



Kipinäsytytteisen biokaasu- moottorin nakutuksen hallinta

Konsta Lesonen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019

Ajoneuvotekniikan koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikan koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka

LESONEN, KONSTA

Kipinäsytytteisen biokaasumoottorin nakutuksen hallinta

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2019

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan biokaasukäyttöisen ottomoottorin nakutusta ja sen hallintaa. Lisäksi käsitellään maa- ja biokaasua polttoaineena. Työn tavoitteena oli löytää nakutustunnistimille toiminnallisesti riittävän hyvät paikat moottorista. Nakutus on ei-toivottu ilmiö ottomoottorissa ja nakutus voi aiheuttaa pahimmillaan moottorivaurion. Hyvän hyötysuhteen ja moottorin luotettavuuden vuoksi moottoria täytyy pystyä käyttämään lähellä nakutusrajaa, joten nakutus täytyy pystyä havaitsemaan ja välttämään luotettavasti.

Moottorin nakutusherkkyyteen voidaan vaikuttaa huolellisella moottorin suunnittelulla ja oikeanlaisilla komponenteilla. Myös polttoaineen puristuskestävyys ja itsesyttymislämpötila vaikuttavat suuresti asiaan. Maa- ja biokaasun käyttöä polttoaineena tukevat niiden pienemmät päästöt. Biokaasun käyttöä tukee lisäksi sen uusiutuvuus, omavaraisuuden lisääminen ja maataloudessa mahdollisuus tuottaa orgaanisesta jätteestä polttoainetta.

Moottorinohjausjärjestelmää varten täytyy tehdä nakutuskalibrointi, jotta ohjausjärjestelmä kykenee säätämään moottorinohjausparametreja oikealla tavalla nakutustilanteessa. Kalibrointi tehtiin moottorilaboratoriossa sylinterinpaineen mitausta hyödyntäen. Kalibroinnissa todennettiin nakutustunnistimien ja niiden sijoituspaikkojen soveltuvuus nakutuksen havaitsemiseen. Testien perusteella testatussa moottorissa riittää yksi nakutustunnistin havaitsemaan nakutuksen luotettavasti moottorin staattisessa kuormitustilanteessa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Vehicle Technology
Industrial Vehicle Engineering

LESONEN, KONSTA
Knock Detection in Spark-ignited Biogas Engine

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 1 page
May 2019

The purpose of this bachelor's thesis is to determine reliable mounting bosses for knock sensors. Topics of this thesis are knocking phenomenon in spark-ignited biogas engine, management of knocking and natural- and biogases as fuels. Knocking is an unwanted phenomenon in spark-ignition engine and it may cause a serious harm to engine, or even engine malfunction. Due to fuel efficiency it is still very important to use the engine close to knocking limit. For these reasons knocking management must be very reliable considering good efficiency and engine reliability.

Knocking sensitivity can be reduced by accurate engine design. Knock resistance of used fuel also has important part to avoid knocking. Methane based gases are becoming more and more potential fuels in internal combustion engines due to tightening emission regulations and high value of exhaust gas aftertreatment systems. Methane has lower carbon dioxide emissions, than gasoline or diesel fuels. Countries without gas or oil reserves can also reduce the fossil fuels importing by using domestic produced biogas as fuel.

Before the engine management system can control the engine, knocking calibration for knock sensors must be done. Calibration were carried out in engine laboratory on steady-state circumstances. Knocking is detected with cylinder pressure sensors and the signal is compared to knock sensors signal. The tests results indicate that only one sensor is sufficient for detecting knocking on steady-state circumstances.

Key words: biogas engine, knocking

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	PALAMINEN JA NAKUTUS	6
2.1	Luvussa käsiteltävät asiat	6
2.2	Tavallinen palaminen	6
2.2.1	Liekkirintama ja turbulenssi	7
2.2.2	Palotilan muotoilun ja puristussuhteen vaikutus nakutustai- pumukseen	8
2.3	Poikkeava palaminen	10
2.3.1	Nakutus	10
2.3.2	Esisyttyminen	13
2.3.3	Hehkusyttyminen	13
2.4	Sytytys	14
2.4.1	Sytytysenergia	15
2.4.2	Sytytyksen ajoitus	16
2.4.3	Seos	17
2.5	Nakutuksen hallinta	18
2.5.1	Moottorinohjausjärjestelmän komponentit	20
2.5.2	Nakutustunnistin	20
2.5.3	Nakutustunnistimien sijoituspaikat moottorissa	22
2.5.4	Nakutustaajuuden laskenta	23
3	MAA- JA BIOKAASU POLTTOAINEENA	29
3.1	Metaani polttoaineena	29
3.2	Maakaasu	30
3.3	Biokaasu	32
3.4	Nesteytetty maakaasu	34
4	MITTALAITTEET JA MITTAUSMENETELMÄT	35
4.1	Moottori	35
4.2	Nakutustunnistin	39
4.3	Sylinterinpaineanturi	39
5	MITTAUSTULOKSET	41
6	POHDINTA	47
	LÄHTEET	48
	LIITTEET	51
	Liite 1. Nakutustunnistin	51

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään bio- ja maakaasua ja niiden käyttöä polttoaineena kipinäsytytteisessä ottomoottorissa sekä nakutuksen hallintaa. Bio- ja maakaasulla on tiettyjä etuja bensiiniin ja dieseliin verrattuna polttomoottorikäytössä ja sen vuoksi kaasukäyttöinen moottori on mielenkiintoinen tutkimussuunta moottoritekniikassa. Etuina ovat esimerkiksi pienemmät hiilidioksidipäästöt, parempi puristuskestävyys bensiiniin verrattuna ja biokaasulla energiaomavaraisuuden paraneminen.

Nakutuksen hallinta on oleellinen osa kipinäsytytteisen polttomoottorin toiminnassa. Hyötysuhteen kannalta sytytysennakko on asetettava lähelle nakutusrajaa, mutta niin luotettavasti, ettei nakutusta ilmene. Näin vältetään moottorivaurio. Tässä työssä keskitytään stoikiometrisellä seossuhteella käytettävään ottomoottoriin. Testeissä käytettiin AGCO Power 4,4 l -nelitahtista turbodieselmoottoria, joka on muunnettu biokaasukäyttöiseksi ja kipinäsytytteiseksi. Laboratoriotestit suoritettiin Otaniemessä Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT). Työn aihe on AGCO Powerilta ja työssä on hyödynnetty VTT:n ja Boschin tekemien mittausten tuloksia.

Biokaasun tuotanto esimerkiksi yhdyskuntajätteestä on tasaisessa kasvussa. Tämän vuoksi biokaasua on jatkuvasti paremmin saatavilla, mikä voisi mahdollistaa biokaasun laajamittaisen käytön moottoripolttoaineena tulevaisuudessa. Biokaasua voi sekoittaa puhdistettuna maakaasun sekaan kaasunjakeluverkkoon. Tämä mahdollistaa tarvittaessa biokaasun korvaamisen maakaasulla, ja toisinpäin.

Työn tavoitteena oli etsiä nakutustunnistimelle sopivat sijoituspaikat testimoottorista. Nakutustunnistin täytyy sijoittaa siten, että se pystyy luotettavasti tunnistamaan nakutuksen kaikista sylintereistä. Tarvittaessa täytyy käyttää useampia tunnistimia. Tunnistimet eivät saa altistua liian suurelle kuumuudelle tai kemikaaleille tarpeettomasti. Kiinnitys täytyy olla tukeva, koska tunnistin mittaa moottorista rakennepäristä värähtelyä, jonka täytyy johtua tunnistimeen mahdollisimman esteettömästi.

2 PALAMINEN JA NAKUTUS

2.1 Luvussa käsiteltävät asiat

Tässä luvussa käsitellään kipinäsytytteisen moottorin seoksen palamiseen ja sytytykseen sekä nakutusherkkyteen vaikuttavia asioita. Lisäksi esitellään nakutuskalibroinnissa tarvittavia antureita ja mittalaitteita. Lopuksi lasketaan mahdollisia nakutuspalamisen aiheuttamien seisovien paineaaltojen taajuuksia palotilassa.

2.2 Tavallinen palaminen

Ottomoottoreissa palotilassa oleva kaasuseos sytytetään ulkoisella kipinällä. Seos ja sytytyksen ajoitus vaikuttavat suuresti moottorin hyötysuhteeseen, päästöihin, tehoon ja nakutusherkkyteen. Seoksen täytyy olla lähellä stoikiometristä, ainakin sytytystulpan elektrodien välissä, jotta seos voidaan sytyttää luotettavasti. (Stone 2012, 109–112.) Ottomoottoreissa täytyykin pystyä hallitsemaan ja säättämään seosta ja sytytystä aina kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopivaksi. Toisinaan käyttötilanteessa tarvitaan maksimisuorituskykyä ja toisinaan pienin mahdollinen polttoaineen kulutus. Kaikissa tilanteissa seoksen hyvä palaminen on oleellista moottorin luotettavan toiminnan varmistamiseksi.

Stoikiometrinen seos tarkoittaa ilman ja polttoaineen massasuhdetta, jolla seos palaa teoreettisesti täysin. Stoikiometrinen massasuhde on riippuvainen käytettävästä polttoaineesta. Esimerkiksi bensiinin stoikiometrinen suhde on 14,7 kg ilmaa 1 kg:a bensiiniä kohti ja vedyllä se on 34 kg ilmaa 1 kg:a vetyä kohti. Ero johtuu polttoaineiden erilaisista hiili/vetyosuhteesta. Hiilen polttamiseen tarvitsee vähemmän ilmaa ja bensiini koostuu enimmäkseen hiilestä (Reif & Dietsche ym. 2014, 316–317, 614.) Aiheesta enemmän luvussa 3.1.

Biokaasukäyttöisen ottomoottorin palotapahtuma on samankaltainen kuin bensiinikäyttöisen ottomoottorin. Eroa on jonkin verran liekkirintaman etenemisnopeudessa, kun verrataan etenemisnopeutta laminaarisessa virtauksessa. Yleisesti

hiilivety/ilmaseoksilla maksimipalamisnopeus on ilmakehänpaineessa luokkaa $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Stone 2012, 35). Todellisessa tilanteessa seos on jatkuvasti pyörteilevässä liikkeessä ja palotilan muotoilulla voidaan vaikuttaa pyörteilyn nopeuteen ja sitä kautta liekkirintaman etenemisnopeuteen. Tyypillisesti liekkirintama etenee noin $15\text{--}25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Hofmann, Mencher, Häming & Hess 2006, 19), ja voi saavuttaa jopa $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ nopeuden (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 148). Turbulenssi on suurin yksittäinen tekijä palamisnopeuteen (Reif & Dietsche, ym. 2014, 407).

Ottomootorissa polttoaineen ja ilman seos sytytetään sytytystulpan kärkien (elektrodien) väliin muodostetulla kipinällä. Palamisprosessi käynnistyy ja liekkirintama lähtee etenemään, ideaalitalanteessa pallon muotoisena, sytytystulpasta pois päin (Reif & Dietsche, ym. 2014, 406). Koska palaminen vie jonkin verran aikaa, täytyy kipinä antaa ennen kuin mäntä on saavuttanut yläkuolokohdan, jotta palamispaineen huippu ajoittuu hieman yläkuolokohdan jälkeen. Painehuippu tulisi saavuttaa noin 15 astetta yläkuolokohdan jälkeen. Tällöin moottorista saadaan paras vääntömomentti ja hyötysuhde. Sytytyksen ajoitusta täytyy säätää moottorin pyörimisnopeuden, seoksen, sylinterin täytöksen ja kuormitustilanteen mukaan. Sopiva sytytysennakko kuhunkin tilanteeseen määritetään laboratoriossa testipenkissä. (Reif & Dietsche ym. 2014, 631–632.)

2.2.1 Liekkirintama ja turbulenssi

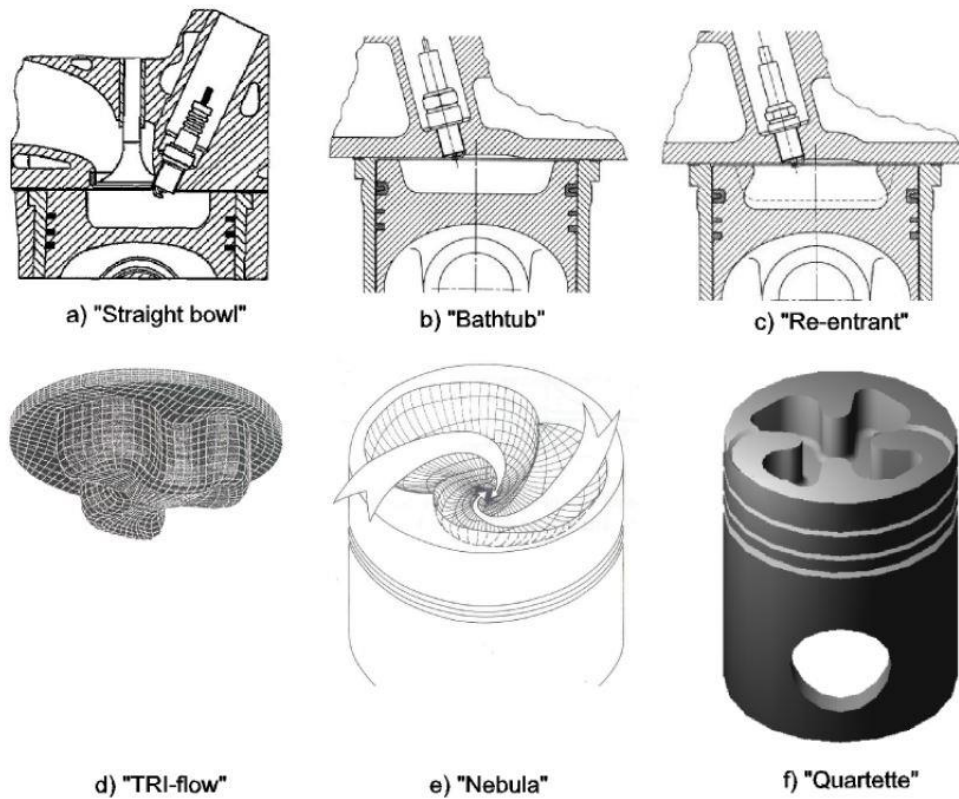
Liekkirintaman etenemisnopeus on oleellinen asia palamisen hyvyden kannalta. Nopeasti palava seos palaa täydellisemmin. Inertiakaasujen lisääminen seokseen hidastaa liekkirintamaa. Tyypillinen esimerkki lisätyistä inertiakaasuista tulee pakokaasujen takaisinkierätyksen kautta. Takaisinkierätysjärjestelmällä kierrätetään osa pakokaasusta takaisin palotilaan imuilman mukana, jolloin pakokaasun hiilidioksidi, vesihöyry ja typpi toimivat inertiakaasuina palotilassa. Stoikiometrisellä seossuhteella toimivassa kipinäsytytteisessä moottorissa takaisinkierätystä käytetään pakokaasujen lämpötilan alentamiseen komponenttien suojelemiseksi kovilla kuormituksilla. Liian kuumat pakokaasut voivat vaurioittaa mm. kolmitiekatalysaattoria tai turboahdinta. Karkeasti voidaan olettaa, että 10

%.n takaisinkieritys hidastaa liekkirintaman nopeutta noin 20 %. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 406–407, 428.)

Palamisnopeutta voidaan nostaa kasvattamalla sylinterinpainetta, lämpötilaa ja turbulenssia. Sylinteripaineen vaikutus palamisnopeuteen on vähäinen, mutta korkea lämpötila ja turbulenssiaste vaikuttavat palamisnopeuteen merkittävästi. Palamisnopeutta ei kuitenkaan kannata kasvattaa loputtomasti jo sen takia, että liian nopeasti palava seos kasvattaa sylinterinpainetta nopeasti ja äänekkäästi ja ääni voi olla häiritsevä. Bensiini moottoreissa paineen nousunopeus tulisi olla 0,5–3,0 bar/1°kampi akselinkulmana. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 407.)

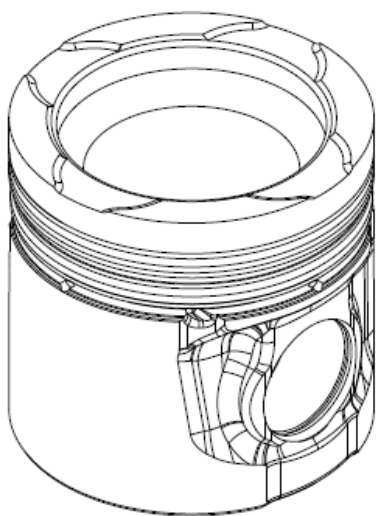
2.2.2 Palotilan muotoilun ja puristussuhteen vaikutus nakutustaipumukseen

Korkea puristussuhde lisää moottorin nakutusherkkyttä. Hyvää moottorin hyötysuhdetta tavoiteltaessa on kuitenkin pakko käyttää mahdollisimman korkeaa puristussuhdetta. (Reif & Dietsche ym. 2014, 84, 407.) Tällöin nakutustaipumusta voidaan lieventää oikeanlaisella palotilan muotoilulla. Nakutustaipumus alenee, kun palotila muotoillaan siten, että kaasuseos on palotilassa voimakkaassa pyörteilyliikkeessä. Nopea pyörteily voidaan saavuttaa esimerkiksi muotoilemalla palotila siten, että mäntä pakottaa liikkeellään palotilan reunoilta seoksen keskelle palotilaa. Tällöin saadaan toteutettua nopea turbulenttinen virtaus, jolloin seos palaa nopeasti. Liian nopea turbulenssi voi kuitenkin aiheuttaa liian nopean palamisen, mikä voi johtaa meluisaan käyntiääneen. (Stone 2012, 112–113.) Kuviossa 1 on erilaisia mäntään muotoiltuja palotiloja. Ylärivin palotilat ovat ammetyyppisiä, jolloin mäntä pakottaa liikkeellään palotilan reunoilta seoksen keskellä olevaan ammeeseen. Alarivillä on voimakkaasti muotoiltuja mäntien palotiloja, joilla tavoitellaan tietynlaisia pyörteilyjä palotilaan. (Doosje 2010, 12.)



Kuvio 1. Erilaisia palotilamuotoja (Doosje 2010, 13)

Kuviossa 2 on AGCO Power 4,4 l -testimoottorissa käytetty mäntä. Palotila on muotoiltu mäntään ammemaiseksi. Mäntään on koneistettu kolot venttiilejä varten, jotta välitys venttiileihin pysyy riittävän suurena männän käydessä YKK:ssa (YKK, yläkuolokohta. Ylin kohta, jossa mäntä käy sylinterissä).



Kuvio 2. 3D-malli Testimoottorissa käytetystä männästä. Puristussuhde 12:1 (AGCO Power 2018)

2.3 Poikkeava palaminen

Kipinäsytytteisessä moottorissa poikkeavalla palamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa seos syttyy muuten kuin sytytyskipinän kautta, eli tapahtuu itsesytyminen. Tällaisia tilanteita ovat nakutus, esisytyminen ja hehkusytyminen. Itsesytyminen voi tapahtua ennen varsinaista sytytysketkeä tai sen jälkeen. Esi- ja hehkusytyminen tapahtuvat ennen varsinaista sytytystä ja nakutus sen jälkeen. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 149–150.)

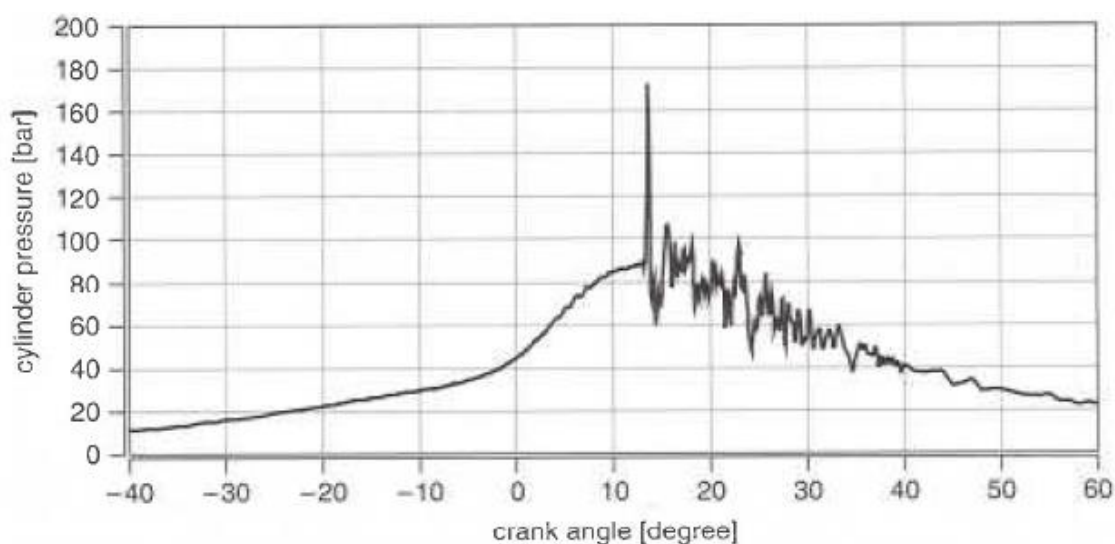
2.3.1 Nakutus

Moottorin nakutus on kipinäsytytteisessä ottomoottorissa ei-toivottu ilmiö, jolla tarkoitetaan hallitsemattomasta palotapahtumasta johtuvaa ”kilisevää” ääntä moottorissa. Äänen vuoksi tapahtumaa kutsutaan yleisesti nakutukseksi. Nakutustapahtumassa osa seoksesta syttyy itsestään, ennen kuin varsinainen sytytystulpa lähtevä liekkirintama tavoittaa seoksen. Nakutustapahtumassa muodostuvat korkea paine ja lämpötila aiheuttavat mäntään, laakerointiin, sylinterinkanteen ja kannen tiivisteeseen korkean mekaanisen ja termisen kuormituksen. Jatkuva nakutus moottorissa voi aiheuttaa vaurioita kannen tiivisteessä, männissä ja sylinterinkannessa ja pahimmassa tapauksessa moottorivaurion. (Hofmann, Mencher, Häming & Hess 2006, 30.)

Nakutustapahtuman lisäksi vastaava ääni voi kuitenkin syntyä myös esisytytyksessä ja hehkusytytyksessä. Nakutustapahtumassa seos syttyy itsestään paineen nousun seurauksena sen jälkeen, kun varsinainen sytytyskipinä on annettu. Esiytytyksessä seos syttyy sylinterissä ennen kuin sytytyskipinä on annettu. Esiytytyminen on yleensä yksittäinen tapahtuma, joka loppuu itsestään, kun moottori käy. Hehkusytytyksessä seos syttyy esisytytyksen kaltaisesti ennen sytytyskipinää jonkin kuumana hehkuvan osan vuoksi. Hehkusytytyminen on itseään tehostava ketjureaktio ja aiheuttaa nopeasti moottorivaurion, jos moottoria ei sammuteta. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 150–153.)

Nakutuksessa palaminen alkaa tavanomaisesti sytyttämällä seos kipinällä, jolloin lämpötila ja paine kasvavat koko palotilassa, myös palamattomassa seoksessa.

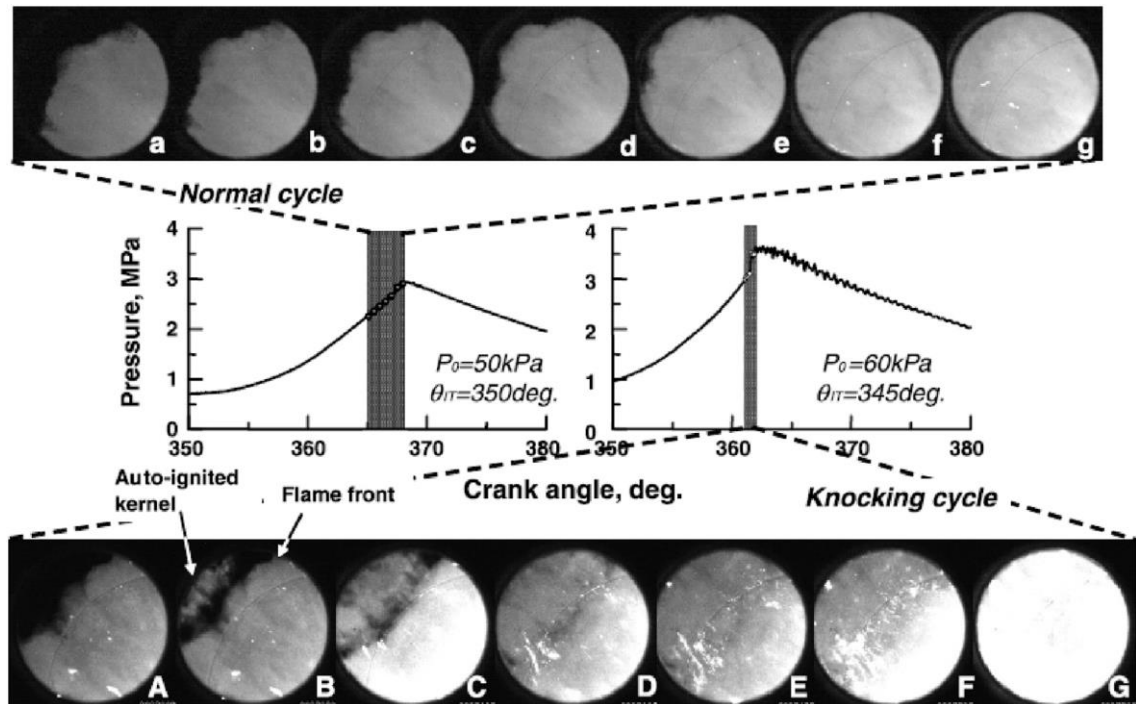
Tällöin syntyvät mahdolliset olosuhteet itsesyttymiselle, kun aikaa syttymisreaktiolle on tarpeeksi ja seos on syttymiskelpoinen. Nakutustapahtumassa kipinän sytyttämä liekkirintama ei ehdi edetä ja sytyttää kaikkea seosta ennen kuin itsesytyminen tapahtuu. Tällöin sylinteriin muodostuu kaksi liekkirintamaa ja niiden kohdatessa syntyy voimakkaita paineaaltoja, jotka aiheuttavat nakuttavan äänen heijastellessaan sylinterin seinämistä. Nämä paineaallot ovat nähtävissä mitatusta sylinterinpaineesta painevaihteluna päällekkäisenä normaalin painekuvaajan päällä (Kuvio 3). (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 150.) Nakutuspalamisessa ei ole varsinaista liekkirintamaa kuten tavanomaisessa palamisprosessissa. Palamattomat kaasut palavat lähes yhtäaikaisesti, jolloin kemialliset reaktiot leviävät jopa ääntä nopeammin. (Guzzella & Onder 2010, 199–200.)



Kuvio 3. Esimerkki painekuvaajasta voimakkaan nakutuksen aikana (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 151)

Kuviossa 4 on vertailu tavallisen ja nakutuspalamisen välillä. Ylärivillä on normaali sykli ja alimmalla nakutussykli. Kuvassa vaalea osa on palanutta seosta ja tumma alue palamatonta. Normaalisessa palamisessa liekkirintama etenee palotilan laidalle sijoitetusta sytytystulpasta sylinterin toista laitaa kohti. Kuvion 4 kuvien palotilassa sytytystulppa on sijoitettu kuvan kirjaimen kohdalle, palotilan reunalle. Nakutustilanteessa liekkirintaman etupuolella seos syttyy ja palaa kovalla nopeudella aiheuttaen nopean paineen nousun, mikä on nähtävissä siitä, että varsinainen liekkirintama ei merkittävästi enää etene loppupalamisen aikana. Kawaharan, Tomitan ja Sakatan mukaan liekkirintama voi jopa perääntyä takaisin nopean ja voimakkaan paineen nousun takia (Wang, Liu & Reitz 2017,

85–86). Kuvion 4 alemman rivin kuvassa a liekkirintama on edennyt sytytystul-
pasta toista reunaa kohti hyvin samankaltaisesti kuin ylärivin kuvassa. Alarivin
kuvassa b näkyy itsesyttynyt seos varsinaisen liekkirintaman edessä. Alarivin ku-
vissa c ja d on nähtävissä, että itsesyttynneen seoksen paine on pakottanut varsi-
naista liekkirintamaa takaisin kohti lähtöpistettä.



Kuvio 4. Normaalin ja nakuttavan syklin vertailu (Wang, Liu & Reitz 2017, 85)

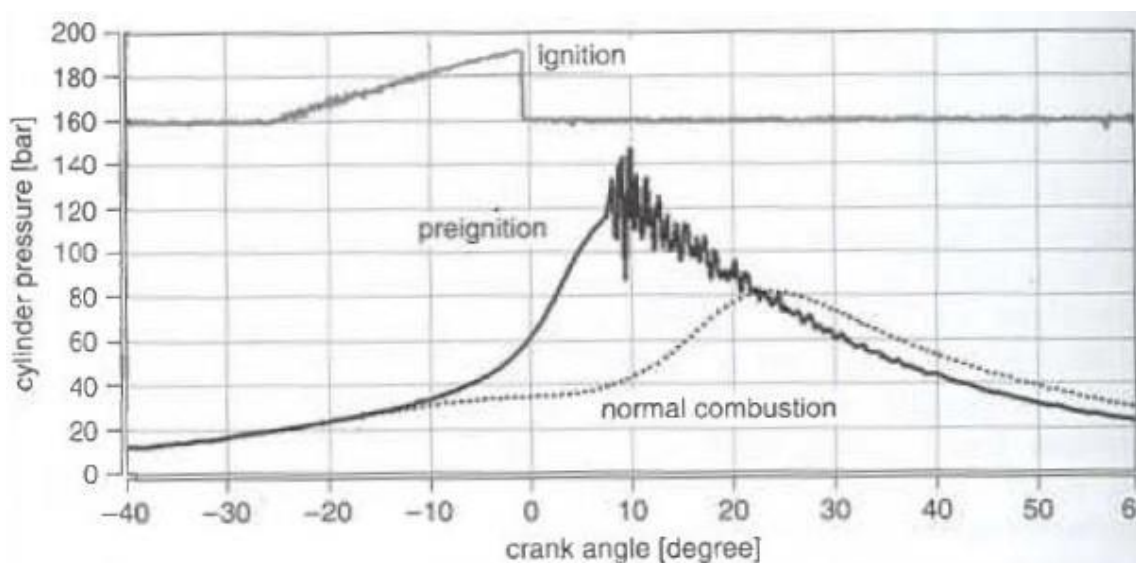
Nakutukselle altistavia tekijöitä ovat mm. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 150.)

- Korkea puristussuhde, kuormitus ja ahtopaine. Tällöin puristusaine ja lämpötila sylinterissä kasvavat myös korkeiksi.
- Hidastunut moottorin käyntinopeus. Itsesyttymisreaktiolle jää enemmän aikaa muodostua.
- Polttoaineen alhainen oktaaniluku. Huono puristuskestävyys altistaa itsesyttymiselle.
- Epäedullisesti muotoiltu palotila ja pitkä etäisyys sytytystulpasta palotilan reunoille. Huonosti muotoillussa palotilassa seos ei pyörtele halutusti ja kuumana hehkuvat pinnat voivat sytyttää seoksen. Pitkä etäisyys sytytystulpalta palotilan reunoihin antaa seokselle aikaa esisyyttyä, ennen kuin liekkirintama ehtii polttaa kaiken seoksen.

- Riittämätön ahtoilman jäähditys. Korkea seoksen lämpötila puristustahdin lopussa.
- Riittämätön palotilan seinämien jäähditys. Korkea seoksen lämpötila puristustahdin lopussa.

2.3.2 Esisytyminen

Esisytyminen tapahtuu ennen kuin varsinainen kipinä on annettu. Esisyttymisiä tapahtuu satunnaisesti ja ne päättyvät itsestään. Sylinterinpainekuvaajassa (Kuvio 5) tämä näyttää siltä kuin sytytys hetki olisi liian aikainen. Täten lämpötila ja paine sylinterissä nousevat jyrkästi puristustahdin loppuvaiheessa. Esisyttymistilanteessa myös nakutusta voi esiintyä työtahdin alkuvaiheessa, mutta kyseessä ei varsinaisesti ole nakutuspalaminen. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 152.)

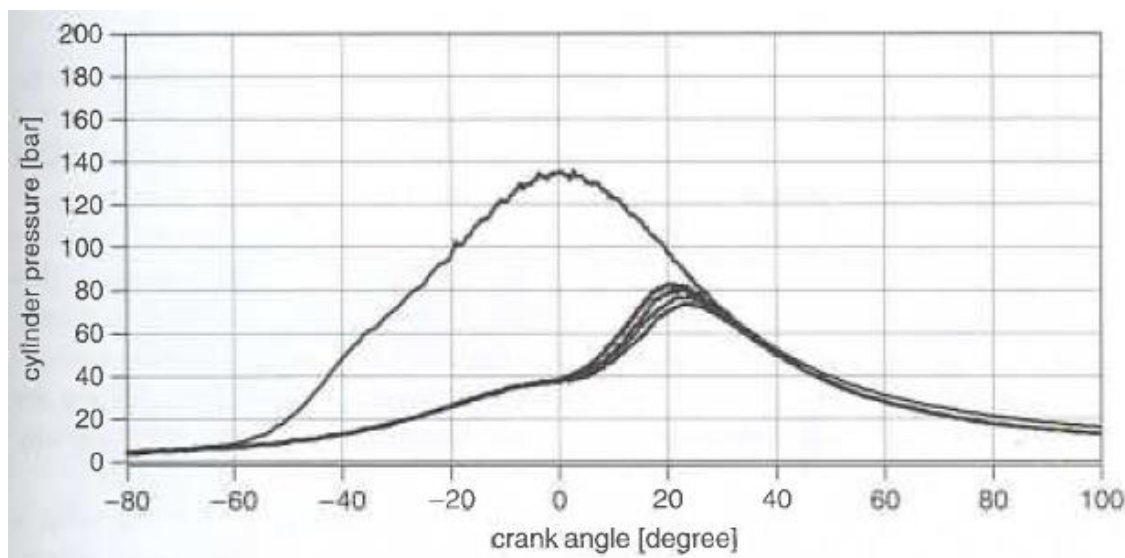


Kuvio 5. Esisytyminen. Paineen nousu alkaa aikaisemmin ja jyrkempänä kuin nakutustilanteessa. Painehuippu myös saavutetaan aikaisemmin YKK:n jälkeen. (Kuva: Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 152)

2.3.3 Hehkusytyminen

Esisyttymisen ja hehkusyttymisen ero on siinä, että esisytyminen päättyy itsestään, mutta hehkusytyminen on itseään voimistava ketjureaktio.

Hehkusyttymisestä on usein seurauksena voimakas nakutus. Jokin kuumana hehkuva osa palotilassa aiheuttaa itsesyttymisen ja kun syttyminen tapahtuu liian aikaisin, nousevat lämpö ja paine yhä edelleen korkeammalle. Tämän vuoksi hehkuvat pinnat lämpenevät entisestään ja moottorin käydessä seos syttyy yhä aiemmin sylinterissä. Hehkusyttymistilanteessa sytytyksen ajoituksen myöhäistäminen ei lopeta itsesyttymistä, koska syttyminen tapahtuu riippumatta varsinaisesta sytytyskipinästä. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 153–154.)



Kuvio 6. Hehkusyttyminen ilman nakutusta yhdessä sylinterissä. Erottuu kuviossa selkeästi muista, koska paine alkaa nousta aikaisemmin ja nousee selvästi korkeammalle. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 153)

2.4 Sytytys

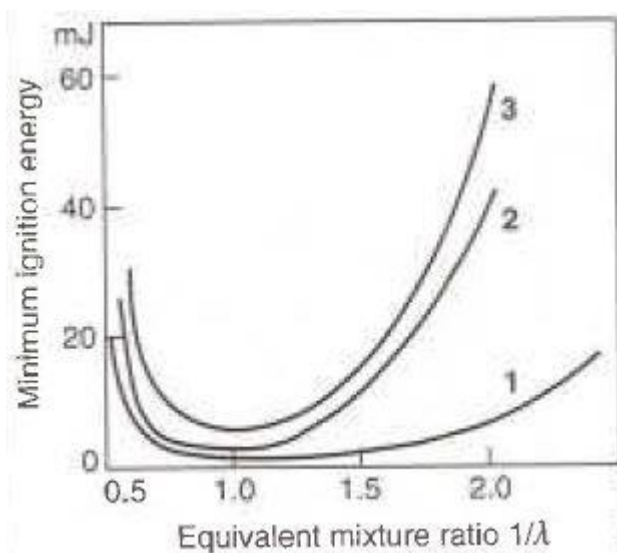
Seoksen sytyttäminen kipinäsytytteisessä moottorissa tapahtuu sytytystulpan elektrodien väliin muodostettavalla kipinällä palotilassa. Luotettava sytytysjärjestelmä on ehdoton häiriöttömän moottorin toiminnan takaamiseksi. Huono sytytys tai sytytyskatkokset aiheuttavat käyntihäiriöitä ja voivat vaurioittaa katalysaattoria. Myös pakokaasupäästöt ja kulutus kasvavat sekä moottorin teho alenee (Reif & Dietsche, ym. 2014, 630.) Kun tulee sytytyskatkos, palamaton seos päättyy katalysaattoriin ja palaa siellä, kuumentaen katalysaattoria. Liiallinen kuumuus voi lyhentää katalysaattorin toimintaikää ja jopa tehdä sen toimintakyvyttömäksi (Knirsch, Kesch, Tappe, Driedger & Lehle 2006, 323.)

Sytytyshetki ja energiamäärä ovat oleellisia tekijöitä moottorin hyötysuhteen, vääntömomentin ja pakokaasupäästöjen kannalta. Liian aikainen sytytys aiheuttaa sylinterissä liian aikaisen paineen nousun, mikä voi aiheuttaa moottorivaurion. Liian myöhäinen sytytys laskee moottorin vääntömomenttia ja hyötysuhdetta sekä nostaa pakokaasujen lämpötilaa. Liiallinen pakokaasujen lämpö voi myös vaurioittaa moottoria. (Reif & Dietsche, ym 2014, 632.)

2.4.1 Sytytysenergia

Sähköisen kipinän voi muodostaa vain, kun tarvittava jännite on saatavilla. Tarvittava jännite on riippuvainen sytytystulpan elektrodien kärkivälistä ja seoksen tiheydestä sytytyshetkellä. Tarvittava sytytysjännite on useita kymmeniä kilovoltteja. Jännitteen nostaminen auttaa kipinän muodostumisessa, mutta tällöin kipinä palaa lyhyemmän aikaa, jos energiamäärää ei nosteta. Tulpan elektrodien kärkivälien pidentäminen auttaa seoksen syttymisessä. Tällöin täytyy myös jännitettä ja energiamäärää nostaa, jotta kipinä muodostuu kärkien väliin. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 405, 630.)

Seoksen luotettavan syttymisen varmistumiseksi täytyy kipinässä olla tarpeeksi energiaa seoksen sytyttämiseksi. Korkea puristussuhde, turboahtaminen ja seoksen nopea pyörteily palotilassa lisäävät sytytysenergian tarvetta. Lisäksi rikas tai laiha seos ja inertikaasujen lisääminen, kuten pakokaasujen takaisinkierrätys, kasvattaa sytytysenergian tarvetta. Esimerkiksi metaani/propaaniseokselle tarvittava minimi sytytysenergia on muutamia millijouleja (mJ) stoikiometrisellä seossuhteella ja alhaisilla, alle 6 m/s, pyörteilynopeuksilla. Pyörteilynopeuden nostaminen ja rikas tai laiha seos voi kuitenkin nostaa sytytysenergian tarpeen kymmeneen millijouleihin. Kuviossa 7 ovat metaani/propaaniseokselle tarvittavat sytytysenergiat virtausnopeuden mukaan. Vaaka-akselilla seossuhde ja pystyakselilla pienin tarvittava sytytysenergia. Viiva yksi kuvaa energian tarvetta staattisessa seoksessa, viivan kaksi pyörteilyn nopeus on 6 m/s ja viivan kolme 15 m/s. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 405, 630.)



Kuvio 7. Sytytysenergian tarve (Reif & Dietsche, ym. 2014, 405)

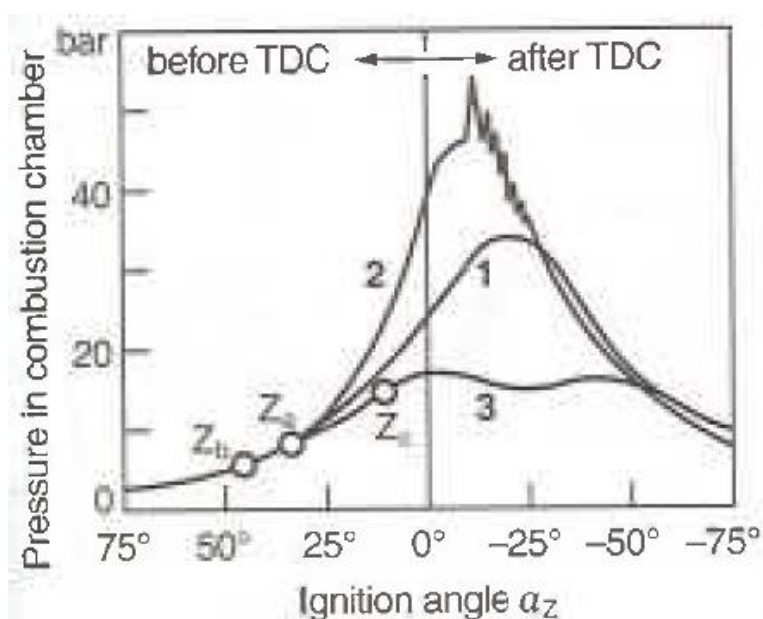
Nykyaikaisilla sytytyspuolilla voi saavuttaa 40–100 mJ sytytysenergian, korkeaenergiapuolilla jopa enemmän. Sytytystulpan elektrodien väliin muodostuva plasma on lämpötilaltaan jopa 6000 K. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 143–144.)

2.4.2 Sytytyksen ajoitus

Sytytyksen ajoituksella on suuri vaikutus pakokaasupäästöihin, kulutukseen, ajettavuuteen ja vääntömomenttiin. Sytytyshetken säätö vaikuttaa käänteisesti esim. päästöihin ja vääntömomenttiin. Sopivan aikaisella sytytyshetkellä saadaan hyvä vääntömomentti ja pieni kulutus, mutta hiilivety- ja typenoksidipäästöt kasvavat. Sytytystä ei siis pystytä optimoimaan siten, että kaikki edellä mainitut ominaisuudet olisivat hyviä, vaan ajoituksen suhteen täytyy etsiä hyvä kompromissi. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 632–633.)

Sytytys täytyy ajoittaa ennen yläkuolokohtaa (EYKK), jotta seos ehtii syttyä oikea-aikaisesti palotilassa ja maksimi sylinteripaine ajoittuu oikeaan kohtaan, hieman yläkuolokohdan jälkeen. Maksimi sylinteripaineen oikealla ajoituksella saadaan moottorista paras mahdollinen vääntömomentti. Seoksen syttyminen ja palaminen vaatii aina aikaa, joten sytytysennakko täytyy olla ennen yläkuolokohtaa. Sytytysennakkoa täytyy aikaistaa, kun moottorin pyörimisnopeutta kasvatetaan, koska paineen nousulle on korkeilla pyörimisnopeuksilla vähemmän aikaa.

Korkeilla käyntinopeuksilla sylinterinpaineen kasvu myös jakautuu laajemmalle alueelle kampiakselin astekulmana, mikä huonontaa hyötysuhdetta. Ennakkoa täytyy lisätä myös, kun seos on laihaa, koska laihaseoksessa liekki-rintama etenee hitaammin, joten koko sylinterin täytöksen palamiseen tarvitaan enemmän aikaa. Moottorikohtaiset sytytyksen ajoituskartat täytyy määrittää kokeellisesti moottorilaboratoriossa. Kuviossa 8 ovat kolmen eri sytytyksen ajoitushetken aiheuttamat paineet palotilassa eri työkiertoilta. Numero yksi on oikea-aikaisesti sytytetty, kaksi on liian aikaisin ja aiheuttaa nakutusta ja kolme on liian myöhäinen, eikä sylinterinpaine ehdi nousta tarpeeksi. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 407, 631 –632.)



Kuvio 8. Sytytyksen ajoituksen vaikutus paineen nousuun (Reif & Dietsche 2014, 631)

2.4.3 Seos

Seossuhde (λ) vaikuttaa oleellisesti päästöihin ja seoksen syttymisherkkyteen. Seos syttyy ja palaa parhaiten, kun seossuhde on stoikiometrinen ($\lambda = 1$). Suurin vääntömomentti ja nopein palamisnopeus saavutetaan kuitenkin hieman rikkaalla seoksella 0,8–0,9, paras kulutus 1,05–1,1 ja paras termodynaaminen hyötysuhde 1,1–1,3. Kolmitiekatalysaattoria käytettäessä on kuitenkin välttämätöntä käyttää moottoria stoikiometrisellä seossuhteella. (Hofmann, Mencher, Häming & Hess 2006, 18–19, 27.) Sopivaa seossuhdetta valittaessa joudutaan näin ollen

tekemään kompromissi ja joudutaan tinkimään parhaasta vääntömomentista ja kulutuksesta, jotta katalysaattorin suorituskyky pysyy hyvällä tasolla.

2.5 Nakutuksen hallinta

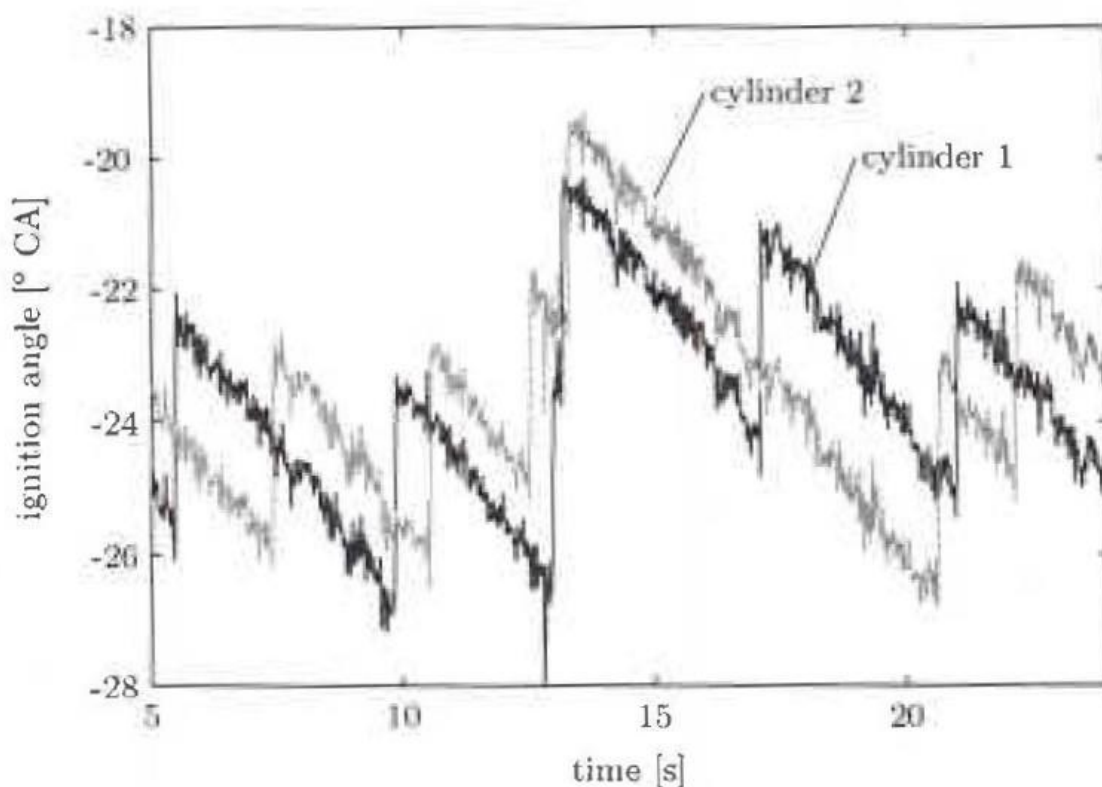
Hyvä nakutuksen hallintajärjestelmä mahdollistaa alhaisemman polttoaineen kulutuksen, suuremman tehon ja väännön ja monenlaisten polttoaineiden käytön vaihtelevalla oktaaniluvulla. Sytytyshetki voidaan tarvittaessa säätää hallitusti hyvin lähelle nakutusrajaa ja täten mahdollistaa hyvä moottorin suorituskyky. Ilman nakutuksen hallintaa sytytykselle täytyy jättää noin 5–8 asteen turvaraja kampiakselinkulmana nakutusrajaan nähden. (Hofmann, Mencher, Häming & Hess 2006, 31.) Nakutuksen hallintajärjestelmään kuuluu nakutustunnistin, signaalin käsittely, nakutuksen havaitseminen ja sytytyksen ajoituksen hallinta mukautumisominaisuudella. (Reif & Dietsche 2014, 633.)

Tyypillinen nakutuksen oire on korkeataajuuksinen värähtely, joka näkyy sylinterinpainekuvaajassa päällekkäisenä varsinaisen painekäyrän päällä (kts. kuvio 3). Paras tapa mitata ja havaita värähtely on mitata se suoraan palotilasta paineanturin avulla. Paineantureiden käyttäminen mittaamisen on kuitenkin suhteellisen kallista, joten värähtely mitataan yleensä sylinteriryhmään kiinnitetyillä nakutustunnistimilla. Yksittäisen sylinterinpaineanturin hinta on tuhansia euroja ja nakutustunnistimen hinta kymmeniä euroja (AGCO Power 2018). Sylinteriryhmään kiinnitettävät nakutustunnistimet ovat pietsosähköisiä kiihtyvyytunnistimia, jotka tunnistavat värähtelyn ja muuttavat sen sähköiseksi signaaliksi, joka käsitellään moottorinohjainlaitteessa. (Reif & Dietsche 2014, 633–634.)

Nakutustunnistimia on kahdenlaisia: laajakaista-anturi, joka kykenee mittaamaan yleensä taajuusalueella 5–20 kHz ja resonanssianturi, joka tunnistaa vain tietyn taajuuden nakutuksen värähtelyn. Laajakaista-anturin ja signaalinkäsittelylaitteen avulla on mahdollista tunnistaa eri taajuuksilla tapahtuvaa nakutusta jopa yhden anturin avulla. Tämä tekee laajakaista-anturin käytöstä paremman vaihtoehdon nakutuksen havaitsemiseen ja hallintaan. Jotta nakutus pystytään havaitsemaan moottorista luotettavasti kaikissa tilanteissa, täytyy nakutustunnistimien paikat ja sijainnit määrittää aina moottorikohtaisesti. 4-sylinterisissä

rivimoottoreissa on tyypillisesti 1 tai 2 nakutusanturia, 5- ja 6-sylinterisissä 2 ja 8- sekä 12-sylinterisissä 4 anturia. (Reif & Dietsche, ym. 2014, 634.)

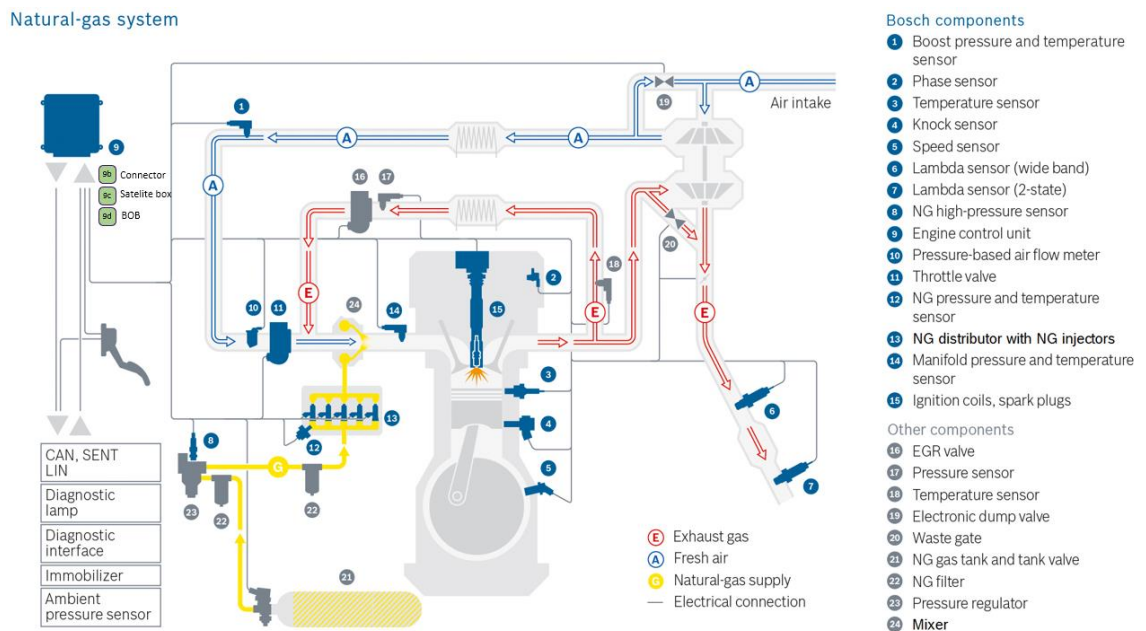
Laajakaista-anturia käytettäessä ohjainyksikkö arvioi jatkuvasti signaalia ja siten varmistaa luotettavan nakutuksen havaitsemisen kaikissa tilanteissa. Ohjainyksikön algoritmi tunnistaa signaalista moottorin nakutuksen jokaisesta sylinteristä ja jokaisesta palotapahtumasta vertaamalla kullakin hetkellä signaalia vastaavaan kuormitustilanteen signaaliin ilman nakutusta. Kun ohjainyksikkö havaitsee jonkin sylinterin nakuttavan, se myöhäistää sytytystä kyseisessä sylinterissä. Kun nakutus päättyy, ohjainyksikkö aikaistaa sytytystä takaisin kohti esiasetettua ennakkoa. Jos nakutus alkaa uudelleen, prosessi toistuu (Kuvio 9). Nakutuksen havaitsemisen algoritmi on ohjelmoitu tunnistamaan ja eliminoimaan kaikki kuuluva ja moottorille haitallinen nakutus kaikissa kuormitustilanteissa. (Reif & Dietsche 2014, 634–635.)



Kuvio 9. Sytytyksenajoituksen säätäminen nakutustilanteessa. Pystyakselilla sytytysennakko kampiakselin astekulmana ja vaaka-akselilla aika sekunteina. (Guzzella & Onder 2010, 209)

2.5.1 Moottorinohjausjärjestelmän komponentit

Kuviossa 10 ovat testeissä käytetyn moottorin ohjaukseen ja nakutuksen havaitsemiseen tarvittavat komponentit. Pääasiassa komponentit ovat samoja kuin bensiinikäyttöisissä moottoreissa ja eroja on lähinnä polttoaineen syöttöpuolella. Kaasukäyttöisessä moottorissa korkeapaineinen kaasu johdetaan tankista (21) suodattimen (22) läpi paineensäätimelle ja siitä toisen suodattimen (22) läpi kaasunjakotukille (13). Jakotukissa ovat kaasusuuttimet, joilla annostellaan haluttu määrä kaasua ja syötetään se sekoittimelle (24) imuilmaputkeen. Kaasun painetta valvotaan paineensäätimellä olevan korkeapaineanturin (8) ja kaasunjakotukissa olevan paine/lämpötila-anturin avulla. Tyypillisesti kaasun paine on tankissa 200 baria ja suihkutuspaine 7 baria.



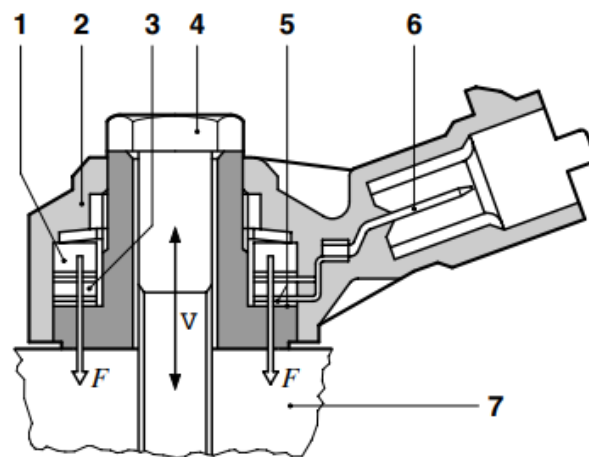
Kuvio 10. Kaaviokuva moottorinohjausjärjestelmästä ja komponenteista (Bosch 2019)

2.5.2 Nakutustunnistin

Toimintaperiaatteeltaan nakutustunnistin on värähtelyn tunnistava anturi ja on kykenevä tunnistamaan rakenteesta johtuvan värähtelyn, polttomoottorin tapauksessa nakutuksen moottoriin aiheuttaman värähtelyn. Nakutustunnistin muuttaa värähtelyn sähköiseksi signaaliksi ja siirtää sen moottorinohjanlaitteelle.

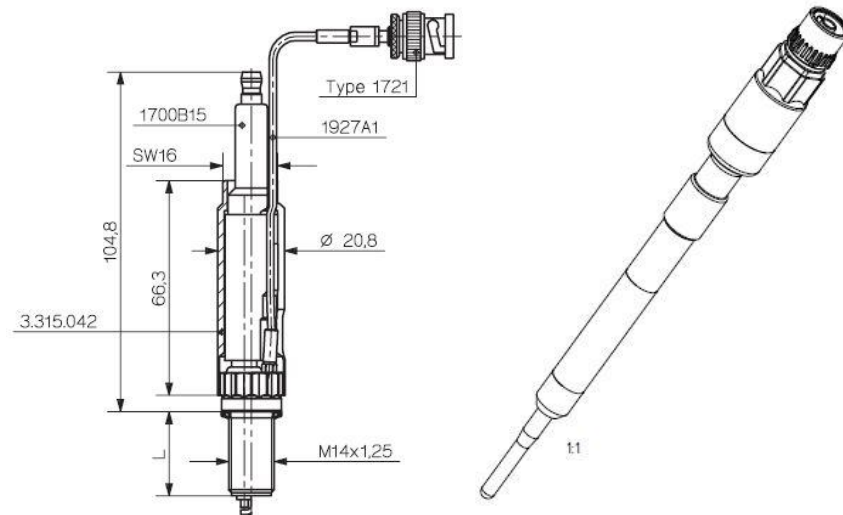
Moottorinohjainlaite myöhäistää sytytystä, kunnes nakutusta ei enää esiinny. (Muller, Konzelmann, Frehoff, Mast & Riegel 2006, 251.)

Kuviossa 11 on esitettyä nakutustunnistimen läpileikkaus. Tunnistin on kiinnitettyä sylinteriryhmän ulkoseinään (7) lähelle sylinteriä. Seismiseen massa (1) johtuu kiinnityspultin (4) kautta sylinteriryhmästä värähtelyä. Massa kohdistaa värähtelyä vastaavalla taajuudella puristavan voiman pietsokeraamiseen elementtiin (3). Tämä voima aiheuttaa elementissä sähköisen varauksen. Keraamisen elementin ylä- ja alaosan välille muodostuva jännite-ero lähetetään kosketuslevyjen (6) kautta moottorinohjausyksikölle. (Muller, Konzelmann, Frehoff, Mast & Riegel 2006, 251.)



Kuvio 11. Nakutustunnistin (Sensors Bosch 2013)

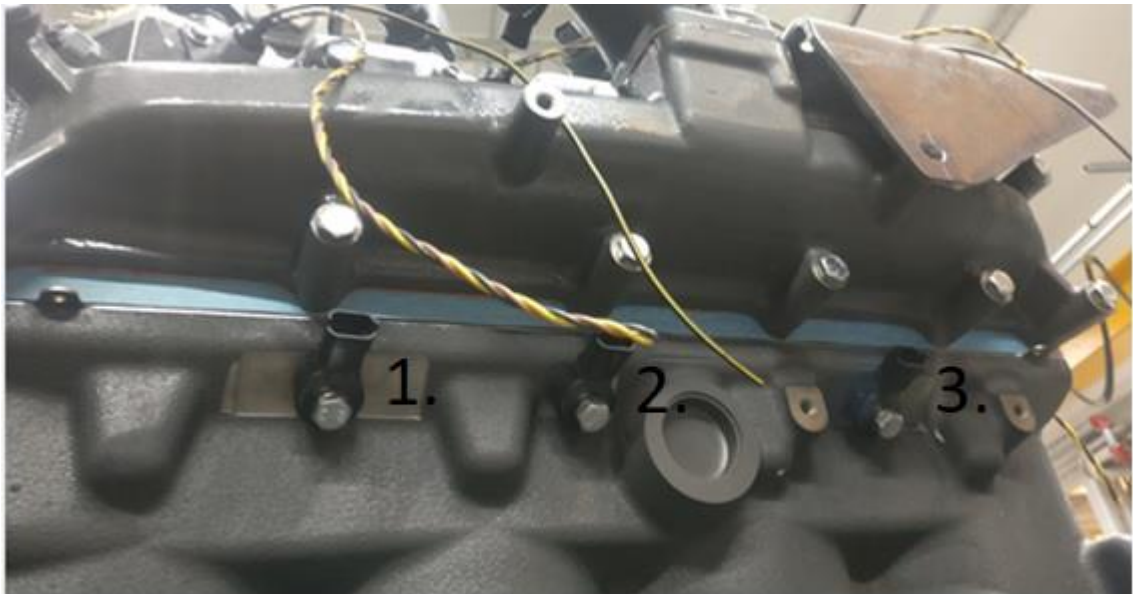
Kipinäsytytteisissä moottoreissa on mahdollista käyttää sytytystulppaan integroituja paineantureita (kuvio 12). Ratkaisun etuna on, ettei sylinterinkanteen tarvitse tehdä ylimääräisiä porauksia paineen mittausta varten. Sytytystulppa toimii edelleen ja se sytyttää seoksen ja sylinterinpaine voidaan mitata myös samalla. Vähäisen tilan vuoksi paineanturi joudutaan usein sijoittamaan tulppaan epäkeskeisesti. Dieselmootoreissa voidaan käyttää hehkutulppien tilalle asennettavia paineantureita, jos moottorissa on hehkutulppien paikat. Tällaisessa asennuksessa käytettävissä oleva tila määrittää minkälaisen anturista voi tehdä. Paineanturin kalvo tulisi saada mahdollisimman lähelle palotilaa, jotta viive olisi mahdollisimman pieni. (Merker, Schwarz & Teichmann 2012, 59–60, 62.)



Kuvio 12. Vasemmalla sytytystulppaan (Kistler) ja oikealla hehkutulppaan (Hidria) integroitu paineanturi. (Hidria; Kistler)

2.5.3 Nakutustunnistimien sijoituspaikat moottorissa

Nakutustunnistimet täytyy sijoittaa moottoriin paikkoihin, joista ne saavat luotettavasti mitattua nakutuksen kaikista sylintereistä. Yleisin paikka nakutustunnistimille on sylinteriryhmässä lähellä sylinterinseinämiä. Jotta nakutustunnistin voi luotettavasti mitata nakutuksen, ilman ylimääräistä resonointia, täytyy anturi kiinnittää tukevasti sylinteriryhmään. Pulttikiinnitys on riittävä kyseiseen tarkoitukseen. Kiinnityksessä on huomioitava seuraavat asiat: pultti on kiristettävä sille määritettyyn kireyteen, kontaktipintojen täytyy olla tarpeeksi tasaisia ja puhtaita ja alus- tai välilevyjä ei saa käyttää kiinnityksessä. Pultin kireys on oleellinen asia, koska värähtely siirtyy sylinteriryhmästä anturiin pultin kautta. (Muller, Konzelmann, Frehoff, Mast & Riegel 2006, 251.) Testimoottorissa nakutustunnistimet sijoitettiin sylinteriryhmän yläosaan, mahdollisimman lähelle palotilaa. Nakutustunnistin 1 on sylinterien 1 ja 2 välissä tunnistin 2 on sylinterien 2 ja 3 välissä sekä tunnistin 3 sylinterien 3 ja 4 välissä (kuva 1). Lisäksi käytössä oli liimattava lisäanturi, joka oli kiinnitettynä sylinterien 2 ja 3 väliin alakulokohdan tasolle.



Kuva 1. Nakutustunnistimien sijoituspaikat. Kuvassa kolme mustaa tunnistinta on kiinnitettyä sylinteriryhmän yläosaan, lähelle sylinterin palotilaa.

Moottorissa on paljon erilaista värinää kuten venttiilikoneiston, öljy- ja vesipumpun sekä kampikoneiston aiheuttamat värinät, joten kaikki tämäntyyppiset värinät täytyy pystyä suodattamaan pois anturin mittaamasta signaalista. Toisin sanoen anturit kyllä mittaavat luotettavasti kaiken värinän moottorista, mutta lisäksi on selvitettävä, mikä värinä on lähtöisin nakutuksesta ja mikä on moottorin toiminnasta aiheutuvaa. Ylimääräisten taajuusalueiden mittaamista voidaan välttää arvioimalla laskennallisesti nakutuksen aiheuttaman värinän ominaistuuksia.

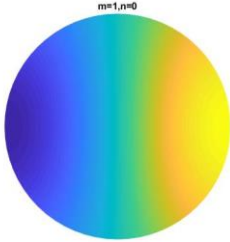
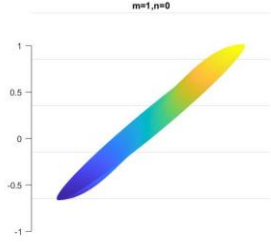
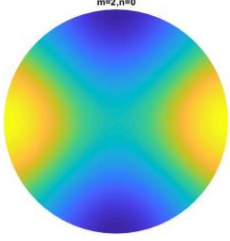
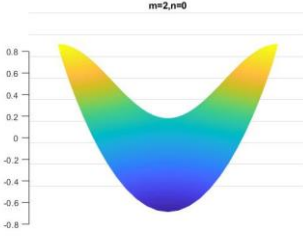
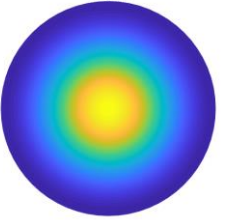
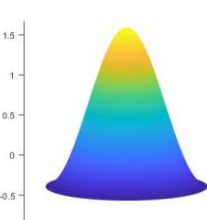
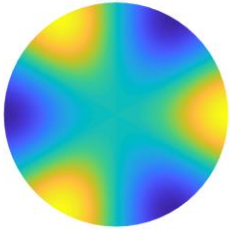
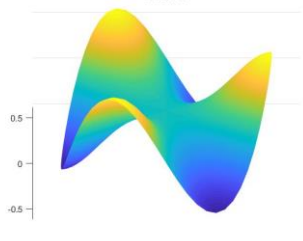
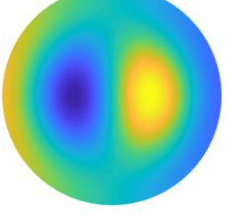
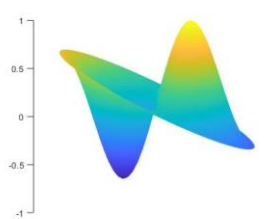
2.5.4 Nakutustaajuuden laskenta

Nakutuspalamisesta aiheutuvalla värähtelyllä on ominaistuuksia, joka määräytyy suurelta osalta aallonpituudesta ja äänen nopeudesta palotilassa (Guzzella & Onder 2010, 205). Lisäksi vaikuttaa värähtelyn tapa (Moodi, Taulukko 1). Värähtely voi tapahtua sylinterimäisessä tilassa monilla eri tavoilla. Nakutustilanteessa värähtelyn oletetaan useimmiten tapahtuvan kehän tai säteittäissuunnassa, joten laskettaessa ei oteta huomioon syvyysuunnassa mahdollisesti tapahtuvaa värähtelyä. (Chen, Li, Yin & Zheng 2014, 949.)

Taulukossa 1 on esitettyä värähtelyn seisovien aaltojen tihentymät ja harventumat sylinterissä. Tihentymät ovat keltaisella ja harventumat sinisellä. Tihentymän

ja harventuman välissä on solmukohta, jossa paine pysyy vallitsevan staattisen paineen tasolla. Sarakkeessa (m,n) m tarkoittaa kehällä tapahtuvaa värähtelyn moodia ja n säteittäisesti tapahtuvan värähtelyn moodia. Perusvärähtelyn arvo on 1 ja sitä suuremmat ovat ylivärähtelytaajuuksia. Sarakkeessa α_{mn} ovat kullekin värähtelytavalle käytettävät kertoimet värähtelytaajuutta laskettaessa.

Taulukko 1. Teoreettiset värähtelytapojen muodot sylinterimäisessä tilassa. (AGCO Power 2019)

(m,n)	$\alpha_{m,n}$	Moodin muoto ylhäältä	Moodin muoto vinosti ylhäältä
(1,0)	1,841		
(2,0)	3,054		
(0,1)	3,832		
(3,0)	4,201		
(1,1)	5,332		

Värähtelyn tapa vaikuttaa laskukaavassa 2 käytettävään lukuun α_{mn} . Tämä luku voidaan määrittää sylinterinmuotoiseen tilaan Besselin kaavalla (Chen, Li, Yin & Zheng 2014, 949). Laskuissa käytetyt luvut ovat nähtävissä taulukossa 2.

Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että palotila on täytetty ilmalla, joka käyttäytyy ideaalikaasun tavoin. Arvioitu kaasun lämpötila vaihtelee hieman lähteestä riippuen. Esimerkiksi Guzzella ja Onder arvioivat lämpötilan olevan 2000K ja Chen ym. käyttävät laskussa lämpötilaa 2500K (Guzzella & Onder 2010, 205) (Chen, Li, Yin & Zheng 2014, 949). Tässä työssä kaasun lämpötila sylinterissä arvioidaan olevan vähintään metaani-ilmaseoksen liekkirintaman lämpötila $t_{cyl} = 2270\text{K}$ (Glassman & Yetter 2008, 28), jolloin äänennopeus palotilassa c_{cyl} voidaan laskea kaavalla 1 (Guzzella & Onder 2010, 205).

$$c_{cyl} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot t_{cyl}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2270 \text{ K}} \approx 955 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

Missä:

ominaislämpökapasiteettien suhde κ . Yksiatomisilla kaasuilla likimäärin 1,67 ja kaksiatomisilla 1,40 (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2014, 107). Kaasuvakio R , ilmalle $287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ (Newworldencyclopedia 2017) ja kaasun lämpötila sylinterissä t_{cyl} . Paineaaltojen ominaistaajuus f_{knock} voidaan laskea kaavalla 2

$$f_{knock} = \frac{c_{cyl} \cdot \alpha_{m,n}}{\pi \cdot B} \quad (2)$$

missä:

$m, n = 0, 1, 2, \text{jne.}$ Äänen nopeus kaasussa c_{cyl} , modaalinen parametri α_{mn} (seisovan aallon värähtelytavan mukaan laskennallisesti määritetty kerroin (taulukko 1)) ja sylinterin halkaisija B .

Kun kaavaan 2 sijoitetaan testeissä käytetyn AGCO Power -moottorin sylinterin halkaisija 0,108 m ja oletetaan värähtelyn tapahtuvan kehäsuuntaisesti ensimmäisellä resonanssitaajuudella, saadaan taajuudeksi

$$f_{knock} = \frac{c_{cyl} \cdot \alpha_{m,n}}{\pi \cdot B} = \frac{955 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,841}{\pi \cdot 0,108 \text{ m}} \approx 5,2 \text{ kHz}$$

Nylund N-O on laskenut propaanikäyttöiselle Valmet 311 -moottorille nakutuksen ominaisvärähtelytaajuuden. Laskuissa sylinterissä olevan kaasuseoksen lämpötilaksi on arvioitu hieman propaanin itsesyttymislämpötilaa (777 K) korkeampaa

arvoa, 850 K (Nylund 1995, 104–105). Laskennalliseksi ominaistajuudeksi on saatu noin 6600 Hz ja mittauksissa nakutus on ilmennyt taajuudella 6500–7000 Hz. Kun samaa laskumenetelmää sovelletaan metaanikäyttöiseen moottoriin, täytyy ottaa huomioon metaanin korkeampi itsesyttymislämpötila. Metaanin itsesyttymislämpötila on 923 K (Reif & Dietsche, ym. 2014, 317). Sijoittamalla kaavaan 1 itsesyttymislämpötila saadaan äänennopeudeksi kaasussa:

$$c_{cyl} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot t_{cyl}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 923 \text{ K}} \approx 609 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Taulukossa 2 on laskennalliset tulokset eri värähtelytapojen mukaan sekä yksi tulos, jossa on oletettu, että värähtelyä tapahtuu myös yhdistetysti ($m,n = 1,1$). Tulokset on laskettu kahdelle eri lämpötilalle. Korkeampi on lähellä liekkirintaman lämpötilaa ja matalampi vastaa metaanin itsesyttymislämpötilaa 923 K.

Taulukko 2. Lasketut värähtelytaajuudet sylinterissä

(m,n)	(1,0)	(2,0)	(0,1)	(3,0)	(1,1)
värähtelytila	1.kehän	2.kehän	1.säteen	3.kehän	1.yhdistetty
$\alpha_{m,n}$	1,841	3,054	3,832	4,201	5,332
$f_{m,n}$ (kHz) 2270 K	5,2	8,6	10,8	11,8	15,0
$f_{m,n}$ (kHz) 923 K	3,3	5,5	6,9	7,5	9,6

Taulukon tulosten perusteella voidaan olettaa värähtelyn pienimmän mahdollisen ominaistajuuden olevan 3,3 kHz ja suurimman 15 kHz. Värähtelyn suurimman intensiteetin oletetaan kuitenkin olevan ensimmäisellä resonanssitaajuudella, joten nakutuksen aiheuttamaa värähtelyn voi olettaa näkyvän mittauksissa $m,n = 1,0$ tai $m,n = 0,1$ värähtelytiloissa. Näiden taajuudet ovat liekkirintaman lämpötilalla 5,2 ja 10,8 kHz sekä itsesyttymislämpötilalla 3,3 ja 6,9 kHz. Mittauksissa on siis syytä keskittyä havaitsemaan näillä taajuusalueilla tapahtuvia värähtelyn intensiteetin muutoksia sylinterinpainekuvaajassa.

Männän muotoilusta johtuen on mahdollista, että myös männässä olevaan sylinterimäiseen palotilaan voi muodostua seisova aalto. Kuitenkin männässä on

palamattomalla seoksella vähemmän aikaa itsesyttyä, koska etäisyys sytytystulppaan on lyhyempi, joten itsesytyminen on epätodennäköistä. Jos kuitenkin männässä tapahtuu itsesytyminen, tai esi/hehkusytyminen aiheuttaa siihen seisovan aallon, ilmenevät värähtelyt mahdollisesti taulukossa 3 olevilla taajuuksilla. Männässä olevan palotilan halkaisija on 80 mm.

Taulukko 3. Lasketut värähtelytaajuudet männän palotilassa

(m,n)	(1,0)	(2,0)	(0,1)	(3,0)	(1,1)
värähtelytila	1.kehän	2.kehän	1.säteen	3.kehän	1.yhdistetty
$\alpha_{m,n}$	1,841	3,054	3,832	4,201	5,332
$f_{m,n}$ (kHz) 2270 K	7,0	11,6	14,6	16,0	20,3
$f_{m,n}$ (kHz) 923 K	4,5	7,4	9,3	10,2	12,9

Männässä resonanssitaajuus on liekkirintaman lämpötilalla todennäköisesti 7,0 tai 14,6 kHz ja itsesyttymislämpötilalla 4,5 tai 9,3 kHz.

3 MAA- JA BIOKAASU POLTTOAINEENA

3.1 Metaani polttoaineena

Maakaasu ja biokaasu koostuvat pääosin metaanista, joka siis näitä polttoaineita käytettäessä on pääasiallinen energialähde. Maakaasun metaanipitoisuus vaihtelee, ollen 80–99 %. Muita maakaasun komponentteja ovat mm. hiilidioksidi, typpi, ja lyhytketjuiset hiilivedyt (Ullmann & Allgeier 2006, 38). Biokaasun metaanipitoisuus on alhaisempi, noin 60–70 % ja loput kaasusta on pääosin hiilidioksidia, 30–40 %. Maakaasun ja biokaasun merkittävin ero on biokaasun suurempi hiilidioksidipitoisuus. Lisäksi maakaasu sisältää usein myös muita hiilivetyjä. Näiden erojen vuoksi biokaasun energiasisältö on pienempi ja biokaasusta täytyy puhdistaa hiilidioksidi, jonka jälkeen energiasisältö on hyvin lähellä maakaasun tasoa. (Petersson & Wellinger 2009, 5.)

Taulukko 4. Kaasujen vertailua alkuperän mukaan (Petersson & Wellinger 2009, 5)

Komponentti	Biokaasu	Kaatopaik- kakaasu	Maakaasu (Tanska)	Maakaasu (Hollanti)
Metaani (til -%)	60–70	35–65	89	81
Muut hiilivedyt (til -%)	0	0	9,4	3,5
Vety (til -%)	0	0–3	0	-
Hiilidioksidi (til -%)	30–40	15–50	0,67	1
Typpi (til -%)	~0,2	5–40	0,28	14
Happi (til -%)	0	0–5	0	0
Rikkivety (ppm)	0–4000	0–100	2,9	-
Ammoniakki (ppm)	~100	~5	0	-
Alempi lämpöarvo* (kWh/Nm ³)	6,5	4,4	11,0	8,8

*Alempien lämpöarvon yksikkö on kilowattituntia normaalikuutiometriä kohden. Normaalikuutiometriä käytetään kaasuntilavuusyksikkönä. Ilmanpaine on 1,01325 baria ja lämpötila 0 °C (Barbir 2013, 125.)

Hiilivetyjen stoikiometriseen seokseen tarvitsee 11,4 kg:a ilmaa 1 kg:a hiiltä (C) kohden ja 34,3 kg:a ilmaa 1 kg:a vetyä (H) kohden. Koska metaanin hiili/vety-suhde on suurempi (enemmän vetyä) kuin bensalla ja dieselillä, täytyy 1 kg:a metaania kohden olla enemmän ilmaa. (Guzzella & Onder 2010, 99.) Metaanin hiili/vetysuhde on 75 C/25 H (Reif & Dietsche 2014, 317), joten stoikiometriseen palamiseen tarvitaan ilmaa

$$0,75 \cdot 11,4 \text{ kg} + 0,25 \cdot 34,4 \text{ kg} = 17,125 \text{ kg}$$

Taulukossa 5 on vertailtu eri hiilivety pohjaisia polttoaineita. Puhdistettu biokaasu ja maakaasu ovat pääosin metaania (Petersson & Wellinger 2009, 5), joten sen vuoksi bensiiniin ja dieseliin verrataan metaanin ominaisuuksia.

Taulukko 5. Polttoaineiden ominaisuuksien vertailua (Reif & Dietsche, ym 2014, 317–318)

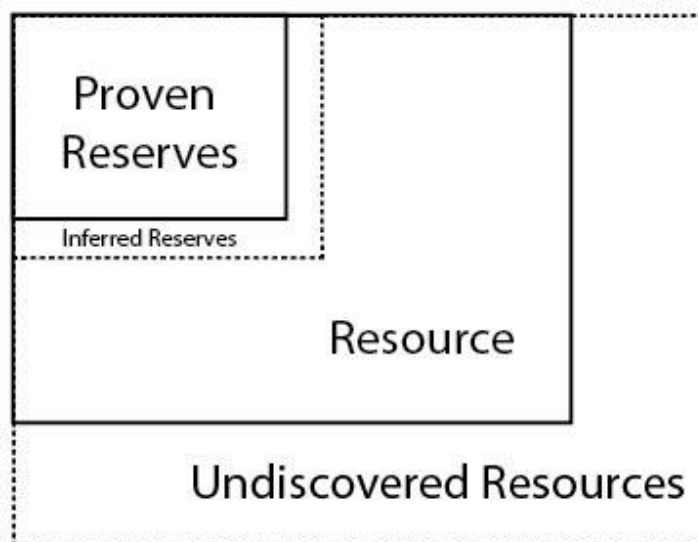
Polttoaine	Metaani	Bensiini	Diesel
Tiheys (0 °C, 1,013 bar)	0,73 kg/m ³	0,720–0,775 kg/l	0,820–0,845 kg/l
Komponentit	75 C, 25 H	86 C, 14 H	86 C, 14 H
Kiehumispiste	-162 °C	25–210 °C	180–360 °C
Nettolämpöarvo	50,0 MJ/kg	40,1–41,6 MJ/kg	42,9–43,1 MJ/kg
Syttymislämpötila	650 °C	420 °C	≈250 °C
Stoikiometrinen ilman tarve	17,2 kg/kg	14,7 kg/kg	14,5 kg/kg

3.2 Maakaasu

Maakaasulla, joka on pääosin metaania, on bensiiniä ja dieseliä parempi lämpöarvo, koska metaanilla on parempi hiili/vetysuhde ja vedyllä on parempi lämpöarvo kuin hiilellä. Bensiinin ja dieselin hiili/vetysuhde on 86 C/14 H ja metaanin 75 C/25 H. (Reif & Dietsche 2014, 316–317.) Myös ominaishiilidioksidipäästö on metaanilla pienempi, koska vedyn palamisreaktiossa syntyy palamistuotteena vettä (Köhler & Allgeier 2006, 269). Bensiiniin verraten etuna on myös korkeampi puristuskestävyys. Bensiinin oktaaniluku on tyypillisesti 91–100 (RON), kun maakaasulla se voi olla jopa 130. Korkeampi puristuskestävyys mahdollistaa

korkeamman puristussuhteen, ja sen myötä paremman hyötysuhteen. (Ullmann & Allgeier 2006, 38.)

OPEC:n mukaan maailman varmistetut maakaasuvarat olivat vuonna 2017 noin 200 000 miljardia kuutiometriä ja maailman vuotuinen maakaasun tuotanto noin 3700 miljardia kuutiometriä (OPEC 2019). Varannon ja tuotannon suhde oli siis noin 54, mikä tarkoittaa, että jos kaasuntuotannon olettaisi jatkuvan samalla tasolla, kaasuvarat riittäisivät noin 54 vuodeksi. Maakaasuvarannoilla tarkoitetaan tällä hetkellä teknisesti ja taloudellisesti hyödynnettävissä olevia tunnettuja varantoja. Näiden lisäksi on olemassa myös varmistamattomia varantoja ja kaasuresursseja, jotka koostuvat löydetyistä ja löytymättömistä kaasukentistä, joiden uskotaan voivan olla tulevaisuudessa kaasuvarantoja. Resurssit muuttuvat varannoiksi, kun kaasun myyntihinta nousee ja tekniikka kehittyy sellaiselle tasolle, että kaasun tuottaminen on mahdollista. Tämän vuoksi varannon ja tuotannon suhde voi pysyä vuosikausia samana, vaikka kaasuntuotanto kasvaisi kokonaisuudessaan jatkuvasti. (International Energy Outlook 2016, 59–60.) Kuviossa 13 Proven Reserves tarkoittaa tunnettuja varantoja ja Inferred Reserves varmistamattomia varantoja. Resources, eli resurssit, ovat tiedossa olevia kaasukenttiä ja Undiscovered Resources ovat löytymättömiä kenttiä.



Kuvio 13. Esimerkki varannot vs. resurssit (Johnson 2017).

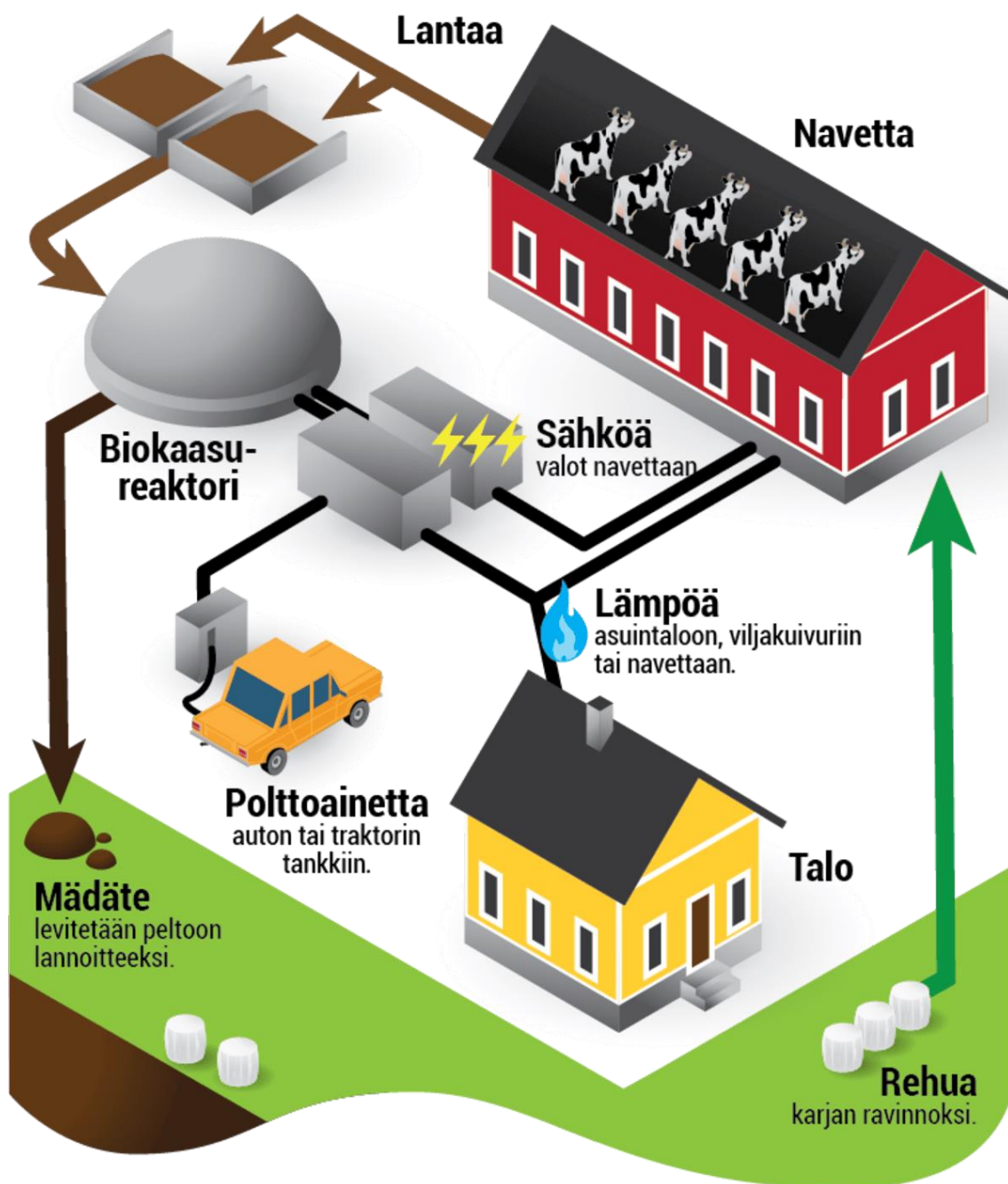
Maakaasu on kuitenkin fossiilinen polttoaine ja siitä aiheutuu runsaasti hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi maakaasua pääsee kaasukentiltä ja huoltoketjusta ilmakehään, missä se muuttuu vähitellen vesihöyryksi ja hiilidioksidiksi (ilmasto-opas

2019). Metaani on noin 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi (Tilastokeskus 2015).

3.3 Biokaasu

Biokaasua syntyy, kun orgaanista ainetta maatuu hapettomissa olosuhteissa. Biokaasun tuotantoon on saatavana biomassaa helposti, koska lähes kaikki orgaaninen massa soveltuu biokaasun tuotantoon. (Petersson & Wellinger 2009, 4.) Biokaasun tuotanto on ollut nopeassa kasvussa maailmanlaajuisesti. IEA:n mukaan Tuotanto on kasvanut vuoden 2000 0,28 EJ:n tuotannosta 1,27 EJ:n tuotantoon vuoteen 2014 mennessä. (Kummamuru 2017, 30). EJ on eksajoule. Eksa on SI-järjestelmän mukainen kerrannainen, jonka kerroin on 10^{18} (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2014, 157). Vertailun vuoksi: Suomen kokonaisenergiankulutus vuonna 2017 oli 1,35 EJ (Tilastokeskus 2019), mistä liikenteen osuus 16 %:a, eli noin 0,22 EJ (Tilastokeskus 2018). Maailman biokaasutuotanto oli siis vuonna 2014 lähes saman verran kuin Suomen kokonaisenergiankulutus vuonna 2017.

Kuviossa 14 on esimerkki omavaraisuuteen tähtäävästä maatilasta. Energiaomavaraisuus syntyy käyttämällä lanta hyödyksi biokaasun tuotannossa ja sen jälkeen lannoitteena pellossa.



Kuvio 14. Esimerkki energia- ja lannoiteomavaraisesta maatilasta (Raimoaho 2019).

3.4 Nesteytetty maakaasu

Maakaasua voidaan nesteyttää (LNG, Liquefied Natural Gas, Nesteytetty maakaasu) ja tällä tavoin saadaan suurempi määrä energiaa samaan tilavuuteen. Nesteyttämällä päästään 0,41–0,5 kg/l tiheyteen, riippuen mm. lämpötilasta ja paineesta. (Demirbas 2010, 66–67.) 200 bariin paineistettuun maakaasuun verrattaessa nesteytettyä maakaasua voidaan pakata noin kolminkertainen määrä samaan tilavuuteen. Nesteytettyä maakaasua täytyy jäähdyttää alle -162 °C:seen, jotta se on nestemäisessä muodossa. Alhaisen lämpötilan vuoksi kaasu täytyy säilyttää hyvin eristetyssä tankissa. (Ullmann & Allgeier 2006, 38.)

4 MITTALAITTEET JA MITTAUSMENETELMÄT

4.1 Moottori

Testimoottori perustuu AGCO Powerin valmistamaan 4-sylinteriseen työkonedieselmoottoriin. Työkonedieselin käyttämistä testimoottorina tukevat sen kestävyysominaisuudet. Testimoottorin virityksaste on huomattavasti alhaisempi kuin aihiona käytetyn työkonedieselin, joten esimerkiksi sylinterinpaineet ja kampikoneiston laakerikuormat pysyvät pienempänä. Koska moottori on alun perin suunniteltu suuremmalle kuormitukselle, voi sitä koekäyttää luotettavasti ilman pelkoa rikkoontumisesta. Huonona puolena on, että stoikiometrisellä seossuhteella käytettävän ottomoottorin pakokaasut ovat huomattavasti kuumempia kuin dieselissä. Kuumuus kuormittaa pakoventtiileitä, pakosarjaa ja turboahdinta. Dieselissä nämä osat on suunniteltu alhaisemmille lämpötiloille, joten testimoottorin teho täytyy rajoittaa sen mukaan, että osat kestävät kuumuuden.

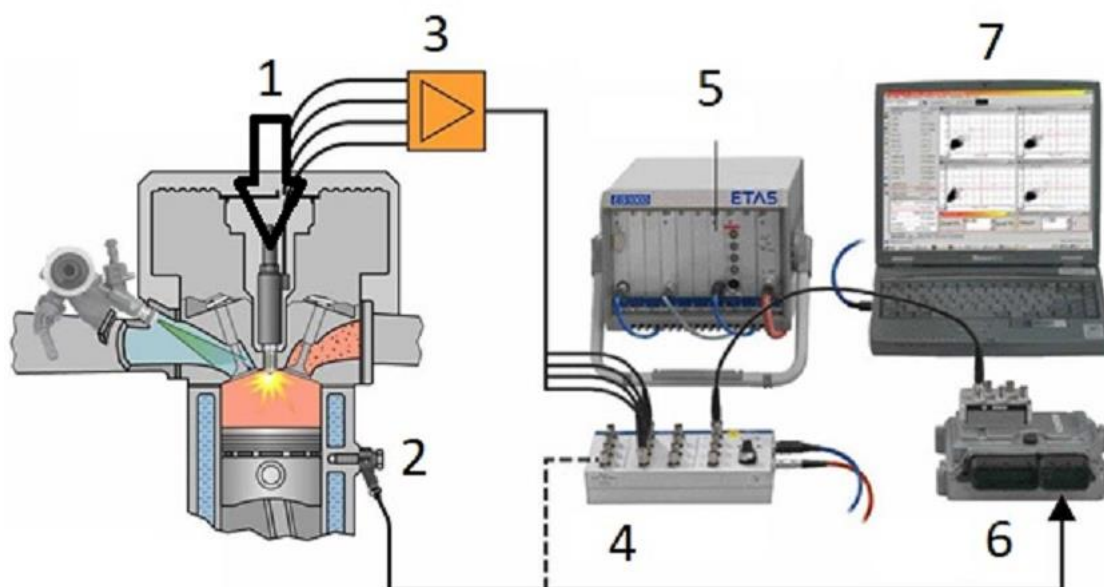
Taulukko 6. Moottorin tekniset tiedot

Moottori	AGCO Power 4,4 l, 4-tahti, 4 venttiiliä/sylinteri, turboahdettu, ahtoilman jäähdytin, sylinteriryhmä ja -kansi valurautaa
Sylinteriluku	4, rivi
Sytytysjärjestys	1-2-4-3
Sylinterin halkaisija	108 mm
Iskun pituus	120 mm
Iskutilavuus	4,4 litraa
Sytytys	Ulkoinen kipinä, sytytystulppa
Venttiilinvälitys, imu ja pako	0,35 mm kylmä/kuuma
Moottorin pyörimissuunta	Myötäpäivään moottorin etupäästä katsottuna
Puristussuhde	12:1
Teho	80 kW
Vääntömomentti	450 Nm

Taulukko 7. Polttoainejärjestelmä

Polttoaineen syöttö	Syöttö imuputkeen ahtimen jälkeen, imuilmaläppä, kaasu/ilma sekoitin
Polttoaine	SFS-EN 16723-2:2017 standardin mukainen maa- /biokaasu (SFS-EN 16723-2 2017)
Syöttöpaine	7 bar

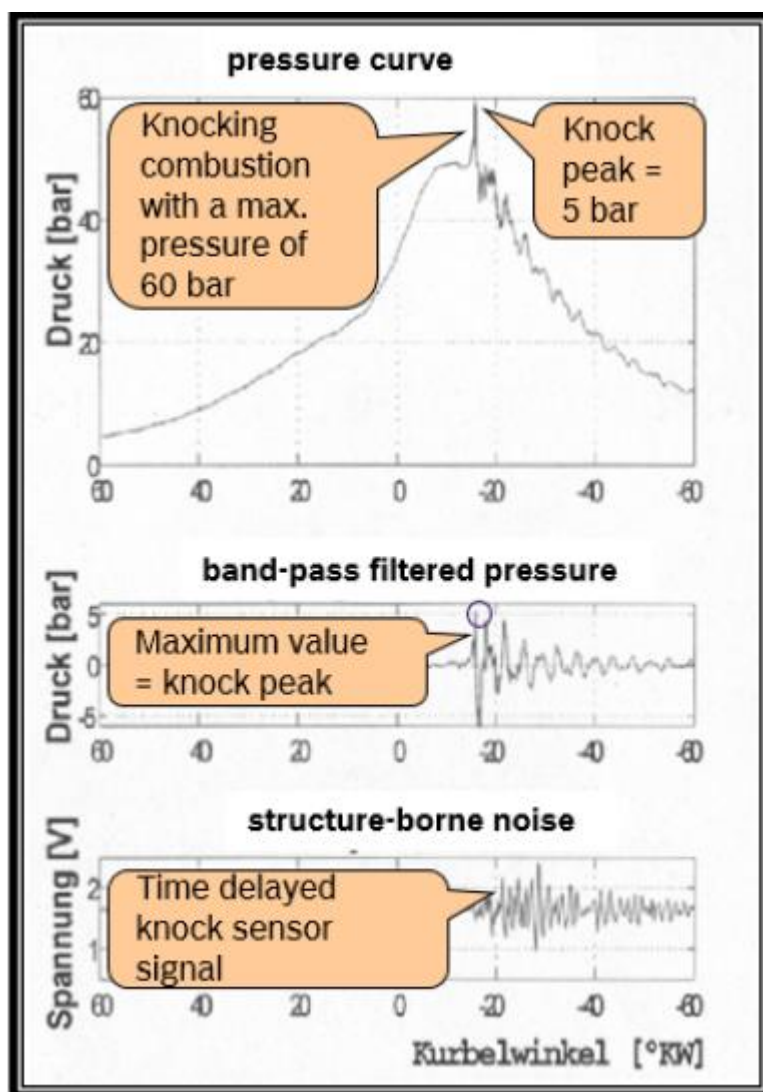
Kuviossa 15 ovat esitettynä nakutuksen havaitsemiseen ja säätöön tarvittavat laitteet. Kuvassa numero 1 on sylinterinpaineanturi, 2 on nakutustunnistin, 3 on signaalinvahvistin, 4 on KID-SU, joka synkronoi paineanturin ja nakutustunnistimen signaalit, 5 on ETAS ES1000 mittalaite, 6 on moottorinohjainyksikkö, 7 on tietokone. Tietokoneella säädetään moottorinohjausparametreja, verrataan sylinteripaineanturin ja nakutustunnistimen signaaleja sekä säädetään sen perusteella nakutuskriteereitä ohjainyksikölle sylintereittäin. Moottorinohjukseen käytettiin ETAS INCA -sovellusta. INCA:lla voi muuttaa moottorinohjausparametreja ja tehdä nauhoituksia ja valvontaa moottoriin sijoitettujen antureiden avulla.



Kuvio 15. Nakutussäätöön tarvittavat mittalaitteet (Bosch 2019, muokattu)

Paineanturin ja nakutustunnistimen signaalia täytyy suodattaa, jotta niistä näkyy nakutuksen aiheuttama paineen nousu ja melu. Kuviossa 16 on esitettynä sylinteripaineikäyrässä päällekkäisenä näkyvä painepiikki (Pressure curve). Paineipiikki

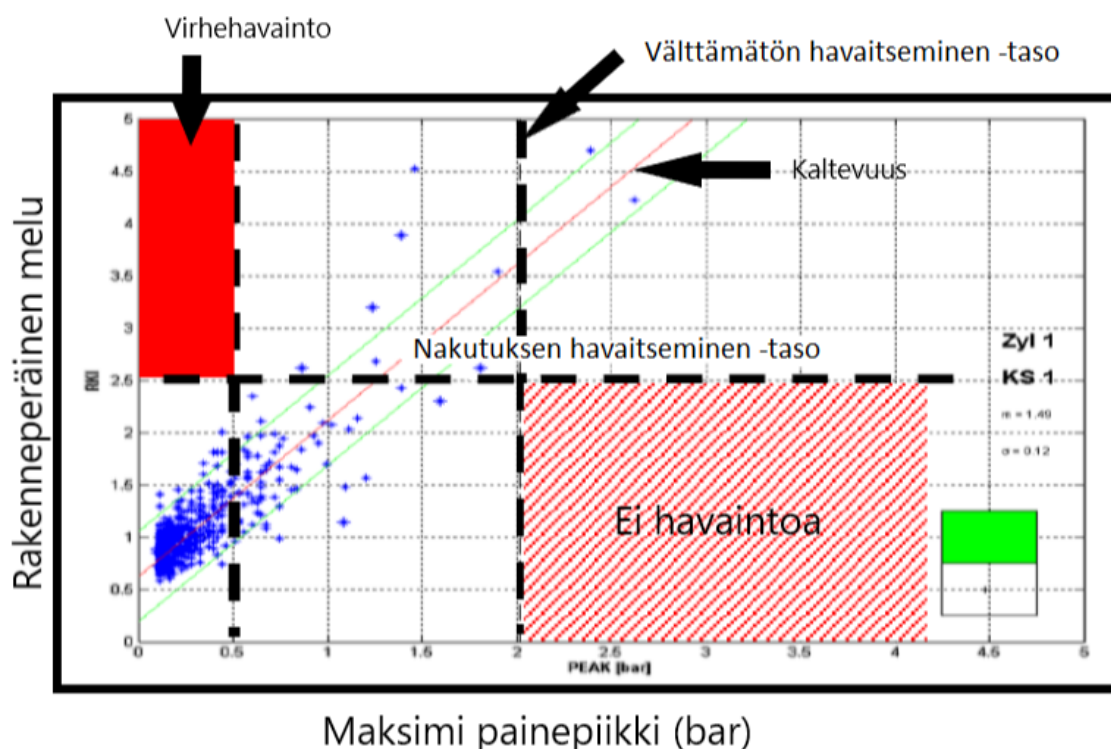
voidaan suodattaa paineanturin datasta painottamalla tietyillä taajuuksilla tapahtuvaa painevärähtelyä ja signaalista saadaan tällöin pelkästään nakutuksen aiheuttama ylimääräinen paineen nousu (band-pass filtered pressure). Alimpana kuviossa on suodatettu nakutustunnistimen signaali (structure-borne noise). Tästä signaalista on suodatettu pois tiettyjä taajuusalueita ja keskitytty mittamaan mahdollisia nakutuksen taajuuksia, joten signaali näyttää pääasiassa nakutuksen aiheuttaman melun.



Kuvio 16. Signaalien suodatus (Bosch 2019)

Mittausikkunassa nähdään visuaalisesti, toimiiko nakutuksen tunnistus pelkän nakutustunnistimen avulla (kuvio 17). Tietokone vertaa nakutustunnistimen signaalia paineanturin signaaliin kuvion 17 mukaisesti. Vaaka-akselilla on nakutuspalamisen aiheuttama ylimääräinen painepiikki. Pystyakselilla on nakutustunnistimen mittaama melu/värähtely sylinteriryhmästä. Siniset täplät ovat kohtia, jossa

paineanturin mittaaman painepiikin taso ja nakutusanturin mittaaman melun taso risteävät. Kun mittaus toimii hyvin, kuvioon merkitty kaltevuusviiva on noin 45 asteen kulmassa. 45 asteen kaltevuus tarkoittaa, että paineanturi sekä nakutustunnistin kykenevät mittaamaan nakutuksen yhtä luotettavasti. Jos kaltevuus on liian jyrkkä ja täplä on vasemman yläkulman virrehavaintoalueella, tarkoittaa se, että nakutusanturi mittaa moottorista mekaanista melua ja luulee sen nakuttavan. Koska tässä tilanteessa paineanturin mukaan ei ole ylimääräistä paineen nousua, moottori ei nakuta ja kyseessä on virrehavainto. Jos täplä sen sijaan on oikean alakulman punaiseksi viivoitetulla "ei havaintoa" -alueella, moottori nakuttaa, mutta nakutustunnistin ei kykene tunnistamaan sitä. Vaakasuuntainen katkoviiva "nakutuksen havaitseminen" -taso on moottoriohjainyksikölle määritetty melutaso, joka vastaa nakutusta. Tämän tason yläpuolelle menevän melun katsotaan olevan haitallista nakutusta. Jos käytössä on useita tunnistimia, tämä taso täytyy määrittää sylinterikohtaisesti, koska eri antureille tulee eri määrä moottorin mekaanista melua. Pystysuuntainen katkoviiva on painetaso, jonka ylittyessä on välttämätöntä tunnistaa nakutus, jotta moottorivauriota ei synny.



Kuvio 17. Nakutuksen havaitseminen (Bosch 2019, muokattu).

4.2 Nakutustunnistin

Nakutustunnistimen valintakriteerejä ovat mm. tarpeeksi laaja mittaustaajuusalue ja hyvä kestävyys erilaisten kemikaalien, lämpötilan ja värinän suhteen. Taulukossa 8 on esimerkki tällaiseen käyttöön soveltuvan nakutustunnistimen ominaisuuksista. Testeissä käytettiin Bosch KS-4-S -tunnistinta (Liite 1).

Taulukko 8. Esimerkki autoteollisuudessa käytetystä nakutustunnistimen ominaisuuksista (Bosch 2010)

Merkki	Bosch 0 261 231 148
Taajuusalue	1...20 kHz
Toimintalämpötila-alue	-40...150 °C
Kiinnityspultti	Valurauta: M8 x 25 Alumiini: M8 x 30
Kiristysmomentti	20±5 Nm

4.3 Sylinterinpaineanturi

Sylinterinpaineen mittaukseen käytettiin sytytystulppaan integroituja paineantureita ja hehkutulppaan integroituja paineantureita. Anturit eivät olleet käytössä yhtä aikaa, vaan molemmille valmistettiin oma sylinterinkansi, joihin ne olivat soivia. Nakutuskalibrointeja tehdessä oli käytössä Kistler 6117B -sytytystulppia integroidulla paineenmittauksella.

Taulukko 9. Kistler-sytytystulppa integroidulla sylinterinpaineanturilla (Kistler)

Merkki	Kistler 6117B
Anturi	Pietsosähköinen
Mittaustaajuus	≤100 kHz
Mittausalue	0...200 bar
Luonnollinen taajuus	130 kHz
Sensorin toimintalämpötila-alue	≤350 °C
Kiinnitys	M14 x 1,25
Kiristysmomentti	20...25 Nm

Taulukko 10. Hidria-hehkutulppa integroidulla sylinterinpaineanturilla (Hidria)

Merkki	Hidria
Anturi	Pietsosähköinen
Mittausalue	0...210 bar
Sensorin toimintalämpötila-alue	-40...150 °C
Kiinnitys	M10 x 1
Kiristysmomentti	12 Nm

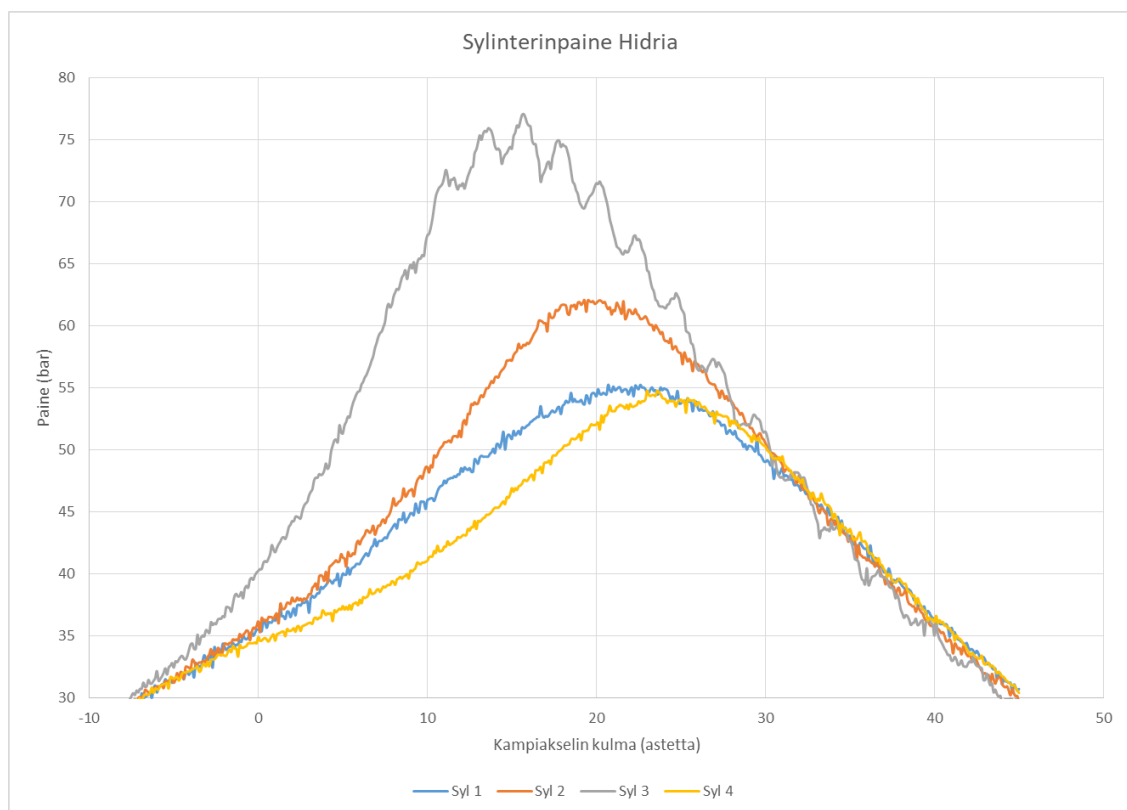
Kuviossa 18 on 3D-kuva sylinterinkannen palotilasta. Kistler-paineanturi sijoittuu lähes palotilan keskelle, koska sytytystulpan paikka on keskellä. Tulpassa ei ole tilaa sijoittaa paineanturia täysin keskelle, joten paineenmittaus sijoittuu hieman epäkeskeisesti. Hidrian paineanturi taas on aivan palotilan reunalla, 43,13 mm:n etäisyydellä keskustasta. Sylinterin halkaisija on 108 mm.



Kuvio 18. Paineanturien sijoitus sylinterin kannessa. (AGCO Power 2018)

5 MITTAUSTULOKSET

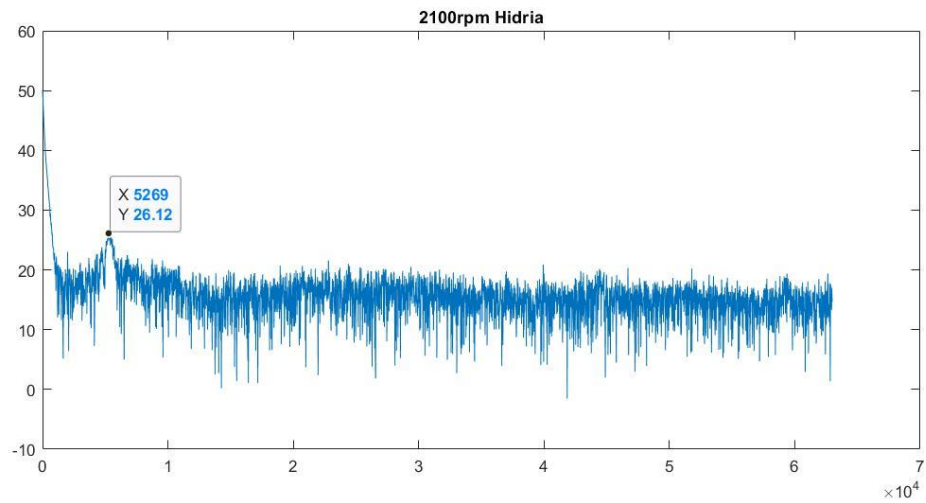
Moottorin nakutusraja etsittiin kokeellisesti ns. provosoimalla kovalla kuormituksella, sytytystä aikaistamalla ja nostamalla imuilman lämpötilaa. Testeissä ilmeni, että moottori ei ole herkkä nakuttamaan, minkä vuoksi imuilman lämpötilaa täytyi nostaa. Alla olevassa kuviossa on kaikkien sylinterien mitatut sylinterin paineet yhdeltä sykliltä. Harmaassa sylinteri kolmen painekäyrässä näkyy normaalin sylinterin paineen kanssa päällekkäisenä nakutuspalamisesta aiheutuva paineoskilointi. Kuvion 19 paineet on mitattu Hidrian antureilla, jotka on sijoitettu palotilan reunalle. Kolmannen sylinterin paine on huomattavasti korkeampi, kuin muissa. Tämä johtuu osittain nakutuspalamisen aiheuttamasta nopeasta paineennousta ja nopeasta lämmönvapautumisesta. Testeissä kuitenkin ilmeni, että suuret paine-erot sylinterien välillä ovat moottorille tyypillisiä, vaikka se ei nakuttaisi.



Kuvio 19. Sylinterin 3 nakutus

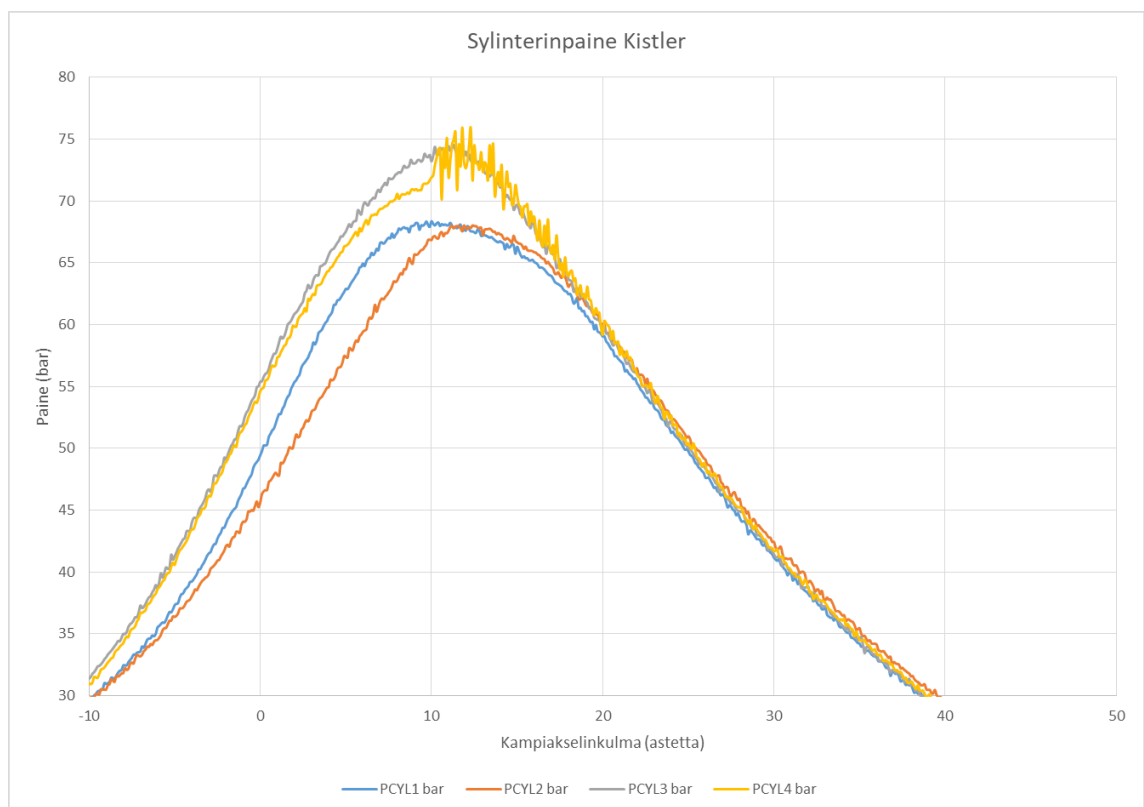
Kuviossa 20 on Matlab-ohjelmalla laskettu painevärähtelyn taajuuksien spektri sylinteristä 3. Matlab-ohjelmalla laskettiin anturien mittaamia nakutuksen seisovien aaltojen taajuuksia. Kuviossa 20 on pystyakselilla desibeliasteikko ja vaak akselilla taajuus kymmeninä tuhansina hertseinä. Noin 5300 Hz:n kohdalla näkyy

selvästi voimakkaampaa ääntä, minkä on päätelty olevan nakutuksesta aiheutu-
vaa. Hidria-paineantureiden tuloksissa taajuus on tyypillisesti 5200–5600 Hz vä-
lillä.



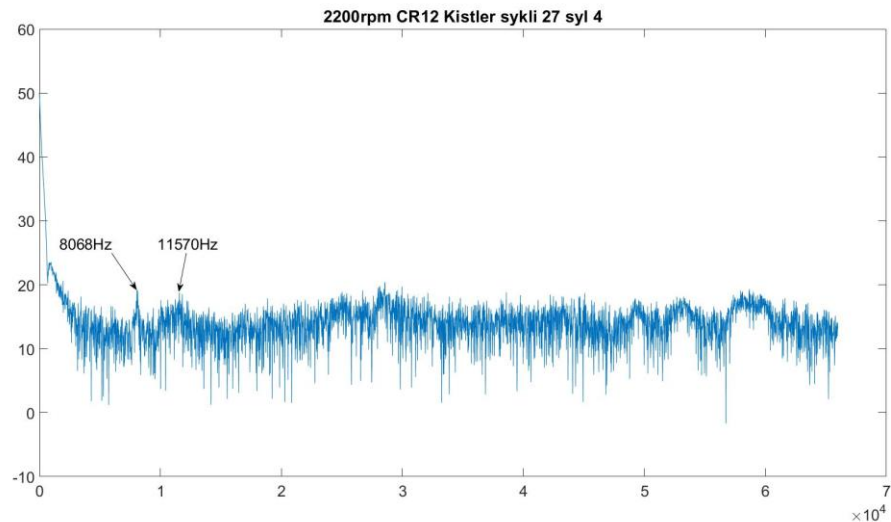
Kuvio 20. Taajuusspektri Hidria-paineanturin mitaamasta datasta

Kuviossa 21 ovat Kistler-paineanturilla mitatut sylinterinpainet nakutuspalamis-
tilanteessa. Sylinteri 4 nakuttaa. Kistlerin-antureilla mitatuissa paineissa nakutuk-
sen aiheuttama oskillointi näkyy terävämpänä sylinterinpaineen päällä. Myös an-
turin mittaamien taajuuksien spektri eroaa Hidria-antureilla mitatuista.



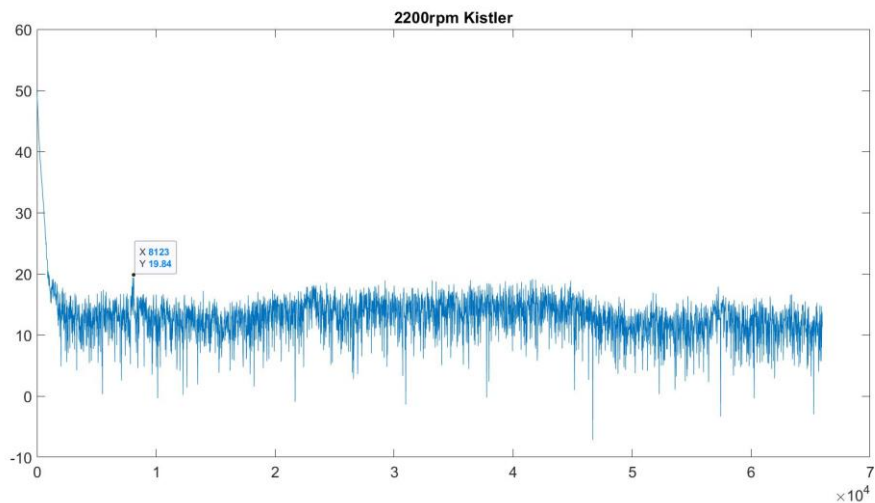
Kuvio 21. Sylinterin 4 nakutus Kistler-paineanturilla mitattuna

Kuviossa 22 on sylinteri 4:n Kistlerillä mitatun oskilloinnin spektri. Taajuudessa näkyy voimakkaampaa oskillointia noin 8000 ja 11600 Hz:n kohdalla. Kistlerillä mitatuissa tuloksissa oskillointi on yleensä 8000–8800 Hz:n välillä. Taajuudella 11600 Hz tapahtuva oskillointi viittaa siihen, että oskillointia tapahtuu myös ylempillä värähtelymoodeilla. Taulukon 2 tulosten mukaan ylempi taajuus voisi olla moodista (m,n) 0,1 tai 3,0.



Kuvio 22. Taajuusspektri Kistler-paineanturin mittaamasta datasta. Sylinteri 4

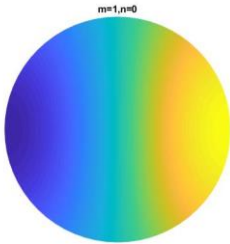
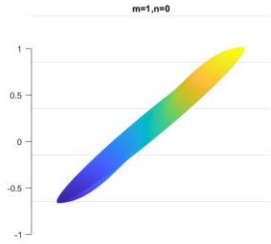
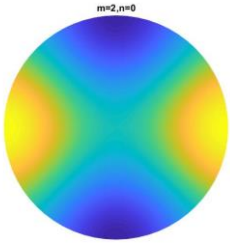
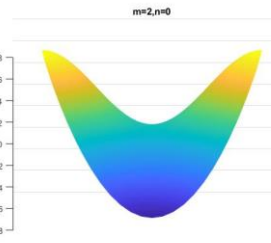
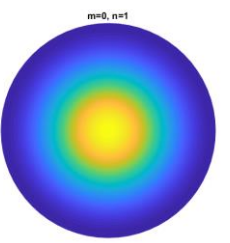
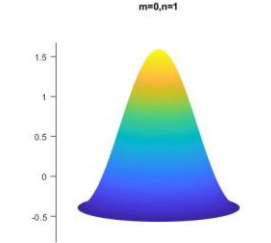
Kuviossa 23 on Kistlerillä mitatun oskilloinnin spektri eräästä mitatusta syklistä. Taajuudessa näkyy voimakkaampaa oskillointia noin 8000 Hz:n kohdalla. Kuvion 22 kaltainen taajuusspektri ilmeni, kun nakutus oli jo selvästi havaittavissa painekuvaajassa.



Kuvio 23. Taajuusspektri Kistler-paineanturin mittaamasta datasta

Kistlerin ja Hidrian antureiden mittaamien taajuuksien ero voi johtua antureiden eri sijoituskohdasta sylinterissä, jolloin ne mittaavat mahdollisesti eri värähtelymoodin seisovia aaltoja. Luvussa 2.5.4 laskettujen taajuuksien mukaan (taulukko 2 seuraavalla sivulla) Hidria voisi mitata moodin (m,n) 1,0 värähtelyä ja Kistler 0,1, 2,0 ja 3,0 moodin värähtelyä 2270 K lämpötilalla laskettuna. Teoreettisesti Hidrian sijoituskohdalle moodin 1,0 solmukohtat sopisivat (Taulukko 11) ja Kistlerillekin moodille 0,1. Kistlerin ei juurikaan pitäisi pystyä mittaamaan moodia 1,0 ja 2,0 ja 3,0, koska seisovan aallon solmukohta on näissä keskellä palotilaa. Alla olevassa taulukossa 11 ovat 1,0, 2,0 ja 0,1 värähtelytapojen muodot.

Taulukko 11. Teoreettiset värähtelytapojen muodot sylinterimäisessä tilassa. (AGCO Power 2019)

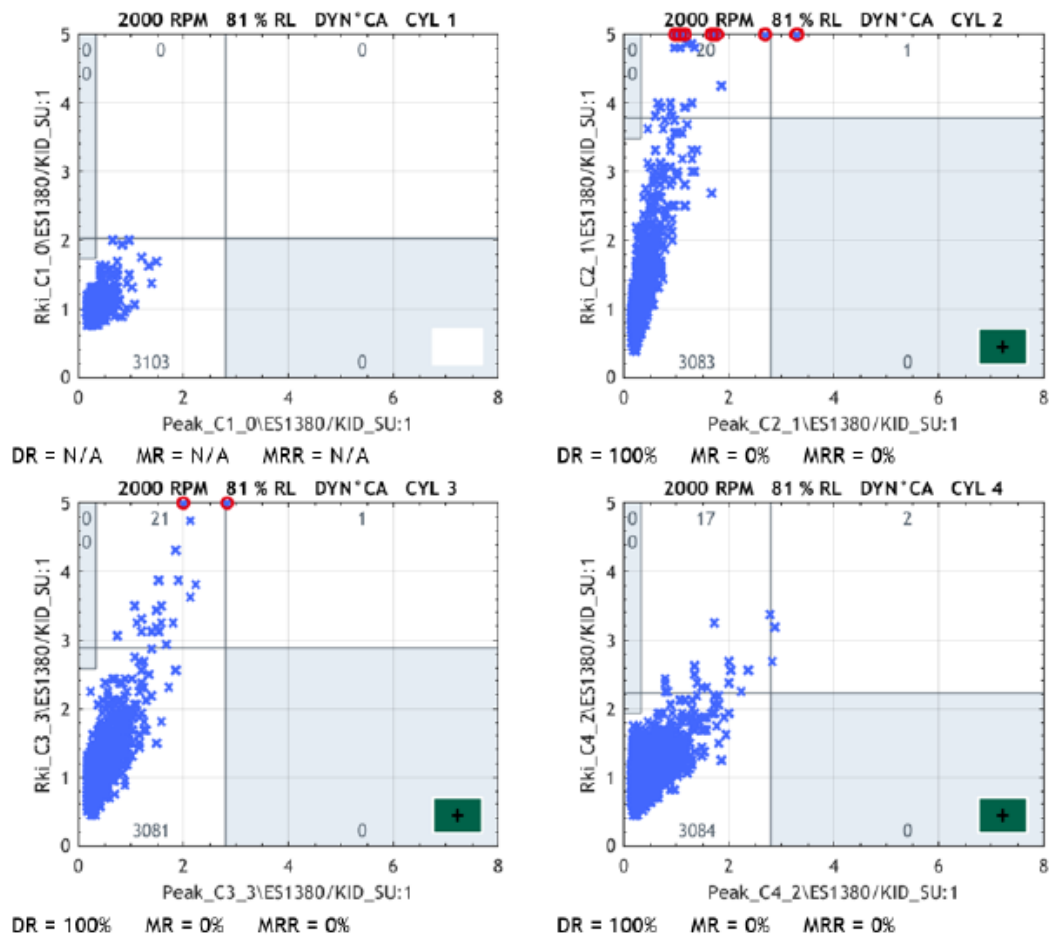
(m,n)	$\alpha_{m,n}$	Moodin muoto ylhäältä	Moodin muoto vinosti ylhäältä
(1,0)	1,841		
(2,0)	3,054		
(0,1)	3,832		

Taulukko 2. Lasketut värähtelytaajuudet sylinterissä.

(m,n)	(1,0)	(2,0)	(0,1)	(3,0)	(1,1)
värähtelytila	1.kehän	2.kehän	1.säteen	3.kehän	1.yhdis- tetty
$\alpha_{m,n}$	1,841	3,054	3,832	4,201	5,332
$f_{m,n}$ (kHz) 2270 K	5,2	8,6	10,8	11,8	15,0
$f_{m,n}$ (kHz) 923 K	3,3	5,5	6,9	7,5	9,6

Kuviossa 23 ovat Boschin eräästä moottorin kuormituspisteestä mittaamat nakutuksen havaitsemiset nakutustunnistimilla ja paineantureilla. Sylinterikohtaiset erot nakutusta vastaavalle nakutustunnistimen mittaamalle melulle ovat suuria.

Full load (390Nm), tans 65°C



Kuvio 23. Nakutuksen havaitseminen (BOSCH 2019).

Sylintereissä 1 ja 4 nakutukseksi määriteltävä rakenteellisen melun taso on selvästi alhaisempi kuin sylintereissä 2 ja 3. Mittauksissa myös havaittiin, että

sylinterien nakutuserkkyyksissä on suuria eroja. Sylinterit 1 ja 2 eivät nakutta-
neet melkein ollenkaan, mutta sylinterit 3 ja 4 olivat herkempiä nakutukselle. Ero
voi johtua mm. mahdollisista eroista sylinterien täytöksissä ja seossuhteesta sekä
siitä, että sylinterit 1 ja 2 jäätyvät paremmin, koska vesipumppu syöttää jäähdy-
tysnesteen moottorin etupäästä. Tällöin moottorin etummaisten sylintereiden
jäähdytys on tehokkaampaa viileämmän nesteen vuoksi. Eri kohdassa moottoria
on erilaista taustamelua, mikä vaikeuttaa nakutuksen havaitsemista nakutustun-
nistimella. Esimerkiksi sylinteri yksi on lähellä jakopään hammaspyörästä, joten
hammaspyörien melu voi peittää alleen nakutuksen äänen.

Taulukossa 13 on vertailu nakutusantureiden toimivuudesta sijoituspaikan mu-
kaan. Toimivuus testattiin eri moottorin pyörintänopeuksilla staattisissa tilanteissa
kaikista sylintereistä. Vihreällä taustalla oleva plusmerkki tarkoittaa hyvää mit-
tausluotettavuutta. Kaikki anturit pystyvät mittaamaan nakutuksen luotettavasti
 $1400 \frac{1}{\text{min}}$ ja pienemmillä nopeuksilla. Tästä nopeammilla pyörintänopeuksilla an-
tureiden sijoituspaikoilla alkaa olla merkitystä nakutuksen havaitsemiseen kai-
kissa sylintereissä. Ainoastaan sylintereiden 2 ja 3 väliin sylinteriryhmän ylälai-
taan kiinnitetty nakutustunnistin kykenee tunnistamaan nakutuksen tarpeeksi luo-
tettavasti kaikilla pyörintänopeuksilla.

Taulukko 13. Nakutusantureiden toimivuus sijoituspaikan mukaan (Bosch 2019)

Overview - Knock detection quality diagram						
Cylinder individual knock detection quality vs. knock sensor mounting position vs. engine speed in full load						
		1000 rpm	1400 rpm	1600 rpm	1800 rpm	2200 rpm
KS1	Zyl. 1	+	+	+	+	+
	Zyl. 2	+	+	+	+	+
	Zyl. 3	+	+	+	+	+
	Zyl. 4	+	+	+	o	-
KS2	Zyl. 1	+	+	+	+	-
	Zyl. 2	+	+	+	+	+
	Zyl. 3	+	+	+	+	+
	Zyl. 4	+	+	+	+	+
KS3	Zyl. 1	+	+	o	-	-
	Zyl. 2	+	+	+	o	o
	Zyl. 3	+	+	+	+	+
	Zyl. 4	+	+	+	+	-
KS4	Zyl. 1	+	+	+	o	-
	Zyl. 2	+	+	+	+	+
	Zyl. 3	+	+	+	+	+
	Zyl. 4	+	+	+	+	o

Mittausten perusteella voidaan todeta, että nakutustunnistimen sijoituspaikka 2
on riittävän luotettava tunnistamaan nakutuksen staattisessa tilanteessa. Näiden
mittausten perusteella ei voi tehdä luotettavia johtopäätöksiä sijoituspaikkojen toi-
mivuudesta dynaamisissa käyttötilanteissa.

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää nakutustunnistimille toimivat sijoituspaikat moottorista. VTT:n ja Boschin mittaukset osoittavat sijoituspaikkojen toimivuuden moottorin staattisissa käyttötilanteissa. Mittaukset suoritettiin käyttämällä moottoria vakiokierrosnopeuksilla staattisilla kuormituksilla. Sijoituspaikka numero 2 on niin hyvä, että yksi nakutustunnistin riittää takaamaan luotettavan tunnistuksen. Kuitenkin dynaamisten tilanteiden nakutuksen tunnistukseen yhden anturin riittävyttä ei voi taata ja mittauksia tuleekin vielä jatkaa niiden osalta.

Työn aikana tuli ilmi paljon nakutukselle altistavia asioita, joita tulee välttää moottorin suunnittelussa alusta asti, sekä nakutuksen tunnistusta haittaavia tekijöitä. Altistavista tekijöistä esimerkiksi sylintereiden välisen jäähdytystehon ero vaikuttaa yksittäisten sylintereiden nakutusherkkyyteen. Nakutuksen havaitseminenkin on vaikeampaa tietyistä sylintereistä, koska eri kohdissa moottoria on erilaista mekaanista ääntä mm. tasapainotusmoduulista, venttiilikoneistosta ja jakopäänhammaspyöristä johtuen. Mekaaniset äänet voivat myös alkaa resonoida eri taajuuksilla, kun moottori asennetaan ajoneuvoon, joten silloin täytyy tehdä uusi nakutuskalibrointi.

Tämän opinnäytetyön suhteen, jälkeenpäin katsottuna, olisi työtä mahdollisesti kannattanut lähestyä enemmän käytännön kuin teorian näkökulmasta. Tässä työssä itse nakutuksen mittaaminen ja datan analysointi jäi melko vähäiseksi ja tulevien testien kannalta olisi ollut hyödyllistä perehtyä näihin asioihin tarkemmin.

LÄHTEET

AGCO Power 2018. 3D-kuvat männästä ja sylinterinkannen palotilasta sekä paineantureiden ja nakutustunnistimien hinnat

AGCO Power 2019. Nakutustaajuuksien Matlab laskennat ja värähtelymoodien simulointikuvat

Barbir, F. 2013. PEM Fuel Cells. Theory and Practice. 2. painos. Waltham: Elsevier

Bosch 2019. Knock Control Assessment Demonstrator – Knock Sensor Mounting Position. AGCO 4.4L 4CYL CNG. 27.2.2019

Chen, L. Li, T. Yin, T. & Zheng, B. 2014. Energy Conversion and Management. A predictive model for knock onset in spark-ignition engines with cooled EGR. Elsevier 87. 949. Tulostettu 23.1.2019

Demirbas, A. 2010. Methane Gas Hydrate. Springer

Doosje, E. 2010. Limits of mixture dilution in gas engines. Eindhoven University of Technology. Thesis

Glassman, I. & Yetter, R, A. 2008. Combustion. 4. painos. Elsevier Science & Technology.

Guzzella, L. & Onder, C, H. 2010. Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine System. Toinen painos. Berlin: Springer-Verlag

Hofmann, D. Mencher, B. Häming, W. & Hess, W. 2006. Gasoline-engine management. Basics of the gasoline engine. 3. painos. Plochingen: Robert Bosch GmbH

Ilmasto-opas. Ilmatieteenlaitos. Metaani. Luettu 15.4.2019. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/dec264e2-6350-418c-a1bc-3ef7c80676aa/metaani.html>

Johnson, C 2017. Kuvio 16 Energy and Mineral Resources Diagram illustrating the relative abundance of proven reserves, inferred reserves, resources, and undiscovered resources. <http://opengeology.org/textbook/16-energy-and-mineral-resources/>

Kistler 6117B. Measuring spark plug with Integrated Cylinder Pressure Sensor. Tulostettu 22.4.2019. https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure_Model_6117B.pdf

Knirsch, M. Kesch, B. Tappe, M. Driedger, G. & Lehle, W. 2006. Gasoline-engine management. Diagnosis. 3. painos. Plochingen: Robert Bosch GmbH

- Kummamuru, B. 2017. WBA Global Bioenergy Statistics. 4, 30. Tulostettu 17.4.2019. https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_lq.pdf
- Köhler, C. & Allgeier, T. 2006. Gasoline-engine management. Exhaust emissions. 3. painos. Plochingen: Robert Bosch GmbH
- Merker, G. Schwarz, C. & Teichmann, R. 2012. Combustion engines development. Mixture formation, combustion, emissions and simulation. Berlin: Springer-Verlag
- Muller, W-M. Konzelmann, U. Frehoff, R. Mast, M. & Riegel, J. 2006. Gasoline-engine management. Sensors 3. painos Plochingen: Robert Bosch GmbH
- Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. & Öistämö, J. 2014. Tekniikan kaavasto. Lämpöoppi. 12. painos. Tampere: Tammertekniikka.
- Nylund, N-O. 1995. On the development of a low-emission propane engine for heavy-duty urban vehicle applications. Espoo: VTT
- OPEC 2019. 2017 Table 9.1: World proven natural gas reserves by country. Tulostettu 3.3.2019 <https://asb.opec.org/index.php/data-download>
- Petersson, A. & Wellinger, A. 2009. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy. Tulostettu 4.3.2019. https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf
- Raimoaho 2019. Kuvio. Biokaasulla maatila voi olla omavarainen energian ja lannoitteiden suhteen. Yle. Luettu 22.4.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-10585921>
- Reif, K. & Dietsche, K-H ja noin 200 kirjoittajaa teollisuus, yliopisto ja korkeakoulu sektoreilta. 2014. Automotive handbook. 9. painos Karlsruhe: Robert Bosch GmbH
- Sensors Bosch 2010. Piezoelectric vibration sensors. Tulostettu 22.4.2019. <https://josemaco.files.wordpress.com/2010/05/bosch-catalogo-de-sensores.pdf>
- Sensors Bosch 2017. Catalog 2013/2014. Tulostettu 20.4.2019. <https://www.mecs.nl/wp-content/uploads/2017/09/sensors-2-1.pdf>
- SFS-EN 16723-2. 2017. Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network. Part 2: Automotive fuels specification. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Tulostettu 14.1.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/507849.html.stx>
- Specific (or individual) gas constant 2017. Luettu 21.4.2019. http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Gas_constant
- Stone, R. 2012. Introduction to internal combustion engines. 4. painos. Hampshire: Palgrave Macmillan

Tilastokeskus 2015. Taulukko 1. IPCC:n arviointiraporttien (SAR ja AR4 ja AR5) mukaiset GWP-kertoimet. 25.5.2016. Verkkojulkaisu. Luettu 15.4.2019
https://www.stat.fi/til/khki/2015/khki_2015_2016-05-25_laa_001_fi.html

Tilastokeskus 2018. Energian hankinta ja kulutus. 11.12.2018. Verkkojulkaisu. Luettu 8.5.2019
https://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_tie_001_fi.html

Tilastokeskus 2019. Energian hankinta ja kulutus. Taulukko Excel-muodossa. 23.3.2019. Verkkojulkaisu. Tulostettu 7.5.2019. https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html

Ullmann, J. & Allgeier, T. 2006. Gasoline-engine management. Fuels for gasoline engines. 3. painos Plochingen: Robert Bosch GmbH

U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016. Chapter 3. Natural gas. Tulostettu 3.3.2019.
https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/nat_gas.pdf

Wang, Z., Liu, H. & Reitz, R. D. 2017. Knocking combustion in spark-ignition engines. Progress in Energy and Combustion Science 61, 85–86. Tulostettu 23.1.2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128516300764>

LIITTEET

Liite 1. Nakutustunnistin

Teil/PART	Material/WATERIAL	Norm/NORM
Behauser/HOUSING	>PA66-BF35 c metallisierter wasserbest. Kunststoff METAL SKT FREE BEAT STABILISED	ISO 1874
Druckhülse/SUPPORTING-SLEEVE	CuZn39Pb2 R410	EN 12184
Steckpinne/CONNECTOR-PINS	Cu58 Ni60 vernickelt / NICKEL-PLATED 1,5-3 µm und /ING vergoldet/GOLD-PLATED 1-1,3 µm	EN 1854

Anbauvorschrift fuer Klopfensoren
MOUNTING SPECIFICATION FOR KNOCK SENSORS

Betriebstemperaturbereich
 OPERATION TEMPERATURE RANGE -40° C ... +150° Flachstecker vergoldet / TERMINAL GOLD-PLATED

Befestigungsschraube
 FIXING SCREW M6x30-B,8 (AL-Motorblock/ ENGINE BLOCK) keine Unterlegscheibe verwenden/NO WASHER

Anzugsmoment
 SPECIFIED BREAKAWAY TORQUE 20 ± 5 Nm gemäß möglich, Festigkeit des Motorblocks beachten GILDED POSSIBLE, NOTICE STABILITY OF ENGINE BLOCK beliebig RANDOM

Einbaulage
 MOUNTING POSITION

Anschlussstecker Kompakt 1.1
 CONNECTOR COMPACT 1.1 D 929 002 69A, Kodierung 1, CODE 1

Gegenstecker
 PLUG RS-Nr. A 929 000 453 (schwarz/SBLACK) mit/WITH BSK-Kontakten/CONTACTS

Kennzeichnungsblatt
 CHARACTERISTIC DATA SHEET D 261 800 015

Die Oberfläche des Kontaktes im Gegenstecker muss entsprechend Anschlussstecker an Klopfensoren sein!
 THE CONTACT SURFACE IN THE APPROPRIATE PLUG MUST BE ACCORDING TO THE CONNECTOR OF KNOCK SENSOR

RS-Sicherheitsleistung fuer die Funktion des Steckersystems nur bei Verwendung der in dieser Angebotszeichnung vorgeschriebenen Gegenstecker-Systemteile.
 RS WARRANTY WILL COVER THE FUNCTION OF THE CONNECTOR SYSTEM ONLY IN CASE OF COMBINATION WITH OPPOSITE CONNECTOR SYSTEM PARTS ACC. TO THIS OFFER DRAWING.

Anbauvorschrift fuer Befestigung/REQUIREMENT FOR MOUNTING BOSS

Schaltbild
 WIRING DIAGRAM

Motorfreie Signale

Sensor darf nur auf seinen Metallflaechen aufliegen (keine Sicherungscheiben verwenden)
 ONLY THE METALS TO PART OF THE SENSOR MAY HAVE CONTACT WITH THE ENGINE (NO WASHERS ARE TO BE USED)

0 261 819 910	0 261 231 275	0 261 231 275	NEU	0 261 800 015	03-1-5
0 261 819 910	0 261 231 275	0 261 231 275	NEU	0 261 800 015	03-1-5
0 261 819 910	0 261 231 275	0 261 231 275	NEU	0 261 800 015	03-1-5

General Information for the Bosch logo and other technical details.