



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Matti Lamberg

# W6L32E- MOOTTORIN 2- VAIHEAHTAUS

Tekniikka ja liikenne

2011

## **ALKUSANAT**

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulussa tekniikan ja liikenteen yksikössä kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman päättötöyönä Wärtsilä Finland Oy:n R&D-osastolle. Työtä ohjasi Wärtsilässä manageri Tero Raikio ja Vaasan ammattikorkeakoulussa lehtori Juha Hantula. Haluan kiittää Tero Raikiota erittäin mielenkiintoisesta työn aiheesta, sekä työtovereitani Mranal Guptaa, Tomi Rauniota, Olli Erosta ja Kaj Lundinia opastamisesta uusien ohjelmien käyttämiseen ja ”talon tavoille”.

Vaasassa 8.9.2011

Matti Lamberg

## VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

**TIIVISTELMÄ**

Tekijä	Matti Lamberg
Opinnäytetyön nimi	W6L32E-moottorin 2-vaiheahtaus
Vuosi	2011
Kieli	Suomi
Sivumäärä	45 + 6 liitettä
Ohjaaja	Juha Hantula

---

Opinnäytetyö on yksi vaihe projektissa, jossa on tarkoitus muuttaa Wärtsilän 6L32E-testimoottori 2-vaiheahdetuksi.

Teoriaosuudessa käydään läpi turboahtamisen toimintaperiaatetta, sekä Miller-ajoituksen ja 2-vaiheahtauksen merkitystä keskinopeiden dieselmoottoreiden NOx-päästöjen alentamisessa.

Työn lopputuloksena on toimiva 3D-malli moottorin 2-vaiheahtauskomponenttien sijoittamisesta. Näiden avulla pystytään tekemään valmiit työpiirustukset, jotka voidaan lähettää alihankkijalle.

---

Asiasanat    turboahdin,    Wärtsilä,    Miller-ajoitus,    2-vaiheahtaus

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

## ABSTRACT

Author	Matti Lamberg
Title	2-stage turbocharging of 6L32E rig-engine
Year	2011
Language	finnish
Pages	45 + 6 appendices
Name of Supervisor	Juha Hantula

---

This thesis is part of a project, whose purpose is to modify the Wärtsilä 6L32E-rig engine for two-stage turbocharging.

In theory, the principal of turbocharging and consequences of Miller-cycle are presented. The influence of two-stage turbocharging in reducing NO<sub>x</sub>-emissions in medium speed diesel engines is also covered.

The aim of this thesis is to come up with a functional 3D layout for locating components which are required for two-stage turbocharging. With this model it is possible to make blue-papers which can be sent to subcontractor(s) for manufacturing.

---

Keywords turbocharger, Wärtsilä, Miller-timing, two-stage turbocharging

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Työn tavoite.....	9
1.2	Aiheen rajaus .....	9
1.3	Ahtamisen merkitys moottoritekniikassa.....	9
1.4	Työn eteneminen .....	10
2	WÄRTSILÄ .....	11
2.1	Avainluvut.....	12
2.2	Visio & Missio .....	12
3	TURBOAHTAMISEN TEORIAA.....	13
3.1	Turboahtaus.....	13
3.2	Ahtoilman jäähdytys .....	13
3.3	Päästörajoitukset ja 2-vaiheahtaus.....	14
3.3.1	NOx-päästöjen rajoitukset.....	14
3.3.2	Miller-ajoitus .....	15
3.4	2-vaiheahtaus.....	16
3.4.1	Waste-gate.....	17
3.4.2	By-pass.....	17
3.4.3	Heikkoudet .....	17
3.5	2-vaiheahdettuja moottoreita.....	18
3.5.1	MAN 18V48/60TS .....	18
3.5.2	Mercedes-Benz OM 651 .....	19
3.5.3	MTU 4000-sarja .....	20
4	TYÖN LÄHESTYMISTAPA JA TOTEUTUS .....	22
4.1	Lähtötilanne.....	22
4.1.1	W6L32E .....	22
4.1.2	Imuilman ja pakokaasujen reitti .....	22
4.2	Elias .....	22
4.3	Käytetyt ohjelmat ja mallintaminen.....	23
4.4	Karkea suunnittelu .....	23
4.5	HP-välijäähdytin.....	24
5	LAYOUTIN VALINTA .....	25

5.1	Konsepti A.....	25
5.2	Konsepti B.....	25
6	KONSEPTIN VALINTA.....	26
6.1	Jatko .....	26
6.2	Suunnittelun jatkaminen .....	27
6.3	Työtaso .....	28
6.4	LP-ahtimen turbiinin sisääntulo.....	29
6.5	CACin kääntö.....	30
6.6	Ilman sisääntulolaatikot.....	30
6.7	Kehikko .....	31
6.8	Palkeet ja laipat .....	32
7	ILMALAATIKOIDEN SUUNNITTELU .....	33
7.1	Valmistettavuus .....	33
7.1.1	Hitsauskuvat .....	33
7.1.2	Koneistuskuvat .....	33
8	YHTEENVETO JA ARVIOINTIA.....	34
8.1	Aikataulussa pysyminen .....	34
8.2	Projektin tuloksen hyödyntäminen ja arviointi .....	34
8.3	Projektin jatkuminen ja keskeiset uudet ideat .....	34
8.4	Johtopäätökset ja jatkokehitysehdotukset .....	35
8.5	Loppusanat .....	35
	LÄHDELUETTELO.....	36

**KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET**

<b>bar</b>	paineen yksikkö, $10\text{N}/\text{cm}^2$
<b>EGR</b>	Exhaust Gas Recirculation, pakokaasujen takaisinkiertäminen
<b>HP</b>	High pressure, korkeapaine
<b>HT</b>	High Temperature, korkea lämpötila
<b>IMO</b>	International Maritime Organization
<b>CAC</b>	Charge Air Cooler, ahtoilman jäähdytin
<b>kW</b>	kilowatti, tehon yksikkö
<b>LP</b>	Low pressure, matalapaine
<b>LT</b>	Low Temperature, matala lämpötila
<b>NOx</b>	Nitrogen Oxides, Typen oksidit
<b>Reduseri</b>	Komponentti jossa siirrytään suuremmasta halkaisijasta pienempään
<b>Receiver</b>	(tässä yhteydessä) sylinterilohkossa sijaitseva ilmakehä
<b>SPEX</b>	Single Pipe Exhaust System
<b>Teamcenter</b>	Wärtsilän käyttämä tuotetiedon hallintajärjestelmä
<b>VNT</b>	Variable Nozzle Turbine, turboahdin jossa on säädettävät suutinrenkaan siivet

**LIITELUETTELO****LIITE 1.** Palaveriraportti 16.5.2011**LIITE 2.** Palaveriraportti 13.6.2011**LIITE 3.** Ahtoilman jäähdyttimien vertailutaulukko**LIITE 4.** Työpiirustukset



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena oli suunnitella vähintään kaksi erilaista layout-ratkaisua 6L32E-testimoottorin muuttamiseksi 1-vaihdetusta 2-vaiheahdetuksi. Tämän jälkeen on tarkoituksena tehdä tarkempi suunnittelu valitulle layout-konseptille.

## 1.2 Aiheen rajaus ja raportti

Työn aihe rajattiin koskemaan 2-vaiheahtauksen käytettäviä komponentteja, niiden sijoittelua ja mallintamista. Työpiirustuksia kappaleista ei tarvitse tehdä. Ahtauksessa käytettävistä laitteista suunnitellaan putket joissa kulkee ilmaa tai pakokaasua, mutta ahtoilman jäähdyttimien vesiputkien suunnittelua ei tarvitse tehdä.

Työnantajan edustajien kanssa sovittiin, että internetissä julkaistavasta raportista poistetaan sisältö, jota työnantaja ei halua yleisesti saataville.

## 1.3 Ahtamisen merkitys moottoritekniikassa

Turboaus näyttelee tänä päivänä varsin merkittävää roolia polttomoottoreissa, varsinkin dieselmootoreissa. Tämä johtuu siitä, että nostamalla moottorin imuilman painetta, pystyy moottori polttamaan enemmän polttoainetta, ja koska palaminen on täydellisempää, ovat pakokaasut puhtaammat kuin vapaasti hengittävällä moottorilla. Tästä seuraa myös se, että moottorin teho/paino-suhde paranee, ja koska ahdin käyttää pakokaasun energiaa, joka muutoin menisi hukkaan, parantaa se myös osaltaan moottorin hyötysuhdetta. Ahtoilman välijäähdytyksen käyttö vakiintui keskinopeissa dieselmootoreissa 1960-luvulla ja alkoi yleistyä nopeakäyntisissä moottoreissa 1970-luvun puolivälin jälkeen.

/14/

Kasvaneet polttoainekustannukset yhdessä kiristyvien päästömääräysten kanssa ovat vaikuttaneet siihen että esim. kaikkien Suomessa myytävien uusien

dieselkuorma-autojen moottorit ovat olleet jo vuosia turboahdettuja. Samoin on dieselmootorilla varustettujen henkilö- ja pakettiautojen laita.

#### **1.4 Työn eteneminen**

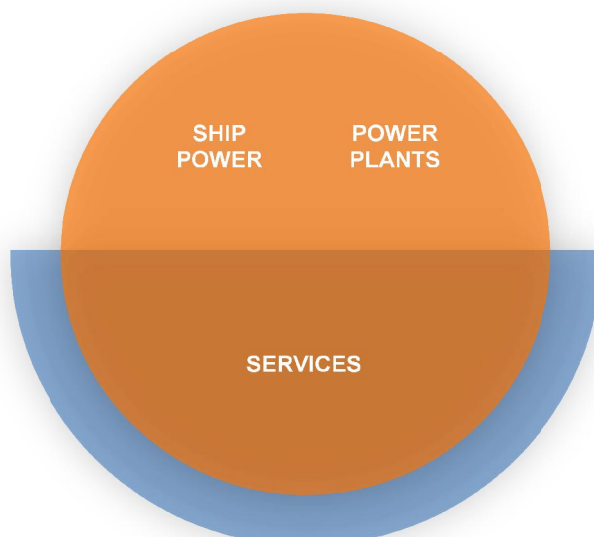
Jo ennen työn aloitusta oli tiedossa kaksi erilaista vaihtoehtoa ahdinten sijoittamiseksi, ja näitä vaihtoehtoja lähdettiin viemään eteenpäin. Myös muutamia muita ratkaisuvaihtoehtoja tuli työn aikana esille, mutta ne karsiutuivat vähitellen pois.

## 2 WÄRTSILÄ

”Wärtsilän juuret ovat Tohmajärven Wärtsilän kylään vuonna 1834 perustetussa sahalaitoksessa. Vuonna 2010 Wärtsilän liikevaihto oli 4,6 miljardia euroa ja henkilöstömäärä yli 17.500. Yrityksellä on 160 toimipistettä 70 maassa. Wärtsilän osakkeet on listattu NASDAQ OMX Helsingissä.

Wärtsilä on kansainvälisesti johtava merenkulun ja energiamarkkinoiden voimaratkaisujen toimittaja, joka tukee asiakasyrityksiä tuotteiden koko elinkaaren ajan. Wärtsilä maksimoi alusten ja voimalaitosten ympäristötehokkuuden ja taloudellisuuden keskittymällä teknologisiin innovaatioihin ja kokonaishyötysuhteeseen.”/1/

Wärtsilän liiketoiminta jakaantuu kolmeen osa-alueeseen, Ship Poweriin joka toimittaa pää- tai apumoottoreita merellä kulkeviin aluksiin, Power Plantsiin joka toimittaa moottoreita ja kokonaisia voimalaitoksia avaimet käteen- periaatteella, sekä Serviceen joka tuottaa huolto ja elinkaaripalveluita molemmille em. yksiköille (**Kuva 1.**)



**Kuva 1.** Wärtsilän yritysjaakauma.

## 2.1 Avainluvut

Wärtsilän avainluvut vuonna 2010

- Liikevaihto 4,553 milj. euroa
- Liiketulos 487 milj. euroa
- Tilauskertymä 4,005 milj. euroa
- Tilauskanta vuoden lopussa 3,795 milj. euroa
- Henkilöstö vuoden lopussa 17 528

## 2.2 Visio & Missio

Visiona on olla kaikkien asiakkaiden arvostetuin yhteistyökumppani. Missiona on tarjota ratkaisuja joilla parannetaan asiakkaan liiketoimintaa koko tuotteen elinkaaren ajan. Samalla pyritään kehittämään yhä parempia teknologioita, joista hyötyvät sekä asiakkaat että ympäristö./2/

## 3 TURBOAHTAMISEN TEORIAA

### 3.1 Turboahtaus

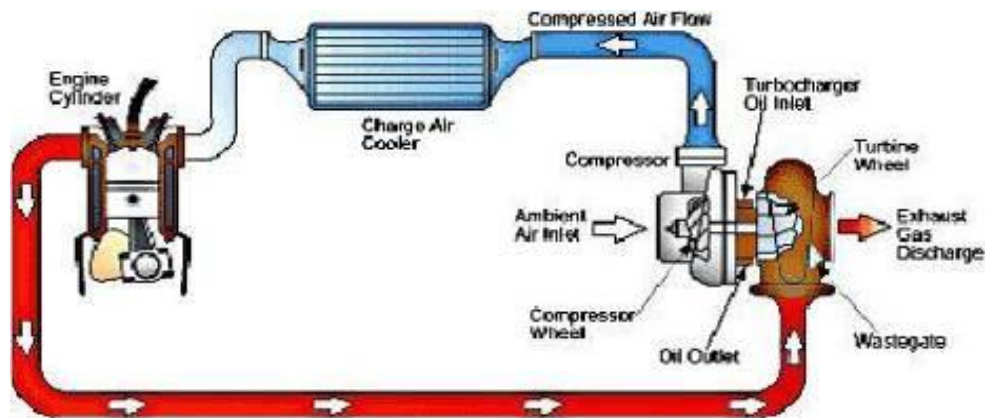
Turboahtimen patentoi sveitsiläinen Alfred Buchi vuonna 1905. Turboahtimen ideana nostaa imuilman painetta jolloin moottori pystyy polttamaan enemmän polttoainetta. Turboahtimessa imuilman paineen nostamiseen tarvittava voima kehitetään pakokaasujen pyörittämällä turbiinilla. Turbiini taas on yhdistetty akselilla kompressoriin, joka suorittaa varsinaisen ilman ahtamisen. Koska turbiiniakselin kierrosnopeus riippuu moottorin pakokaasujen virtauksesta, seuraa turboahdin automaattisesti moottorin kierrosnopeuden vaihtelua.

Käyttämällä pakokaasun energiaa ahtamiseen saadaan osa tehohäviöstä talteen ja moottorin teho/paino-suhde paranee. Mitä enemmän polttonestettä sylinterissä palaa, sitä enemmän mekaanista energiaa kehittyy. Tämä kuitenkin edellyttää imuilman tiheyden, ja sitä kautta paineen kasvattamista. /14/

### 3.2 Ahtoilman jäädytys

Koska paineen kasvaessa ilman lämpötila nousee, ilma myös laajenee. Vastaavasti lämpötilan laskiessa ilma muuttuu tiheämmäksi ja sitä voidaan syöttää enemmän moottoriin. Lämpötilaa voidaan laskea yksinkertaisella lämmönvaihtimella jota kutsutaan usein välijäädyttimeksi, koska se sijaitsee kompressorin ja moottorin välissä (**Kuva 2.**)

Toimintaperiaatteensa mukaisesti ahtoilman jäädyttimet jaetaan kahteen tyyppiin. ilmasta ilmaan- tyyppisissä jäädyttimissä ahtoilmaa jäädytetään ulkoilmasta saatavalla viileällä ilmalla. Ilmasta veteen -tyypissä taas lämpö johdetaan jäädyttimessä ahtoilmaasta veteen. Koska kaikki moottorin tarvitsema ilma virtaa välijäädyttimen lävitse, tulee jäädyttimen kennoston aiheuttama mahdollisimman vähän virtaushäviöitä, ja koska virtausnopeus on varsin suuri, tulee jäädyttävän pinta-alan olla mahdollisimman laaja. /14/

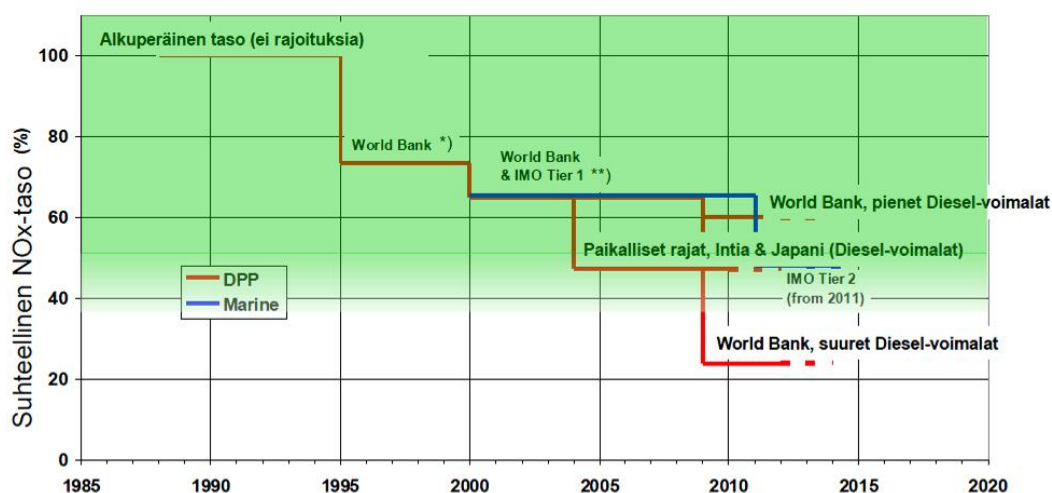


**Kuva 2.** Periaatekuva turboahtauksesta ja ahtoilman jäädytyksestä.

### 3.3 Päästörajoitukset ja 2-vaiheahtaus

#### 3.3.1 NO<sub>x</sub>-päästöjen rajoitukset

Useimmat NO<sub>x</sub>:eista ovat myrkyllisiä kasvihuonekaasuja, jotka aiheuttavat happamoitumista. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on asettanut laivanvarustajille rajat sallituista NO<sub>x</sub>-päästöistä. Seuraava taso on IMO Tier III, joka astuu voimaan vuoden 2016 alusta. Samoin Maailmanpankki on asettanut rakennettaville diesel-voimalaitoksille rajoituksia. Kuten kuvasta 3 näkee, kiristyvät rajoitukset jatkuvasti. Tämä on pakottanut moottorinvalmistajat kehittämään jatkuvasti uusia keinoja laskemaan pakokaasupäästöjä. Yksi yleisesti hyötയാjoneuvoissa käytetty keino on ruiskuttaa palotilasta poistuvan pakokaasun veden ja urean seosta, jolloin typen oksidit pelkistyvät vedeksi ja typeksi. Tästä pakokaasujen puhdistuskeinosta käytetään lyhennettä SCR (Selective Catalytic Reduction)./3//6/



**Kuva 3.** Maailmanpankin ja IMO:n NO<sub>x</sub>-päästörajoitukset.

### 3.3.2 Miller-ajoitus

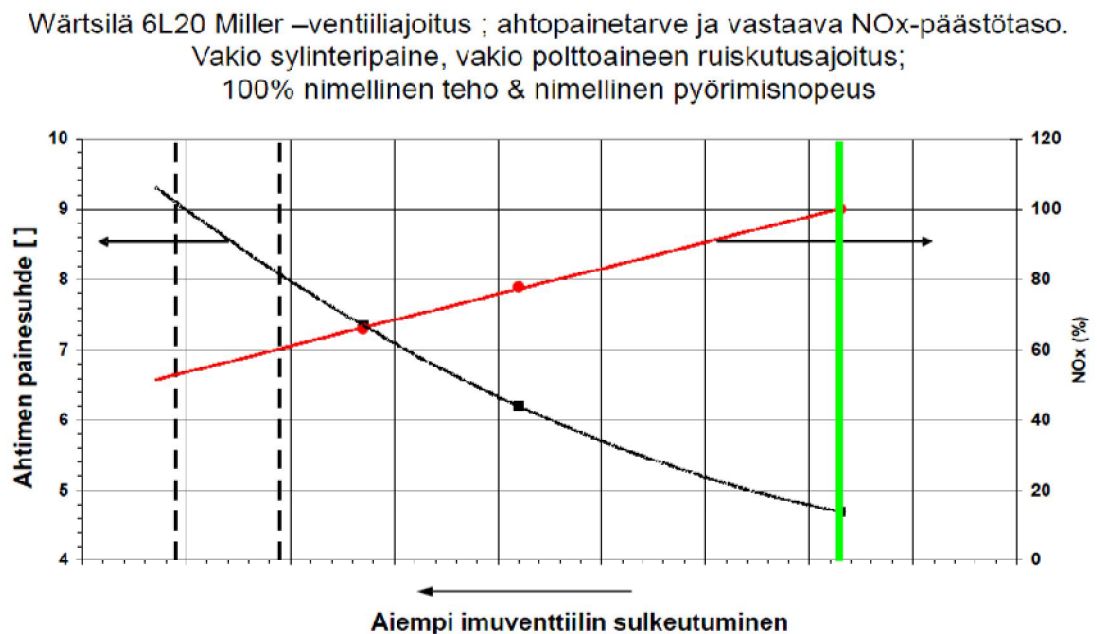
Miller-ajoituksen kehitti amerikkalainen insinööri Ralph Miller 1940-luvulla. /4/

Miller-ajoitus tarkoittaa aikaistettua imuventtiilin sulkemista imutahdin aikana, ennen kuin mäntä saapuu alakuolokohtaan. Tästä seuraa että mäntä jatkaa matkaa alaspäin, jolloin imuilma on suljetussa tilassa ja näin ollen laajenee. Vastaavasti ilman laajetessa sen lämpötila alenee. Koska NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostuminen on riippuvainen palotapahtuman lämpötilasta - mitä korkeampi lämpötila, sitä enemmän päästöjä - voidaan Miller-ajoituksella tehokkaasti laskea NO<sub>x</sub>-päästöjä.

Miller ajoituksella pystytään laskemaan yhtä aikaa sekä NO<sub>x</sub>-päästöjä sekä polttoaineenkulutusta. Tämä tekee Miller-ajoituksesta erittäin mielenkiintoisen, koska hiilidioksidipäästöt ja polttonesteenkulutus ovat suoraan verrannollisia toisiinsa, voidaan Miller-ajoituksella laskea myös hiilidioksidipäästöjä.

Jotta saataisi riittävä täytös ilma-polttoaine-seosta palotilaan, täytyy imuilman ahtopaine olla korkeampi kuin normaalilla venttiilin ajoituksella varustetussa moottorissa (**Kuva 3.**) Lisäksi on huomattu että erittäin aikaisella imuventtiilin sulkeutumisella (ns. voimakas Miller-ajoitus) painesuhdetarve kasvaa eksponentiaalisesti. /15/

Yksi Miller-ajoituksen ongelmista on pakokaasujen alhainen lämpötila, koska tällöin ei perinteinen katalysaattori pysty toimimaan. Tämä vaatii vaihtoehtoisia pakokaasujen käsittelytapoja, joista pakokaasujen takaisinkiertäminen (EGR), on yksi käyttökelpoinen vaihtoehto. Siinä syötetään osa pakokaasusta imuilman joukkoon, jolloin pakokaasut laskevat imuilman happipitoisuutta ja näin palamislämpötila alenee. /16/



**Kuva 4.** Miller-ajoituksen, ahtopaineen tarpeen ja NO<sub>x</sub>-päästöjen keskinäinen suhde.

### 3.4 2-vaihehahtaus

2-vaihehahtauksessa nostetaan moottorin imusarjaan syötettävän ilman painetta kahdella turboahtimella. Ensimmäisenä pakokaasut saapuvat HP-ahtimen turbiinipesään, josta ne siirtyvät LP-ahtimen turbiinipesän kautta pakoputkistoon. Imuilman reitti on taas päinvastainen, eli ensin ilma imetään LP-ahtimen kompressoripesään, jonka jälkeen on ensimmäinen ahtoilman jäähdytin. Jäähdytetty ahtoilma siirtyy seuraavaksi HP-ahtimelle, jonka jälkeen lopullisen



paineen saanut ilma kulkee vielä jäähdyttimen kautta, ennen kuin se päätyy imusarjaan.

### 3.4.1 Waste-gate

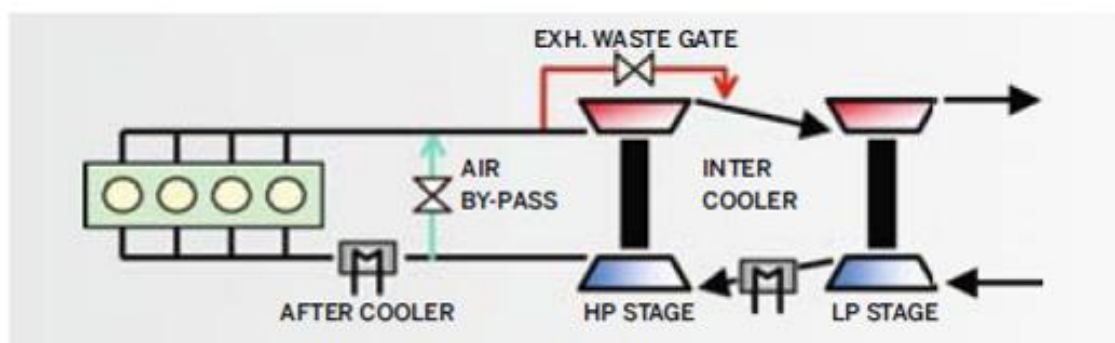
Moottoriin voidaan asentaa ohituskanava (waste-gate) jolla pakokaasut voidaan ohjata HP-ahtimen ohi. Tämä on tärkeää, koska muutoin korkeita kierroslukuja käytettäessä HP-ahtin saattaisi ylikuormittua.

### 3.4.2 By-pass

Toinen mainitsemisen arvoinen komponentti on ohitusventtiili (by-pass) jolla ohjataan käynnistystilanteessa imuilmaa HP-kompressin ulostulon jälkeen HP-turbiinin sisääntulokanavaan. Tällä saadaan nostettua moottorin kierrokset nopeammin nimellistasolla ylösajotilanteessa.

### 3.4.3 Heikkoudet

2-vaihehtauksen heikkoja puolia on se että sekä ahtimia, välijäähdyttimiä, että ilmaputkia/kanavia täytyy olla kaksinkertainen määrä normaalisti ahdettuun moottoriin nähden. Tämä taas nostaa sekä moottorin hintaa, että painoa. Polttoaineen palaminen on matalilla kierroksilla epätäydellistä ja kuormanotto, eli kyky pitää moottorin kierrokset vakiona sitä kuormitettaessa, on heikkoa. Kaksi viimeksi mainittua ominaisuutta pystytään eliminoimaan varsin tehokkaasti muuttuvalla imuventtiilin ajoituksella, mutta tämäkin lisää kustannuksia.



**Kuva 5.** Periaatekuva 2-vaihehtauksesta.

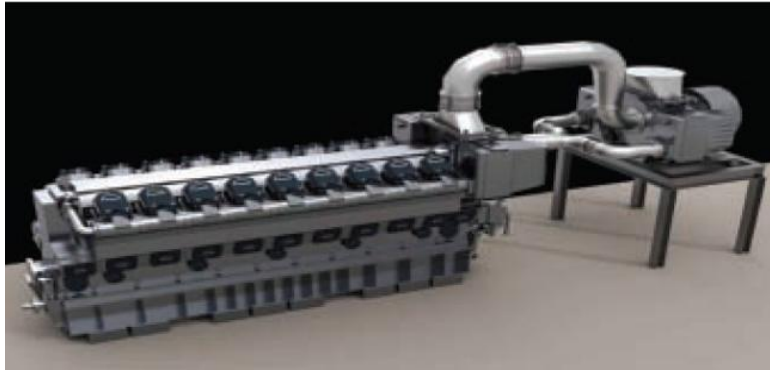
### 3.5 2-vaiheahdettuja moottoreita

2-vaiheahdettuja moottoreita on valmistettu jo vuosikymmeniä, ja aiemmin niillä haluttiin ainoastaan lisätä moottorista saatavaa tehoa, mutta tänä päivänä sitä hyödynnetään yhä enemmän yhdessä Miller-ajoituksen kanssa NO<sub>x</sub>-päästöjen alentamiseen. Seuraavassa esitellään muutamia eri kokoluokan 2-vaiheahdettuja moottoreita.

#### 3.5.1 MAN 18V48/60TS

Saksalainen moottori- ja ajoneuvovalmistaja MAN esitteli kesällä 2011 tuotantovalmiin, keskinopean dieselmoottorin jossa on käytetty voimakasta Miller-ajoitusta ja 2-vaiheahdusta. Moottori on suunniteltu voimalaitoskäyttöön, ja sen yhden sylinterin halkaisija on 480 mm ja iskunpituus 600 mm. Moottori täyttää Maailmanpankin vuonna 2008 dieselvoimalaitosmoottoreille asettamat päästörajat. Moottorin perustana on perinteisesti ahdettu 18V48/69-moottori, jonka ahtausjärjestelmän HP-puoli sijaitsee moottorin lohossa ja LP-puoli on sijoitettu erillisen kehikon päälle moottorin vapaaseen päähän (**Kuva 3.**) Valmistaja tarjoaa myös mahdollisuutta muuttaa perinteisesti ahdettu 18V48/69-moottori jälkikäteen 2-vaiheahdetuksi.

Moottori on rakenteeltaan 18-sylinterinen V-moottori ja sen yhden sylinterin tuottama teho on versiosta riippuen 1050- 1200 kW. Moottorin ominaiskulutus on 171 g/kWh ja NO<sub>x</sub>-päästöt ovat 1480 mg/Nm<sup>3</sup>, jolloin se on valmistajan mukaan omassa teholuokassaan vähäpäästöisin moottori. /14/



**Kuva 6.** MAN 18V48/60TS-moottorin esitekuva. HP-taso on jätetty ennalleen ja LP-tason komponentit ovat erillisen kehikon päällä.

### 3.5.2 Mercedes-Benz OM 651

Vuonna 2008 esitteli Mercedes-Benz ensimmäistä kertaa ajoneuvokäyttöön tarkoitetun 2-vaiheahdetun dieselmoottorin. Tämä tyyppin OM 651-moottorin iskutilavuus on  $2143 \text{ cm}^2$  ja maksimiteho 150 kW nopeudella 2400 r/min. Moottorin maksimi vääntömomentti on 500 Nm kierroslukualueella 1600- 1800 r/min. Tyypiltään OM651 on nelisylinterinen rivimoottori, jossa on yhteispaineruiskutus sekä pakokaasujen takaisinkierätysjärjestelmä (EGR). Moottorissa on 2 ahdinta, mutta ainoastaan yksi ahtoilman jäähdytin, joka toimii ilmasta-ilmaan-periaatteella ja on sijoitettu HP-ahtimen jälkeen. Moottorista valmistetaan myös useita matalammalla virityksasteella olevia versioita, ja sitä asennetaan moniin Mercedes-Benzin henkilö- ja tavara-automalleihin. /8/

Lisäksi mm. saksalainen BMW valmistaa nykyisin 2-vaiheahdettuja henkilöautodieseleitä. Samoin amerikkalainen Cummins on siirtymässä lähitulevaisuudessa käyttämään 2-vaiheahdustekniikka nopeakäyntisissä ajoneuvomoottoreissa./9//10/



**Kuva 7.** 2-vaiheahdettu ajoneuvomoottori Mercedes-Benz OM 651. Molemmat ahtimet on sijoitettu moottorin oikealle puolelle. /8/

### **3.5.3 MTU 4000-sarja**

Saksalainen MTU (aik. Motoren- und Turbinen Union) esitteli vuoden 2010 lopulla 4000-sarjan moottorit. Moottori täyttää vuonna 2012 voimaan astuvat EU Stage III B -päästö määräykset. Verrattuna vuonna 2009 voimaan astuneisiin Stage III A -rajoituksiin ovat NOx-päästötasot laskeneet 39 % ja partikkelipäästöt 88%. Yhteispaineruiskutusjärjestelmän suurin ruiskutus paine on 2200 bar. Moottori on varustettu sylinterilohkon päälle asennetulla 2-vaiheahtausjärjestelmällä, jäähdytetyllä EGR -järjestelmällä sekä partikkelisuodattimella. Näin saadaan riittävän puhtaat pakokaasut ilman pakokaasun jälkikäsittelyä. Moottorisarja tulee kattamaan kokoluokat 1000 -2700 kW. Moottorit on tarkoitettu rautatiekäyttöön, ja valmistaja tarjoaa moottoria toimitettavaksi yhdessä Siemensin valmistaman generaattorin kanssa. /11/



**Kuva 8.** MTU 12V4000 RX4 rautatiekäyttöön. /11/

## 4 TYÖN LÄHESTYMISTAPA JA TOTEUTUS

### 4.1 Lähtötilanne

#### 4.1.1 W6L32E

Ei julkaista

#### 4.1.2 Imuilman ja pakokaasujen reitti

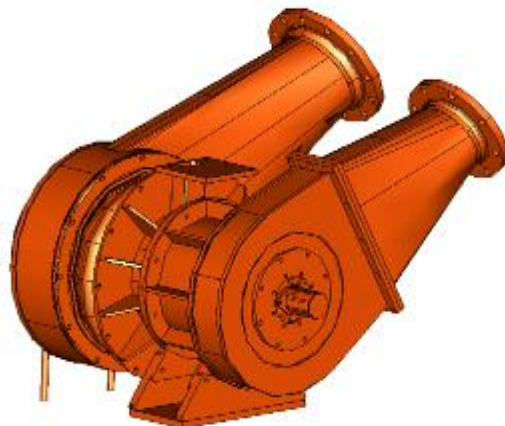
Ei julkaista

### 4.2 Elias

2-vaihesovelluksessa tullaan HP-ahtimena käyttämään Lappeenrannan teknillisen yliopiston kehittämää 15K-ahdinta josta käytetään nimitystä Elias (**Kuva 2.**) Ahtimen erikoisuutena on kompressoripesän sijoitettu kestopagneettigeneraattori. Ahtimen ollessa toiminnassa virtaa ilma generaattorin sivuitse ja jäädyttää sitä samalla. Moottorin käydessä nimelliskierroksilla on Eliaksen roottoriakselin pyörimisnopeus luokkaa 30000 r/min. Tällöin on generaattorin tehoksi laskettu 350kW.

Aivan projektin alkuvaiheessa saatiin alustava 3D-malli Elias-ahtimesta. Mallia tutkittaessa todettiin että turbiinin, samoin kuin kompressorin sisääntuloaukot ovat ehdottomasti liian pitkät ja jo heti alussa lähdettiin layouteja suunnittelemaan siltä pohjalta, että näitä liitännöitä lyhennetään 200-300 mm. Tähän saatiin LTY:ltä varsin pian hyväksyvä vastaus. Toinen modifiointivaatimus koski ahtimen kompressoripuolen ulostuloliitännän asentoa: mikäli ahdin asennetaan moottorin takaosaan, tulee SPEXin pää olla vastakkain ahtimen turbiinin sisääntulon kanssa. Tällöin tulisi kompressorin ulostuloaukon olla peilikuva nykyiseen nähden, muutoin ulostulon ja HP-jäädyttimen välinen putkitus olisi hyvin monimutkainen. Myös tämän peilaamisen kerrottiin LTY:lla olevan mahdollista. Kolmas huomautus Elias-ahtimeen liittyi kaikkien sisään- ja ulostuloaukkojen kiinnitykseen ja asentoon. Esitettiin toive kiinnitysruuveja olisi kehällä 24

kappaletta, näin aukkojen suuntaa voisi pyörittää 15° välein. Tämä toisi tiettyjä vapauksia muiden moottorin ahtauskomponenttien sijoittamiseen.



**Kuva 9.** Elias-ahdin. Kompressoripesän yläpuolella näkyy ulostuloaukko generaattorin kaapeleita varten.

### 4.3 Käytetyt ohjelmat ja mallintaminen

Suunnittelu ohjelmistona toimi NX I-Deas 6.0 jonka yhteydessä PDM-ohjelmistona oli Teamcenter. Mallinnus aloitettiin luomalla Teamcenteristä löytyvistä osista karkea malli 6L32E-moottorin lohkoista, ja jättämällä siitä pois mahdollisimman paljon osia, jotka eivät vaikuta 2-vaiheahtauskomponenttien sijoitteluun. Osat joko poistettiin kokonaan kokoonpanoluettelosta, tai ne piilotettiin Suppress-komennolla. Tämä toimenpide tehtiin siksi, että mitä enemmän piirteitä/dataa tiedostossa on, sitä hitaammaksi kappaleen liikuttaminen käy ruudulla. Tämän huomasi selvästi mallin ollessa loppusuoralla valmiina. Kappaletta zoomatessa oli jopa useamman sekunnin pituinen viive. Nyrkkisääntönä pidetäänkin, että tiedoston koko tulisi olla alle 1 gigatavu.

### 4.4 Karkea suunnittelu

Aloitettaessa suunnittelua oli tiedossa muutamia seikkoja, jotka vaikuttavat olennaisesti moottorin liittyvien komponenttien sijoittamiseen. Koska käynnistys- ja sammutusvaiheessa moottori tärisee varsinkin sivusuunnassa voimakkaasti, on

komponenttien oltava ehdottomasti kiinni samassa alustassa kuin moottori, ts. niitä ei voi asentaa erikseen lattialle. Suotavin ratkaisu olisi, että mahdollisimman paljon komponentteja olisi kiinnitettyä moottorin lohkoon. Laitteiden ympärillä tulee olla myös riittävästi tilaa asennustyötä varten. Koska moottorin molemmilla sivuilla on työtasot, tulee sinne sijoittaa mahdollisimman vähän komponentteja, mutta vastaavasti yläpuolella on tilaa useita metrejä. Ylhäälle sijoitettaessa tulee kuitenkin huomioida, että liian korkealla sijoitetut komponentit ovat alttiina voimakkaalle värinälle.

Alettaessa suunnitella moottorin modifiointia 2-vaiheahdetuksi, oli harkittavana muutamia erilaisia ehdotuksia sijoittaa ahtimet. Vaihtoehto A oli jättää LP-ahdin omalle paikalleen moottorin vapaaseen päähän ja sijoittaa HP-ahdin vauhtipyörän päälle omalle hyllylleen. Tällöin HP-jäähdytin sijoitettaisiin hyllyn sisäpuolelle. Vaihtoehdossa B LP-ahtimena toimiva Elias sijoitettaisiin hyllyn päälle vapaaseen päähän ja LP-ahdin sen etupuolelle, erillisen kehikon päälle. Ilmassa oli myös vaihtoehto C, jossa LP-ahdin jäisi omalle paikalleen ja HP-ahdin sen eteen teräskehikon päälle. Tämä kuitenkin tekisi pakokaasujen johtamisen LP-ahtimeen erittäin vaikeaksi, joten se hylättiin välittömästi.

#### **4.5 HP-välijäähdytin**

Ei julkaista



## **5 LAYOUTIN VALINTA**

### **5.1 Konsepti A**

Mallinnettiin vaihtoehto A:ta jossa Elias-ahdin on SPEXin päässä ja Napier sen alapuolella. Tämän ratkaisun etu on mm. se, että pakokaasujen kiertomatka on hyvin lyhyt ja asentajille jää vielä kohtuullisesti tilaa pumppukotelon ääressä työskentelyyn. Haittapuolia on mm. se, että välijäähdyttimet joudutaan sijoittamaan niin lähelle toisiaan, että välijäähdyttimille joudutaan tekemään omat liitäntälaatikot (ellei Teamcenteristä löydy valmiita komponentteja, jotka käyvät paikoilleen). Ahtoilman jäähdyttimien sijoituksesta johtuu myös se, että ilmavirta joudutaan ohjaamaan varsin jyrkkien mutkien kautta, joka taas aiheuttaa sen, ettei ilma leviä tasaisesti jäähdyttimen sisälle. HP-ahdin ja LP-jäähdytin ovat myös sijoitettuna varsin korkealle, mikä saattaa muodostua ongelmaksi moottorin aiheuttaman värinän vuoksi. Ilmassa oli myös ratkaisun, jossa LP-ahdin olisi sijoitettu poikittain moottorin sylinterilinjaan nähden, mutta tällöin pakokaasujen johtaminen LP-ahtimeen vaatisi hyvin monimutkaisen putkiston, joten ratkaisu hylättiin.

### **5.2 Konsepti B**

Ratkaisu B vaati SPEXin kääntämistä 180 astetta, ja aluksi ei oltu aivan varmoja onko tämä mahdollista. Ratkaisussa B sekä pako- että imuilma joutuisivat kulkemaan pidemmän matkan mutta komponentteja tarvitsisi muokata huomattavasti vähemmän. Tämä tulee olemaan myös lopullinen ratkaisu koska kyseessä ei ole sarjatuotanto- vaan laboratoriokäyttöön tuleva moottori, jossa on tärkeintä päästä ajamaan suoritusarvot asennetuilla komponenteilla.

## 6 KONSEPTIN VALINTA

Toteutettavan konseptin valitsemiseksi järjestettiin palaveri, jossa esiteltiin vaihtoehdot A ja B, sekä niiden edut sekä haitat. Toteutuksen kannalta molemmissa vaihtoehdoissa oli yhtä paljon etuja ja haittoja (**Taulukko 1.**)

**Taulukko 1.** Vertailutaulukko.

	Concept A	Concept B
Components located to low height	+	-
Components able fasten to engine block	-	+
Serviceability	-	+
Relocating ancillary components	+	-
Total	++	++

Myös ahdinten välisen pakoputken sijoittaminen olisi hyvin hankalaa, koska pakoputki ottaisi käytännössä kiinni moottorin oikealla puolella olevaan työtasoon. Päädyimme siis ratkaisuun A, jossa molemmat ahtimet ovat moottorin vapaassa päässä.

Lisäksi keskusteltiin siitä, että turbon kehikosta tehtäisiin sellainen, että sen voisi nostaa nosturilla mahdollisimman valmiina paikalleen, ts. valmis moduuli.

Seuraavaksi sovittiin, että HP-ahtimen sijoitus olisi sellainen, että HP-ahdin ja SPEX olisivat keskiviivoiltaan samalla linjalla. Tällöin todennäköisesti tehdään myös uusi hylly HP-ahtimelle koska nykyinen hylly on liian leveä ja ilmaputkien tiellä.

Sovittiin myös että tiedustellaan, voidaanko HP-ahtimeen tehdä turbiinin ulostuloaukon jälkeen mutka, ja että tarvitaan tieto asteluvuista, joiden rajoissa ahtimen yhteitä voidaan kääntää.

### 6.1 Jatko

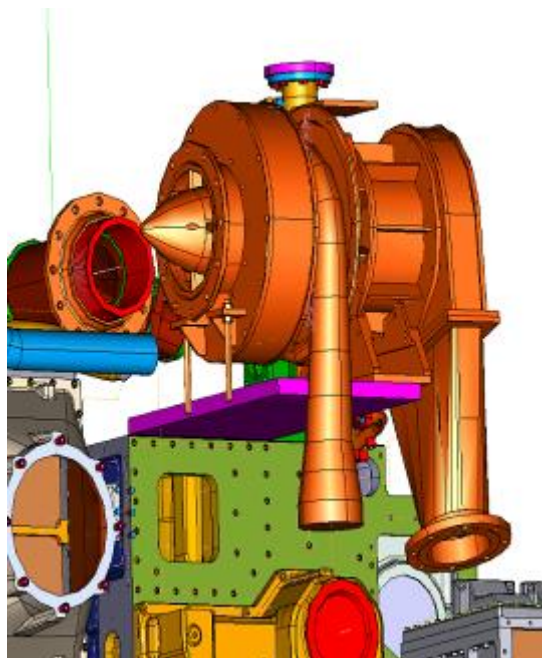
Ei julkaista

## 6.2 Suunnittelun jatkaminen

Suunniteltiin vapaaseen päähän erilaisia kiinnitystapoja HP-ahtimelle, ehdotettiin 2 eri mahdollisuutta:

1. Säilytetään alkuperäinen hylly asetetaan sen päälle korotuspala, johon tulee Eliakseen sopivat kiinnitysruuvien paikat, tehdään SPEXin loppukäyrään 15° asteen mutka ja sen perään palje.
2. Tehdään uusi hylly ja pudotetaan ahdin mahdollisimman alas, kuitenkin niin että se jää SPEXin kanssa samaan linjaan.

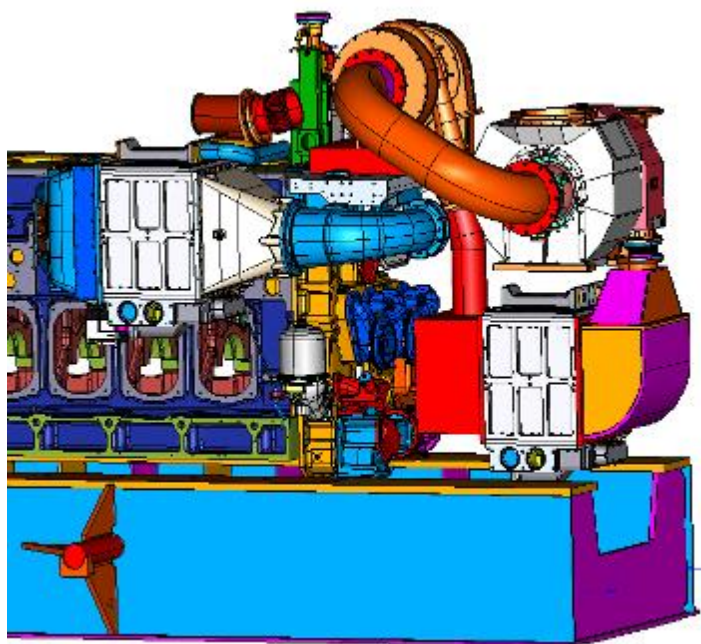
Ensin mallinnettiin vaihtoehto 2, jossa tulisi 40mm paksu levy HP-ahtimen alle. Tällöin turbiinin sisääntuloaukko ja SPEX olisivat samassa linjassa. Todettiin, että lohkon yläreunassa olevien kiinnitysreikien käyttö olisi tällöin jotakuinkin mahdotonta. Mikäli levy tulisi käyttöön, tukkisi vaaka- ja pystytasossa olevien levyjen välinen hitsaussauma käytännössä reiät (**Kuva 5**.) Tämän vuoksi vaihtoehto hylättiin.



**Kuva 14.** Tekstissä mainittu reikärivi on kuvassa violetin levyn alapuolella.

Toinen vaihtoehto, jossa käytettäisiin alkuperäistä hyllyä, mutta asetettaisiin sen alle korotuspala, vaikutti paremmalta. Hyllyn ja turbon välissä on 47 mm korkea

korotuspala, johon tulee reiät joilla pala kiinnitetään hyllyyn, sekä ahdin kiinnitetään palaan. Samassa yhteydessä mallinnettiin  $15^\circ$  kulmapala johon tulee heti perään 150 mm pitkä palje. Kun LP-ahdin asetetaan 1266 mm korkeudelle alustasta, asettuvat HP-ahtimen turbiinin ulostulo sekä LP-ahtimen sisääntulo  $45^\circ$  kulmaan. Keskustelimme myös alustavasti LP-jäähdyttimen sisään- ja ulostulolaatikoiden mallista. Tehtiin päätös, jossa kylmälle puolelle tulee kuutiomainen laatikko ja kuumalle puolelle (eli sisääntuloon) yhdeltä särmältä pyörästetty laatikko.



**Kuva 15.** Ahtoilman jäähdytin pystysuorassa.

### 6.3 Työtaso

LP-jäähdyttimelle mallinnettiin ilman sisään- ja ulostulolaatikat. Sisääntulopuolelle tuli yhdeltä särmältään 400mm taivutussäteellä pyörästetty teräslaatikko ja ulostulopuolelle 450mm pitkä kuutiomainen laatikko. Tämän jälkeen vierailtiin Vaskiluodon laboratoriossa katsomassa varsinaista moottoria ja ottamassa taas mittoja. Kävi ilmi, että moottorin vapaan pään yläpuolella 3300mm:n korkeudella alustasta on U-mainen 200 x 200mm palkista tehty työtaso johon myös moottorin pakoputki on tuettu (**Kuva 7.**) Palkista otettiin mitat ja mallinnettiin se. Keskusteltiin samalla laboratorion henkilökunnan kanssa ja

todettiin, että pakoputken voisi 2-vaihe sovelluksessa viedä läpi työtason ”U-silmukan” keskeltä. Mallinnettuaani tämän työtason huomattiin, että LP-ahdinta joudutaan siirtämään 318mm sivusuunnassa, mikäli pakoputki halutaan viedä hyllyn keskeltä.



**Kuva 16.** Työtaso johon pakoputki on tuettu.

#### **6.4 LP-ahtimen turbiinin sisääntulo**

Tutkittaessa LP-ahtimen mallia tarkemmin huomattiin, että siihen on olemassa valmis sisääntulo aksiaaliselle sisääntulolle. Tämä helpotti mallinnustyötä, koska muutoin olisi jouduttu siirtämään myös HP-ahdinta sivusuunnassa. Oltiin myös yhteydessä Napierin edustajaan ja varmistui että 298-malliin ollaan ottamassa ko. sisääntulomalli myös tuotantoon. LP-ahtimen siirtyessä vapaasta päästä katsottuna oikealle, parantuu myös LP-coolerin ulostuloputken sijoitus, putki saadaan sijoitettua siten että sen lähtö on ilmalaatikon päälle asennettavan reduserin keskellä ja se nousee suoraan HP-ahtimen sisääntulon kohdalle.

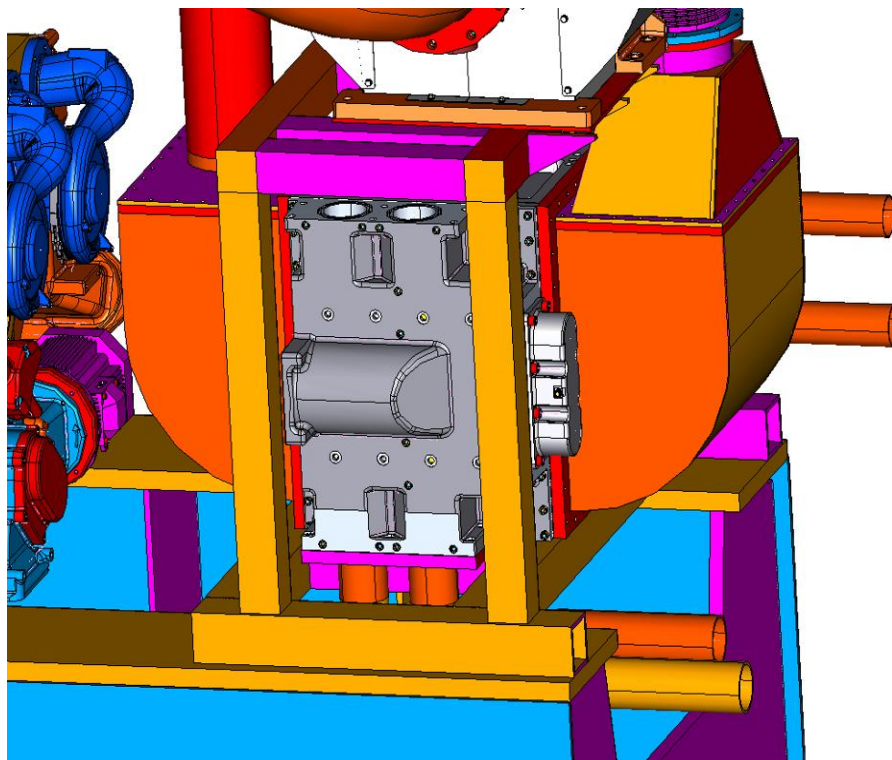
## 6.5 CACin kääntö

Keskusteliin mahdollisuudesta kääntää LP-CACia 90°, jolloin sisällä olevat vesiputket ovat pystyssä ja poikkilevyt vaakatasossa. Tämä aiheuttaa omia vaatimuksia kuuman ilman sisääntulolle. Ensimmäisessä versiossa CAC on pystysuorassa (**Kuva 19.**) Kääntämällä jäähdytin kyljelleen pieneni sen vaatima kokonaiskorkeus n. 250 mm. LP-ahtimen sijoitukseen kääntö ei tule vaikuttamaan, mutta tuo huomattavasti enemmän tilaa HP-ahtimen ympärille tehtävälle tukikehikolle. Täten myös jäähdyttimen kiinnittäminen tulevaan kehikkoon helpottuu koska ainoat kiinnitysreiät siinä ovat pitkillä sivuilla. Samoin ilmalaatikoiden seinämävahvuudet voi huoletta pienentää 20 mm:stä 10 mm:iin, koska ilmalaatikoiden ei nyt tarvitse osallistua jäähdyttimen kannattamiseen, vaan kaikki rasitus kohdistuu ympärille tulevaan kehikkoon. Ainoa haitta joka CACin käännöstä seuraa, on vesiputkien johtamisen hankaloituminen, koska nyt joudutaan tekemään kaksi ylimääräistä 90° asteen mutkaa putkistoon putkien laippojen asennon vuoksi.

## 6.6 Ilman sisääntulolaatikot

Ensimmäisessä versiossa sisääntulolaatikkoa oli muotoiltu siten, että siinä oli R=400 mm viiste ja takapuolella on vain kuutiomainen laatikko josta lähti putki HP-ahtimelle. Välijäähdyttimen käännön jälkeen kuitenkin huomattiin, että laatikko vaikeuttaa asentajien työtä, mikäli vapaassa päässä olevia komponentteja, esim. öljypumppuja, täytyy päästä käsittelemään. Koska huomattiin, että sisääntulopuolen laatikko sopii suoran ulostulopuolen pultinreikiin, mutta on kohdasta riippuen 30- 130 mm lyhyempi, päätettiin käyttää samaa laatikkoa (**Kuva 3.**) Näin myös valmistettavuus helpottuu.

Aikomuksena oli lisätä laatikoiden kyljille nostolenkit siltanosturilla liikuttamista varten, mutta koska laatikossa on ennestään jo tarpeeksi kierrereikiä, päätettiin lenkit jättää pois. Laatikoiden yhteispaino on luokkaa 200 kg.



**Kuva 19.** Sama ilmalaatikko käy jäähdyttimeen sekä meno- että paluupuolelle.

Tässä todettiin, että jäähdytin voitaisiin kiinnittää kehikkoon ilmalaatikon kiinnityslaippaan tehdyistä ”tassuista”

## 6.7 Kehikko

Komponenttien sekä putkitusten ollessa valmiita, aloitettiin niiden ympärille tulevan tukikehikon suunnittelu. Kehikko tullaan rakentamaan 100 mm x 100 mm kokoisesta neliöputkesta jonka seinämävahvuus 10 mm ja materiaalina S400H-teräs. Lisäksi kehikon alimmat pitkittäisjuoksut tehdään 120 mm x 120 mm neliöputkesta, joka seinämävahvuus on 10 mm ja materiaali S355-terästä. Näin saadaan alimmaisille palkeille enemmän pinta-alaa, josta ahtolaitteiden paino kohdistuu alustaan. Kehikon laskennallinen paino on luokkaa 350 kg, ja päälle tulevan LP-ahtimen paino 1118 kg. /12/

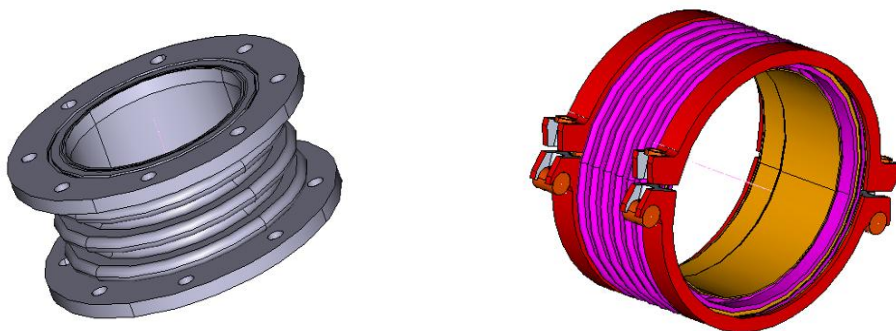
Kun kehikko oli valmis, suoritettiin myös osien eräiden yksityiskohtien hiomista, ne jätettiin tarkoituksella loppusuoralle, koska haluttiin olla varmoja, että kaikkien komponenttien sijoittaminen paikoilleen on täysin mahdollista. Tällaisia viimeistelytoimenpiteitä olivat esimerkiksi turbohyllyn korokepalan



kiinnitysruuvien mallintaminen. Se oli helppoa, kun valmiit reiän paikat löytyivät niin HP-ahtimesta, kuin hyllystäkin.

## 6.8 Palkeet ja laipat

Koska teräs laajenee lämmitessään, täytyy tämä ottaa huomioon suunniteltaessa moottorin imuilman ja pakokaasujen putkitusta. Yleinen tapa estää laajenemisen aiheuttamat vääntymät on asentaa putkeen palje.



**Kuva 20.** Pultti- ja pantakiinnitteiset palkeet.

Palje on haitarimainen välikappale, joka joustaa pituussuunnassa putkiston laajetessa. Yleisimmin palkeet ovat kiinnitetty putkiin joko päätylaippoihin asennetuilla pulteilla tai kiristettävällä pannalla (**Kuva 20.**) Lisäksi palkeen sisällä saattaa olla lieriömäinen levy jotta kaasu tai neste pääsee virtaamaan sen sisällä esteettömästi. Palkeiden sijoittamisessa on huomioitava että lämpölaajeneminen on voimakkainta putken pituussuunnassa. Mikäli siis putkessa on mutkia, täytyy jokaiselle pidemmälle suoralle olla oma palje.



## 7 ILMALAAATIKOIDEN SUUNNITTELU

Opinnäytetyön aihetta rajattaessa sovittiin että layoutin mallintamisen jälkeen tehdään jostain ahtaukseen oleellisesti liittyvästä komponentista valmiit työpiirustukset. Osaksi valittiin LP-CACin sisään- ja ulostuloaukkoon liitettävä ilmalaatikko. Tähän päädyttiin osaltaan siksi että sama osa tulee jäähdyttimen molemmille puolille, jolloin samoilla piirustuksilla voidaan tehdä 2 osaa.

### 7.1 Valmistettavuus

#### 7.1.1 Hitsauskuvat

Laatikon suunnittelu aloitettiin muokkaamalla levyjen sivuilla olevat saumat paremmin hitsaukseen soveltuviksi. Aikaisemmat tasaiset reunat muokattiin siten että levyt jäävät toisiinsa nähden limittäin ja levyjen väliin muodostuu tila pienahitsille. Hyvä keino kasvattaa hitsin a –mittaa on siirtää levyt siten että esim. kyseessä olevassa 10 mm levyssä levyt jäävät 3 mm matkalla päällekkäin, jolloin väliin jää 7 mm x 10 mm ura hitsisaumalle. /13/

#### 7.1.2 Koneistuskuvat

Seuraavaksi tehtiin koneistusmalli jossa otettiin huomioon työvarat. Tällöin 40 mm levy muutettiin 50 mm paksuksi, näin pultinkantojen alle jäävä osa voidaan koneistaa tasaiseksi jolloin varmistutaan että pultit jäävät suoraan. Samoin ilmalaatikon laippojen keskellä olevien suorakaiteen muotoisten aukkojen reunat pyöristettiin 20 mm säteellä levytyökeskusta varten. Samoin tarkastettiin laippaan tulevien vapaareikien halkaisijat sopiviksi, tässä tapauksessa M12-ruuville katsottiin 14 mm halkaisija riittäväksi.

Ylemmässä laipassa jouduttiin tekemään myös valmistettavuuden takia muutoksia. Aihiona laipassa on 30 mm teräslevy jossa on koneistusvaraa 5 mm. Koska standardin mukainen M12 –umpireikä on syvyydeltään n. 25 mm, harkittiin aluksi reikien muuttamista M10 –kokoon. Tällöin reiän vaatima syvyys olisi ollut enää 21 mm. Päädyttiin kuitenkin vaihtamaan aihio 35 mm paksuksi jolloin kappale olisi koneistuksen jälkeenkin riittävän paksu.

## **8 YHTEENVETO JA ARVIOINTIA**

### **8.1 Aikataulussa pysyminen**

Koska projekti aloitettiin yhteisellä palaverilla molempien ohjaajien kanssa ja samalla tehtiin aiheen rajaus, saatiin heti alkuun ”lentävä lähtö”. Koska työpaikalla oli myös käytettävissä kokenutta henkilöstöä, pystyttiin heidän avulla tekemään aikataulusta sopivan väljä, ilman että missään vaiheessa tuli erikoisempaa kiirettä. Tämän vuoksi pysyttiin hyvin välietapeiksi asetetuissa päivämäärissä.

### **8.2 Projektin tuloksen hyödyntäminen ja arviointi**

Ei julkaista

### **8.3 Projektin jatkuminen ja keskeiset uudet ideat**

Koska suoritettu layout- suunnittelu on osa suurempaa kokonaisuutta jossa lopullisena tavoitteena on saada Vaskiluodon laboratoriossa oleva moottori 2-vaiheahdetuksi, on projektin jatkumiselle osoitettavissa hyvin selkeä jatko. Seuraavana vaiheena on tehdä 3D-mallin uusista osista työpiirustukset ja toimittane alihankkijalle, joka valmistaa niiden mukaan uudet komponentit. Sen jälkeen on vuorossa 2-vaiheahtauslaitteiston kasaaminen ja asentaminen paikoilleen, jolloin päästään suorittamaan koeajo.

Mielenkiintoinen havainto oli että projektin alkuvaiheessa hyvin varmana konseptivaihtoehtona pidettyä ratkaisua B:tä ei voitukaan toteuttaa käytännössä, koska käynnistysilmakabinetin siirtäminen olisi tullut niin hankalaksi. Nykyinen, lopullinen ratkaisu taas on mainio esimerkki kompromissista, sillä se on yhdistelmä molempien esitettyjen vaihtoehtojen ominaisuuksia, tarkoituksena saada moottori toimintaan mahdollisimman vähillä muutoksilla.

#### **8.4 Johtopäätökset ja jatkokehitysehdotukset**

Ei julkaista

#### **8.5 Loppusanat**

Kaiken kaikkiaan projekti oli erittäin mielenkiintoinen ja sopivan vaativa. Opiskeluaikana olin tutustunut useampaan eri mallinnusohjelmaan, mutta I-Deasta en ollut aiemmin käyttänyt. Sen, ja samoin kuin Teamcenterin käytössä riittikin työn alussa runsaasti opeteltavaa. Samoin 2-vaihehaituksen ja Miller-ajoituksen periaatteet olivat täysin uutta asiaa. Niiden omaksumisessa auttoi merkittävästi työpaikalla järjestetty koulutus sekä teoriaosuuden kirjoittaminen, jonka aikana sain perehtyä nykyaikaiseen moottoriteknologiaan liittyviin seikkoihin. Projektin suorittamisessa auttoi merkittävästi sovituin määräajoin järjestetyt palaverit laboratorion ja Performance henkilökunnan kanssa. Näissä palavereissa selvisi moni seikka, jotka täytyi ottaa huomioon, ja jotka taas voitiin jättää pois. Työn loppuvaiheessa tuli eteen paljon ilmalaatikon valmistettavuuteen liittyviä asioita joita täytyi omaksua. Heti opinnäytetyön alussa tehtiin aikataulu, ja sitä pystyttiin noudattamaan koko projektin ajan ilman viivästyksiä.

## LÄHDELUETTELO

/1/ <http://www.wartsila.com/fi/about/yhtio-johto/yhtiorakenne> [viitattu 7.7.2011]

/2/[http://compass.wartsila.com/business\\_support/communications\\_and\\_marketing/presentations/Corporate%20Presentations/Forms/AllItems.aspx](http://compass.wartsila.com/business_support/communications_and_marketing/presentations/Corporate%20Presentations/Forms/AllItems.aspx) [viitattu 6.6.2011]

/3/[http://www.imo.org/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)---regulation-13.aspx](http://www.imo.org/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/nitrogen-oxides-(nox)---regulation-13.aspx) [viitattu 20.7.2011]

/4/[http://www.marinediesels.info/2\\_stroke\\_engine\\_parts/Other\\_info/miller\\_cycle.htm](http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/miller_cycle.htm) [viitattu 21.7.2011]

/5/ <http://pia.sagepub.com/content/219/8/631.full.pdf> [viitattu 21.7.2011]

/6/ <http://fi.findadblue.com/adblue/scr/> [viitattu 5.7.2011]

/7/ <http://www.gmp.uk.com/publications/June2011/WIP/WIP-June-2011.pdf> [viitattu 18.7.2011]

/8/ <http://www.roadtransport.com/blogs/truck-and-van-blog/2009/05/new-mercedes-benz-engine-for-e.html> [viitattu 22.7.2011]

/9/[http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/6series/coupe/2007/allfacts/engine\\_6c\\_diesel.html](http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/6series/coupe/2007/allfacts/engine_6c_diesel.html) [viitattu 15.7.2011]

/10/[http://www.dieselpowermag.com/tech/dodge/1002dp\\_6\\_7l\\_cummins\\_diesel\\_engine/index.html](http://www.dieselpowermag.com/tech/dodge/1002dp_6_7l_cummins_diesel_engine/index.html) [viitattu 19.7.2011]

/11/ <http://www.sae.org/mags/sve/tools/9140> [viitattu 27.8.2011]

/12/ <http://www.tm-rauta.fi/images/stories/hea-heb.pdf> [viitattu 12.7.2011]

/13/[http://fis8004.fi.wnsd.com/technology/instructions/external\\_standards/Standard/sfsen/sfsen1011-2.pdf](http://fis8004.fi.wnsd.com/technology/instructions/external_standards/Standard/sfsen/sfsen1011-2.pdf) [viitattu 1.9.2011]

/14/ <http://www.industrialmarinepower.com/-3-76-man-launches-mediumspeed-twostage-turbocharged-engine-.html>

/15/ Kleimola, Matti – Pohjanpalo, Yrjö 1986. Autotekniikan käsikirja: Dieselmoottori. 2.painos. Helsinki. Tammi.

/16/ Niemi Seppo /<http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/a/luentoaineisto.html>  
[viitattu 16.7.2011]

/17/ Wik Christer & Hallbäck Björn (2008) Reducing emissions using 2-stage turbo charging, In detail, Wärtsilän teknillinen julkaisu 01/2008, ISSN 1797-0032

**LIITE 1**

Ei julkaista

**LIITE 2**

Ei julkaista

**LIITE 3**

Ei julkaista



**LIITE 4**

Ei julkaista