttikuvajaan

Imunokka-akselin ajoitusta päätettiin muuttaa 5° aikaisemmalle täytöksen kar-  
kaamisen vuoksi. Vääntömomentti kasvoi 7000 1/min kierrosnopeuden alapuolel-  
la yläkierrosten momentin säilyessä lähes ennallaan (kuva 50).



**Kuva 50** Imunokka-akselin ajoituksen vaikutus momenttikuvaajaan (sininen kuvaaja on aikaistettulla ajoituksella)

Muutettaessa nokka-akselien arvoja tulee ottaa huomioon muuttuvat olosuhteet imu- ja pakosarjan kannalta. Suurempia muutoksia venttiilien ajoitukseen tehtäessä täytyy imu- ja pakosarjan mitoitus tehdä uudestaan. Imu- ja pakosarjan simuloimalleissa käytettiin imupuolella 236-asteista ja pakopuolella 216-asteista nokka-akselia. Optimoitujen akselien muutokset eivät olleet merkittäviä, ja niillä ei ollut huomattavaa vaikutusta imu- ja pakosarjan toimintaan.

## 8. VALMISTUS

### 8.1 Imusarja

Imusarjasta valmistetaan kaksi versiota testausta varten. Testien tarkoituksena on selvittää imusarjan geometrian vaikutukset sen toimintaan sekä varmistaa moottorisimuloinnissa saadut tulokset tehomittauksessa muuttamalla primääriputkien pituuksia ja kokoojakammion tilavuutta. Imusarjat ovat luvussa 4.1 esillä olleet tyyppit 1 ja 2. Imusarjojen valmiit primääriputket moottoriin kiinnitettynä on esitetty kuvissa 51 ja 52. Kummankin testi-imusarjan ensiöputket valmistettiin valmiita te-

räsputkimutkia käyttäen. Materiaali valittiin pelkästään kustannusten perusteella ja lopullisen version ensiöputket tullaan valmistamaan alumiinista. Ensiöputkien päihin valmistettiin kuvan 53 mukaiset kiihdytyssuppilot alumiiniputkesta prässäämällä, samassa kuvassa näkyvän muotin avulla.



**Kuva 51** Tyypin 1 imusarjan ensiöputket



**Kuva 52** Tyypin 2 imusarjan ensiöputket



**Kuva 53** Muotti ja valmis kiihdytyspippilo

Tyypin 1 kokoojakammio ja kuristin valmistettiin lasikuidusta laminoimalla teräksestä CNC-sorvatun muotin avulla (kuva 55). Jos kyseistä imusarjatyyppeä pääteään käyttää kilpailuissa, valmistetaan kokoojakammio hiilikuidusta. Tyypin 2 imusarjan kokoojakammio valmistettiin vahvuudeltaan 1 mm alumiinilevystä (kuva 56) ja siihen liimataan samaisella muotilla tehty lasikuituinen kuristusosa.



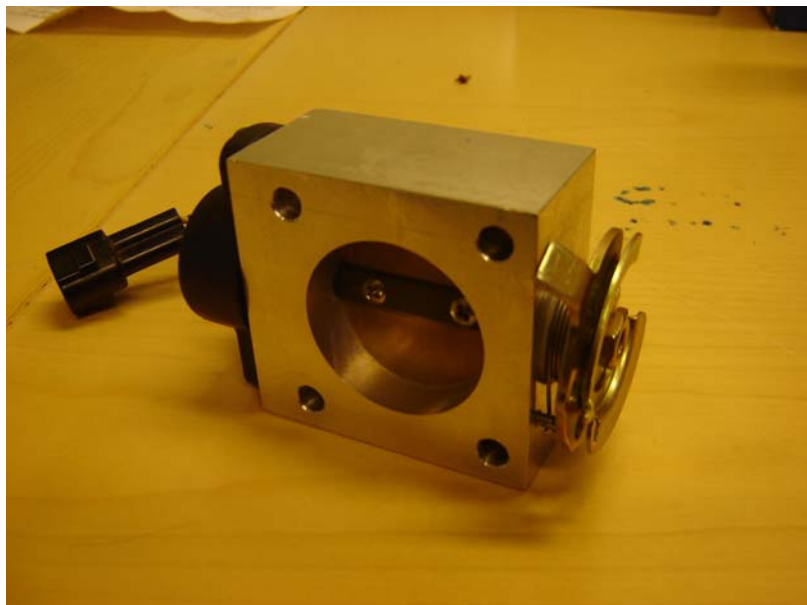
**Kuva 54** Imusarjan kuristinosan muotti ja valmis kappale





**Kuva 55** Tyypin 2. imusarjan kokoojakammio

Kaasuläppärunko valmistetaan käyttäen Yamaha R6 2005 38 mm kaasuläppää ja akselia. Kaasuläpän ja akselin ympärille valmistetaan alumiinista jyrsimällä runko-osa liitteen 1 piirustusten mukaisesti. Valmis kaasuläppärunko on esitetty kuvassa 56.

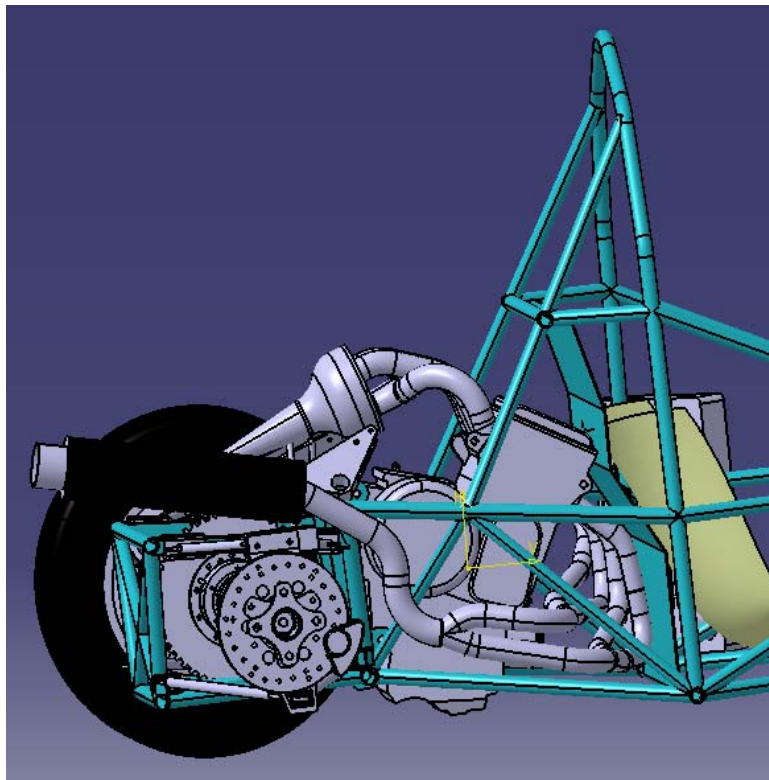


**Kuva 56** Kaasuläppärunko

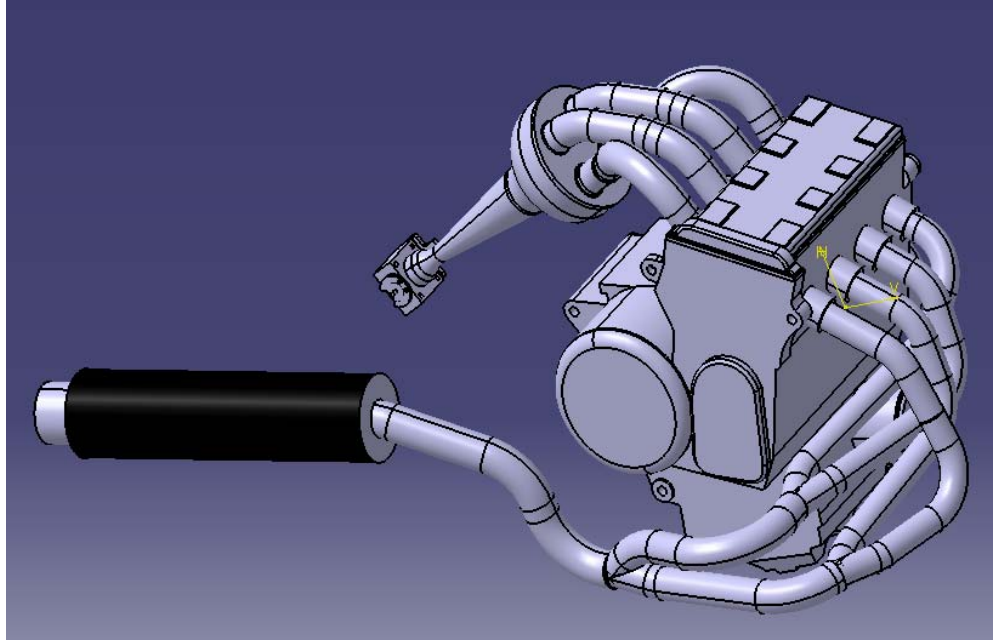
Imusarjan materiaalit on valittu siten, että imusarjan massasta tulee mahdollisimman pieni, mutta huomioon täytyy ottaa myös kustannukset niin materiaalien kuin valmistuksenkin osalta.

## 8.2 Pakosarja

Pakosarjan valmistusta varten putket mallinnettiin formulan kokoonpanokuvaan (kuva 57). Moottorin kokoonpanomallinnus pakosarja kiinnitettynä on esitetty kuvassa 58. Putkien pituudet saatiin täsmäämään suunniteltuja arvoja  $\pm 3$  mm tarkkuudella. Pakosarja valmistetaan valmiita teräsputkimutkia käyttäen. Mallinnuksen perusteella katkaistiin putkien osat valmiiksi mittoihinsa ja kollektorit kiinnitettiin jigien avulla paikalleen. Ensiöputket rakennettiin yksi kerrallaan sylinteristä 4 lähtien esikiinnittäen ne pistehitseillä. Ennen toisioputkien liittämistä toisiinsa ensiöputkien liitokset hitsataan lopullisesti kiinni.



**Kuva 57** Pakosarja valmiina auton kokoonpanomallinnuksessa



Kuva 58 Moottorin kokoonpanomallinnus

### 8.3 Nokka-akselit

Nokka-akselit toimitettiin Kylmäkosken erikoismoottoriin hiottaviksi. Nokka-akselien kyljistä hiotaan profiilia kapeammaksi perusympyrän säilyessä samana. Nokka-akselin nostosta jouduttiin hiomaan pois noin 0,3 mm, jotta nokan kärki ei muodostu liian teräväksi. Hionnan jälkeen nokkien pinnat fosfatoitiin kulutuskestävyyden parantamiseksi. Nokka-akselien ajoituksen muuttamiseksi akselien hammaspyörien kiinnitysreikiin työstettiin säätövaraa noin 5°.

## 9. TYÖSSÄ SAAVUTETUT TULOKSET JA KEHITYSNÄKYMÄT

Työssä keskityttiin erityisesti imu- ja pakojärjestelmän sekä nokka-akselien ajoituksen optimoimiseen moottorisimulointiohjelmaa työvälineenä käyttäen. Taulukossa 3. on esitetty laskemalla saadut arvot verrattuna moottorisimuloinnissa optimoituihin arvoihin. Tuloksia tarkasteltaessa nähdään, että optimoidut arvot poikkeavat joiltain osin huomattavastikin lasketuista arvoista. Simuloinnin tulokset tullaan vielä varmistamaan käytännön testeillä, ainakin imusarjan osalta. Imusarjan ensiöputken pituuksia ja kokoojakammion tilavuutta tullaan muuttamaan ja moottorin vääntömomentti mitataan eri arvoilla. Näitä tuloksia voidaan verrata simu-

loinnissa saatuihin tuloksiin. Auton valmistus on vielä kesken, joten käytännön testien tulokset jouduttiin jättämään aikataulusyistä tämän työn ulkopuolelle.

**Taulukko 3** Moottorisimuloinnin tulokset verrattuna laskelmien arvoihin

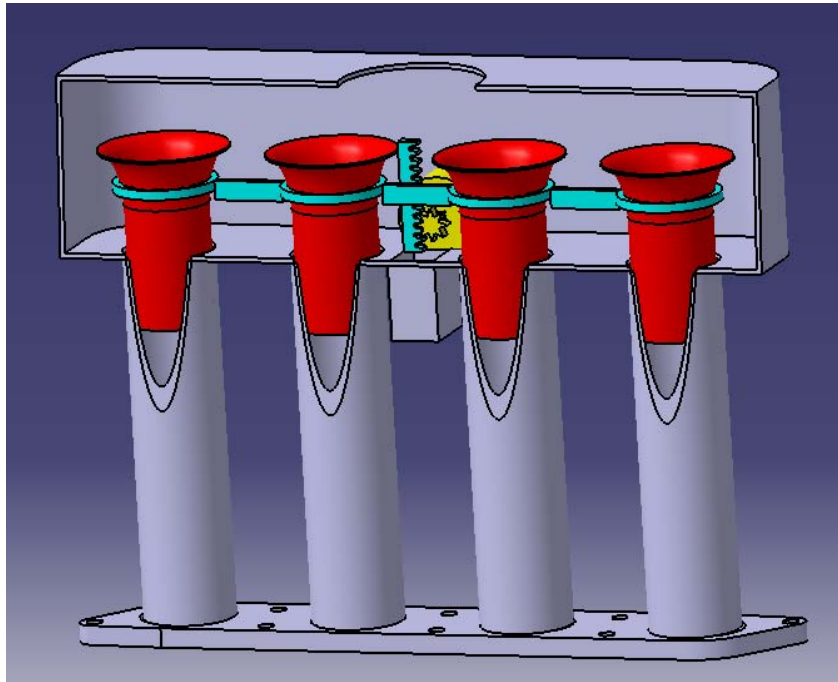
<b>imusarja</b>	<b>laskelmien arvot</b>	<b>optimoidut arvot</b>
imukanavan pituus	500 mm	325 mm
imukanavan halkaisija	35 mm	35 mm
<b>4-1 -pakosarja</b>		
ensiöputken pituus	566 mm	650 mm
ensiöputken halkaisija	26 mm	35 mm
<b>4-2-1 -pakosarja 360°</b>		
ensiöputken pituus	381 mm	460 mm
ensiöputken halkaisija	26 mm	30 mm
toisioputken pituus	185 mm	185 mm
toisioputken halkaisija	34 mm	35 mm
<b>4-2-1 -pakosarja 180°</b>		
ensiöputken pituus	381 mm	480 mm
ensiöputken halkaisija	26 mm	30 mm
toisioputken pituus	185 mm	255 mm
toisioputken halkaisija	34 mm	35 mm

Moottorin ominaisuuksien valinnassa huomioitiin erityisesti kokemattomat kuljettajat. Momenttikuvaajasta haluttiin mahdollisimman laaja ja moottorin toiminnasta joustava ja suoraviivainen. Kuljettajien kehittyessä ja testeistä saatujen kokemusten perusteella moottorin viritystasetta voidaan todennäköisesti nostaa, jolloin moottorin kierrosnopeusalue kapenee, mutta huippuvääntömomenti ja -teho kasvavat. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi nostamalla imusarjan virityskierrosnopeutta korkeammaksi ja siirtymällä 4-1 -tyyppisen pakosarjan käyttöön.

Tulevaisuudessa tulisi pyrkiä saamaan auto aikaisemmassa vaiheessa valmiiksi, jotta testaukselle jäisi enemmän aikaa. Erityisen tärkeää olisi testata imusarjan lisäksi myös pakosarjan muutoksia käytännössä ja varmistaa näin moottorisimuloinnissa saadut tulokset.

Suunnittelun loppuvaiheessa heräsi ajatus varustaa imusarja muuttuvapituuksisilla ensiöputkilla. Tällä tavoin imusarjan toiminta saataisiin laajemmalle kierrosnopeusalueelle. Käytettävissä oleva aika ei kuitenkaan riittänyt ajatuksen toteuttamiseen käytännössä. Muuttuvapituuksisen imusarjan rakenteesta on esitetty alustava mallinnus kuvassa 59. Ensiöputkien päissä on liikkuvat suppilo-osat, joita ohjataan sähkömoottorin avulla. Sähkömoottoria voidaan ohjata moottorinohjausyks-

költä tulevan ohjauksen avulla. Säättösuurena käytettäisiin moottorin kierrosnopeutta. Rakenne on melko yksinkertainen ja helppo valmistaa, mutta toiminnan varmistaminen ja optimointi olisi vienyt liikaa aikaa, joten ajatuksesta luovuttiin toistaiseksi. Muuttuvapituuksinen imusarja nähdään toiminnassa todennäköisesti vuoden 2009 autossa.



**Kuva 59** Muuttuvapituuksisen imusarjan mallinnuskuva

## LÄHDELUETTELO

1. Formula Student säännöt 2008. [www-sivu]. [Viitattu 22.3.2008].  
Saatavissa:  
<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>
2. DE Winterbone – RJ Pearson, Design Techniques for Engine Manifolds. Professional Engineering Publishing. 1999.
3. Ricardo wave -ohjelman information center
4. Mark Claywell – Donald Horkheimer – Garrett Stockburger, Investigation of Intake Concepts for a Formula SAE Four-Cylinder Engine Using 1D/3D (Ricardo WAVE-VECTIS) Coupled Modeling Techniques. SAE International. 2006.
5. Willi Bohl, Teknillinen virtausoppi. Sonator 1984.
6. Esko Mauno, Virittäjän käsikirja 1. Alfamer 2002.
7. Team-Integra artikkelikokoelma. [www-sivu]. [Viitattu 12.4.2008].  
Saatavissa: <http://www.team-integra.net/sections/articles/showArticle.asp?ArticleID=2>
8. G.P. Blair, Design and Simulation of Four-Stroke Engines. SAE. 1999.
9. A. Graham Bell, Four-Stroke Performance tuning. Heynes. 1998.
10. Yamahazone. [www-sivu]. [viitattu 9.5.2008]. Saatavissa:  
<http://www.yamahazone.biz/>

