

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2021

Mikael Hanski

# TURBOMOOTTORIN RAKENTAMINEN KILPA-AUTOON

– Volvo B23

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Huhtikuu 2021 | 35 sivua

Mikael Hanski

# TURBOMOOTTORIN RAKENTAMINEN KILPA-AUTOON

- Volvo B23

Tämän opinnäytetyön aiheena on rakentaa tieliikennekäyttöön tarkoitettusta muun muassa Volvo 740:ssä käytetystä B23-moottorista kilpa-autoon soveltuva turbomoottori. Työ jakaantui kahteen laajaan kokonaisuuteen. Ensin suoritettiin varsinainen moottorin suunnittelu ja rakentaminen ja sen jälkeen käsiteltiin moottorinohjausjärjestelmän säätäminen ja testaus. Työn kaikissa vaiheissa pyrittiin noudattamaan AKK-Motorsport ry:n laatimia kilpa-auton moottorin rakentamiselle asetettuja Special Saloon -ryhmän sääntöjä.

Työn tavoitteena on parantaa alkuperäisen moottorin tehoa ja toisaalta myös selvittää, onko tällaisen kilpa-auton moottorin rakentaminen mahdollista. Tässä työssä toteutetun moottorin tulee soveltua käytettäväksi Special Saloon -sääntöjen mukaisesti rallisprint- ja jääratakilpailuissa.

Moottorinohjausyksikkönä käytettiin MegaSquirt-moottorinohjausta. Se on laajasti harrastajien käytössä oleva tietokoneella ohjelmoitava moottorinohjaus.

Moottorista mitattiin muutostöiden jälkeen 536 hv ja 760 Nm.

ASIASANAT:

Moottori, kilpa-autot, suunnittelu, rakentaminen, testaus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

April 2021 | 35 pages

Mikael Hanski

## BUILDING TURBO ENGINE FOR A RACE CAR

- Volvo B23

The object of this bachelor's thesis was to convert Volvo 740 road car engine type B23 to a powerful turbocharged race car's engine.

The study was divided in two stages: first designing and building the engine, then adjusting and testing of the engine control system. In every step in this building process the national AKK-Motorsport's technical regulations for Special Saloon race car engine were followed.

The object was to increase the engine's power and to find out if it's possible to build this type of race car engine. The finished engine needs to be able to be used in rally sprint and ice driving competitions following the Special Saloon regulations.

The engine control unit used in the study was MegaSquirt. It is computer programmable engine controller widely used by car enthusiasts.

The finished engine's measured power output was 536 hp and torque output 760 Nm.

KEYWORDS:

Engine, racing cars, design, construction, testing

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 SPECIAL SALOON -MOOTTORILLE ASETETUISTA TEKNISISTÄ MÄÄRÄYKSISTÄ</b>	<b>8</b>
2.1 Organisaatiot	8
2.2 Special Saloon -ryhmän määräyksistä	8
<b>3 MOOTTORI</b>	<b>10</b>
3.1 Yleistä moottorista	10
3.2 Tavoitteiden asettelu	10
3.3 Sylinteriryhmä	12
3.4 Kampiakseli	15
3.5 Kiertokanget	16
3.6 Männät	17
3.7 Sylinterikansi	17
3.8 Nokka-akseli	20
3.9 Imusarja	22
3.10 Pakosarja	23
3.11 Turboahdin	24
3.12 Välijäähdytin	26
<b>4 MOOTTORINOHJAUSJÄRJESTELMÄ</b>	<b>28</b>
4.1 Moottorinohjausjärjestelmän valinta	28
4.2 Perusasetukset	28
4.3 Seoksen säätö	29
4.4 Sytytysennakon säätö	30
<b>5 LOPUKSI</b>	<b>34</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>35</b>
 <b>KAAVAT</b>	
 Kaava 1. Tehon laskukaava.	 11

Kaava 2. Tehollinen keskipaine Volvo B23.	12
Kaava 3. Tehollinen keskipaine Toyota 2JZ -moottorissa.	12

## KUVAT

Kuva 1. Valmis turbomoottori.	6
Kuva 2. Öljyruisku.	13
Kuva 3. Sylinterilohko.	14
Kuva 4. Lämmönvaihdin (KG Trimning 2021).	14
Kuva 5. Sylinteriryhmä ja kampiakseli koneistettuna.	15
Kuva 6. Kiertokanget.	16
Kuva 7. Männät.	17
Kuva 8. Palotilojen mittaus.	19
Kuva 9. Sylinterikansi.	20
Kuva 10. Nokka-akseli.	21
Kuva 11. Säädetty nokkapyörä.	21
Kuva 12. Omavalmisteinen plenum-imusarja.	22
Kuva 13. Omavalmisteinen pakosarja.	23
Kuva 14. Turboahdin.	25
Kuva 15. Omavalmisteinen välijäähdytin.	26
Kuva 16. Perusasetukset.	29
Kuva 17. Sytytyskartta.	32

## KUVIOT

Kuvio 1. Mitattu teho- ja vääntömomenttikäyrä valmistetusta moottorista.	32
--	----

## TAULUKOT

Taulukko 1. Iskusuhde.	16
Taulukko 2. Nokka-akselin arvot.	20

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kuvata tieliikennekäyttöön tarkoitettun henkilöauton moottorin rakentamista Special Saloon -ryhmään soveltuvaksi kilpa-auton moottoriksi. Tavoitteena on suunnitella ja rakentaa moottori, joka soveltuu käytettäväksi Special Saloon -säätöjen mukaisesti rallisprintissä ja jääradalla. Työhön sisältyy moottorin rakentamisen lisäksi myös sen toimintakuntoon saattamiseen vaadittavat moottorinohjaimen kohdistuvat muutokset säätämisineen.

Moottoriksi valittiin Volvon B23 sen kestävyiden ja osien saatavuuden takia. Tämä moottorimalli on laajalti käytössä eri luokkien kilpa-autoissa, joten erilaisia viritysosia on helpposti saatavilla. Moottori on myös erittäin kestävä rakenteeltaan, joten se soveltuu hyvin projektin aihiksi. Kun moottorin viritysastetta nostetaan, tämä moottorimalli on hyvä aihio erinomaisen teho- ja painosuhteensa ansiosta. Kuvassa 1 on valmis moottori.



Kuva 1. Valmis turbomoottori.

Moottorinohjaukseksi valittiin MegaSquirt-moottorinohjausjärjestelmä. Se on avoimeen lähdekoodiin perustuva harrastajien yhteistyössä kehittämä moottorinohjausjärjestelmä. Valintaan vaikuttivat ratkaisevasti kyseisen järjestelmän yleinen saatavuus ja sen modulaarisuus.

Projektin laajuuden takia tässä opinnäytetyössä käsitellään moottorin suunnittelua ja rakentamista vain pääpiirteittäin. Tavoitteena on mahdollisuuksien rajoissa suorittaa suurin osa eri työvaiheista mahdollisimman itsenäisesti. Kilpa-auton moottorin rakentaminen on

kaiken kaikkiaan mielenkiintoinen tehtävä, jossa moottoritekniikan perimmäisiä kysymyksiä on pohdittava tavoitteeksi asetetun suorituskyvyn ja kestävyuden saavuttamiseksi.

## 2 SPECIAL SALOON -MOOTTORILLE ASETETUISTA TEKNISISTÄ MÄÄRÄYKSISTÄ

### 2.1 Organisaatiot

Moottoriurheilu on hyvin järjestäytyntä toimintaa sekä kansainvälisesti että kansallisella tasolla. Fédération Internationale de l'Automobile eli FIA on kansainvälinen autourheilun kattojärjestö, jonka valvonnassa kansalliset jäsenjärjestöt toimivat.

AKK-Motorsport ry (aiemmin Autourheilun Kansallinen Keskusliitto ry) toimii maassamme kansallisena autourheilun kattojärjestönä. Se mahdollistaa autourheilun harrastamisen maassamme ja toimii lajiliittona suomalaisen autourheilun johtavana tukijana. AKK-Motorsport ry (AKK) järjestää jäsenseurojensa kanssa kansallisia ja kansainvälisiä tapahtumia. (AKK 2021.) AKK valmistelee lukuisten kilpalajien sääntöasioita. Tässä työssä nojaututaan AKK:n sääntöihin vuodelta 2019.

### 2.2 Special Saloon -ryhmän määräyksistä

AKK on laatinut autojen tekniset määräykset, jotka jakautuvat yleisiin määräyksiin ja ryhmäkohtaisiin määräyksiin. Tässä projektissa huomioitavana olivat vain moottoriosiota koskevien Special Saloon -ryhmän määräysten noudattaminen.

Special Saloon -säännöt sallivat käyttää tähän ryhmään kuuluvassa kilpa-autossa käytännössä mitä tahansa moottoria. Moottori saa olla peräisin minkä tahansa merkkisestä autosta tai moottoripyörästä. Tässä projektissa valmistettu moottori on siis mahdollista asentaa minkä tahansa merkkiseen ja malliseen Special Saloon -ryhmän autoon.

Määräyksissä todetaan, että moottorin pitää olla sellainen, jossa polttoaine tulee ruiskuttaa ja polttaa ennen pakokanavaa. Moottorin nimellinen sylinteritilavuus määritetään bensiinikäyttöisen turbomoottorin osalta kertomalla sylinteritilavuus turbokertoimella 1,7. Nimellinen sylinteritilavuus siis tässä tapauksessa tulee olemaan  $1,7 \times 2480 \text{ cm}^3$  eli nimelliseksi sylinteritilavuudeksi tulee  $4216 \text{ cm}^3$ . Special Saloon -ryhmässä moottori on muutoin vapaa, mutta moottorilohkon on oltava sarjavalmisteisesta henkilöautosta tai moottoripyörästä, joita on valmistettu vähintään 200 kappaletta 12 kuukauden aikana. Sylinteritilavuutta saadaan kuitenkin vapaasti muuttaa. (AKK 2020, 280, 388–390.)

Tässä projektissa sylinteritilavuutta on kasvatettu alkuperäisestä muuttamalla iskunpituutta ja sylinterihalkaisijaa. Tämän nimellisen sylinteritilavuuden mukaan määräytyy mm. tilavuusluokka ja auton minimipaino. Tämän projektin osalta, koska kyseessä on 8-venttiilinen moottori, tulisi kohdeauton minimipainon olla 1286 kg rallisprint- ja jääratakilpailussa. Ratakilpailussa minimipainon taas tulisi olla 1089 kg. Nelivetoisessa ahdetussa autossa minimipaino on kuitenkin aina yli 1270 kg, mutta moottorin laskennallisen tilavuuden ollessa 4216 cm<sup>3</sup> noudatetaan minimipainoa 1286 kg.

Vain polttomoottorit ovat sallittuja ja niitä tulee olla yksi kappale, useamman lohkon käyttäminen on siis kielletty. Muilta osin moottori on vapaa. Moottorin asennussuunta ja sijainti on vapaa, mutta sen tulee olla valmistajan määrittämässä alkuperäisessä paikassa. Koska polttoaine on poltettava sylinteritilassa, ei aiemmin sallitut Antilag-järjestelmät ole sallittuja. Mikäli käytetään avointa huohotusjärjestelmää, tulee tämän olla yhdistetty öljynkeruusäiliöön, jonka minimitilavuus on kaksi litraa. (AKK 2020, 424.)

## 3 MOOTTORI

### 3.1 Yleistä moottorista

Tämän projektin kohde oli ruotsalaisen AB Volvo:n valmistamaa B23-moottori. Se on henkilöautoon suunniteltu ja valmistettu moottori, joka on ensimmäisen kerran tullut markkinoille jo vuonna 1979. Moottori on bensiinikäyttöinen nelisynterinen henkilöauton moottori, joka on varustettu yhdellä kannen yläpuolisella nokka-akselilla ja kahdella venttiilillä sylinteriä kohden. Sylinteriryhmä on valmistettu valuteräksestä, jossa kampiakseli on tuettu viidellä runkolaakerilla. Sylinterikansi on valmistettu alumiinista.

Volvo B23 -moottori on alun perin tilavuudeltaan 2316 cm<sup>3</sup>, iskupituudeltaan 80 mm ja sylinterihalkaisijaltaan 96 mm männällä varustettu henkilöauton moottori. Moottori tuottaa vakiona vapaasti hengittävänä variaatiosta riippuen noin 100-150 hv ja 160 Nm.

Tällaista moottoria käytettiin vuosien 1979 ja 1998 välisenä aikana mm. seuraavissa henkilöautoissa: Volvo 240, Volvo 740, Volvo 760, Volvo 780, Volvo 940 ja Volvo 960.

### 3.2 Tavoitteiden asettelu

Tavoitteena tässä työssä on nostaa moottorin tuottamaa tehoa noin 450 hv:an. Tarkkaa tehotavoitetta kuitenkin on hyvin vaikea työn alkuvaiheilla sanoa, mutta osien kestävyys joka tapauksessa tulisi harkita tehotavoitteen mukaan. Varsinaista tuotettavaa tehomäärää tärkeämpi asia ajettavuuden kannalta on käyttötarkoitukseen nähden riittävän laaja tehoalue.

Tehotavoitteen saavuttamiseksi tulee moottorin mekaaniseen kestävyys kiinnittää erityistä huomiota. Tästä syystä moottorissa tulee käyttää alkuperäistä laadukkaampia materiaaleja. Materiaalivalintoihin tulee kiinnittää erityistä huomiota, kun moottorin tehoa kasvatetaan, koska silloin myös mekaaniset rasitukset kasvavat samassa suhteessa tehon kanssa. Myös moottorin liikkuvien osien tasapainotus ja koneistustarkkuuksia tulaa parantamaan.

Moottorin suunnittelussa keskeistä on myös keskittyä parantamaan sylinterien täytösastetta. Mitä suurempi täytösaste sylinteriin saavutetaan, sitä enemmän moottorista

saadaan tehoa. Täytösasteen lisäys toteutetaan parantamalla kanavien muotoilua ja ko-  
koa, jolloin moottorin läpi virtaava ilmanmassa saadaan suuremmaksi. Tällöin moottoriin  
voidaan syöttää enemmän polttoainetta, jolloin moottorin tuottama teho kasvaa.

Jos vääntömomentti vaikuttaa tietyn aikayksikön ajan, voidaan tämä ilmaista tehona.  
Kun vääntömomentti vaikuttaa pyörivään akseliin, se tekee työtä. Teho on työ jaettuna  
ajalla. Tehodynamometri mittaa juuri pyörimisnopeuden muutosta inertiaa vasten. Toisin  
sanoen vääntömomentti, joka aiheuttaa kulmanopeuden kasvamisen, tekee työtä ja  
saatu teho voidaan laskea kaavassa 1 esitetyllä tavalla.

$$P = M * \omega = M * 2\pi f = M * 2\pi * \frac{n}{60} = 630 \text{ Nm} * 2\pi * \frac{5970 \text{ kierr./min}}{60} = 393861 \text{ W}$$

, jossa

- P = teho [W]
- M = vääntömomentti [Nm]
- $\omega$  = kulmanopeus [rad/s]
- f = pyörimistaajuus [Hz = 1/s]
- n = kierrosnopeus [rpm]

Kaava 1. Tehon laskukaava.

Tehollinen keskipaine tarkoittaa moottorin tekemää työtä kierrosta kohden jaettuna syl-  
interin tilavuudella. Sylinterin tehollisen keskipaineen laskemisella voidaankin arvioida  
moottorin kestävyyttä. Huomionarvoista on, että koska kyseessä on pienitilavuuksinen  
moottori, on sylinterin tehollinen keskipaine mitatulla moottoriteholla varsin suuri. Nyky-  
aikaisilla polttoaineilla ja moottorin rakennusmateriaaleilla voidaan luotettavasti kuitenkin  
käyttää suhteellisen korkeaa keskipainetta. Eri lähteet antavatkin viitearvoja hyvin laa-  
jalla hajonnalla. Sopivaa raja-arvoa tuleekin pohtia tarkoin suhteuttaen se käytettävän  
moottorin rakennusmateriaaleihin, tukirakenteisiin ja käyttötarkoitukseen. Tämän moot-  
torin olleessa kyseessä on tehollinen keskipaine noin 32 bar, kuten voimme oheisesta  
kaavasta todeta (Kaava 2).

$$p_e = \frac{P_e * j}{V_i * n} = \frac{393861 \text{ W} * 2}{0,002480 \text{ cm}^3 * \frac{5970}{60} \text{ 1/s}} = 3192259,7 \text{ Pa} \approx 32 \text{ bar}$$

, jossa

- $p_e$  = sylinterin tehollinen keskipaine [Pa]
- $P_e$  = kampiakselilta saatava teho [W]

$j$  = toimintatapakerroin  
 $V_i$  = iskutilavuus [ $\text{cm}^3$ ]  
 $n$  = moottorin pyörintänopeus [rpm]

Kaava 2. Tehollinen keskipaine Volvo B23.

Mutta kuten todettu, voi sylinterin tehollinen keskipaine olla luotettavasti yli 50 bar luke-  
missakin, varsinkin kun polttoaineena käytetään etanolia. Vertailun vuoksi on tässä  
otettu Toyota Aristosta peräisin oleva viritetty 2JZ-moottori, josta on mitattu kampiakse-  
litehoa 1388 hv (Kaava 3). Kyseisestä kokoonpanosta on laskettu sylinterin teholliseksi  
keskipaineeksi noin 51 bar. Tämän suuruinen keskipaine on kuitenkin poikkeuksellisen  
suuri johtuen moottorin erittäin korkeasta viritysasteesta.

$$p_e = \frac{P_e * j}{V_i * n} = \frac{1020590 \text{ W} * 2}{0,003070 \text{ cm}^3 * \frac{7900}{60} \text{ 1/s}} = 5049717,6 \text{ Pa} \approx 50.5 \text{ bar}$$

, jossa

- $p_e$  = sylinterin tehollinen keskipaine [Pa]
- $P_e$  = kampiakselilta saatava teho [w]
- $j$  = toimintatapakerroin
- $V_i$  = iskutilavuus [ $\text{cm}^3$ ]
- $n$  = moottorin pyörintänopeus [rpm]

Kaava 3. Tehollinen keskipaine Toyota 2JZ -moottorissa.

Kuten edellä mainituista laskuista nähdään, voivat raja-arvot olla hyvin poikkeavia riip-  
puen käyttötarkoituksesta ja moottorien rakenteista. Raja-arvoja tulisikin miettiä vaik-  
kapa toisesta samanlaisesta moottorirakenteesta vertaamalla tai suhteuttamalla sitä va-  
kioarvoihin. Vakioarvot eivät kuitenkaan ole merkitseviä, mikäli moottorin rakennetta on  
muutettu.

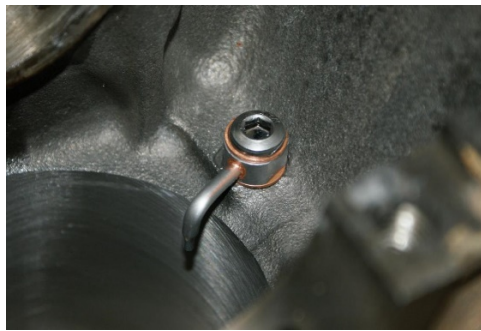
### 3.3 Sylinteriryhmä

Lohkon valintaan vaikuttavia tekijöitä oli lohkon hyvä kestävyys. Toinen tärkeä valinta-  
peruste oli lohkon suuri suosio kilpa-auton moottorina harrastajien keskuudessa, mikä  
takaa hyvän moottorin osien saatavuuden. Samasta syystä myös tietoa erilaisista moot-  
torikokoonpanoista on saatavilla hyvin. Vaikka lohko tullaan myöhemmässä vaiheessa

poraamaan, oli tärkeää, ettei se olisi liian kulunut, koska tästä seuraisi mäntiä valittaessa liian iso sylinterin halkaisija. Tästä syystä lohkoksi tuli etsiä mahdollisimman vähän kulunut yksilö. Kyseisissä moottoreissa yleisin moottoririkon aiheuttava vika on sylinteriputken repeäminen. Tästä syystä pyrittiin sylinteriseinämistä poistamaan materiaalia mahdollisimman vähän.

Porausvälykseksi suunniteltiin alkuperäiseen nähden paljon suurempi välys, koska männien materiaaliksi valittiin taottu alumiini eli ns. takomäntä. Takomalla valmistetun männän lämpölaajeneminen on moninkertaista valamalla tuotettuun mäntään nähden, jolloin välyksen tulee olla suurempi, jottei kiinnileikkautumista tapahdu.

Lohkoon haluttiin myös tehon kasvun aiheuttamien lisääntyneiden lämpökuormien takia asentaa öljyruiskut, jotka on suunnattu ruiskuttamaan öljyä männän helman alapuolelle, toisin sanoen männäntapille (Kuva 2).



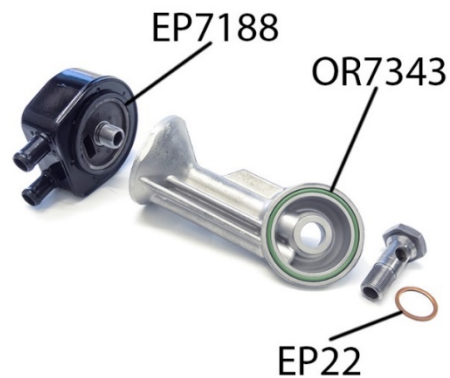
Kuva 2. Öljyruisku.

Öljyruiskulla saavutetaan lämmönsiirron lisäksi myös huomattavasti parempi voitelu männän ja sylinteriputken välille. Työ toteutettiin jyrsimällä lohkon sisäpuolelle pääöljykanavaan tasaiset alueet, joiden keskelle porattiin reikä. Lopuksi reiät kierteistettiin ja niihin liitettiin öljyruiskujen mukana tulleet banjopultit. Koska öljyruiskujen ei ole kovinkaan tarpeellista olla auki joutokäynnillä tai muutoin matalilla kierroksilla, eikä öljynkierroksen tuoton riittävyttä haluttu riskeerata, asennettiin jokaiseen öljyruiskuun oma rajapaineventtiili. Rajapaineventtiilit avautuvat vasta saavutettuaan 1,5 bar paineen. Tällä varmistuttaisiin siitä, ettei öljynpaine pääse laskemaan joutokäynnillä, jolloin öljypumpun tuotto on alhaisempi. Valmis sylinteriryhmä on kuvassa 3.



Kuva 3. Sylinterilohko.

Öljyruiskujen lisääminen lisää öljyn lämpiämistä. Tämä on hyvä ottaa huomioon moottoria rakentaessa, koska liian kuumana öljyn voiteluominaisuudet laskevat merkittävästi. Tässä projektissa ongelma ratkaistiin asentamalla moottoriin lämmönvaihdin (Kuva 4).



Kuva 4. Lämmönvaihdin (KG Trimning 2021).

Lämmönvaihdin (EP7188) siirtää kuumasta moottoriöljystä lämpöä viileämpään jäähdytysnesteeseen. Se myös auttaa kylmää öljyä lämpenemään nopeammin haluttuun lämpötilaan moottorin ollessa kylmä. Kylmän öljyn nopeampi lämpeneminen vähentää moottorin kulumista. Suurempi lämpökuorma jäähdytysnesteelle tulee huomioida moottorin jäähdyttimen kapasiteettia laskiessa.

### 3.4 Kampiakseli

Kampiakselina käytettiin alkuperäistä B23-moottorin kampiakselia. Osittain sen kestävyysden takia ja jo olemassa olevien pienemmällä laakerikauloilla olevien H-profiilisten kiertokankien takia päädyttiin käyttämään alkuperäistä kampiakselia, joka on hiottu epäkeskeisellä työstämismenetelmällä sopimaan pienemmille laakerikauloille. Tällä menetelmällä saatiin uudemman B230-moottorin kiertokanget sopimaan vanhemman B23-moottorin kampiakselin kanssa. Suurena etuna saavutettiin iskunpituuden kasvaminen 85 mm:iin, jolloin iskutilavuus saatiin lähelle 2500 m<sup>3</sup> yhdessä hieman suuremman porauksen kanssa. Iskunpituuden kasvu tällä menetelmällä on riippuvainen siitä, kuinka hyvin kampiakseli saadaan hiottua, ja kuinka kulunut se ennestään on. Maksimaalinen iskunpituuden kasvu kuitenkin on 5 mm, joka tässä tapauksessa saavutettiin.

Lopuksi kampiakselin laakerikaulat vielä kiilloitettiin ja niiden pyöreys tarkistettiin. Koska kampiakselia jouduttiin koneistamaan laakerikaulojen osalta, oli myös suoruus tarkistettava ja linja oikaistava tarvittaessa. Myös kampiakselin tasapainotus piti suorittaa, koska materiaalia oli poistettu laakerikauloilta, jotta moottorin liikkuvat osat pysyivät tasapainossa. Koneistettu sylinteriryhmä ja kampiakseli näkyvät kuvassa 5.



Kuva 5. Sylinteriryhmä ja kampiakseli koneistettuna.

Iskunpituuden kasvattaminen on jokseenkin työläs toimenpide, mutta kasvanut iskutilavuus on lähes suoraan verrannollinen sylinterin täytösasteen kasvuun. Tämä nostaa

suorassa suhteessa moottorin tuottamaa tehoa. Menetelmä voidaan suorittaa asiantuntevassa moottorikoneistamossa, mutta koska työ on jokseenkin harvinainen, ei siihen monikaan yritys välttämättä kykene puuttuvien koneistuslaitteiden takia. Myös koneistustunteja kuluu tässä menetelmässä paljon.

### 3.5 Kiertokanget

Kiertokanget vaihdettiin teräksisiin H-profiilisiin kiertokankiin, jotka ovat alkuperäisiä valettuja kiertokankia paljon kestävämmät. Koska moottorista lähdettiin lähtökohtaisesti hakemaan moninkertaista tehon tuottoa alkuperäiseen nähden, oli tämä kiertokankien vaihtaminen kestävämpiin pakollinen hankinta. Tosin hankitut kiertokanget oli suunniteltu pienemmillä laakerikauloilla olevaan B230-sylinterilohkoon, mutta tämä ongelma ratkaistiinkin jo kampiakselin kanssa koneistamalla materiaalia kampiakselin kauloista. Alla olevassa kuvassa 6 kiertokanget, joille kampiakseli koneistettiin.



Kuva 6. Kiertokanget.

Kasvanut iskunpituus vaikuttaa kiertokankiin kohdistuviin voimiin, koska iskusuhte hie-man muuttuu kasvaneen iskunpituuden johdosta. Tämä ei kuitenkaan vielä muuta iskusuhdetta merkittävästi huonompaan suuntaan, kuten voimme huomata seuraavasta laskukaavasta: iskusuhte ("kankisuhte") = männän halkaisija / iskunpituus

Taulukko 1. Iskusuhte.

alkuperäisellä kokoonpanolla	$96 \text{ mm} / 80 \text{ mm} = 1,2$
toteutuvalla kokoonpanolla	$96,5 \text{ mm} / 85 \text{ mm} = 1,135$

### 3.6 Männät

Mäntinä käytettiin mittatilauksena teetettyjä amerikkalaisen Wiseco Pistons Ltd:n takomalla valmistettuja mäntiä. Takomäntä on valmistettu takomalla, joten se on rakenteeltaan ja kestävyydeltään eri luokkaa alkuperäisiin valettuihin mäntiin verrattuna. Wiseco Pistons Ltd:n valmistamat takomännät ovat suosittuja kilpamoottorien virityksessä. Alla olevassa kuvassa 7 näkyvät männät, joista keskimmäinen mäntä on valmistettu valamalla, reunimmaiseta takomalla.



Kuva 7. Männät.

Vaihtoehtona olisi ollut valita normaalin mäntävalikoiman mukaan sopivat männät ja tämä lieneekin yleisempi keino. Tässä työssä kuitenkin päädyttiin hieman poikkeavan kokoonpanon takia teettämään männät omien piirustusten mukaan, jotta puristussuhde saataisiin optimaaliseksi. Toinen peruste teettämiseksi oli, että mäntä saadaan tulemaan haluttuun korkeuteen lohkon yläpinnan tasoon nähden. Hintakaan ei omien piirustuksien mukaan tehtynä ollut merkittävästi kalliimpi.

Mäntien halkaisijaksi valittiin 96,5 mm, jotta poraus ei kasvaisi liian suureksi. Tällöin vaarana olisi ollut sylinteriseinämien heikentyminen. Porausvälykseksi männille tuli noin 0,12 mm, jotta suuren tehon tuottamalta lämpökuorman aiheuttamalta lämpöleikkaantumiselta vältyttäisiin.

### 3.7 Sylinterikansi

Sylinterikannen virtauksiin pitää kiinnittää erityistä huomiota, jotta moottorista saavutettaisiin mahdollisimman paljon tehoa. Mitä suurempi on imukanavien dynaaminen virtaus,

sitä suurempi täytösaste saavutetaan samalla ahtopaineella. Suurempi sylinterin täytösaste taas tarkoittaa enemmän tehoa. Sama pätee myös vapaasti hengittäviin moottoreihin. Kanavien virtausta voi parantaa kanavien muotoilemisella, kanavien seinämien karheusastetta muuttamalla ja venttiililautasia suurentamalla. Muitakin tapoja vaikuttaa virtaukseen on, mutta niiden merkitys ei ole läheskään näin suuri. Myös pakopuolen hyvä virtaaminen on tärkeää, jotta palanut polttoaineseos saadaan mahdollisimman hyvin pois sylinteristä pakotahdin aikana. Huono pakopuolen virtaus myös nostaa moottoriin kohdistuvia lämpökuormia, mikä voi olla kohtalokasta moottorille.

Sylinterikanteen asennettiin halkaisijalta noin 2 mm isommat imu- ja pakoventtiilit, jotta virtausta saataisiin parannettua. Kanavien muotoiluun kiinnitettiin erityistä huomiota, ja niitä työstettiin kauan haluttuun lopputulokseen pääsemiseksi. Sylinterikannen imu- ja pakokanavat koneistettiin raakamuotoon CNC-jyrsimen avulla. Valmiit kanavamallinnukset olivat olemassa virityspajalla, jossa kanavien raakatyöstö suoritettiin. Kanavat on mallinnettu ja työstetty muotoonsa vuosien kokemuksella kyseisistä sylinterikansista ja muistakin kanavatyöstöistä. Lopullinen kanavatyöstö oli kuitenkin suoritettava käsin. Työstöjen välissä kanavista tehtiin virtausmittauksia, jotta saavutettaisiin optimaalinen muoto kanaville. Kanavien muotoilu tehtiin poistamalla materiaalia kanavaseinämisestä. Kanavien täyttäminen erinäisillä menetelmillä on myös mahdollista. Tällaisia menetelmiä voivat olla esimerkiksi epoksilla täyttö ja hitsaaminen, mutta tässä tapauksessa tällaisiin toimiin ei ollut tarvetta.

Kanteen myös asennettiin kiinteät paininakupit alkuperäisten palasäädöllisten tilalle. Tähän päädyttiin, jotta mahdollisesti suuremmalla maksiminostolla olevan nokka-akselin kanssa ei tulisi ongelmia. Jos jyrkällä nousukulmalla ja korkealla maksiminostolla oleva nokka-akseli pääsee kippaamaan alkuperäisen mallisen yläpuolisen säätöpalan, voi pahimmassa tapauksessa koko moottori tuhoutua. Kippaaminen tapahtuu, mikäli nokka-akselin kärkiosa aloittaa paininakupin painamisen aivan säätöpalan reunalta. Tällöin säätöpala voi irrota sen pesästä. Korkea kierrosluku myös lisää riskiä säätöpalan irtoamisesta. Koska venttiilit vaihtuivat rosterista valmistettuihin, oli myös kanteen asennettava K-liner-merkkiset pronssiohjurit alkuperäisten valurautaisten tilalle, jottei venttiilin varsi pääsisi leikkautumaan kiinni venttiilinohuriin.

Puristussuhde ilmaisee, paljonko polttoaineen ja ilman seos puristuu ennen syttymistään. Puristussuhde ilmoitetaan muodossa 10:1. Tämä tarkoittaa, että seos puristetaan sylinterissä yhteen kymmenesosaan alkuperäisestä vapaasta tilavuudesta. Puristus-

suhde tässä moottorikokoonpanossa haluttiin asettaa 8,9:1, jotta moottori kestäisi ylipaineistamista ilman detonaatiota. Myös aiempi kokemus turbomoottorien rakentamisesta tuki tätä puristussuhteen valintaa. Puristussuhteen lopullinen kohdilleen asettaminen oli helppo tehdä kantta madaltamalla, jolloin puristussuhdetta saatiin korkeammaksi. Vastaavasti palotiloja suurentamalla puristussuhde pienenee.

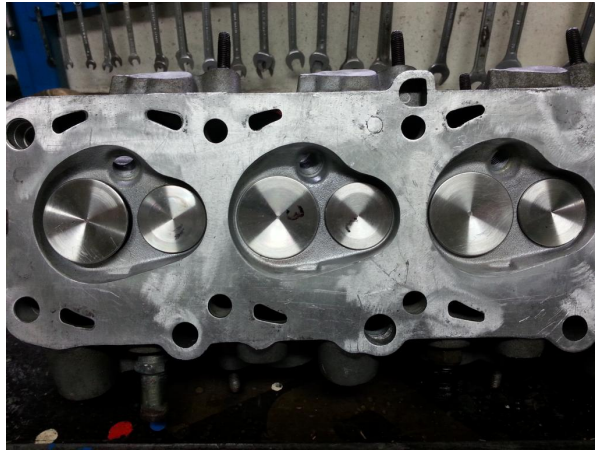
Kuvassa 8 on meneillään palotilojen tilavuuden mittaaminen. Palotilan tilavuuden mittaaminen suoritettiin ATF-öljyn avulla. Kansi asetettiin tarkasti vaakasuoraan vatupassin avulla ja kannen palotilaa alettiin täyttää öljyllä siten, että samalla koko ajan mitattiin lisättävän öljyn määrää. Kun öljy on tasan tasopinnan kanssa, katsotaan paljonko öljyä täyttämiseen on mennyt. Mitattu öljymäärä ilmaisee suoraan kannen palotilan tilavuuden.



Kuva 8. Palotilojen mittaus.

Koska kyse on ahdetusta moottorista, puristussuhde haluttiin matalammaksi kuin vastaavassa vapaasti hengittävässä moottorissa. Jos puristussuhde on liian korkea, voi seos päästä puristustahdin aikana detonoimaan liian korkeasta paineen ja lämpötilan noususta johtuen. Detonaatio tarkoittaa polttoaineseoksen palorintaman hallitsemattoman nopeaa palamista. Detonaatio on usein kohtalokasta korkeavirtteiselle moottorille. Useimmiten detonaatio tuhoaa männät tai kannentivisteet. Tätä tulisi välttää kaikin mahdollisin tavoin.

Sylinterikansi koneistettuna isommille venttiileille näkyy kuvassa 9.



Kuva 9. Sylinterikansi.

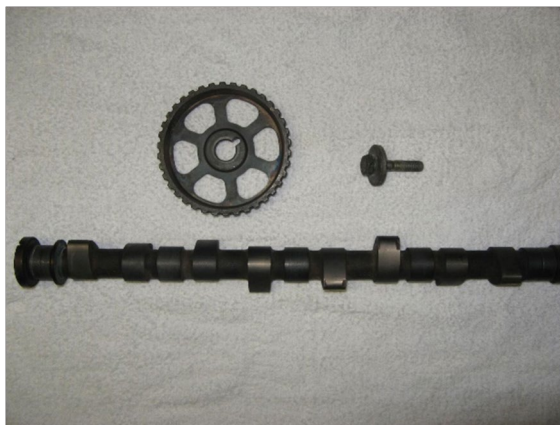
### 3.8 Nokka-akseli

Nokka-akselilla on merkittävä rooli moottorin käyttäytymisen kannalta. Sen valinta tulisi-kin suorittaa sen pohjalta, mitä moottorilta tullaan vaatimaan. Nokka-akselin valintaan vaikuttaa myös paljon moottorin muu rakenne. Projektin kohteena olevaan moottoriin va-  
littiin AB Volvo:n valmistama nokka-akseli seuraavanlaisilla arvoilla:

Taulukko 2. Nokka-akselin arvot.

maksiminosto	11,95 mm
asteet imu	270 °
asteet pako	257 °
lsa	110 °

Nokka-akselin (Kuva 10) profiililla ja maksiminostolla voidaan vaikuttaa suurimman saavutetun moottoritehon ja vääntömomentin lisäksi myös paljon moottorin tehoalueeseen. Karkeasti ajateltuna mitä enemmän nokissa on asteita, jolloin venttiili on auki, sitä enemmän tehoa saavutetaan tiettyyn rajaan asti. Tässä pitää kuitenkin huomioida, että alakierrosalue kärsii. Tämä on vain karkea yksinkertaistus, koska muu moottorin kokoonpano vaikuttaa asiaan oleellisesti.



Kuva 10. Nokka-akseli.

Nokka-akselin valintaa helpottaa, mikäli sylinterikannesta on tehty virtausmittauspöytäkirja. Kyseisen moottorin tapauksessa sellainen oli saatavilla, koska kannen kanavien virtaus mitattiin virtauspenkissä kanavatöiden ja venttiilikoneiston muuttamisen yhteydessä. Virtauspenkistä saadun raportin avulla voidaan määrittää nokka-akselin haluttu maksiminosto. Maksiminostoa ei kannata määrittää paljoa suuremmaksi kuin nosto, jossa virtaus kanavan läpi ei enää nouse. Hieman maksimivirtauksen päälle nosto voi kuitenkin mennä, jolloin saavutetaan suurempi maksimivirtauksen alueella oleva venttiilien aukiolo. Liian korkealla nostolla voi kanavan virtausnopeus romahtaa ja tällöin huipputeho alkaakin laskea. Tästä syystä maksiminosto kannattaa harkita tarkoin.

Nokka-akselin hankinnan jälkeen voidaan moottorin ominaisuuksia muuttaa vielä haluttuun suuntaan. Tämä tapahtuu nokka-akselin ajoitusta muuttamalla eli säätämällä nokka-akselin ja sen käyttöpyörän keskinäistä asemaa. Nokka-akselin asemointia suhteessa kampiakseliin muutetaan säädettävästä nokkapyörästä (Kuva 11).



Kuva 11. Säädettävä nokkapyörä.

Nokka-akselin asemoinnilla voidaan vaikuttaa myös turboahtimen ahtopaineen nousun viiveeseen. Koska jokainen moottorikokoonpano on yksilöllinen, on mahdoton antaa yleispätevää ohjetta nokka-akselin ajoituksen säätöön. Se olisikin hyvä suorittaa teho-dynamometrissä tarkkailemalla tehokäyrää.

### 3.9 Imusarja

Imusarjalla on oleellinen vaikutus saavutettavaan sylinterien täytösasteeseen ja moottorin käyttäytymiseen. Imusarjan primääriputkien pituudella voidaan vaikuttaa moottorin vääntö- sekä tehokäyrästäihin. Tämä johtuu siitä, että plenumin etäisyys imuventtiilistä muuttuu, kun primääriputkien pituutta muutetaan. Oleellista onkin plenumin etäisyys imuventtiilistä, mutta ainoa järkevä keino muuttaa tätä etäisyyttä tapahtuu primääriputkien pituutta muuttamalla. Pidemmällä ja ohuemmilla primääriputkilla saavutetaan yleensä suurempi vääntömomentti alhaisemmillä kierroksilla huipputehon laskiessa. Primääriputkien mitoittamisessa tuleekin ottaa huomioon kannen kanavien virtaus sekä se, mitä moottorin suorituskyvyltä odotetaan; korkeaa huipputehoa, vai laajaa vääntöaluetta. Primääriputkien halkaisijana käytettiin samaa halkaisijaa imukanavien kanssa.

Imusarjan plenumin mitoittamisella voidaan myöskin vaikuttaa moottorin käyttöön ja kaasun vastaavuuteen. Karkeasti voidaan ajatella, että plenumin tilavuuden tulisi olla noin 1,4-1,8 kertaa moottorin sylinteritilavuus. Eli kohdeauton osalla noin 3,5-4,5 litraa. Kuvassa 12 näkyy plenum-kotelo.



Kuva 12. Omavalmisteinen plenum-imusarja.

Kaasuläpän mitoitus on hyvä tehdä lähelle haluttua moottoritehoa, jotta kaasun vastavuus ja käytettävyys säilyisi hyvänä. Mitoitus voidaan tehdä laskemalla, mutta tässä työssä halkaisijaksi valikoitui 75 mm aiempien kokemusten perusteella.

### 3.10 Pakosarja

Ahdetun moottorin pakosarjan mitoitukseen ei yleensä suhtauduta samalla kriittisyydellä kuin vapaasti hengittävän moottorin pakosarjan mitoitukseen. Hyvää turbomoottoria rakennettaessa pakosarjakin kannattaa rakentaa niin, että jokainen primääriputki olisi saman mittainen, mahdollisimman lyhyt, mahdollisimman jouheva ja sellainen, että se mahtuisi moottoritilaan. Tällaisen toteutuksen tekeminen ei aina kuitenkaan ole tilanpuutteen takia mahdollista. Pakosarjan materiaalina on käytetty tavallisia vesijohtokäyriä halkaisijaltaan 42,4 mm ja ainevahvuudeltaan 2,6 mm niiden edullisen hinnan ja hyvän saataavuuden takia. Toki myös ominaisuuksiltaan ne soveltuivat hyvin käyttötarkoitukseen. Turboahdin on varustettu jaetulla turbiinipesällä (*Twin Scroll*), joten pakosarjan pulssien jakamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kollektorin jako suoritetaan sytytysjärjestystä hyväksi käyttäen. Esimerkkiautossa kollektorin jako menee seuraavasti: ensimmäisen ja kolmannen sylinterien pakopulssit samalle puolelle kollektoria, kun taas toinen ja neljäs menevät samaan kollektoriin, kuten kuvasta 13 voidaan havaita.



Kuva 13. Omavalmisteinen pakosarja.

Hukkaportin tehtävä on ohjata sylintereistä poistuvaa pakokaasua turbon turbiinisiiven ohi, jotta ahtopaine ei nousisi tavoitearvoa korkeammaksi. Hukkaportin tehtävä on rajata

turbon pyörimisnopeutta. Hukkaportti onkin eräänlainen ylipaineventtiili, jota ohjataan pneumaattisesti tai kuten tässä tapauksessa sähköllä.

Hukkaportille menee erilliset putket kummaltakin puolelta kollektoria, jotta pakovirtaukset eivät pääsisi sotkeutumaan kollektorin eri puolilla kammioita. Hukkaportin tulo on myös jaettu. Liitokset tehtiin TIG-hitsausmenetelmää käyttäen.

### 3.11 Turboahdin

Tässä työssä käytetään pakokaasuahdinta sen hyvän hyötysuhteen ja luotettavuuden takia. Ahtimen tarkoituksena on parantaa moottorin täytöstä ja täten on mahdollista saavuttaa samasta iskuilavuudesta samalla pyörintänopeudella suurempi teho. (Bauer ym. 2003, 480.)

Toimintaperiaatteeltaan turboahdin on keskipakopumppu, tarkemmin sanoen pakokaasukäyttöinen ilmakompressori. Se koostuu turbiini- ja kompressoripyöristä. Ne on kiinnitetty samalle akselille, mutta ne sijaitsevat akselin eri päissä turbiini- ja kompressorikoteloissa. Moottorista virtaava pakokaasu pyörittää turbiinipyörää, jolloin akselin toisessa päässä oleva kompressoripyörä pyörii samalla nopeudella ja puristaa keskipakopumpun tavoin ilmaa imusarjan kautta sylintereihin.

Suuret lämpökuormitukset ja pyörimisnopeudet tekevät turboahtimen tehtävästä haastavan. Tyypillistä turboahtimelle on lämpötilan kohoaminen jopa yli 1000°C:seen pyörimisnopeuden ollessa jopa 100000 kierrosta minuutissa. Tämä asettaa tarkat vaatimukset käytettäville materiaaleille ja koneistustarkkuuksille. Tämän lisäksi ahtimen mitoitus on tehtävä tarkoin, jotta kaasuun vastaavuus, moottoriteho ja ajettavuus saataisiin haluttunlaisiksi. (Bell 1998, 149.)

Ensimmäiseksi turboahtimeksi projektiin valittiin Garrett GT 40 -mallinen turboahdin sen kompressoripuolen oikean kokoluokan takia. Turbiinipesän poikkipinta-ala tässä ahtimessa on 10 cm<sup>2</sup>. Tämän ahtimen kanssa kuitenkin muodostui hyvin nopeasti ongelmia ahtimen ahtopaineen viiveen ja tuoton kanssa. Ahtimen turbiinipesän virtaus loppui jo alhaisilla kierrosluvuilla, mikä nosti pakopainetta rajoittaen moottorin läpi virtaavaa ilmassaa. Myös ahtopaineen viiveen kanssa oli ongelmia, toisin kuin voisi pienellä turbiinilla olevan ahtimen kanssa olettaa. Turboviive aiheutui turbiinikotelon maksimivirtauksen rajan saavuttamisesta, jolloin turbiinipuoli keräsi vain pakopainetta. Suurinta tehoa

ei tämän ahtimen kanssa moottorista mitattu, koska turbiinipesän maksimivirtaus saavutettiin ennen suurinta moottoritehoa. Voidaan kuitenkin olettaa suurimman tehon olleen noin 300 hv. Arvio perustuu seoskartan tarkisteluun ja aiempiin moottorikonstruktioihin.

Näiden edellä mainittujen syiden takia autoon vaihdettiin Holset:n valmistama turboahdin malliltaan HX40Super (Kuva 14).



Kuva 14. Turboahdin.

Tämän ahtimen turbiinipesäksi valittiin Holset:n 18 cm<sup>2</sup> turbiinipesä, joka on siis huomattavasti suurempi verrattuna aiempaan Garrett-ahtimeen. Muutoksen myötä moottorin läpivirtaava ilmamassakin saatiin selvästi suuremmaksi. Tämän turboahtimen kanssa ei pakopainetta enää ollut liikaa ja ahtopaineen viive saatiin paljon odotettua paremmaksi. Ajotilanteessa ahdin tuottaa ylipainetta lähes heti kaasua painettaessa, alustadynamometrissä hieman hitaammin johtuen pienemmästä ajovasteesta. Pakopaine tällä ahdin kokonaisuudella jääkin yli 500 hv:n lukemissakin alle 0,5 bar. Lukema on maltillinen pakopaine tällaisessa kokoonpanossa. Osittain pakopaineen pienuuteen voi tuki vaikuttaa sähköinen ahtopaineenohjaus, jolla hukkaportin avautumisen kulmikkautta on hieman lievennetty. Hukkaportin ohjaus on toteutettu sähköpneumaattisesti kalvon molemminpuoleisella ohjauksella, jolloin hukkaportin jousen tulee olla voimaltaan vain sen suurinen, että se sulkee hukkaportin ennen ylipainealuetta. Hukkaportin kiinnittäminen toteutetaan kalvon yläpuolelle johdettavalla ylipaineella ja avaaminen hukkaportin kalvon alapuoleisella ylipaineella. Hukkaportin ohjauspaine määräytyy kaasuläpän asennon ja ajotilanteen mukaisesti moottorinohjaimen ohjaamana. Moottorinohjain ohjaa monitieventtiiliä, jolla paine-ero kalvon ylä- ja alapuolella saadaan halutun suuruiseksi. Täten

hukkaporttia saadaan avattua jo alle 1 bar ylipaineella, kun tarvittaessa kuitenkin saavutetaan yli 2 bar ylipainetta. Tämä mahdollistaa lähes portaattoman ahtopaineen säätämisen. Näin moottorin ajettavuus ja hallittavuus saatiin tarkemmaksi.

### 3.12 Välijäähdytin

Välijäähdyttimen tehtävä on jäähdyttää moottoriin ahdettua imuilmaa. Imuilman lämpötila nousee merkittävästi ahtimessa johtuen paineen noususta, lämmön johtumisesta ja kitkasta. Välijäähdyttimet ovat joko vesi-ilma-jäähdytteisiä, jossa ilmaa jäähdytetään vesikierron avulla tai ilma-ilma-tyyppisiä, joissa imuilma jäähdytetään välijäähdyttimen ohi virtaavan ilmamassan avulla. Kyseisessä ajoneuvossa on ilma-ilma-tyyppinen välijäähdytin (Kuva 15).



Kuva 15. Omavalmisteinen välijäähdytin.

Ilman lämpölaajenemisesta johtuen saadaan samalla ahtopaineella moottoriin sitä vähemmän ilmaa, mitä kuumempaa sylintereihin johdettu ilma on. Moottoriin ahdetaan satoja litroja ilmaa sekunnissa. Tästä syystä välijäähdyttimen tulisikin virrata erittäin hyvin. Erittäin nopeasta virtauksesta johtuen tulisi jäähdytyspinta-alaa olla paljon. Tästä syystä välijäähdyttimen tehtävä on tärkeä sekä moottorin toiminnan, että myös sen tehon tuoton kannalta. Korkeavirteisessä ahdetussa moottorissa välijäähdytin onkin tästä syystä lähes välttämätön.

Jos ulkoilman lämpötila olisi 25°C ja ahtoilman lämpötila turboahtimen jälkeen 125 °C, on ahtimessa tapahtunut sadan asteen lämpötilan kohoaminen. Tällainen tilanne on hyvinkin tyypillinen kesällä ajettaessa. Välijäähdytin poistaa tästä lämmöstä noin 80 %, joten ilman lämpötila välijäähdyttimeltä lähdettäessä on enää 25 °C + 20 °C eli yhteensä 45 °C. Imuilman lämpötilan aleneminen kymmenellä asteella tarkoittaa likipitäen 1 % kasvua moottoritehoon, joten 80°C lämpötilan pudotus johtaisi tämän perusteella 8 %

tehon lisäykseen. Käytännössä tämänkaltaisessa moottorikokoonpanossa tämä tarkoittaisi noin 40 hv. (Storer 2004, 125.)

## 4 MOOTTORINOHJAUSJÄRJESTELMÄ

### 4.1 Moottorinohjausjärjestelmän valinta

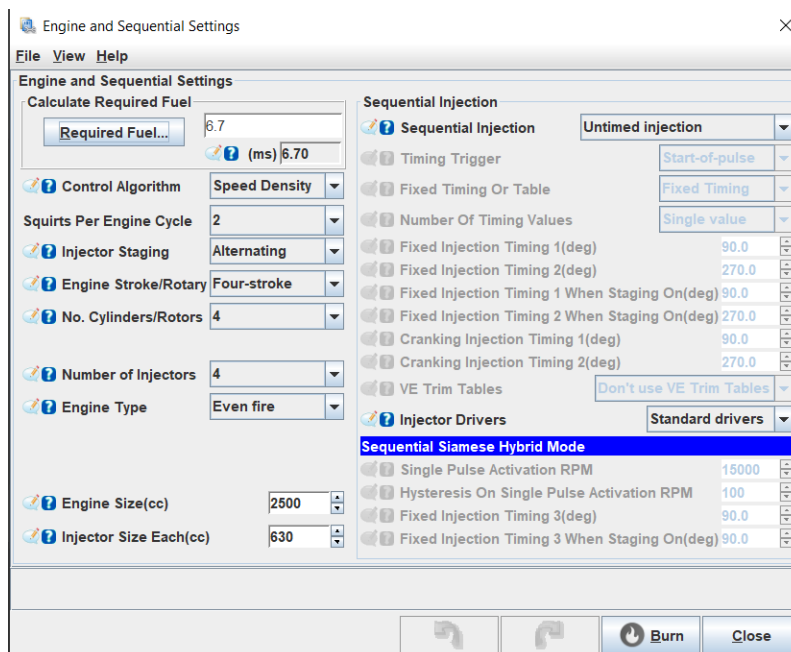
Ainutlaatuisesta moottorikokoonpanosta johtuen jouduttiin moottorinohjausjärjestelmä rakentamaan tämän konstruktion edellyttämällä tavalla. Alkuperäistä moottorinohjausjärjestelmää ei siis voinut tässä tapauksessa hyödyntää. Tällaisissa tapauksissa moottorinohjausjärjestelmä tulee aina toteuttaa yksilöllisesti moottorikohtaiset ominaisuudet huomioiden. Mikäli näin ei tehtäisi, voisi se pahimmillaan johtaa moottorin tuhoutumiseen.

Markkinoilta löytyy lukuisia eri merkkiä ohjelmoitavia moottorinohjausjärjestelmiä, jotka olisivat tähän projektiin soveltuneet ominaisuuksiensa puolesta. Projektiin valittiin MegaSquirt, koska sen kytkeminen ja säätäminen ovat useamman aiemman projektin kautta entuudestaan tuttua.

MegaSquirt on avoimeen lähdekoodiin perustuva harrastajien yhteistyössä kehittämä moottorinohjausjärjestelmä. Käytetty moottorinohjausjärjestelmä on täysin tietokoneella ohjelmoitava, jolloin se soveltuu käytettäväksi lähes kaikenlaisissa bensiinikäyttöisissä moottoreissa. Tämän kaltaisessa moottorikokoonpanossa on sytytysennakon säätäminen erittäin tärkeässä asemassa.

### 4.2 Perusasetukset

Moottorinohjaimen perusasetuksilla tarkoitetaan parametreja, jotka tulee asettaa ennen varsinaista polttoaine- ja sytytyskarttojen säätämistä (Kuva 16). Tällaisia parametreja ovat mm. moottorin sylinteriluku, moottoritilavuus ja ruiskutusten määrä kierrosta kohden.



Kuva 16. Perusasetukset.

Perusasetuksen säätämisen lisäksi on erityisen tärkeää muistaa kalibroida kyseisessä kokoonpanossa käytettävät anturit. Mikäli antureiden kalibroiminen on määritetty väärin, tekee se myöhemmässä vaiheessa säätämisestä käytännössä mahdotonta. Hetkellisesti säädöt voivat kyllä pysyä väärilläkin kalibroititiedoilla kohdallaan, mutta vallitsevien olosuhteiden muuttuessa säädöt eivät muutukaan halutulla tavalla.

#### 4.3 Seoksen säätö

Polttoaineseoksen säätöön tulee kiinnittää erityistä huomiota, koska se takaa optimaalisen palotapahtuman sylinterissä. Tässä moottorissa polttoaineseos sekoitetaan imusarjassa ja poltetaan sylinterissä. Syttymiskelpoisessa seoksessa polttoaine on kaasumaista ja polttoaineen ja ilman seoksen tulee olla optimaalisessa suhteessa keskenään. Optimaalinen polttoaineen ja ilman seos tuottaa palaessaan enemmän tehoa ja tietyissä tilanteissa myös vähentää kulutusta. Optimaalinen polttoaineseos myös vähentää moottoriin kohdistuvia lämpökuormia ja vähentää nakutuksen vaaraa. Laiha seos korkean sylinteripaineen alaisena johtaa helposti moottorin nakuttamiseen ja tätä kautta moottorin tuhoutumiseen.

Seossuhteen säätö tapahtuu laajakaistaisen lambda-anturin avulla. Lambda-anturi mittaa pakokaasujen jäännöshapen määrää. Mitä rikkaampi seos on, sitä vähemmän moottorin läpi pääsee jäännöshapetta, joten tästä voidaan laskea seossuhde. Ihanteellinen polttoaineen ja ilmamassan seossuhde eli niin sanottu stoikiometrinen seos on E98-polttoaineella 14,7:1.

Stoikiometrinen seossuhde tarkoittaa yhden polttoainekilon suhdetta 14,7 kg ilmassaa kohden. Stoikiometrinen seos ei kuitenkaan ole suurimman saavutetun moottoritehon kannalta välttämättä oikea seossuhde. Usein suurin moottoriteho saavutetaan rikkaammalla seoksella.

Polttoaineseoskarttoja säätäessä tulee huomioida myös hetkellinen sytytysennakko. Polttoaineseos syttyy ennenaikaisesti helpommin niin sanotusti laihalla seoksella. Laiha seos voi myöskin aiheuttaa moottorille liian korkeita lämpökuormia.

Varsinainen polttoainekartan säätäminen tapahtui tehodynamometrissä moottoria kuormittaen. Säätäminen on syytä suorittaa siten, että seoskartta on ensin rikkaalla, mistä sitä aletaan kohta kohdalta laskea sopivaan seokseen. Mikäli säätäminen aloitettaisiin laihalla seoksella, saattaisi se aiheuttaa moottorivaurion jo säätämisen alkuvaiheilla johtuen korkeasta lämpökuormasta ja mahdollisesti aiheutuvasta nakuttamisesta. Tässä tapauksessa muutokset tehoalueeseen ja sen suuruuteen nähdään suoraan mittaustuloksista.

Ongelmaksi moottorikokoonpanossa huomattiin liian pieniksi mitoitetut polttoainesuuttimet, tästä syystä tehomittausta ei voitu suorittaa kaasuläppä täysin auki olevana. Seurauksena tästä teho jäikin tehodynamometrimittauksessa alle 550 hv. Myöhemmin autoon asennettiin isommat suuttimet ja ahtopainetta nostettiin alkuperäisestä. Teho on tällä hetkellä luultavasti paljon alkuperäistä suurempi. Mittausta ei vielä kuitenkaan ole suoritettu.

#### 4.4 Sytytysennakon säätö

Tärkeä sytytysjärjestelmän peruseriaate ja samalla moottorin tehokkuuteen vaikuttava tekijä on saada polttoaineseos syttymään juuri oikealla hetkellä. Tämä tapahtuu sytytystulpasta hyppäävän kipinän ajoituksen säätämisen avulla. Toinen tärkeä seikka on, että kipinä on niin voimakas, että seos syttyy varmasti. Autovalmistajien omia säätöjä ei voitu tässä tapauksessa käyttää johtuen moottorin perusparametrien muuttumisesta. Tällaisia

muuttuvia tekijöitä ovat mm. puristusaine, palotilojen muoto ja seossuhde. Nämä vaikuttavat oleellisesti käytettävän sytytysennakon suuruuteen.

Polttoaineseoksen palamisnopeuteen vaikuttavat monet asiat, joista tärkeimmät ovat seossuhde, seoksen homogeenisuus sekä palotilan muoto ja koko. Palotilojen muotoilu toteutettiin tätä silmällä pitäen jo sylinterikannen rakennusvaiheessa. Tärkeitä seikkoja ovat myös sytytystulpan sijainti, moottorin puristussuhde, hengitysominaisuudet ja toimintalämpötila. Lisäksi tarvittavaan sytytysennakkoon vaikuttaa moottorin pyörimisnopeus. Sytytysennakkoon siis vaikuttavat monet eri tekijät ja niiden tiedostaminen onkin tärkeää moottorinohjauksen säätämisen kannalta. Sytytyshetken tulee olla sitä aikaisempi, mitä korkeampi on moottorin käyntinopeus. Moottorin pyörimisnopeuden kasvessa myös mäntien keskinopeus kasvaa. Koska polttoaineseoksen palamisaika ei muutu, täytyy polttoaineseos sytyttää aikaisemmin, jotta seoksen palamispaine edelleenkin saavuttaisi maksimiarvonsa heti männän yläkuolokohdan jälkeen. (Storer 2004, 65.)

Sytytysennakon säätäminen ja sen seuraaminen tapahtuvat sylinteriryhmään kiinnitetyn pietso-anturin avulla. Anturi mittaa sylinterilohkon mekaanista värähtelyä. Liian aikaisin tapahtuvan sytytyksen tapahtuessa lohkon värähtely muuttuu merkittävästi normaalia voimakkaammaksi. Se voidaan havaita pietso-anturilla. Pietso-elementissä värähtely saa aikaan sähkövarauksen, jota voidaan seurata siihen soveltuvalla laitteistolla. Jokaisen moottorin yksilöllisyyden takia tulee sytytysennakon säätö tapahtua moottorin tehoaluetta ja mahdollista detonaatiota (nakutus-ilimö) seuraamalla. Detonaatio aiheutuu joko liian korkeasta sylinteripaineesta tai lämpötilasta ennen varsinaista sytytyshetkeä. Detonaatio aiheuttaa hetkellisen sylinteripaineen nousun ja pistemäisen lämpöenergian kohdentumisen, joka jatkuessaan johtaa yleensä moottorivaurioon.

Hyötysuhteen kannalta on tärkeää saada sytytyksen jälkeinen seoksen palamisesta aiheutuva painehuippu juuri oikeaan kohtaan, joka on tavallisesti 10-15 ° jälkeen yläkuolokohdan. Kun painehuippu osuu tämän verran yläkuolokohdan jälkeen, ei paineen aiheuttamassa työnsuorituksessa tapahdu merkittävää menetystä, mutta huipun siirtyminen lyhentää aikaa, jolloin lämpötila on korkea vähentäen moottoriin kohdistuvaa lämpökuormaa. (Eerola 1976, 55-56.)

MegaSquirt-moottorinohjausjärjestelmä mahdollistaa sytytysennakon ja polttoaineen seossuhteen säädön 256 kohtaa per kartta (Kuva 17).

Ignition Table 1 (Spark Advance)

File View Help

Ignition Table 1 (Spark Advance) 3D View

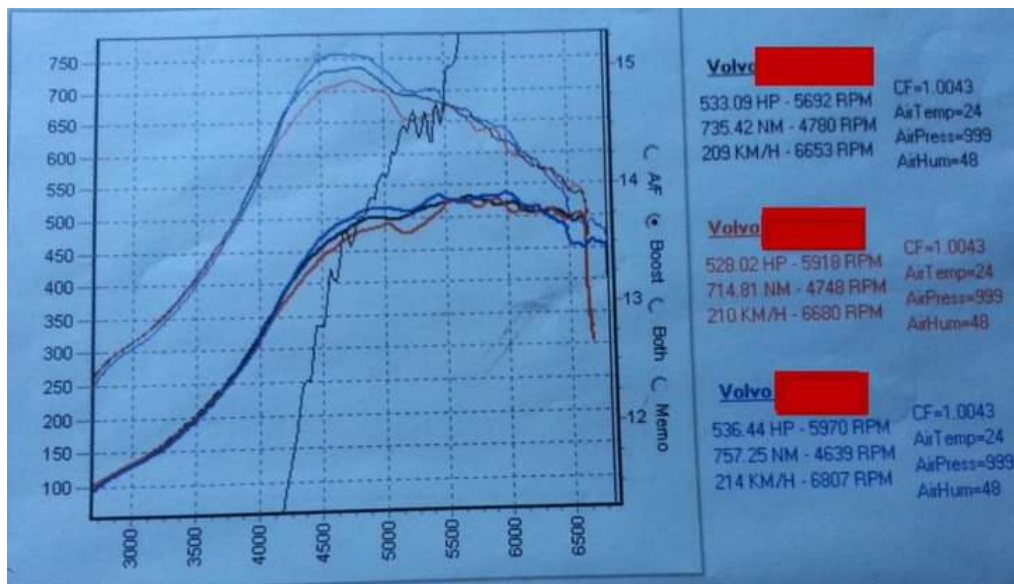
250.0	10.0	10.0	7.0	6.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
220.0	10.0	10.0	8.0	7.0	12.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
200.0	10.0	10.0	7.0	13.0	13.0	12.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
180.0	10.0	10.0	8.0	14.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
140.0	12.0	13.0	11.0	18.0	19.0	21.0	22.0	23.0	23.0	24.0	24.0	24.0
120.0	12.0	15.0	18.0	23.0	19.0	21.0	22.0	23.0	23.0	24.0	24.0	24.0
100.0	15.0	20.0	23.0	27.0	34.0	33.0	35.0	37.0	39.0	39.0	40.0	40.0
90.0	18.0	25.0	25.0	27.0	35.0	33.0	35.0	37.0	39.0	39.0	40.0	40.0
80.0	19.0	25.0	25.0	27.0	35.0	34.0	36.0	38.0	40.0	40.0	41.0	41.0
60.0	15.0	15.0	15.0	25.0	35.0	35.0	37.0	39.0	40.0	41.0	41.0	41.0
40.0	15.0	15.0	15.0	25.0	36.0	37.0	39.0	40.0	41.0	43.0	43.0	43.0
20.0	15.0	15.0	15.0	25.0	37.0	38.0	40.0	42.0	43.0	45.0	47.0	47.0
rpm	500	700	1000	2000	3000	4000	5000	6000	6300	6400	6600	7000

Burn Close

Kuva 17. Sytytyskartta.

Jotta maksimaalinen teho saavutettaisiin, on sytytysennakko säädettävä lähelle polttoaineen itsesytytyspainetta ja -lämpötilaa, mutta samalla detonaatiota välttämällä.

Kuviossa 1 näkyy mittaustulos.



Kuvio 1. Mitattu teho- ja vääntömomenttikäyrä valmistetusta moottorista.

Mittaustulos on suoritettu alustadynamometrillä takapyöriltä mittaamalla. Vaikka suunniteltu huipputeho ylittyikin, jäi saavutettu teho liian pieniksi mitoitettujen polttoainesuuttimien takia alle mahdollisen maksimitehon. Liian pienien polttoainesuuttimien takia jouduttiin tehomittauksessa huipputehoa kuristamaan ilmapvirtauksen avulla. Kuristaminen tapahtui sulkemalla kaasuläppää vääntömomentin huippuarvon 757 Nm jälkeen. Tämä myös näkyy nopeasti laskevana vääntömomenttina. Moottoria ei myöskään kierrätetty kierroslukurajoittimeen asti, jotta moottori ei vaurioituisi liian seoksen takia.

Moottorin laihalle seokselle meneminen johtui polttoainesuuttimien tuoton loppumisesta. Tehomittauksessa suuttimia jouduttiin ohjaamaan 100 %:n pulssisuhteella, mikä ei ole ideaalitalanne säätämisen kannalta. Moottorille saatiin tästä huolimatta suhteellisen laaja käyttöalue noin 3500 rpm, joka saavutettiin välillä 3500-7000 rpm. Kyseisellä käyttöalueella moottori tuottaa tehoa 200 hv:sta aina 536 hv:en asti. Mittauksen jälkeen moottoriin vaihdettiin isommat polttoainesuuttimet ja ahtopainetta lisättiin, mutta toimenpiteen jälkeen mittausta ei kuitenkaan suoritettu uudestaan. Voidaan kuitenkin olettaa tehon lisääntyneen korkeamman ahtopaineen seurauksena.

Työn aikana kehitetty moottorikokonaisuus voisi olla hyvin soveltuva kilpakäyttöön sen erinomaisen vääntöalueen takia. Laaja vääntöalue on kilpa-autoilussa monessakin eri luokassa erittäin toivottu ominaisuus. Laaja vääntöalue helpottaa moottorin hallintaa ja vähentää vaihteiden vaihdon tarvetta. Tästä syystä moottori soveltuisi hyvin myös kokemattomalle kuljettajalle. Moottorin voisikin nähdä hyvin monenlaisessa käyttötarkoituksessa.

## 5 LOPUKSI

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja rakentaa turbomoottori, joka soveltuisi käytettäväksi Special Saloon -sääntöjen mukaisesti rakennetussa kilpa-autossa. Projektin kohteeksi valikoitui Volvo B23-moottori ja sen turboahtaminen, koska se on erittäin opettavainen ja haasteellinen tehtäväalue. Lisäksi tällainen prosessi antaa hyvin valmiuksia tuleviin moottoriprojekteihin monelta eri näkökulmalta.

Tähän työhön sisältyi myös laajan kokonaisuutena moottorin ohjaukseen kohdistuneet muutokset ja säädöt. Moottorinohjaimeksi valittiin avoimeen lähdekoodiin perustuva yleisesti harrastajien käytössä oleva MegaSquirt-moottorinohjausjärjestelmä. Tämä valinta osoittautui hyväksi ratkaisuksi, koska se täytti moottorin vaatimat edellytykset.

Yllätyksenä koettiin, kuinka aikaa vievää ja vaativaa kannen kanavistojen virtausmallinnus ja niiden pohjalta kanavatyöstöt olivat. Näihin tulisikin varata paljon aikaa sekä tutkimisen että työstön osalta. Tämä työvaihe on luonteeltaan sellainen, ettei oikotietä onneen ole, ja pienikin virhe voi pilata koko kokonaisuuden.

Suurin ongelma työn toteutuksessa oli moottorin lopullinen säätäminen parhaaseen mahdolliseen suorituskykyyn. Tämä kehitystyö tulee olemaan todennäköisesti jatkuvaa. Jatkotutkimuksena voisi suurempia teholumkia tietenkin tavoitella edelleen, mutta viritysasteen nostaminen todennäköisimmin johtaa moottorin käyttöiän lyhentymiseen tai jopa nopeaan vaurioitumiseen.

Tavoite saavutettiin lopullisessa konstruktiossa jopa paremmin kuin alun perin oli suunniteltu. Kohdemoottori on palvellut käytössä niin luotettavuudeltaan kuin käytettävyydeltäänkin erittäin hyvin.

Toivottavasti tämä opinnäytetyö innostaa moottorin rakentamisesta kiinnostuneita jatkamaan harrastustaan ja antaa hyödyllistä tietoa myös jo hieman pidemmällekin edenneille alan harrastajille.

## LÄHTEET

AKK 2020. Autourheilun Kansallinen Keskusliitto ry:n kotisivut. Autojen tekniset määräykset ja kuljettajien ajovarusteet. Liite J. 2019. XIV Eryityismääräykset Special Saloon -autoille. Viitattu 9.12.2020.

AKK 2021. Autourheilun Kansallisen Keskusliitto ry:n kotisivut. Viitattu 12.3.2021.  
[www.autourheilu.fi/akk](http://www.autourheilu.fi/akk)

Bauer, H.; Haapaniemi, H. & Boström, B. 2003. Autoteknillinen taskukirja. 6. painos. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus.

Bell, A. G. 1998. Uusi moottoritekniikka. Virittäminen ja säätäminen. Helsinki: Alfamer Oy.

Eerola, O. E. 1976. Polttomoottorit. 2. painos. Jyväskylä:Gummerus Oy.

KG Trimming 2021. Lämmönvaihdin KG Trimming AB -sivustolta. Viitattu 15.3.2021.  
<https://www.kgtrimning.org>

Storer, J. & Jex, B. 2004. Tuning. Moottorin viritys. Helsinki:Alfamer Oy.