

Lasse Haapala

**Ruiskutuspumpun suunnittelu korkeavirtteiseen diesel-  
moottoriin**

Opinnäytetyö

Kevät 2011

Tekniikan yksikkö

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Auto- ja työkonetekniikan suuntautumisvaihtoehto



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Haapala Lasse

Työn nimi: Ruiskutuspumpun suunnittelu korkeavirtteiseen dieselmoottoriin

Ohjaaja: Ylinen Hannu

Vuosi: 2011

Sivumäärä: 32

Liitteiden lukumäärä: 2

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ruiskutuspumppu, joka annostelee poltettavan ruiskutusmäärän dieselmoottorissa.

Ruiskutuspumpun käyttötarkoitus tulee olemaan korkeavirtteisissä nopeakäyntisissä suoraruiskutus-diesel-moottoreissa, joissa suuri ruiskutusmäärä yhdistettynä nopeaan käyntinopeuteen asettavat korkeat vaatimukset ruiskutuspumpun suunnittelulle.

Aluksi työssä tutustuttiin jo markkinoilla oleviin ruiskutuspumppuihin, jolloin saatiin kuva siitä onko työtä kannattavaa tehdä ja osattiin arvioida millaisella budjetilla työtä kannattaisi lähteä tekemään. Saatujen tietojen perusteella työn tekemiselle oli riittävät perusteet ja suunnitelmien tekeminen aloitettiin.

Suunnittelussa käytettiin kokemusten perusteella tulleita ajatuksia ja lujuuslaskelmilla arvioitiin, millainen pumppurungon pitäisi ulkomitoiltaan olla.

Työn tuloksena syntyi suunnitelma ruiskutuspumpusta ja laadittiin piirustukset, joiden perusteella ruiskutuspumppu voitaisiin valmistaa.

Avainsanat: Polttomoottori, Diesel

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Automotive and Transportation Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Lasse Haapala

Title of thesis: Designing the injection pump to the highly tuned diesel engine

Supervisor: Hannu Ylinen

Year: 2011      Number of pages: 32      Number of appendices: 2

---

The purpose of this thesis is to design the injection pump to the highly tuned diesel engine. This type of the injection pump is used in diesel engines which run at high rotation speeds and give the maximum engine power nearly at full rotation speed.

At first of this thesis we looked at the products on the market already this because we have to know if it is useful to do and what the appropriate budget would be.

During the work the strength calculation and the necessary injection quantity are estimated as well as the sufficient injection pump area so that allowable stress is not exceeded.

The result of the work was the finished drawings of the injection pump.

Keywords: combustion engine, diesel

# SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ .....	4
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	6
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	7
<b>1 Johdanto.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Dieselmoottori.....</b>	<b>9</b>
2.1 Dieselmoottorin perusteet .....	9
2.2 Toimintaperiaate .....	9
2.3 Nelitahtiperiaate .....	10
<b>3 Diesel-ruiskutus.....</b>	<b>13</b>
3.1 Ruiskutusjärjestelmien jaottelu .....	13
3.2 Ruiskutuspumpputyypit .....	13
3.3 Ruiskutusjärjestelmä .....	16
3.4 Ruiskutuspaineen vaikutus.....	16
3.5 Ruiskutuksen vaiheet .....	17
3.5.1 Syötön alku .....	17
3.5.2 Ruiskutuksen alku .....	17
3.6 Käytössä olevat rivityyppiset ruiskutuspumput .....	17
<b>4 Ruiskutuspumpun suunnittelu.....</b>	<b>19</b>
4.1 Suunnittelun lähtökohdat.....	19
4.1.1 Markkinoiden tarjonta .....	19
4.1.2 Kohdemoottorit.....	20
4.1.3 Kilpailuluokka .....	20
4.2 Ruiskutuspumpun mitoitus .....	20
4.2.1 Ruiskutusajan laskenta .....	22
4.2.2 Ruiskutuselementin valinta.....	23
4.2.3 Ruiskutuspaineen laskenta .....	24
4.3 Lujuuslaskenta .....	25

5	Erityisvaatimukset.....	28
5.1	Ruiskutuselementin painin pesät.....	28
5.2	Polttoainekanava .....	29
5.3	Ruiskutuspumpun pohja.....	29
6	YHTEENVETO .....	30
	Lähteet .....	<b>Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.</b>
	LIITTEET .....	32

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Ruiskutuspumppu</b>	Dieselmoottorissa käytettävä laite joka annostelee polttoaineen syöttömäärän tarkasti sylintereille moottorin kaikissa toimintatiloissa.
<b>Ruiskutuselementti</b>	Rivityyppisen ruiskutuspumpun annostelumäntä ja sitä ympäröivä sylinteri.
<b>Vh</b>	Iskutilavuus
<b>Vc</b>	Puristustilavuus
<b>Rpm</b>	Revolutions Per Minute, kierrosnopeuden yksikkö.
<b>Bar</b>	Paineen yksikkö. 1 Bar on yhtä kuin 100 kPa.
<b>VAG</b>	Volkswagen AG.

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Dieselmoottori .....	10
Kuvio 2. Nelitahtimoottorin työkierto .....	12
Kuvio 3. Rivipumppu (Automotive teknologi) .....	13
Kuvio 4. V-lohkoinen riviruiskutuspumppu (J-H diesel) .....	14
Kuvio 5. Jakajapumppu (Delphi) .....	14
Kuvio 6. HEUI-pumppusuutin (cdxetextbook) .....	15
Kuvio 7. Polttoainejärjestelmän kaavio .....	16
Kuvio 8. Esimerkkejä ruiskutuspumpuista (Robert Bosch GmbH, 2010) .....	18
Kuvio 9. Ruiskutuspumppun rungon kuormitetuin alue .....	25
Kuvio 10. Leikkaus pumppurungosta .....	26
Kuvio 11. Lujuuslaskennan yksinkertaistettu piirros pumpunakselista .....	27
Kuvio 12. Ruiskutuspumppun paininpesän lukitus .....	28
Taulukko 1. Pumppujen käyttökohteet .....	18
Taulukko 2. Lähtöarvoja ruiskutusmäärän laskentaan .....	21
Taulukko 3. Ruiskutusmäärät 3,7 mm hyötyiskulla .....	23
Taulukko 4. Ruiskutuspaineen laskenta .....	24
Taulukko 5. Ruiskutuspumppun kuormitus .....	27

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ruiskutuspumppu, joka rakenteeltaan soveltuu korkeaviritteisen dieselmoottorin ruiskutuspumpuksi. Korkeaviritteiseksi nopeakäyntinen dieselmoottori luokitellaan, kun sen ominaisteho on suurempi kuin 100 kW/litra tai sylinteriteho on suurempi kuin 150 kW. Tällaisen tehon saavuttaminen moottorin kierrosluvulla 5000 rpm vaatii ruiskutuslaitteistolta erittäin paljon. Erityisimmät vaatimukset ovat ruiskutuksen kesto ja ruiskutusmäärä. Korkeaviritteisiä dieselmoottoreita on käytössä esimerkiksi ratakuorma-autoissa ja pulling-ajoneuvoissa.

Tämän työn tekijän mielenkiinto ruiskutuslaitteistoja kohtaan on alkanut henkilöautojen virityksen parissa. Koska mielenkiinto ruiskutuslaitteita kohtaan kasvoi yhä enemmän, hankki työn tekijä itselleen ruiskutuspumppujen testauspenkin. Ruiskutuspumppujen virityksen ja huoltojen parissa työn tekijä on keksinyt tapoja joilla ruiskutuslaitteiston tehokkuutta olisi mahdollista parantaa. Nämä ideat motivoivat ottamaan haasteen ruiskutuspumpun suunnittelun parissa.

Työn tekemisen taustalla on Tractor Pulling-harrastus, jossa kilpailutason kokenemisen seurauksena virittäjät etsivät yhä parempia komponentteja moottoreihinsa. Ruiskutuslaitteistojen valmistajat ovat eräänlaisessa monopoliasemassa, sillä harvat ruiskutuspumppu virittäjät täyttävät Tractor Pulling-väen vaatimukset. Kovi- en vaatimuksien ja vaihtoehtoisen tarjonnan puutteen takia ruiskutuslaitteistojen hinnat ovat niin korkealla, että ilman suuria sponsoreita pelkän ruiskutuspumpun hankkiminen on useille mahdotonta.

Työn tavoitteeksi asetettiinkin että pystyttäisiin suunnittelemaan ruiskutuspumppu. Ruiskutuspumpun tulisi olla sellainen, jonka avulla lajiin pääsisi mukaan huomattavasti edullisemmin kuin jo tarjolla olevilla ruiskutuspumpuilla, kaluston pysyessä kuitenkin kilpailukykyisenä.



## 2 Dieselmoottori

### 2.1 Dieselmoottorin perusteet

Dieselmoottori toimii itsesytytysperiaatteella ja palotilassa tapahtuvalla seoksenmuodostuksella. Palamiseen tarvittava ilma puristetaan kokoon palotilassa. Tämän seurauksena syntyy korkeita lämpötiloja, minkä ansiosta ruiskutettu dieselpolttoneste syttyy itsestään. Dieselpolttonesteen sisältämä kemiallinen energia muuttuu dieselmoottorissa lämmön kautta mekaaniseksi työksi.

Polttomoottoreista dieselmoottorilla on korkein hyötysuhde. Siihen liittyvä alhainen polttonesteen kulutus, suhteellisen alhaiset haitalliset pakokaasupäästöt ja ennen kaikkea esiruisikutuksen myötä laskenut melu takaavat dieselmoottorin laajan levinneisyyden.

Ahtaminen sopii erittäin hyvin dieselmoottorin yhteyteen. Tämä ei pelkästään lisää tehoa ja nosta hyötysuhdetta, vaan vähentää myös päästöjä.

Dieselmoottorit voivat toimia sekä kaksi- että nelitahtiperiaatteella. Ajoneuvoissa käytetään pääasiassa nelitahtimoottoreita niiden paremman hyötysuhteen takia.

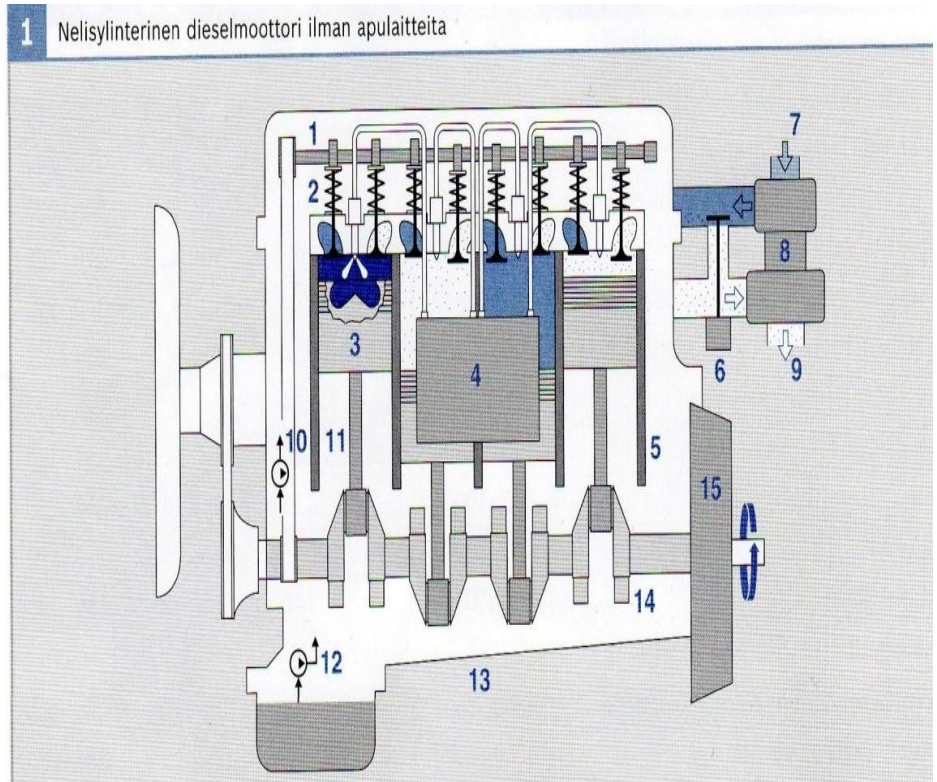
### 2.2 Toimintaperiaate

Dieselmoottorissa on yksi tai useampi sylinteri (kuvio 1.). Ilma- ja polttonesteseoksen palamisen ansiosta jokaisen sylinterin mäntä (kuvio 1, kohde 3) suorittaa jaksottaisen edestakaisen liikkeen. Tämän toimintaperiaatteen myötä moottoria sanotaan "iskumäntämoottoriksi".

Kiertokanki (11) muuttaa männän iskuliikkeen pyörimisliikkeeksi kampiakselilla (14). Vauhtipyörä (15) kampiakselilla pitää liikkeen tasaisena ja pienentää pyörintänopeusvaihtelua, joka syntyy yksittäisille männille kohdistuvista palamistapah- tumista. Kampiakselin pyörintänopeutta kutsutaan myös moottorin pyörintänopeu- deksi. (Robert bosch GmbH 2010.)

**Kuva 1**

- 1 nokka-akseli
- 2 venttiilit
- 3 mäntä
- 4 ruiskutuslaitteisto
- 5 sylinteri
- 6 pakokaasujen takaisinkierätyk-
- 7 imuputki
- 8 ahdin (tässä pakokaasuahdin)
- 9 pakoputki
- 10 jäähdytys-
- 11 kiertokanki
- 12 voitelujärjestelmä
- 13 moottorin lohko
- 14 kampiakseli



Kuvio 1. Dieselmoottori. (Robert bosch GmbH 2010.)

### 2.3 Nelitahtiperiaate

Nelitahtisessa dieselmoottorissa venttiilit ohjaavat raittiin ilman ja pakokaasujen kaasunvaihtoa. Venttiilit avaavat ja sulkevat sylinteriin johtavat imu- ja pakokana- vat. Jokaisella sylinterillä voi olla yksi tai kaksi venttiiliä imu- tai pakopuolta kohti. (Robert bosch GmbH 2010.)

Kuviossa 2. on esitetty dieselmoottorin työkierron eri vaiheet.

1. Imutahti (a)

Mäntä (6) liikkuu yläkuolokohdasta alaspäin kasvattaen tilavuutta sylinterissä. Ilma virtaa sylinteriin avoimen imuventtiilin kautta. Alakuolokohdassa saavutetaan sylinterin suurin tilavuus ( $V_h + V_c$ ).

2. Puristustahti (b)

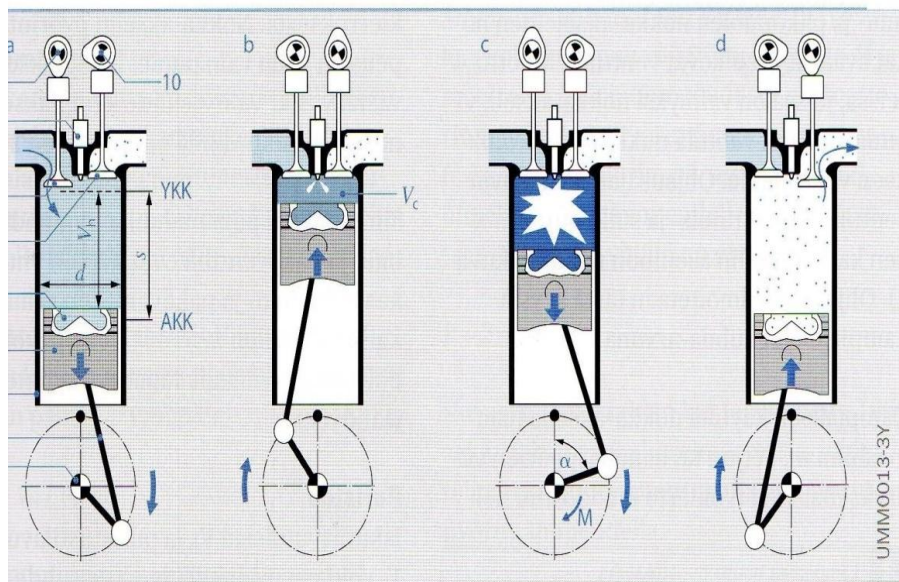
Molemmat venttiilit ovat kiinni. Ylöspäin liikkuva mäntä puristaa sylinterissä olevan ilman kokoon moottorikohtaisen puristussuhteen mukaisesti. Ilma kuumenee. Puristustahtidin loppuvaiheessa ruiskutussuutin (2) ruiskuttaa polttonesteen korkealla paineella kuuman ilman sekaan. Yläkuolokohdassa sylinterin pienin mahdollinen tilavuus on saavutettu.

3. Työtahti (c)

Työtahti alkaa syttymisviiveen jälkeen (yleensä muutamia kammengkulman asteita). Hienojakoinen syttymisherkkä dieselpolttoneste syttyy itsestään palotilassa (5) olevan kokoon puristetun, kuuman ilman johdosta ja palaa. Seurauksena sylinterissä oleva täytös kuumenee itsestään ja paine sylinterissä nousee korkeammaksi. Palamisessa vapautuva energia määräytyy pääasiassa ruiskutetun polttonestemassan mukaan. Paine liikuttaa mäntää alaspäin ja kemiallinen energia muuttuu liike-energiaksi. Kampikoneisto muuttaa männän liike-energian kampiakselilla vaikuttavaksi vääntömomentiksi.

4. Poistotahti (d)

Pakoventtiili (4) avautuu jo hieman ennen alakuolokohtaa. Paineenalainen kuuma kaasu virtaa ulos sylinteristä. Männän ylöspäin suuntautuva liike työntää loputkin kaasuisia ulos.



- a imutahti
- b puristustahti
- c työtahti
- d poistotahti
- 1 imupuolen nokka-akseli
- 2 ruiskutussuutin
- 3 imuventtiili
- 4 pakuventtiili
- 5 palotila
- 6 mäntä
- 7 sylinterin seinämä
- 8 kiertokanki
- 9 kampiakseli
- 10 pakopuolen nokka-akseli

- $\alpha$  kammenkulma
- $d$  poraus
- $M$  vääntömomentti
- $s$  männän liikematka
- $V_c$  puristustilavuus
- $V_h$  iskutilavuus
- YKK yläkuolokohta
- AKK alakuolokohta

Kuvio 2. Nelitahti moottorin työkierto. (Robert bosch GmbH 2010.)

### 3 Dieselruiskutus

#### 3.1 Ruiskutusjärjestelmien jaottelu

Erilaisia dieselruiskutusjärjestelmiä on monia ja järjestelmiä on tullut lisää kehityksen ja monien käyttökohteiden mukaan.

Erilaiset ruiskutuspumput jaotellaan elementin/elementtien akseliin nähden olevan suunnan perusteella, elementtien asettelun perusteella tai säätimen käyttötavan perusteella.

#### 3.2 Ruiskutuspumpputyypit

Rivityyppisiä ruiskutuspumppuja käytetään kaikentyyppisissä dieselkäyttöisissä moottoreissa. Rivityyppisen ruiskutuspumpun käytön suosio perustuu sen kestävään ja varmatoimiseen rakenteeseen. (Kuvio 3.)



Kuvio 3. Rivipumppu. (Automotive technology, [viitattu 5.3.2011].)

V-lohkoista riviruiskutuspumppua käytetään työkoneissa. Etuna rivityyppiseen ruiskutuspumppuun on elementtien sijoittelu, jonka vuoksi pumpun akselin neljällä nokalla voidaan käyttää esimerkiksi kahdeksaa elementtiä. Pumppurunko on erittäin lyhyt. (kuvio 4.)



Kuvio 4. V-lohkoinen riviruiskutuspumppu. (J-H diesel, [viitattu 6.3.2011].)

Jakajatyypiset ruiskutuspumput jaetaan pääsääntöisesti kahteen osa-alueeseen: säteittäismännällä tai aksiaalimännällä oleviin ruiskutuspumppuihin. Jakajatyypisiä ruiskutuspumppuja käytetään moottoreissa, joiden sylinteriteho on pienempi kuin 45 kW. (Kuvio 5.)



Kuvio 5. Jakajapumppu. (Delphi, [viitattu 1.4.2011])

Varsinaisten ruiskutuspumppujen lisäksi on ruiskutusjärjestelmiä, joissa jokaiselle sylinterille on sähköisesti ohjattu ruiskutussuutin, joka sähköohjauksen perusteella päästää korkeapaineisen polttonesteen suuttimen läpi sylinteriin (common rail). Korkeapaine tuotetaan erillisellä korkeapainepumpulla.

Raskaassa kalustossa 60-luvulta lähtien käytettiin yksikkösuuttimia. Tällaisessa järjestelmässä jokaisella yksikkösuuttimella on oma itsenäinen ruiskutuspumppu. Pumppu on asennettuna yksikkösuuttimen yhteyteen, jolloin pumppua käytetään

yleisimmin venttiilikoneistossa olevalla nokka-akselilla. Ruiskutusmäärän säätö tapahtui yksikkösuuttimen kyljessä olevan vivun välityksellä. Tästä järjestelmästä tuli myöhemmin sähköisesti ohjattu versio nimeltään pumppusuutin, jota esimerkiksi Vag-konserni käytti 2000-luvun alussa.

Pumppuputkisuutin järjestelmä ei eroa edellä mainitusta järjestelmästä muuten, kuin että yksikköpumppu ja ruiskutussuutin ovat erotettu toisistaan ja yhdistetty toisiinsa suutinputkella. Tämä järjestelmä antaa vapautta sijoittaa yksikköpumppu, mutta suutinputken takia ruiskutusviive pitenee.

Eräillä ajoneuvovalmistajilla on käytössä järjestelmiä, jotka eivät ole yleistyneet. Esimerkkinä tällaisesta ruiskutusjärjestelmästä on International Truck and Engine Corporationin kehittämä ja tuotannossakin ollut HEUI-ruiskutusjärjestelmä. Erikoisuutena järjestelmässä on tapa, jolla ruiskutusaine paine tuotetaan. Korkea polttoainepaine tuotetaan muuttamalla 40-200 barin kuormituksen mukaan vaihteleva öljynpaine suuttimen sisäänrakennetulla elementillä, jossa hyödynnetään karaa, jonka päissä on erisuuruiset pinta-alat. (Kuvio 6.)



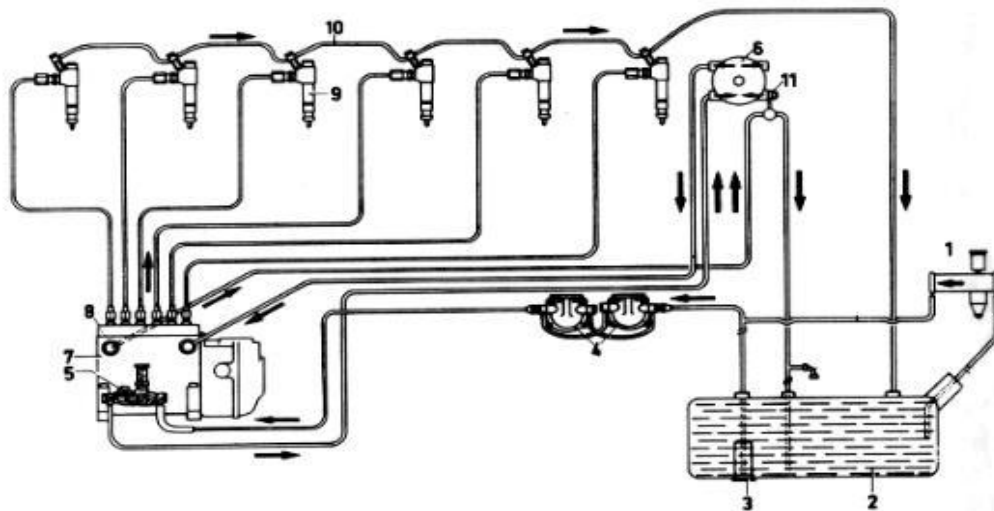
Kuvio 6. HEUI-pumppusuutin. (cdxetextbook, [viitattu 6.3.2011].)



### 3.3 Ruiskutusjärjestelmä

Polttonesteen matalapainepiiri huolehtii polttonesteen siirrosta säiliöstä ruiskutusjärjestelmän käyttöön. Ruiskutuspumppu tuottaa ruiskutukseen vaadittavan polttonestepaineen. Useimmissa järjestelmätyypeissä polttoneste kulkeutuu ruiskutus-suuttimille korkeapaineputkia pitkin. Ruiskutus palotilaan tapahtuu suuttimella vaikuttavalla paineella 200–2000 baria. (Bosch 2002.)

Ruiskutetun polttonesteen ainemäärä, ruiskutusaine, ruiskutushetki sekä ruiskutuksen ja palamistapahtuman kulku vaikuttavat oleellisesti moottorilta saatavaan tehoon.



Kuvio 7. Polttoainejärjestelmän kaavio  
(Agimwali, [viitattu 1.3.2011].)

### 3.4 Ruiskutuspaineen vaikutus

Hyvä polttoaineen sumutus aikaansaadaan korkeilla ruiskutuspaineilla. Korkeimmillaan ruiskutuspaineet ovat noin 2000 baria, rivipumpuilla tuotettava korkea paine on noin 1300 baria. Korkealla ruiskutuspaineella polttonesteen suhteellinen nopeus sylinterissä olevaan ilmaan nähden on suuri, jolloin polttonestesuihku hajailee tehokkaasti. (Bosch 2002.)



### **3.5 Ruiskutuksen vaiheet**

#### **3.5.1 Syötön alku**

Syötön alku on se hetki, jolloin ruiskutuspumppu kykenee aloittamaan rakenteestaan riippuen polttonesteen paineistamisen. Syötön alkamisesta ruiskutuksen alkuun kestävä hetki on nimeltään ruiskutusviive.

Ruiskutusviiveeseen kuluva aika muodostuu paineaallon etenemisestä ruiskutuspumpulta suuttimelle. Ruiskutuspumppujärjestelmissä ruiskutusviiveen pituus riippuu ruiskutusputken pituudesta, koska polttoaineen paineaalto etenee putkessa äänennopeudella.

Rivipumput ajoitetaan pääsääntöisesti syötön alkuhetken mukaan. Syötön alkuhetkeä ei pidä sekoittaa ruiskutuksen alkuhetkeen.

#### **3.5.2 Ruiskutuksen alku**

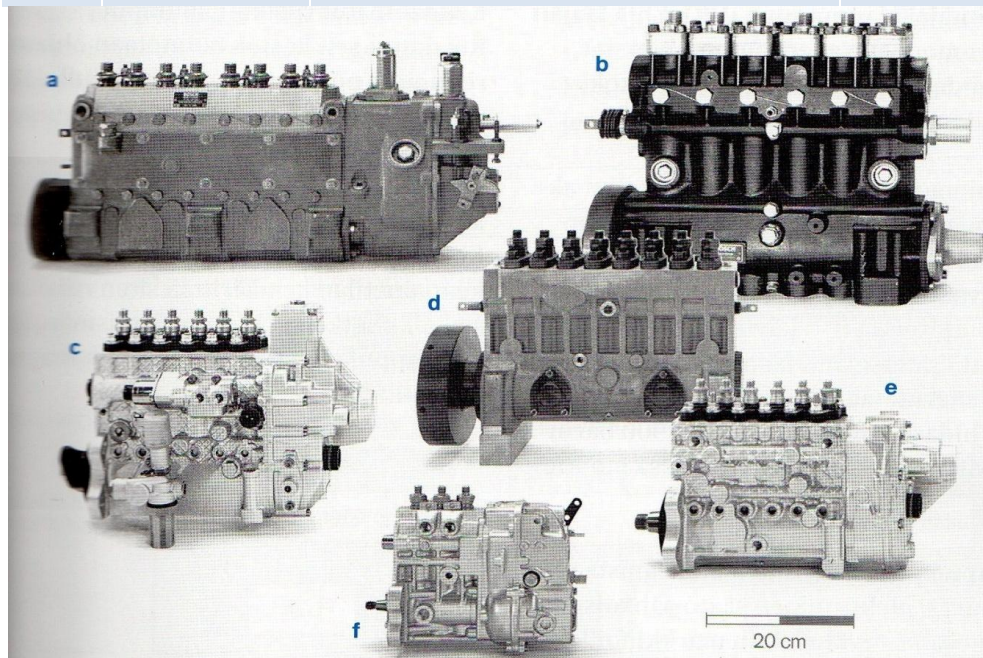
Ruiskutuksen alku on se hetki kun polttonestepaine pääsee suuttimen kautta purkautumaan sylinteriin, mikä ilmoitetaan yleensä kampiakselin kulmana ennen yläkuolokohtaa.

### **3.6 Käytössä olevat rivityyppiset ruiskutuspumput**

Seuraavassa kaaviossa on erilaisia käyttökohteita erilaisille ruiskutuspumpuille. Kaavioista ilmenee käyttöpaine käyttökohteen mukaan. Esimerkkikuvat pumpuista on kuviossa 8.

Taulukko 1. Pumppujen käyttökohteet.

Tyyppi	Käyttöpaine (BAR)	Käyttökohteet	
M	550	Henkilöautot	
A	750	Hyötyajoneuvot, paikallismoottorit, työko- neet	f
P3000	950	Hyötyajoneuvot, paikallismoottorit	
P7100	1200	Hyötyajoneuvot, paikallismoottorit, vetu- rit, työkonet	e
P8000	1300	Hyötyajoneuvot, paikallismoottorit, vetu- rit, työkonet	e
P8500	1300	Hyötyajoneuvot, veturit, maatalous	e
R	1150	Hyötyajoneuvot, paikallismoottorit, veturit	e
P10	1200	Paikallismoottorit, veturit, työkonet	d
ZW	950	Veturit	a
P9	1200	Paikallismoottorit, työkonet	d
CW	1000	Veturit	b



Kuvio 8. Esimerkkejä ruiskutuspumpuista. (Robert Bosch GmbH 2010.)

## **4 Ruiskutuspumpun suunnittelu**

### **4.1 Suunnittelun lähtökohdat**

Ruiskutuspumpun suunnittelun alkuvaiheessa suunniteltiin, millaisia menetelmiä suunnitelman tekemiseen tarvitaan. Lujuuslaskelmien tekeminen olisi ehdottoman tärkeää, koska omat kokemukset ovat osoittaneet ruiskutuspumpun runkoon kohdistuvan vetojännityksen. Suuret jännitykset ovat ilmenneet halkeamina ruiskutuspumpun rungoissa.

Piirustus- ja suunnitteluohjelman käyttö tulisi suunnitelman aikana palauttaa mieleen, ohjelman avulla pystyy esittämään suunnitelman myös muille. 3-D-mallinnuksen avulla pystyy selkeästi osoittamaan millaisia toteutuksia suunnittelussa on käytetty.

#### **4.1.1 Markkinoiden tarjonta**

Ruiskutuspumppu, jota työssä lähdettiin suunnittelemaan, ei ole uusi keksintö. Markkinoilla on tarjolla ruiskutuspumppuja, jotka soveltuvat tavoiteltavan tehomäärän saavuttamiseksi, mutta niiden harvinaisuuden vuoksi hinnat ovat korkeita.

Tractor Pullingissa käytettyjä ruiskutuspumppuja ovat yleisesti Sigman, Columbus dieselin ja Rock techin valmistamat ruiskutuspumput, joiden hinnat vaihtelevat tehotavoitteista riippuen 7000–11000 €. Esimerkiksi Enter Price enginen myymän Sigma-pumpun hinta on 12000 €.

Korkeat hinnat motivoivat suunnittelemaan ruiskutuspumpun itse ja piirustusten valmistuttua teettää työ jollakin yrityksellä alihankintana.

#### **4.1.2 Kohdemoottorit**

Nykyiset työkonedieselmoottorit ovat pääasiassa nopeakäyntisiä suoraruiskutteisia dieselmoottoreita. Nopeakäyntinen dieselmoottori tarkoittaa moottoria, jonka pyörintänopeus on suurempi kuin 1000 rpm. Suunniteltava ruiskutuspumppu on tarkoitettu tämän kaltaisille moottoreille.

Ruiskutuspumpun kohdemoottori on Fordin valmistama dieselmoottori, mallimerkinnältään 360t. Moottorin tasapainotus, liikkuvat osat, männät, kampikoneisto, sylinterikansi, venttiilikoneisto ja jakopää on muokattu kestäämään korkea keskipaine ja suuret pyörintänopeudet.

Kohdemoottorin tehotavoite on 1000 hv/4500 rpm. Kohdemoottorin oletettu hyötysuhde on 35 %. Moottorissa käytettävä polttoneste on jakeluasemilta saatava normaali dieselpolttoaine.

#### **4.1.3 Kilpailuluokka**

Traktorilla kilpaillaan Tractor Pulling Modified 2500-kilpailuluokassa. Kilpailuluokan säännöt antavat virittäjille ja rakentajille melko vapaat kädet toteuttaa itseään. Kaikkia moottoreita, vaihteistoja, tasauspyörästöjä ja napoja saa käyttää vapaasti. Polttonesteen tyyppiä ei ole määritetty. Kierroslukua ei ole rajoitettu. Turvamääräysten osalta luokka on kuitenkin hyvin tarkkaan määritetty.

Tällä hetkellä ruiskutuspumppuna käytössä on Bosch P3000 -ruiskutuspumppu.

#### **4.2 Ruiskutuspumpun mitoitus**

Tavoitteena on, että ruiskutuspumpun tuottama ruikutusmäärä täytyisi riittää saavuttamaan ominaisteho, joka on suurempi kuin 150 kW/sylinteri.

Seuraavassa taulukossa on lähtöarvoja, joita tarvitaan, kun tarvittava polttonesteen syöttöannos lasketaan.

Taulukko 2. Lähtöarvoja ruiskutusmäärän laskentaan

Sarake1	Sarake2
Pyörintänopeus [rpm]	5000
Polttonesteen tiheys [g/cm <sup>3</sup> ]	0,85
Oletettu hyötysuhde [%]	35
Ruiskutusaika [ms]	2
Ominaiskulutus [g/kWh]	220
Sylinteri teho [kW]	150

Kaavan 1 avulla näistä lähtöarvoista on laskettavissa, tarvittavan tehon edellyttämä polttonesteen syöttöannos jokaista työtaphtumaa kohden.

$$QH = \frac{P \cdot \beta e \cdot 1000}{30 \cdot \eta \cdot Z \cdot \rho} \quad [\text{mm}^3/\text{isku}], \quad (1)$$

jossa:

P= Haluttu teho [kW]

$\beta e$ = Polttoaineen ominaiskulutus [g/kWh]

$\eta$ = Kampiakselin pyörintänopeus [rpm]

Z= Polttonesteen tiheys [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho$ = Moottorin hyötysuhde [%]

Kaavaan 1 sijoitus:

$$QH = \frac{800 \cdot 220 \cdot 1000}{30 \cdot 5000 \cdot 0,85 \cdot 0,35} \quad [\text{mm}^3/\text{isku}]$$

$$GH = 369 \text{ mm}^3/\text{isku}$$

Kun tarvittava kertasyöttöannos on laskettu, sen jälkeen voidaan laskea tarvittavan elementin halkaisija, jolla tarvittava syöttöannos saadaan. Syöttömäärään vaikuttaa myös elementtimännän tehollinen iskunpituus. Tehollinen iskunpituus on useimmiten noin 8–10 mm, mutta usein 8–10 mm:n elementtimännän nosto saavutetaan pumpunakselilta asteina mitattuna kulmana, joka on suurempi kuin 35°. Tällöin ruiskutusaika olisi niin pitkä, että moottorin hyötysuhde laskisi todella paljon ruiskutustapahtuman aikana. Ruiskutuselementin halkaisijan täytyy olla niin suuri, että haluttu ruiskutusmäärä saavutetaan elementinnostolla, joka on pienempi kuin 6 mm.

Suoraruiskutteisissa dieselmootoreissa maksimiruiskutuksen kesto on kampiakselin asteina mitattuna noin  $40^\circ$ . Jos ruiskutuksen kestoja jatketaan pidempään, moottorin hyötysuhde alkaa laskea rajusti, koska ruiskutettava polttoainesumu ei suuntaudu enää männän palotilaan, vaan männän päälle kohti sylinterin seinämää. Tällöin palaminen ei enää tapahdu pelkästään männän palotilassa, vaan myös männän päällä.

Koska halutun ruiskutusajan kampiakselin asteina mitattuna on pysyttävä pienempänä kuin  $40^\circ$ , ruiskutuspumpun nokan suunnittelussa täytyy huomioida, että tarvittava ruiskutusmäärä saavutetaan tavoitellussa ajassa. Koska nelitahtimoottorin toiminnan kannalta ruiskutuslaitteiston pyörintänopeus täytyy olla puolet kampiakselin pyörintänopeudesta, ruiskutuspumpun on kyettävä suoriutumaan ruiskutus tapahtumasta alle  $20^\circ$ :ssa ruiskutuspumpun akselilta mitattuna.

Kun moottorin pyörintänopeus ja tavoiteltava ruiskutusaika kampiakselin asteina tiedetään, pystytään laskemaan myös aika, joka ruiskutukseen kuluu. Tämä aika on tarpeellinen tieto, kun lasketaan ruiskutuspumpulta vaadittua ruiskutuspainetta.

Aiemmin esitetyn ruiskutusmäärän laskentakaavan avulla ruiskutuksen kertasyöttö-annoksen suuruudeksi saatiin  $369 \text{ mm}^3/\text{isku}$ . Koska moottorin hyötysuhde laskee moottorin kierrosnopeuden kasvaessa, tarvittava kertasyöttöannos oletetaan suuremmaksi kuin laskukaavan antama tulos. Tässä tapauksessa kertasyöttöannokseksi oletetaan  $431 \text{ mm}^3/\text{isku}$ . Ruiskutuspaineen laskentaan tarvitaan ruiskutussuuttimen reikäkoon lisäksi aika, jossa ruiskutus tapahtuu.

#### **4.2.1 Ruiskutusajan laskenta**

Ruiskutusaika kampiakselin asteina on selvitetty, mutta astelukuna olevan ruiskutusajan käyttöä ei pystytä suoraan käyttämään ruiskutuspaineen laskemiseksi.

Ruiskutusajan laskentaan tarvittavia lähtöarvoja ovat kampiakselin pyörintänopeus ja ruiskutusaika kampiakselin asteina.

Kun kampiakselin pyörintänopeuden arvo tunnetaan, kuten myös ruiskutukseen käytettävä kampiakselin pyörähdyksen asteluku, asteluku saadaan muutettua ajallisesti mitattavaksi yksiköksi kaavan 2 avulla.

$$T = \left( \frac{1}{\eta} * 1000 \right) * \frac{1}{360} * Ra, \quad (2)$$

jossa

T= Aika

$\eta$  = Pyörintänopeus

Ra= Haluttu ruiskutusaika

Kaavaan 2 sijoitus

$$T = \left( \frac{1}{5000} * 1000 \right) * \frac{1}{360} * 40^\circ$$

Kaavan avulla selviää, että kampiakselin 40°:n pyörähdykseen kuluu 1,3 ms, kun moottorin pyörintänopeus on 5000 rpm.

#### 4.2.2 Ruiskutuselementin valinta

Ruiskutuspumpun nokka-akseli on valmistettu ja se kykenee nostamaan ruiskutuselementtiä 6,7 mm, kun ruiskutuspumpun akselia käännetään 20°. Tästä 6,7 mm:stä menee elementin täytösreiän ohittamiseen noin 3 mm, eli hyötyiskuksi tulee 3,7 mm/20°.

Seuraavaksi vertaillaan, minkäkokoisella elementillä tarvittava ruiskutusmäärä saadaan ruiskutettua aiemmin lasketussa ajassa. Taulukosta 3 ilmenee, että halutun 430 mm<sup>3</sup>/isku syöttömäärän saavuttamiseksi riittää 13 mm ruiskutuselementti.

Taulukko 3. Ruiskutusmäärät 3,7 mm hyötyiskulla

Elementin halkaisija [mm]	Ruiskutusmäärä [mm <sup>3</sup> ]
12	418,248
13	490,8605
14	569,282
15	653,5125

### 4.2.3 Ruiskutuspaineen laskenta

Ruiskutuspaineen laskenta on tarpeellinen kahdesta eri syystä. Ensimmäinen syy on selvittää ruiskutuspaineen synnyttämä vetojännitys ruiskutuspumpun runkoon, erityisesti sylinteriryhmän kohdalla, jossa pinta-ala tulee oletettavasti olemaan pienin.

Toinen syy ruiskutuspaineen laskentaan johtuu tarpeesta selvittää, riittääkö arvion perusteella valmistetuissa ruikutussuutinkärjissä virtauspoikkipinta-ala. Suutinkärjet, jotka valmistettiin tulevaa ruiskutuspumppua varten, ovat monireikäiset P-tyyppiset suutinkärjet. Suutinkärkien reikäkoko on 0,60 mm ja reikien lukumäärä on viisi, jolloin virtaus poikkipinta-alaksi muodostuu 9,42 mm<sup>2</sup>.

Kaavassa 3 lasketaan kuinka suureksi ruiskutuspaine muodostuu.

$$Ruiskutuspaine = \frac{q \cdot Q \cdot Q}{2 \cdot Ad \cdot Ad}, \quad (3)$$

jossa

$q$  = Polttoaineen tiheys

$d$  = Virtauspoikkipinta-ala

$Q$  = Polttoaineen kertasyöttöannos

Sijoitus kaavaan 3.

$$Ruiskutuspaine = \frac{0,85 \cdot 431 \cdot 431}{2 \cdot 9,4 \cdot 9,4}$$

Ruiskutuspaine= 893 bar

Taulukko 4. Ruiskutuspaineen laskenta.

Ruiskutuspaineen laskenta	
Ad [mm <sup>2</sup> ]	9,4
q [g/cm <sup>3</sup> ]	0,85
Q [mm <sup>3</sup> /isku]	431,37
Ruiskutuspaine [bar]	895,0313187

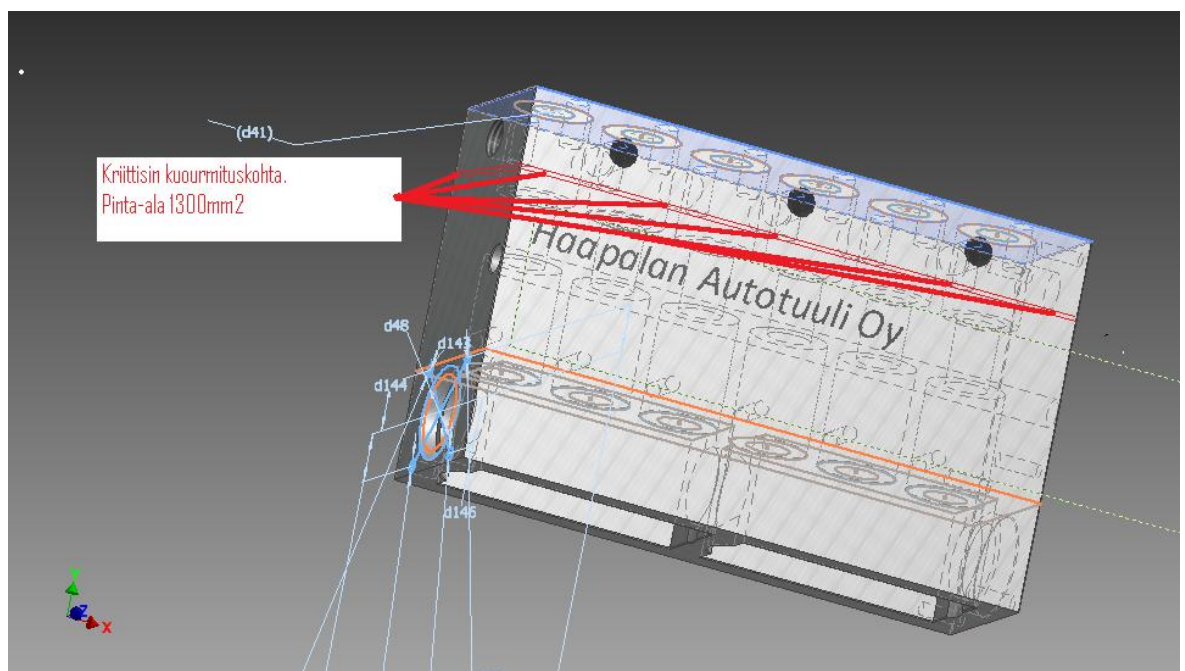


Kokemusperäisen tiedon avulla valitut suutinkärjet vaikuttavat erityisen sopivilta tämän kaltaiselle ruiskutusajalle sekä ruiskutusmäärälle. Sopivuus varmistui taulukon 4 avulla. Jos reikien pinta-ala olisi liian pieni, ruiskutuspaine nousisi liian korkeaksi.

### 4.3 Lujuuslaskenta

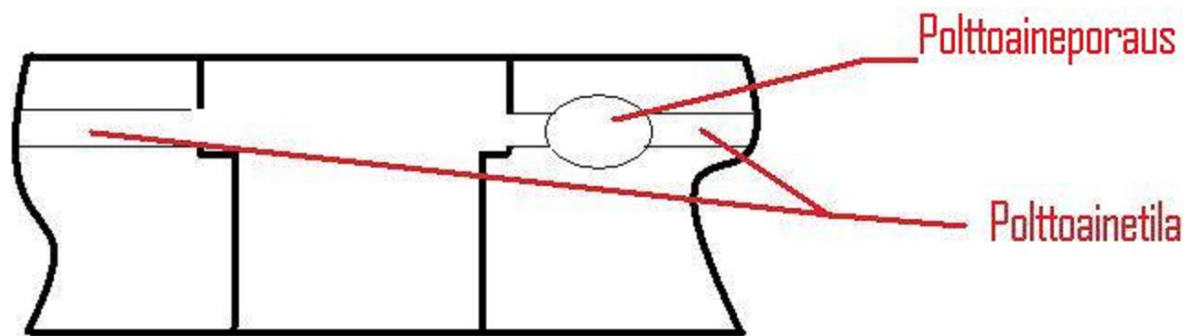
Ruiskutuspaineen tuottaminen saa aikaan vetojännityksen ruiskutuspumpun sylinteriryhmään, aina käyttöakselin laakeripesistä ruiskutuselementin kiinnityspisteeseen asti. Ongelmaksi on muodostunut ruiskutuspumppujen halkeaminen juuri tältä kriittiseltä osalta, jossa polttoaineen porauskanava laskee poikkipinta-alaa.

Työssä laskettiin vähimmäispoikkipinta-ala, joka kestää noin 900 barin aiheuttaman vetojännityksen ruiskutuspumpun rungossa. Runkoon kohdistuu yhden elementin aiheuttama vetojännitys kerrallaan, koska ruiskutukset tapahtuvat aina yksi kerrallaan. Varmuudsluvuksi valittiin 1.5, koska ruiskutuspumppuun kohdistuu pelkän vedon lisäksi myös värinää ja nostimien palautusjouset aiheuttavat jatkuvan kuormituksen runkoon. Kuvio 9 osoittaa ruiskutuspumpun kriittisimmät kohdat kuormituksen kannalta.



Kuvio 9. Ruiskutuspumpun rungon kuormitetuin alue.

Mitoitusta varten pumppurunkoon tehtiin leikkaus, jolloin saatiin tarkasteltavaksi heikoimman elementin asennuskohta. Pumppurungon heikoin kohta on 2–5 elementtien asennuspaikat. Näiden elementtien asennuspaikalla on molemmin puolin polttoainetila sekä pumpun etupuolella olevat polttoaineporaukset. Nämä oleelliset poraukset heikentävät elementin kiinnitystä, koska elementtiä ympäröivä pinta-ala pienenee. Näin ollen heikoimman elementin ympäröivä pinta-ala on 2570 mm<sup>3</sup>.



Kuvio 10. Leikkaus pumppurungosta.

Tästä alasta (Kaava 4) laskettuna saadaan elementtiä ympäröivän kuormituksen määräksi 4,6 Mpa. Kuormitus on noin 15 kertaa sallittua kuormitusta pienempi, joten rungon yläosan pääteltiin kestävän.

$$\sigma F = \frac{F_{py}}{A_{kok}} \quad (4)$$

jossa,

$\sigma F$  = Jännitys

$F_{py}$  = Vetojännitys y-akselin suunnassa

$A_{kok}$  = Elementtiä ympäröivä pinta-ala

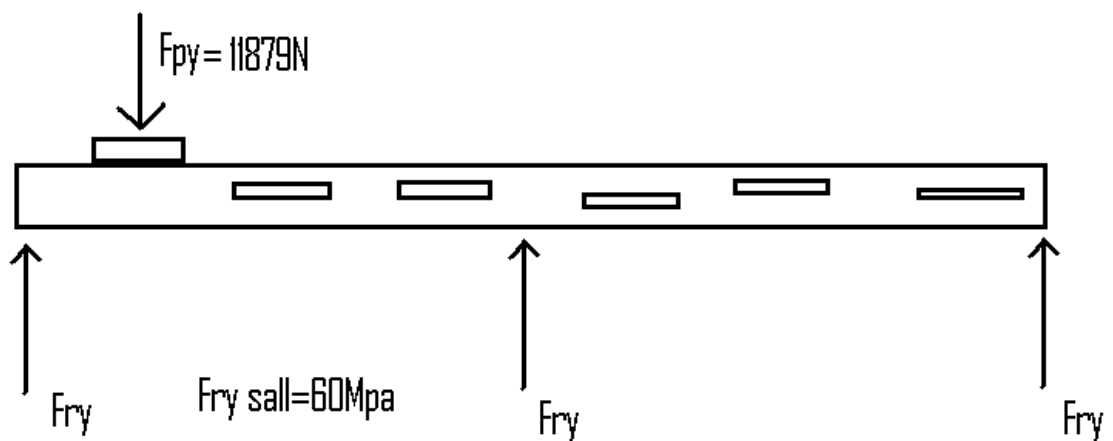
Taulukko 5. Ruiskutuspumpun kuormitus.

Pumpun runkoon kohdistuva voima [N]	11879,95562
sallittu kuorma [MPa]	70
Paine [MPa]	89,50313187
Pinta-ala (Ruiskutuselementin männän)	132,7322896
Ruiskutuspumpun heikoimman kohdan pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	2570
Voiman aikaansaama vetojännitys [MPa]	4,622550825

Voima, joka vaaditaan, että elementti saadaan tarpeeksi nopeasti ylös, kohdistuu myös pumppuakseliin, joka tukipisteensä avulla pysyy paikoillaan (Kuvio 11). Tämän tukipisteen kuormitus täytyy myös laskea, jolloin voidaan varmistua akselin päissä olevien laakeripesien ja akselin keskikohtaan tulevan tukipisteen kuormituksen jäävän alle sallitun.

Kohdissa Fry ovat akselin tukipisteet, kuorma  $F_{py}$  painaa akselia voimalla  $F$  tukipisteiden suuntaan, oletetaan voiman  $F$  jakautuvan akselille tasaisesti. (kuvio 11.)

Kohtien Fry yhteen laskettu pinta-ala on 1665,3 mm<sup>3</sup>.



Kuvio 11. Lujuuslaskennan yksinkertaistettu piirros pumpunakselista.

$$\sigma_F = F_{py} / A_{kok} \quad (4.)$$

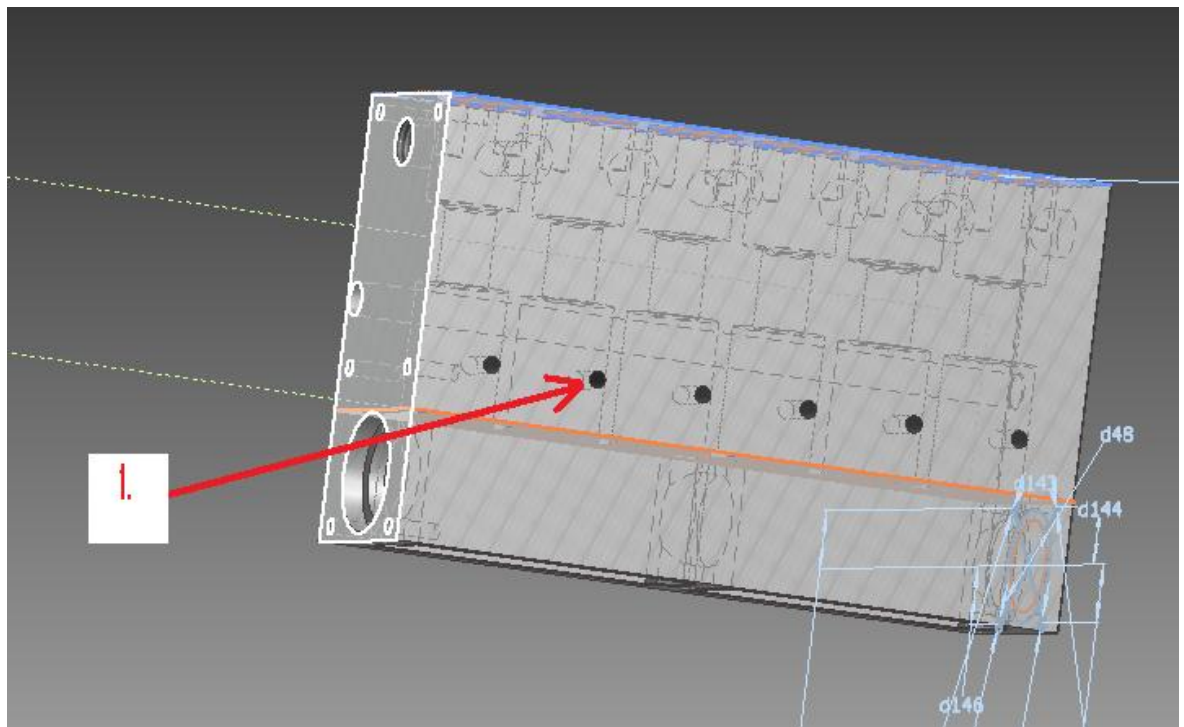
Kaavan avulla jännityksen arvoksi saatiin 7,1 Mpa, jolloin oletamme myös akselin tukipisteiden kestävän.

## 5 Erityisvaatimukset

Suunnitellussa ruiskutuspumpussa (LIITE 1) on erityisen vahva runko ja erityisesti huoltotyötä ajatellen valmistettu ruiskutuspumpun akselin irrotus. Ruiskutuspumpun huoltoa helpottamaan on suunniteltu paininkuppien pesiin reiät, joiden avulla ruiskutuspumpun akselin irrotus on entistä helpompaa.

### 5.1 Ruiskutuselementin paininpesät

Paininkuppien pesässä olevat reiät (Kuviossa 12 numero 1) on kierteytetty M8\*1,5 kierteellä. Normaalikäytössä paikalle asetetaan tulpat, mutta huoltotyössä painimet lukitaan yläasentoon, jolloin pumpun akselin irrotustyö on mahdollista. Painimen lukitus suoritetaan pultilla M8\*1,5.



Kuvio 12. Ruiskutuspumpun paininpesän lukitus.

## 5.2 Polttoainekanava

Pumppurungossa on kolme polttoainetilaan yhteydessä olevaa porausta, jotka on kierteytetty kierteellä M14\*1,5. Porauksia on kolme, joista kahta laitimmaista käytetään polttoaineen sisäänmenolinjana ja keskimmäinen on jäähdyttävän polttoaineen paluuporaus. Polttoainetilan tilavuus on 72 cm<sup>3</sup>, joka varmistaa elementin täytöksen.

## 5.3 Ruiskutuspumpun pohja

Ruiskutuspumpun pohjalevy (LIITE 2) on kiinnitetty kymmenellä kartiokeskityskanalla olevalla ruuvilla M6\*1,25. Ruiskutuspumpun pohja on irrotettavissa huollon ajaksi, ja jo edellä mainittu pumpun akselin irrotus on pumpun pohjalevyn vuoksi erityisen helppoa. Koska muiden valmistajien suunnittelemissa ruiskutuspumpuissa akseli vedetään läpi erittäin tarkkuutta vaativalla tavalla, joka on hidas ja keskituen paikoilleen asettaminen on epämiellyttävää. Tätä varten pumpun akselin kiinnitys suunniteltiin uudella tavalla, joka sallii akselin irrotuksen ja asennuksen ilman erikoistyökaluja. Pumpun akselin irrotuksen helppous perustuu pumpun pohjassa olevaan keskitukeen. Kun pohjalevy irrotetaan pumpusta, painimet täytyy olla lukittuina nokkiennoston määräämään yläasentoon. Pohjan irrotuksen vaikutuksesta akseli lepää ainoastaan ulommaisten laakereiden varassa ja koska painimet ovat lukittuina yläasentoon, mikään ei kuormita akselia. Tässä vaiheessa akselin voi liu'uttaa takimmaisen laakerin läpi ja etummainen laakeri jää akseliin paikoilleen.

## 6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena ollut ruiskutuspumpun suunnitelma toteutui piirustuksien ja laskelmien osalta, käytännön toteutusta ei ole vielä tehty. Koska käytännön toteutus on vielä kesken, pumppua ei vielä ole päästy koeajamaan penkissä tai kohdemoottorissa, mutta odotukset ovat korkealla.

Piirustuksien ja laskelmien tekeminen olisi pitänyt aloittaa pari viikkoa aiemmin jolloin aikaa olisi jäänyt mieleen tuleville parannuksille. Eli lisääaikaa olisi erityisesti tarvittu kokemusten keräämiseen pumpun koeajon aikana ja sen jälkeen. Kerätyt tulokset olisivat täydentäneet hyvin tätä työtä. Myös koeajo kohdemoottorissa olisi ollut mielenkiintoinen suorittaa jo tämän työn aikana, sillä koeajo olisi parhaiten kertonut työn onnistumiset ja epäonnistumiset, sekä kuinka tarkasti tehotavoite savutetaan laskelmien perusteella.

Työn aikana ideoita tuli paljon lisää, ja varsinkin kun työtä katsoo jälkikäteen, tulee mieleen, että mitä olisi tehnyt toisin. Seuraavaan pumppuversioon muutoksia tul-  
laan varmasti tekemään.

Työn tekemisen aikana ilmeni, että tarvetta pumpuille on myös moottoreille, joiden kierrosluku on 3000 rpm. Suunnitellun pumpun soveltuvuus myös tällaisiin moottoreihin on hyvä, kunhan ruiskutuselementin halkaisija kasvatetaan 15–16 millimetriin. Vankkarakenteisen pumppu rungon ansioista tämä on mahdollista.

## LÄHDELUETTELO

Aqimwali. (1997). [www-dokumentti]. [viitattu 01. 03 2011]. Saatavana: <http://aqimwali.co>

Automotive technologi. (ei päiväystä). [www-dokumentti]. [viitattu 5.3.2011]. Saatavana: [http://rb-kwin.bosch.com/sk/pool/de/Diesel/Nfz/Einspritzung/Nfz\\_Reihenp.jpg](http://rb-kwin.bosch.com/sk/pool/de/Diesel/Nfz/Einspritzung/Nfz_Reihenp.jpg)

Robert Bosch GmbH. 2002. Autoteknillinen käsikirja. Robert Bosch.

cdxetextbook. (ei päiväystä). [www-dokumentti]. [viitattu 6.3.2011]. Saatavana: <http://www.cdxetextbook.com/fuelSys/diesel/elec/heuidieselinject.html>

Delphi. (ei päiväystä). [www-dokumentti]. [viitattu 1.4.2011]. Saatavana: <http://am.delphi.com/products/parts/diesel-index/agricultural-industrial-and-marine-index/rotary-fuel-injection-pumps/>

Enter Price Engine. (ei päiväystä). [www-dokumentti]. [viitattu 4.6.2011]. Saatavana: [http://www.enterpriseengine.com/display\\_part/179.php](http://www.enterpriseengine.com/display_part/179.php)

J-H diesel. (ei päiväystä). [www-dokumentti]. [viitattu 6.3.2011]. Saatavana: <http://www.jhdiesel.com/cat3208.jpg>

Robert Bosch GmbH. (2010). Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. Robert Bosch.

## **LIITTEET**

LIITE 1. Ruiskutuspumpun piirustus

LIITE 2. Ruiskutuspumpun pohjan piirustus





**LIITE 2. Ruiskutuspumpun pohjan piirustus**

