

Sami Liikanen

Dieselmoottorin kunnon ja suorituskyvyn  
seuranta käyttämällä

mittalaitetta

Doctor DK-20

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Merenkulun koulutus



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Merenkulun ammattikorkeakoulututkinto, Insinööri
Tekijä/Tekijät	Sami Liikanen
Työn nimi	Dieselmoottorin kunnan ja suorituskyvyn seuranta käyttämällä mittalaitetta Doctor DK-20
Toimeksiantaja	Finnlines
Vuosi	2023
Sivut	26 sivua
Työn ohjaaja(t)	Joel Paananen

## TIIVISTELMÄ

Tutkimus käsittelee dieselmoottorin kunnan ja suorituskyvyn analysointia käyttäen Doctor-DK-20-analyysilaitetta. Tutkimuksessa on tarkoitus suorittaa mittaus kyseisellä laitteella Wärtsilä 46D -merimoottorista ja tältä pohjalta suorittaa mittaustulosten analysointi.

Työssä tutustutaan pv-diagrammiin ja nelitahtimoottorin yleisiin toimintaperiaatteisiin, jotta analysaattorin tuottamaa dataa olisi helpompi ymmärtää. Mittauksista saatuihin tuloksiin perehtymällä pyritään selvittämään moottorin kuntoa ja, että säädöt ovat oikeat, jotta moottori toimisi optimaalisella tasolla.

Tutkimuksen pääasiallisena ideana on perehtyä analysaattorin tuottamien kuvaajien tulkintaan sekä siihen, kuinka niistä pystyisi löytämään poikkeamia, jotka aiheutuvat mekaanisista vioista. Työ ei tarjoa absoluuttisia vastauksia, vaan se esittelee esimerkkejä siitä, miltä moottorin komponentin vikaantuminen voi näyttää kuvaajassa.

**Asiasanat:** analysointi, huolto, mittaus

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Sami Liikanen
Thesis title	Monitoring of the condition and performance of a diesel engine using measuring instrument Doctor DK-20
Commissioned by	Finnlines
Time	2023
Pages	26 pages
Supervisor	Joel Paananen

## ABSTRACT

The aim of the study was to perform measurements using the Doctor-20 diesel engine measuring instrument on the Wärtsilä 46D marine engine and subsequently analyse the results. The main purpose of the study was to determine how easily and reliably the results of the analysis could be used in maintenance planning.

Conducting practical measurements requires constant conditions in the powertrain, which can be challenging due to changing weather conditions and power fluctuations caused by steering the vessel.

The results of the analysis were compared to the condition of the engine components, with the aim of finding similarities between the analysis results and the different components service hours.

The results of the thesis made it clear that, due to the specific operational area of the vessel, it was not always possible to create similar measuring conditions. Despite this, it was still possible to interpret the measurements if a certain component of the machine did not function as intended. Continuous real-time measurements in challenging operational areas where achieving a consistent machine load was difficult would enable more effective utilization of peak pressure measurements.

**Keywords:** analysis, maintenance, measuring

## SISÄLLYS

TERMISTÖ.....	5
1 JOHDANTO .....	6
2 PV-DIAGRAMMI.....	7
2.1 Nelitahtimoottorin työkierto .....	7
3 HUIPPUPAINEANALYSAATTORI.....	9
4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -TAVOITE .....	10
5 DK-20-ANALYSAATTORIN KÄYTTÖ LAIVALLA .....	11
6 TEHOKUVAAJAN HYÖTY .....	12
6.1 Tehokaavion ymmärtämisestä saatavat edut.....	12
6.2 Palamisprosessiin vaikuttavat komponentit .....	13
7 PALOTAPAHTUMAN KUVAAJA .....	15
7.1 Huippupaine kuvaaja .....	15
7.1.1 Huippupaine kuva lisättynä sytytyshetkikäyrällä.....	17
7.1.2 Kuvaaja moottorin toiminnasta.....	18
7.1.3 Tehokäyrä .....	19
8 ONGELMAT MOOTTORISSA .....	20
8.1 Polttoainesuutin .....	20
8.2 Polttoainepumppu .....	21
8.3 Vuotava pakoventtiili.....	22
9 YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	25

## Termistö

**MIP** (baaria) Mean indicated pressure tarkoittaa keskimääräistä painetta, jonka polttoaine tuottaa sylinterissä palaessaan. Tämä arvo huomio mekaaniset häviöt.

**BHP** (kW) Koneesta dynometrissä saatu teho, joka mitataan koneen voiman ulostulosta. Tämä arvo ei sisällä mekaanisia häviöitä eikä sitä mitata potkuriakselilta.

**kw-ind** (kW) Indikoitu teho eli mekaaniset häviöt on otettu huomioon. Tämä teho muodostuu, kun polttoaineen sisältämästä energiasta noin 40–50 % käytetään voiman tuottamiseen ja lopusta polttoaineesta muodostuu lämpöä.

**PMAX** (baari) Tunnetaan myös huippupaineena ja kertoo maksimipaineen arvon.

**PCOMP** (baari) Painearvo ennen sytytystä tai yläkuolokohtaa, jolloin polttoaine ja ilma seos on valmiiksi sekoittuneena ja valmiina sytytettäväksi. Jos arvossa on vaihtelua ennen sytytyskohtaa niin viittaa siihen, että vika olisi polttoainekomponenteissa.

**Firing** (astetta kampiakselilla) kertoo sytytysajankohdan.

**HI-LO** Kaikkien sylintereiden keskiarvon korkeimman ja matalimman arvon erotus.

**MCR** ind (kW) Maximum continuous rating indicated on moottorin korkein jatkuvasti tuotettava teho. Voi myös kutsua maksimikäyttötehoksi. Indikoituna arvona siihen on tehty noin 8–9 % vähennys.

**TDC** (astetta kampiakselilla) tarkoittaa kohtaa, jolloin mäntä on korkeimmassa kohdassa liikeradallaan. Kutsutaan myös yläkuolokohdaksi.

**BDC** Männän alin asema männän liikeradalla. Kutsutaan myös alakuolokohdaksi.

# 1 JOHDANTO

Merimoottorien kunnan seuranta tapahtuu seuraamalla konevalvonnan esittämiä mittausrvoja ja myös huoltojen yhteydessä osien kunto kertoo, kuinka hyvin osat ovat kestäneet huoltovälin. Jos osissa on poikkeuksellisen paljon kulumaa, silloin on syytä epäillä, että jokin moottorin osa-alue ei ole kunnossa. Ovatko toleranssit liian suuret, onko voiteluaineen kierrossa poikkeavuuksia, tapahtuuko käyntilämpötilassa liian suurta heittelyä vai onko moottorin säädöissä korjattavaa. Moottorin säädöt koskevat venttiilikoneistoa ja ajoituksen säätöä.

Moottorin kuntoa voi myös seurata konevalvonnan lisäksi erikseen tehtävillä moottorianalysointimittauksilla. Mittauksista saadaan tietoa juuri näistä moottorin säädöistä ja myös osviittaa polttoainepuolen osien kunnosta. Konevalvontajärjestelmästä saatavat parametrit, jotka koskevat polttoainejärjestelmän toimintaa, ovat todella rajalliset. Ne rajoittuvat lähinnä pakokaasun lämpötilaan, josta voidaan päätellä, onko polttoaineen syötössä ongelmia. Tässä tapauksessa ongelmana ovat rikkoontunut polttoainesuutin tai polttoainepumppu.

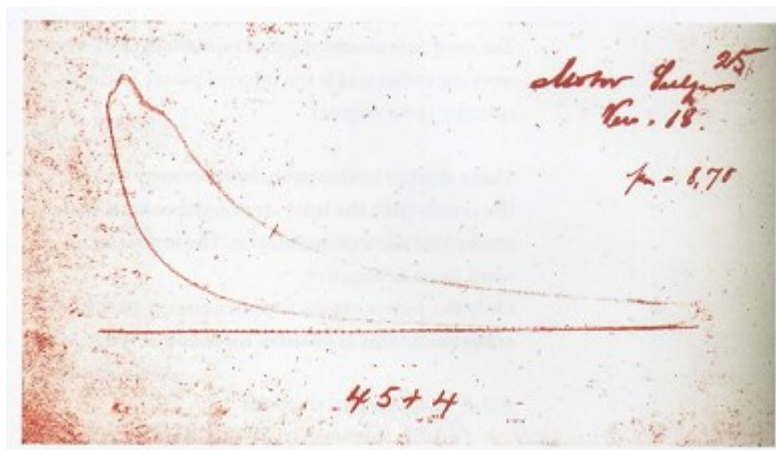
Koneen omaa mittauskapasiteettia on hankala lisätä, joten analysointilaitteilla säännöllisesti suoritettavat mittaukset auttavat huomaamaan poikkeavuudet ennalta. Tällöin voitaisiin välttyä ennakoimattomilta koneen pysähdyksiltä ainakin hieman paremmin. Teknisiä ongelmia tulee aina ilmenemään, vaikka seurantalaitteet mittaisivat reaaliaikaisesti koneen arvoja, koska ongelmista on mittaustapojen ulkopuolella.

Tämä työ käsittelee DK-20-analyysilaitteen tuottaman mittaustuloksen tulkintaa. Huippupainetestausta on PMS-huoltojärjestelmän mukainen työ, joka suoritetaan kuukausittain. Opinnäytetyössä pyrin perehtymään mittaustuloksiin ja niiden tulkintaan. Mittauksista saatavat tulokset olisivat hyödyllistä saada tehokkaampaan käyttöön. Tulosten oikeanlainen tulkinta auttaa saamaan merimoottorin toimimaan optimaalisella tasolla ja samalla tuo polttoainesäästöä. Opinnäytetyössä keskityn vain huippupainetta ja ajoitusta koskevaan tehokkaisuuteen.

Mittaukset on suoritettu M/S Finnlady -aluksella, jossa on neljä kappaletta yhdeksän sylinteristä Wärtsilä 46 D -pääkonetta. Mittaukset on suoritettu ainoastaan edellä mainituista pääkoneista. Mittausajankohta on normaalin mittaus-  
syklin mukainen. Mittaus suoritetaan yhden kerran kuussa. Varsinaista mit-  
tauksen toteuttamista en käy opinnäytetyössä läpi, koska sen suorittamiseen  
tarvittavat ohjeet löytyvät laitteiston ohjekirjasta. Kaikki kuvaajat ovat oikeita  
mittauksia, mutta osa niistä on toisista aluksista ja toimivat esimerkkinä.

## 2 PV-DIAGRAMMI

Jotta tiedetään, että dieselmoottori toimii optimaalisesti, tarvitaan paine-tilavuus-diagrammia, joka tunnetaan lyhyesti pv-diagrammina. Tällä diagrammilla havainnollistetaan moottorin sylinterissä tapahtuvaa paineen ja tilavuuden muutosta, ja se antaa tietoa sylinterin huippupaineesta. Alun perin huippupainetta mitattiin manuaalisella huippupainemittarilla, joka piirsi paperille huippupainediagrammin, jota kutsutaan myös leikkisästi banaanikuvaajaksi. (Kuiken 2012a, 51.)

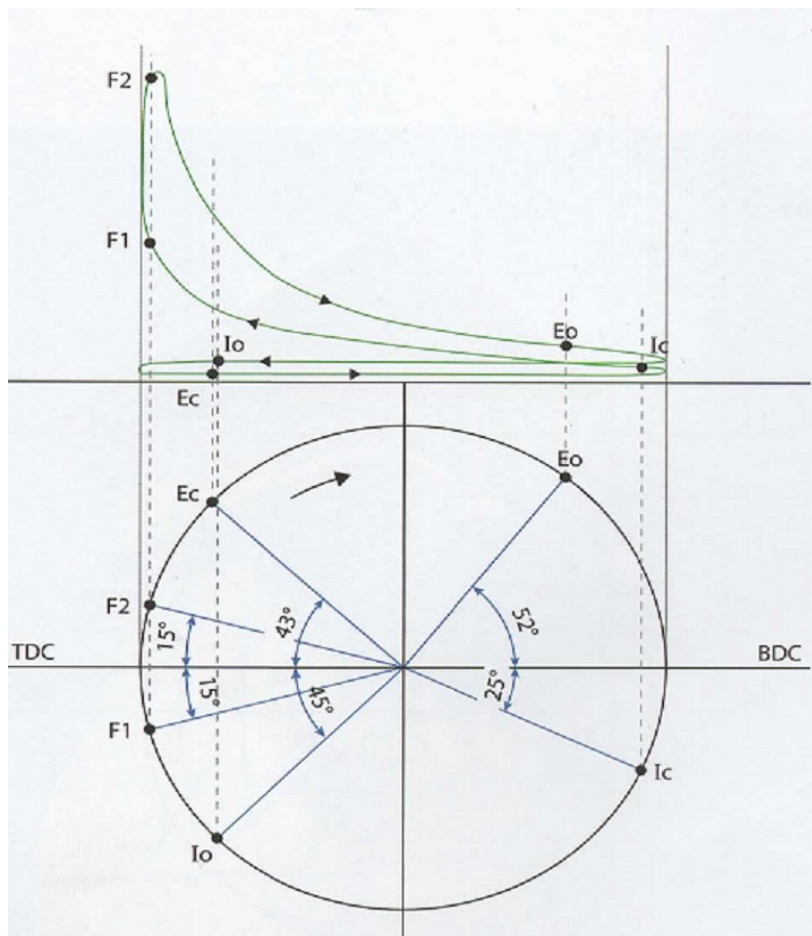


Kuva 1. Rudolf Dieselin pv-diagrammi (Kuiken 2012a, 51)

### 2.1 Nelitahtimoottorin työkierto

Se viittaa nelitahtiseen moottoriin ja sen työkiertoon, joka on neljästä vaiheesta koostuva sykli ja tapahtuu moottorissa. Tämä sykli koostuu imutahtivaiheesta, puristustahtivaiheesta, voimantuottovaiheesta ja huuhtelutahdistista. Oletetaan, että mäntä on alakuolokohdassa (AKK) ja aloittaa ylöspäin suuntaavaan liikkeensä. Siinä vaiheessa, kun imuventtiilit sulkeutuvat, sylinterissä

oleva paine alkaa kasvaa. Lähtötilanteessa paine on noin 2,5 baaria, joka on pakokaasuauhtimen tuottama paine. Paine kasvaa noin 150 baariin asti siihen kohtaan, jossa mäntä on noin  $15^\circ$  ennen yläkuoloa (YKK). Lämpötila sylinterissä kasvaa  $50^\circ\text{C}$ :sta  $750^\circ\text{C}$ :een, ja näistä  $50^\circ\text{C}$  on ahtoilman tulolämpötila. Kun mäntä saavuttaa yläkuoloa, erittäin hieno polttoainesumu ruiskutetaan sylinteriin ja ilma-polttoaineseos syttyy. Tämä tapahtuu  $2-7^\circ$  ennen yläkuoloa (Woodyard 2009, 8). Palotapahtuman aikana sylinterin paine nousee noin 200 baariin ja lämpötila nousee  $1600^\circ\text{C}$ :een. Tästä alkan työtahdin aikana sylinterin paine laskee noin kuuteen baariin, minkä jälkeen pakoventtiilit aukeavat ja sylinterissä olevan kaasun lämpötila on noin  $700^\circ\text{C}$ . Pakoventtiilien avauduttua on pakokanavassa noin kahden baarin paine ja palokaasujen lämpötila noin  $450^\circ\text{C}$ . Kolme männän tekemästä työvaiheesta kuluttavat energiaa, ne ovat: imutahti, puristustahti ja pakotahti. Ainoastaan työtahti tuottaa positiivista energiaa kambiakselille. (Kuiken 2012, 51–52.)



Kuva 2. pv kuvaaja ja kampikulmat (Kuiken 2012a, 51)

Kuvassa 2 on esitetty männän asema eri työkierron vaiheissa ja vierellä on myös pv-diagrammi, josta selviää paineen ja tilavuuden muutos eri työkierto- vaiheissa. Kuvassa olevien kirjainlyhenteiden merkitykset ovat:

Ic imuventtiili menee kiinni, jolloin sylinterinpaine alkaa kasvamaan, kohdassa F1 polttoaine ruiskutetaan sylinteriin ja F2 alkaa työtahti. Eo-kohdassa pako-venttiili aukeaa ja sulkeutuu kohdassa Ec, kun pakotahti tulee päätökseen. Imutahdin aikana lo imuventtiili aukeaa ja sulkeutuu Ic kun sylinteri on saatu täytettyä ilmalla. (Kuiken 2012, 51.)

### 3 HUIPPUPAINEANALYSAATTORI

Huippupaineanalysaattorit ovat tärkeä osa moottorin kunnossapitoa. Huippu- paineanalysaattorit perustuvat yleensä korkeapaine-erotukseen, joka syntyy kahden eripaineisen alueen välillä. DK-20-mittari perustuu palamistapahtuman tuottaman paineen johtamiseen kaksiportaiseen venttiiliin. Laitteessa on läm- pötilankompensointi, joka kompensoi lämpötilan vaikutukset mittaustuloksiin.



Kuva 3. DK-20-analysaattori. Oma kuva

Analysaattorin käyttö laivaolosuhteissa on käytännössä erittäin helppoa. Itse laitteen kytkentä moottoriin on helppo suorittaa. Painetta mittaava anturi kytketään moottorin indikointihanaan ja triggerianturi vauhtipyörään tehtyyn telineeseen. Tietenkin tämä vaati aluksi hieman järjestelyjä, kuten vauhtipyörän anturin paikan tekemisen ja merkkäämällä vauhtipyörään metallisella tapilla vauhtipyörän nollakohdan.

#### **4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -TAVOITE**

Tutkielman tavoite on helpottaa huippupaineanalysaattorin tuottaman datan tulkintaa. Joillekin laitteen tuottama graafinen ja numeerinen tieto on helpompi ymmärtää kuin toisille. Itse olen huomannut, että tulkinnassa on eroja siinä, miten kuvaajia tulkitaan. Tutkimuksessani olen työskennellyt yhdessä mittauksia tekevän henkilön kanssa ja pyrkinyt ymmärtämään kuvaajien tulkintaa siitä, mikä on merkittävää ja mikä johtuu mittauksen häiriöistä. Palotapahtumasta johtuva mittausvirhe, joka näkyy mittaustuloksessa, johtuu vanhentuneesta tekniikasta. Tämä laite on kuitenkin harvan laivayhtiön päivityslistalla ensimmäisenä.

Toinen tavoite on tutkia laitteiston tehokasta käyttöä. Alus, jossa mittaukset tehtiin, liikennöi suhteellisen vilkkaalla liikennöintialueella, joten optimaalisten tehojen ylläpitäminen mittauksen aikana on vaikeaa. Tässä tullaankin kysymykseen, milloin pystytään varmasti tulkitsemaan palotapahtuman tuottamien painearvojen perusteella, että kyseessä on ongelma.

Laitteiston tuottaman datan hyödyntäminen paremmin lähti siitä, kun ymmärsin sen itse hieman paremmin. Kun vaihdetaan esimerkiksi polttoainepumppu, tarkastetaan ajoitus mittaamalla ja vertaamalla sitä arvoon, joka on ilmoitettu polttoainepumpun rungossa. Vaikka ajoitus tarkistetaan ja todetaan vastaavaksi kuin pumppussa, niin silti välillä tulee vastaan mittauksissa, että ajoitus ei ole kohdillaan. Mittauksella on myös helppo tarkistaa, onko ajoituksen säätö onnistunut.

## 5 DK-20-ANALYSAATTORIN KÄYTTÖ LAIVALLA

Tutkimus rajautuu käsittelemään ainoastaan huippupainemittausta. Huuhteluilman riittämättömyys sekä sen erilainen jakautuminen johtuen imukanavan rakenteesta tietenkin vaikuttaa palotapahtumaan, mutta tässä tapauksessa en sitä käsittele. Yleensä esimerkiksi välijäähdyttimen kuntoa seurataan paineromittarilla ja turboahtimen kunnan seuranta rajoittuu turboahtimen paineentoton seuraamiseen ja lämpötilojen seurantaan.

Haasteina tutkimuksen tekemisessä oli saada joka mittauskerralla vertailukelpoinen tulos. Tämä on osittain sitä, mitä tässä tutkimuksessa haen: kuinka erilaiset mittausolosuhteet tulee ottaa huomioon tulkinnassa. Kun keskustelin mittauksia tekevän yrityksen edustajan ja pitkän uran mittauksien parissa työskennelleen henkilön kanssa, tuli aina ilmi, kuinka paljon tulkinta vaatii tässä tapauksessa kokemusta. Itse mittauksen suorittaminen ei ole erikoinen prosessi, mutta tulosten tulkinta on hieman monisyisempiä. Omasta mielestäni tämä tuo laitteen tulosten hyödyntämiseen pienen miinuspuolen. Jos henkilökunta, joka suorittaa mittauksia, ei pysty jokaisella mittauskerralla varmasti toteamaan poikkeavuuden aiheuttajaa, se vähentää motivaatiota analysaattorin hyödyntämiseen.

Mittauksen suorittaminen ja niistä saatava tieto ovat kuitenkin erittäin hyödyllisiä koneen optimaalisen toiminnan kannalta. Myös säästö, jonka saa polttoaineen kulutuksen laskun seurauksena, on merkittävä. Tietenkin säästöjen saaminen vaatii yleensä joko uusia osia tai ylimääräistä huoltoa, joka toisaalla verottaa jo nyt varsin rajallista henkilöstöä.

Pitkäaikainen koneen kunnan seuranta on siltikin hyödyllistä, koska kun tunti-perusteinen huolto on ajankohtainen, samalla voi mittauksien perusteella tehdä säädöt esimerkiksi ajoitukseen. Tätä ei välttämättä tulisi tehtyä, jos tällaista dataa ei olisi.

## 6 TEHOKUVAAJAN HYÖTY

Moottorissa on useita palotapahtumaan vaikuttavia komponentteja, jotka tarvitsevat säännöllistä huoltoa. Suurin osa kaikista ennakoimattomista moottori-huolloista johtuu joko polttoainepumpusta tai polttoainesuuttimista. Tehokaavioiden avulla voidaan ennakoida tulevia ongelmatilanteita ja suorittaa huollot, ennen kuin syntyy häiriötilanne.

Siksi tehokaavioiden avulla voidaan seurata sellaisten komponenttien oletettua kuntoa, joissa todennäköisimmin esiintyy ennenaikaista vikaantumista ennen huoltotuntien täyttymistä. Tässä kyseisessä aluksessa on PMS (Planned Maintenance Service) -huolto-ohjelma, joka perustuu käyntitunteihin, mutta tällaisella osien toimintaa seuraavalla mittauksella ja yhdistämällä se automaation antamaan dataan voitaisiin myös harkita CBS (Condition Based Service) -huolto-ohjelmaa.

### 6.1 Tehokaavion ymmärtämisestä saatavat edut

Tehokaaviot kertovat, onko tiettyjen komponenttien tila tyydyttävä vai ei. Tehokaaviot näyttävät graafisen tulkinnan avulla huomattavasti enemmän tietoa kuin pelkkä huippupainemittaus. Tehokaaviot käsittelevät vain palamisprosessin komponentteja. Tehokas palaminen jokaisessa sylinterissä on välttämättömyyksiä. Tämä johtaa tasapainoiseen suorituskykyyn, ja siten optimaalinen moottorin toiminta saavutetaan.

Saatavat edut ovat:

- Polttoaineensäästö
- Pakokaasupäästöjen pienentyminen
- Tarkan moottorin tuottaman tehon mittaaminen, joka on hyödyllinen verrattaessa potkuriakselilta saatavaan tehon arvoon, koska saadaan selville, kuinka suurella polttoaineen kulutuksella saavutetaan tuo potkuriakselilta mitattava teho. Mekaanisten häviöiden osuus selviää, kun pystytään mittaamaan, kuinka hyvin moottori tuottaa tehoa verrattuna siihen, kuinka lähellä ollaan moottorin tehodarvoja ja vertaamalla potkuriakselilta mitattua tehoa.

- Kun huomataan, että polttoaineen kulutus on kasvanut, voidaan tehokaavioista todeta, johtuuko kulutuksen kasvu jonkin moottorin komponentin vioittumisesta. Jos näin ei ole ja muualtakaan polttoainejärjestelmästä ei löydy vika kohteita, kulutuksen nousu voi johtua kasvuston muodostumisesta laivan runkoon, mikä haittaa kulkua. Tämä kulunvastus voi selittää sen, miksi mittaustulokset ovat lähellä haluttuja arvoja, mutta haluttua matkavauhtia ei saavuteta. Mittaukset suoritetaan vertailukelpoisissa olosuhteissa ja samanlaisilla tehoarvoilla.
- Karstoittumisen estäminen, koska voidaan seurata polttoainesuuttimen ja polttoainepumpun oikeanlaista toimintaa tehokaaviosta. Karstoittuminen voi aiheuttaa huomattavia ongelmia. Se aiheuttaa ylimääräistä kulumaa ja eristää, joten lämmönsiirtyminen on hitaampaa kuin suunniteltu, jolloin osat kärsivät liiallisesta termisestä rasituksesta. Karsta on palamatonta polttoainetta, joten siinä on myös kulutukseen vaikuttava aspekti.

## **6.2 Palamisprosessiin vaikuttavat komponentit**

Palamisprosessi sisältää alla olevat komponentit, joissa vikoja ilmenee:

1. Polttoaineventtiili, jossa kaksi osaa: suutin ja jousi. Kuluneet reiät suuttimessa aiheuttavat epätasaisen polttoainesumun. Jousijännitys heikkenee ja aiheuttaa aikaista "tippumista" ja epätasaista polttoainesumua, joka taas lisää karstan muodostumista ja vähentää kyseisen sylinterin tehoa.
2. Polttoainepumppu, jossa kaksi osaa: mäntä ja pumpun elementti. Mäntään voi kehittyä kulumaa ja korroosiota.
3. Nokka-akseli voi olla kulunut tai vaurioitunut, mutta vaikutus polttoainepumpun toimintaan ei ole niin merkittävä. Nostajan rullan jumittuminen aiheuttaa yleensä enemmän ongelmia, koska nostaja ei seuraa nokanmuotoja.
4. Mäntä, männäntoppi voi halkeilla/reikäytyä. Männän helma voi halkeilla, mikä on harvinaista.

5. Sylinteriputki tarkistetaan säännöllisesti fyysisillä mittauksilla. Se voi halkeilla, jolloin jäähdytysvettä pääsee palotilaan.
6. Männänrenkaat: Normaali kuluminen on yleistä, mutta harvinaista on kuitenkin männänrenkaiden katkeaminen.
7. Pakoventtiilit: Niissä voi esiintyä ohivirtausta, kun syöpyminen syvenee reiäksi pakoventtiin tiivistepinnalla, jolloin tiivistepinnan jatkuvuus katkeaa. Pitting johtuu korkean lämpötilan korroosiosta (Grote ym. 2008, 151). 400 °C:ssa polttoaineen natrium, vanadiini ja rikki yhdistyvät syövyttäväksi kemialliseksi yhdisteeksi. Edes venttiin nimonic-seos ei estä tätä. Myös venttiin runsas karstoittuminen heikentää pakokaasun poistumista. Pahimmassa tapauksessa karstaa voi olla niin paljon, että venttiili ei sulkeudu kunnolla.
8. Imuventtiilit yleensä ongelmattomia.
9. Sylinterikannessa kannentiiviste voi vuotaa, jolloin sylinterin paine karkeaa.
10. Turboahdin: Yleensä kompressoripuoli on ongelmaton, mutta turbiinipuolella runsas karstoittuminen voi häiritä ilmanvirtausta. Korkea lämpötila voi taas rasittaa suutinrengasta, mikä saattaa johtaa suutinrenkaan materiaalivaurioihin. Polttoaineen huono palaminen vaikuttaa merkittävästi tähän ilmiöön. Tietenkin turbiinipuolen säännöllisellä pesemisellä on vaikutus. Myös oheislaitteiden toimintahäiriöt voivat vaikuttaa ahtoilman määrään ja siten moottorin suorituskykyyn.
11. Välijäähdytin: Paine-eromittauksella seurataan välijäähdyttimen kuntoa. Välijäähdytin voi tukkeutua ja aiheuttaa sylintereiden epätasaista täyttöä. Sekä imuilman liian korkea lämpötila. (Man diesel 2010, 24.)

## 7 PALOTAPAHTUMAN KUVAAJA

Kuvaajasta saa nopean näkymän mittaustuloksesta sekä siitä, toimivatko sylinterit samalla tavalla ja ovatko ne keskenään tasapainossa. Kaikkien sylinterien ja paineen muutosastekäyrän yhtäaikainen näyttäminen kuvaajassa auttaa selvittämään ongelman syytä, kun näkee tarkemmin sytytysajankohdan.

Viivadiagrammista saadaan selville helposti, ovatko kaikki sylinterit tasapainossa ja lähellä optimaalisia käyntiarvoja. Tarkat arvot saadaan taulukosta. Ilman tällaista dataa moottoriin tehtävien muutosten havaitseminen tai koneen tehon optimointi on mahdotonta.

Teholukemien tulisi pysyä lähellä keskiarvoteholukemaa. Sylinterikohtaisessa tehossa käytetään indikoituja kilowatteja, jotka osoittavat polttoaineesta saatavan tehon sylinterissä mukaan lukien mekaaniset häviöt. Indikoitu teho on noin 13 % vähemmän kuin koneen akseliteho. Sylinterissä vain noin 40–50 % polttoaineen energiasta muuttuu liike-energiaksi, kun taas 50–70 % polttoaineen energiasta muuttuu lämmöksi. (Slight 2022.)

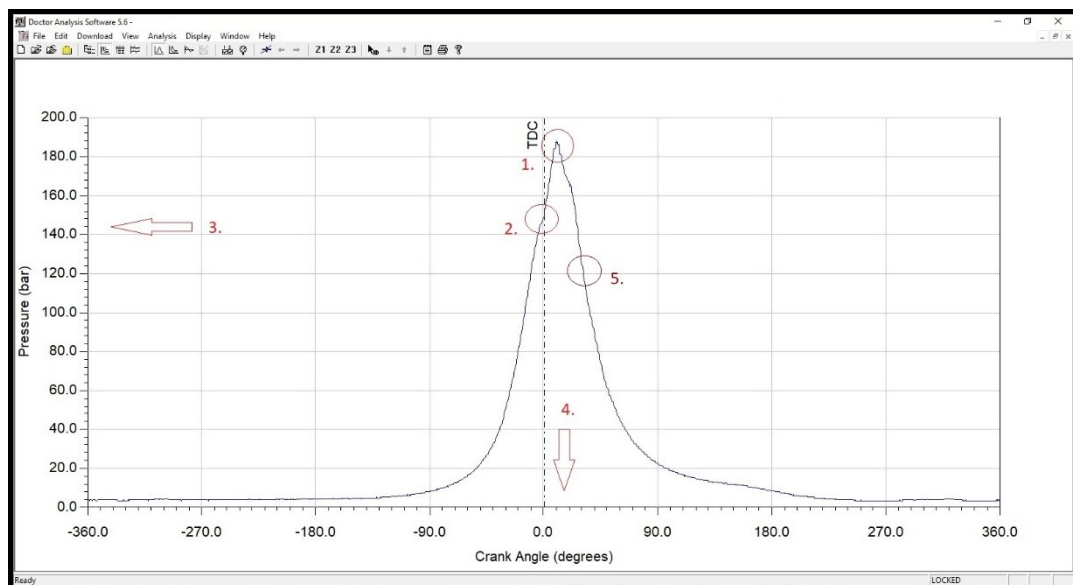
### 7.1 Huippupaine kuvaaja

Kuvaaja kertoo sylinterin huippupaineen ja ajankohdan. Tätä arvoa voi verrata aikaisempiin mittauksiin tai koeajopöytäkirjasta löytyviin arvoihin. Tämän voi myös mitata mekaanisella huippupainemittarilla. Tämä mittari kuitenkin kertoo vain sylinterin kokonaispaineen erittelemättä, mistä paine muodostuu, kun taas analysaattorilla saadaan huomattavasti enemmän tietoa, koska sieltä saadaan myös esimerkiksi MIP eli mean indicated pressure.

MIP kertoo, kuinka paljon polttoaineen palaminen tuottaa painetta palotilassa, ja on suoraan suhteessa sylinterin tehoon. Se mittaa siis polttoaineen ja ilman seoksen tuottaman paineen palotapahtumassa. Jos huippupaine on koeajopöytäkirjan mukainen, MIP voi kuitenkin olla korkeampi, jolloin sylinteri tuottaa enemmän tehoa kuin on suunniteltu ja siten kuluttaa enemmän polttoainetta. Eli palotapahtuman tuottama paine vie suuremman osuuden sylinterin puristuksesta johtuvasta paineen noususta.

Jos MIP on huomattavasti keskiarvoa alhaisempi, palotapahtuma ei ole oikeanlainen, ja polttoainetta esimerkiksi valuu sylinteriin suuttimen kautta eikä riittävää polttoainesumua muodostu. Tässä tapauksessa polttoaineen kulutus kasvaa turhaan. Huomattavaa on, että muutos keskiarvon molemmin puolin voi olla yli 12 %. Keskiarvona käytetään valmistajan ilmoittamaa sylinterikoh- taista tehontuottoa lähimpänä olevaa mittauservoa.

MIP seuraa tarkasti sylinterin tehoa, joten kaikkien sylinterien huippupaine- käyrien ollessa rinnakkain voidaan havaita poikkeamat sylinterien tehon tuo- tossa tehokäyrän kohdalla. MIP-arvoon on myös sisällytetty mekaaniset hä- viöt.



Kuva 4. Näyttökuvaa Doctor analysis Software 5.6

Kuvassa 4 on

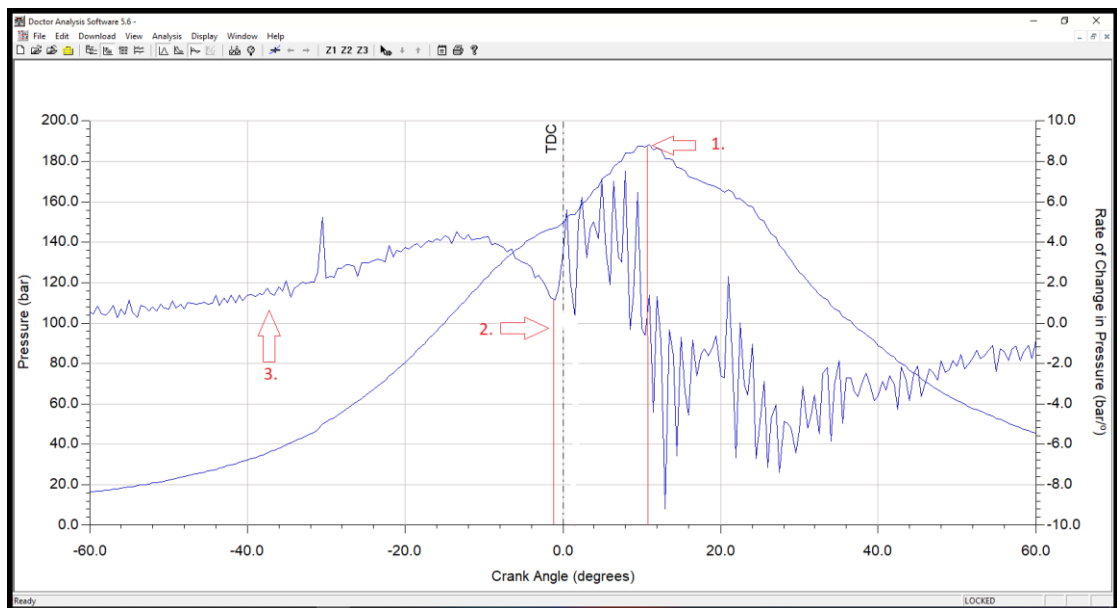
1. Huippupaine. Palotapahtuma 11 astetta nolla kohdasta
2. Polttoaineen sytytys ajankohta -1.5 astetta. Näkyy pienenä lovena huip- pupaineikäyrässä.
3. Sylinterin paine
4. Kampiakselinkulma astein
5. Työvaihe

### 7.1.1 Huippupaine kuva lisättynä sytytysaikakäyrällä

Sama diagrammi on suurennettuna itse palotapahtuman kohdalta. Graafiin on lisätty paineen muutos suhteessa kampiakselin asteluvun muutokseen, josta näkee, kun kohdassa kaksi paine putoaa polttoaineen sytytyksen tapahduttua. Käyrästä nähtävä sytytysajankohta auttaa myös selvittämään, jos on väärästä ajoituksesta johtuvia ongelmia, kuten liian korkea huippupaine tai liian alhainen tehon tuotto.

Samalla saadaan kampiakselin kulma-asteikko tarkemmalla asteikolla, joten se on hieman helpompi tulkita. Kampiakselikulma sytytykselle sekä huippupaineen kampiakselin kulma saadaan myös tarkkoina numeroarvoina taulukosta. Viivadiagrammista saadaan helposti selville, ovatko kaikki sylinterit tasapainossa ja lähellä optimaalista huippupainetta.

Mittauksissa näkyvä sahalaitaisuus johtuu mittaushäiriöistä, kuten anturin kunnosta, indikointihanan porauksen puhtaudesta, mittakaapeleiden kunnosta ja vauhtipyörän pyörimisanturin kunnosta. Jos joudutaan käyttämään jatkoputkea indikointihanan kanssa, syntyy vääristymä mittaustulokseen. Laitteen tuloksissa itsessään on 1–2 %:n mittavirhe.



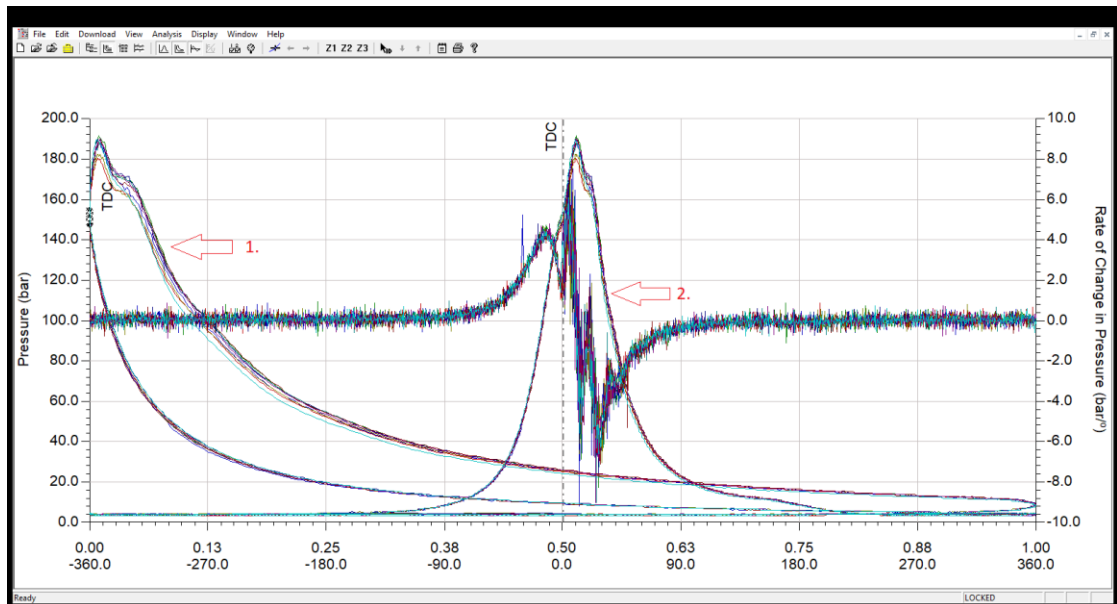
Kuva 5. Näyttökuva Doctor analysis Software 5.6

Kuvassa 5 on

1. Huippupaine
2. Sytytys ajankohta
3. Paineen muutos suhteessa kampiakselin aste lukuun

### 7.1.2 Kuvaaja moottorin toiminnasta

Kuvassa on esitetty kaikki yhdeksän sylinteriä. Kuvassa on myös lisänä ”ba-  
naanikuvaaja” kohta numero yksi. Kuvaaja kertoo sylinterin tilavuuden ja sylinterin  
paineen suhdetta. Jos paine- ja tilavuuskäyrät ovat lähes päällekkäin,  
kaikkien sylinterien indikoitu tehontuotto on sama. Sytytysajankohdan ollessa  
noin kahden asteen kohdalla kaikkien sylinterien osalta polttoainepumput ovat  
riittävän hyvin ajoitettu. Sytytysajankohdan tulee olla ennen TDC-kohtaa eli  
miinusmerkkisen nelitahtimoottoreissa. Jos sytytysajankohta on myöhäinen eli  
yläkuolokohdan jälkeen, on sylinteristä suurempi osa altistuneena palotapahtu-  
malle, joka taas rasittaa männänrenkaita sekä likaa voiteluöljyn (Kuiken  
2012b, 342).



Kuva 6. Näyttökuva Doctor Analysis Software 5.6

Kuvassa 6 on

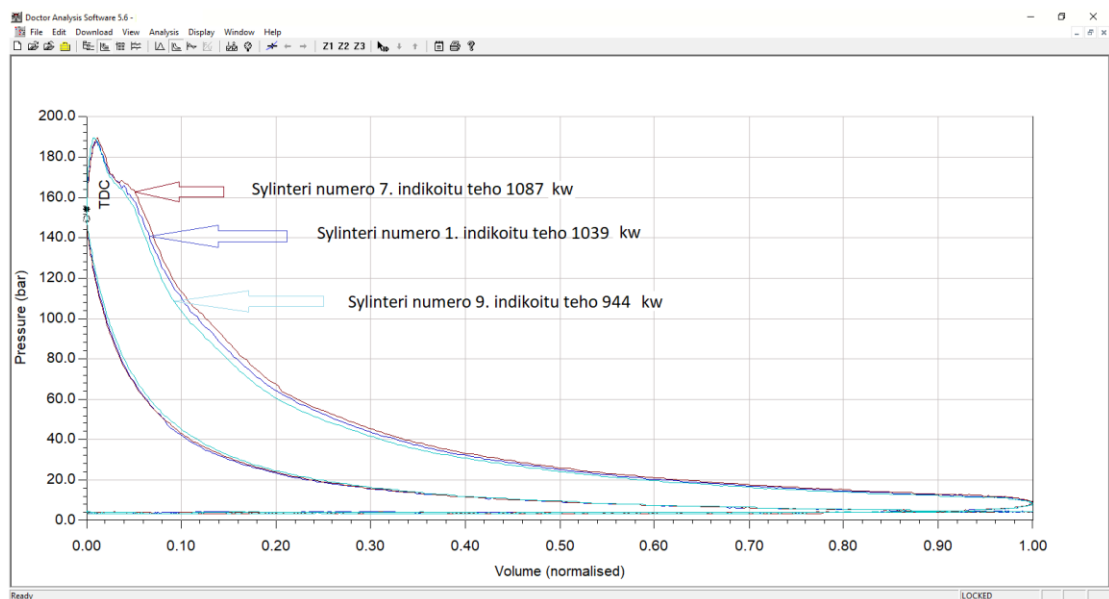
1. Tehokäyrä. Tilavuuden ja sylinterin paineen suhde.
2. Tämä palotapahtuman jälkeinen käyrä kuvaa myös tehoa.

### 7.1.3 Tehokäyrä

Tehokäyrässä on otettu kaikkien yhdeksän sylinterin keskiarvosta korkein ja matalin teho sekä keskiarvoteho, joka on tässä tapauksessa sylinteri numero yksi. Tehojen vaihteluväli on 143 kw, mikä on suurempi kuin suositeltu tasapainoarvo 120 kw, mutta tässä koneessa on vielä huoltosykli kesken, joten sillä voi olla vaikutusta. Nämä arvot ovat myös taulukossa, joten arvojen tarkempi tutkiminen on helpompaa.

Tehoarvot ovat indikoitua tehoa eli tehoa, joka syntyy palotilassa polttoaineesta ja siihen sisältyy mekaaniset häviöt. Mekaaniset häviöt saadaan yksinkertaisesti kertomalla mittalaitteelle oletettu mekaaninen häviö prosentteina. Moottorin jatkuvasti käytettävissä olevaan tehoon MCR tehdään 8–9 prosentin vähennys, jolloin moottori toimii normaalikäyttöalueella ilman, että olisi riskiä mekaanisesta vauriosta. Indikointi tarkoittaa, että tehontuotto on saatu mittaamalla sylinteripaineita eikä tehoa ole mitattu akselilta. Tämä arvo on indikoitu MCR-arvo, joka ilmoitetaan prosentteina moottorin akselitehosta.

Kuvasta voi nähdä, että sylinteri numero yhdeksän tehontuotto on aavistuksen heikompaa. Yhdeksän prosenttia heikompi tehontuotto verrattuna keskiarvoon on seurannan arvoinen yksityiskohta. Yli kahdentoista prosentin ero keskiarvoon aiheuttaisi jo syvempää perehtymistä.



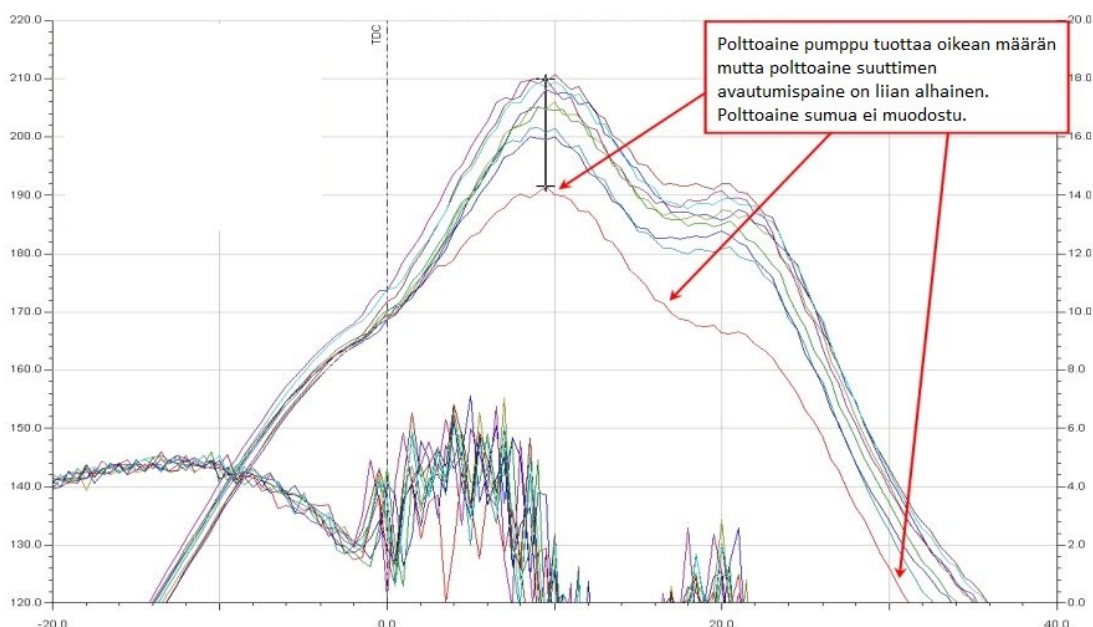
Kuva 7. Näyttökuva Doctor Analysis Software 5.6

## 8 ONGELMAT MOOTTORISSA

Omissa mittauksissa ei löytynyt mitään mainittavaa ongelmaa moottorin toiminnasta. Kuten kuvaajien käyristä näkyy, kaikki käyrät seuraavat toisiaan, ja tehokemat ja huippupaineet olivat moottorille ilmoitetulla tasolla. Ongelmien tulkintaa varten esitän muutaman kuvaajan, joissa näkyy muutamia erityyppisiä ongelmia.

### 8.1 Polttoainesuutin

Polttoainesuutin on aika yleinen huollon kohde johtuen korkeasta avautumis-  
paineesta ja sumutus-  
paineesta. Lämpörasitus on myös suurta vaihdettaessa  
raskasöljystä dieseliin. Polttoaineessa olevat partikkelit aiheuttavat abrasiivista  
kulumista. Lisäksi suutinta kuormittaa kemiallinen korrosio.



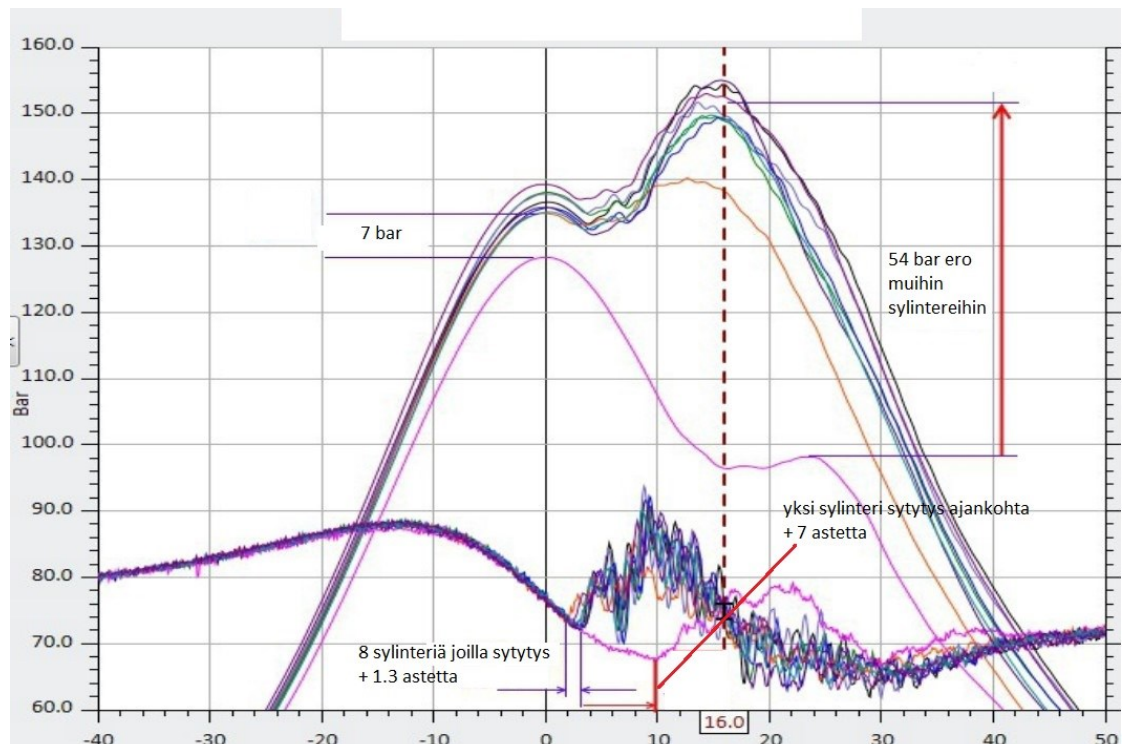
Kuva 8. Näyttökuvaa Doctor Analysis Software 5.6

Tietenkään kuvaaja ei suoraan kerro, onko vika suuttimessa. Tässä tapauk-

nessä se oli. Sytytyskäyrästä voi päätellä, että paine kasvaa suhteellisen normaalisti suhteessa kampiakselin kulmaan. Mutta tehokäyrä jää huomattavan alas, joten palotapahtuma ei ole halutunlainen. Tässäkin tapauksessa helpoin tapa testata ongelman syy on vaihtaa suutin. Korkeapaineputken rikkoontuminen voi myös aiheuttaa huonon palotapahtuman.

## 8.2 Polttoainepumppu

Polttoainepumppu on toinen yleinen ongelmia aiheuttava komponentti. Ongelmien aiheuttajina toimivat samat syyt kuin polttoainesuuttimessa. Lisäksi polttoainepumpussa on muutama liikkuva osa enemmän, kuten plungeri/elementti, takaiskuventtiili ja säätöhammastanko. Tietenkin pumpun kuntoon vaikuttaa säännöllinen rasvaus ja vuotojen toiminta, eikä pelkästään polttoaineen epäpuhtaudet ja lämpötilan vaihtelut.



Kuva 9. Näyttökuvaa Doctor Analysis Software 5.6

Tässä ilmenee, miltä kuvaajassa näyttää, kun polttoainepumpun takaisku vuotaa. Kuvaajassa näkyy, miten sytytysajankohdassa ollaan seitsemän baaria alempana, koska polttoainetta ei ole tullut sylinteriin. Vähäinenkin polttoaine,

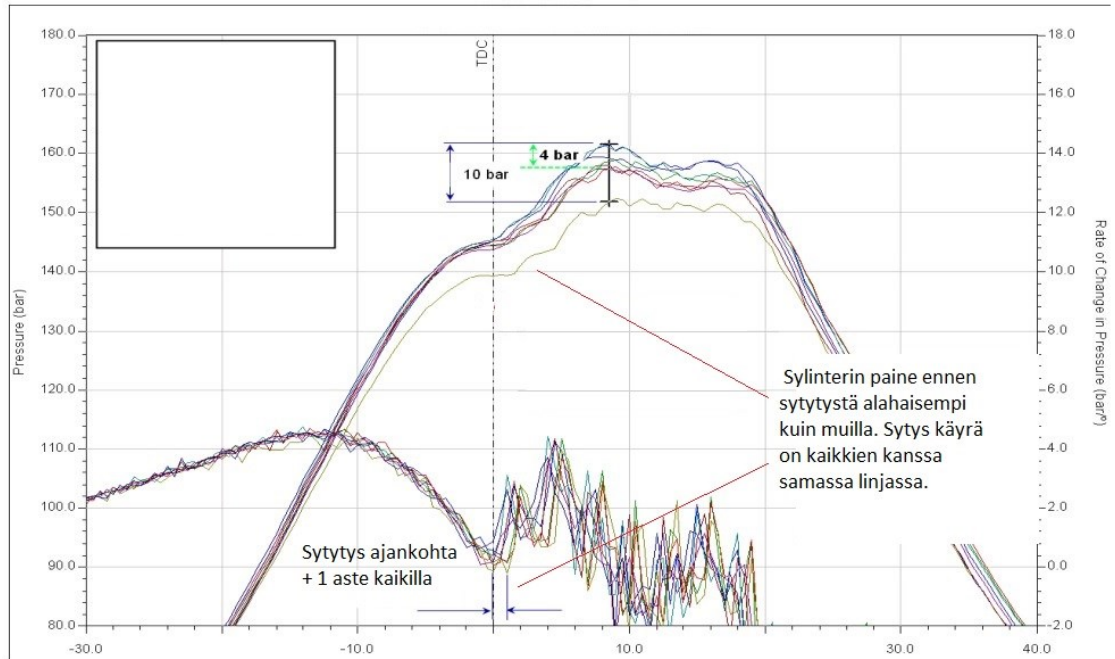
mikä on päätynt sylinteriin, sytty vasta seitsemän astetta myöhemmin kuin muissa sylintereissä. Joten huippupaineikin jää huomattavan alas, ja huippupaine tulee melkein kahdeksan astetta myöhemmin kuin toisissa sylintereissä, joissa se on 16 asteen kohdalla.

Tämä vika on itselle tullut monesti vastaan ja ollut syynä, kun sylinterin lämpötila on ollut liian alhainen. Takaiskun ollessa rikkoutunut suurin osa polttoaineesta pääsee takaisin paluulinjaan kulkematta polttoainesuuttimen kautta. Kuten yleistä, niin pienen osan rikkoontumisesta voi muodostua suuri haitta.

Toisenlainen tapaus olisi esimerkiksi se, että pumpun elementti on vioittunut, jolloin huippupainekäyrä ja sytytyskäyrä kulkevat muiden käyrien kanssa rinnan, mutta huippupaineen lakipiste jää tasaiseksi ja alemmalle tasolle. Tehokäyrä jää myös muita sylintereitä matalammaksi eli niiden alapuolelle.

### **8.3 Vuotava pakventtiili**

Pakventtiilien vuodot ovat todella ei toivottuja tapahtumia niiden korjaamiseen tarvittavan kohtalaisen suuren työmäärän takia. Myös imupuolen venttiileissä ja niiden tiivistepinnoissa voi ilmetä ongelmia, mutta ei yhtä usein kuin pakopuolen venttiileissä. Jos epäillään, että venttiilien kanssa olisi ongelmia, voidaan käyttää venttiilikannessa vesiletkuviritystä, josta ilmenee, tuleeko jäähdytysveteen ilmaa. Mutta jos on mahdollista käyttää moottorianalysaattoria, niin se käy myös ilmi analysaattorin tuottamasta kuvaajasta.



Kuva 10. Näyttökuva Doctor Analysis Software 5.6

Kuten kuvaajasta selviää, sylinterin paine on jo ennen sytytystapahtumaa alhaisempi kuin muissa. Tässä tapauksessa kuitenkin sytytysajankohta on linjassa muiden kanssa, huippupaine ei putoa niin radikaalisti, ja tehokäyräkin seuraa muiden sylinterien käyrää. Eli palotapahtuma syntyy, mutta osa paineesta karkaa vuotavasta pakaventtiilistä.

Huippupaine on vain kymmenen baaria alempi kuin korkein arvo ja kuusi baaria alempi kuin keskiarvopaine. Joten pelkkä huippupainemittaus ei välttämättä kertoisi, että venttiili vuotaa. Kuvajasta huomataan, että paine ei tahdo kerääntyä sylinteriin lähestyttäessä yläkuoloa.

Tässä kohtaa voi todeta, että edellisessä kappaleessa mainittu polttoainepumppu voi tehdä suhteellisen samanlaisen käyrän huippupaineen osalta, mutta silloin tehontuotantokäyrä on laskenut muiden alapuolelle. Paineikäyrä olisi linjassa muiden sylinterien kanssa.

## 9 YHTEENVETO

Tämä tutkimus osoitti, että huippupaine analysaattorin käyttöönotto oli erittäin hyödyllistä laivan teknisessä ylläpidossa. Mittaustulosten vertailu aikaisempiin mittauksiin auttoi havaitsemaan muutoksia laivan järjestelmissä ja antoi mahdollisuuden nopeaan vianmääritykseen. Haastattelut henkilökunnan kanssa osoittivat myös, että analysaattorin käyttö oli helppoa ja että se säästi aikaa ja vaivaa vianmäärityksessä.

Tutkimuksen avulla voitiin myös arvioida, kuinka tehokkaasti analysaattoria käytettiin laivalla ja miten sen käytettävyyttä voitaisiin parantaa entisestään. John Slight tietolähteenä ja perehdyttäjänä oli korvaamaton, sillä hänellä oli syvä ymmärrys analysaattorin toiminnasta ja hän pystyi tarjoamaan arvokasta tietoa sen käytöstä. Tämä siitä syystä, että kuvaajissa esiintyvien erilaisien poikkeamien tulkinta on tulosta vuosien analysaattorin käytön tulosta.

Tämä tutkimus osoitti, että huippupaineanalysaattori on erittäin tärkeä työkalu laivan teknisessä ylläpidossa ja että sen käyttöönotto kannattaa. Se antaa henkilökunnalle mahdollisuuden nopeaan ja tehokkaaseen vianmääritykseen ja auttaa laivan tekniikasta ylläpitovastuullisia henkilöitä tekemään parempia päätöksiä huollon ja kunnossapidon suhteen.

## LÄHTEET

Grote, K-H. & Antonsson, E-K. 2008. Springer handbook of mechanical engineering. Würzburg: Stürtz GmbH.

Kuiken, K. 2012a. Diesel engines for ship propulsion and power plants 1. Netherlands: Target Global Energy Training.

Kuiken, K. 2012b. Diesel engines for ship propulsion and power plants 2. Netherlands: Target Global Energy Training.

Man diesel. 2009. Man diesel performance. Yhtiön sisäinen pdf-dokumentti. Man diesel.

Slight, J. 2022. Haastattelu 19.12.2022. Manager. Merellä: m/s Finnlady.

Woodyard, D. 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 9. painos. Great Britain: Butterworth-Heinemann.

