



Rapport *Report*

Reglerade motoremissioner under statiska och transienta belastningar

*Regulated engine exhaust gas emissions at static and
transient loads*

Magnus Lindgren
Hans Arvidsson
Christian Wetterberg
Bengt Johansson
Per-Anders Hansson

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för energi och teknik

The Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Energy and Technology

Reglerade motoremissioner under statiska och transienta belastningar

Regulated engine exhaust gas emissions at static and transient loads

Magnus Lindgren
Hans Arvidsson
Christian Wetterberg
Bengt Johansson
Per-Anders Hansson

Rapport/Report 015
ISSN 1654-9406

Uppsala 2009

Nyckelord: Non-road mobile machinery, engine emissions, particle emissions, alternative fuels, diesel fuels, FT-diesel, FTD, alcohol, RME

Abstract

This is one of two final reports within the “Regulated and non-regulated emissions from non-road mobile machinery (EMMA 5)” project. The project was conducted within the Swedish emission research program (EMFO). The purpose of the project was to study the effects of alternative fuels on the energy efficiency and formation of emissions in diesel engines for non-road mobile machinery. Both regulated and non-regulated emissions including particle number and particle size distribution was studied. In this report, the results from the studies of regulated emissions and energy efficiency was reported.

Special emphasis was given to the effects of transient load conditions and recorded work operations. The effects of both steady-state and transient load condition on regulated emission were studied using four different diesel fuels. The fuels were:

- Conventional Swedish diesel fuel of environmental class 1, EC1
- Fischer-Tropsch diesel fuel, Ecopar™
- Mixed diesel fuel, 90% EC1 and 10% of a higher alcohol, Etamix D3
- Mixed diesel fuel, 85% EC1, 10% of a higher alcohol and 5% of rapeseed methyl ester (RME), Agrodiesel15

Analyses of the composition of the different fuels are presented in table S1.

Table S1. Fuel composition

Substance	Unit	EC1	Ecopar	Etamix D3	Agrodiesel15
Carbon	% mass	86.2	84.8	83.5	83.9
Hydrogen	% mass	14.6	14.9	13.9	13.6
Oxygen	% mass	<0.1	0.2 ^a	2.6	2.4
Nitrogen	mg/kg	21	<1	21	297
Sulphur	mg/kg	<5	<5	<5	5.7
Cetane number	-	56.2	52.1	54.4	59.8
Total aromatics	% mass	6.3	<0.1	3.8	3.6 ^b
Lower heating value	MJ/kg	43.7	44.2	42.5	42.4
Density @ 15°C	kg/m ³	813	798	814	821

^a Measurement accuracy set to 0,2 %-mass

^b Sum of mono- and di-aromatics

The different fuel had comparable fuel compositions, for example the carbon/hydrogen ratio varied between 5.7 and 6.2 and the lower heating value between 42.4 and 44.2 MJ/kg. One of the major differences was the nitrogen content of the fuels, which varied from one mg/kg up to almost 300 mg/kg of fuel. Three of the fuels were based on conventional Swedish diesel fuel of environmental class 1, Etamix D3 and Agrodiesel15 consisted of 90 and 85per cent EC1 respectively. All three alternative fuels were developed to be diesel substitutes and to operate in conventional and already existing engines without any engine modifications. This was also shown in the results, which only presented small but detectable differences in emissions.

The results showed a 5 per cent difference in specific fuel consumption during steady-state conditions between Ecopar, which resulted in the lowest specific consumption, and Agrodiesel15 which had the highest specific consumption. However, there were no significant differences in fuel efficiency between the fuels. The higher consumption of Agrodiesel15 and to a limited extend Etamix D3 was attributed to a lower energy density of the fuels.

The most pronounced differences were recorded for emissions of nitrogen oxides and particulate matter. Agrodiesel15 resulted in the highest emissions of nitrogen oxides and the second lowest emissions of particulate matter. The use of Etamix D3 resulted in the lowest emissions of particulate matter of the four fuels studied. The emission of particulate matter from Etamix D3 and Agrodiesel15 was approximately 40 per cent lower than the emissions from EC1 and Ecopar.

In order to study the influence of transients during in-use conditions, 5 different work operations were developed, representative for non-road mobile machinery. The transient effects were calculated as the difference between recorded emissions during transient operation and calculated emissions using a semi-static calculation method. For the in-use conditions, the largest effects were obtained during heavy load transients in combination with a high average engine power. For example, transient effects from two different loading operations, one representing a wheel loader operation and one representing an agricultural tractor operation were compared. Both operations had comparable transients but the load cycle based on agricultural tractor operation was performed on a lower average engine power and thus resulted in less pronounced transient effects. Agrodiesel15 and Etamix D3 resulted in lower emissions of particulate matter during transient conditions compared with the other two studied fuels. The results also indicated that the emissions can, during specific transient conditions, result in reduced amounts compared with steady-state conditions.

Major differences in emissions, especially for emissions of particulate matter and carbon monoxide, were recorded during specific, isolated transients in both engine torque and speed. The effects on emissions during these isolated transient indicates the sensitiveness of the current combination of engine and fuel to transient load conditions. The results indicated that, primarily emissions but also fuel consumption were rather sensitive to changes in engine load conditions. This result in that actual emission amounts and fuel consumption from an engine are dependent on, not only the current engine load but also the previous engine load conditions. The heavier the change in load the larger is the effect. Transient engine load conditions are rather common during in-use operations with non-road mobile machinery and could result in major increase in fuel consumption and emissions.

Sammanfattning

Denna rapport är en av två delrapporter för ett EMFO-projekt, emissionsforskningsprogrammet. Projektets syfte var att kartlägga hur användningen av alternativa drivmedel påverkar energieffektivitet och emissionsbildning för dieselmotorer i arbetsmaskiner. Både reglerade och oreglerade emissioner inklusive partikelantal och storleksfördelning studerades. I denna rapport behandlas endast reglerade emissioner samt bränsleförbrukning och energieffektivitet.

Speciellt betonades effekterna av transienta belastningar och verkliga arbetsoperationer med dynamiska belastningar. Reglerade emissioner studerades för fyra olika bränslen under både statistiska och transienta belastningar. De studerade bränslena var

- Konventionell diesel av miljöklass 1, MK1
- Fischer-Tropsch diesel, Ecopar
- Blandbränsle mellan MK1 och alkohol, Etamix D3
- Blandbränsle mellan MK1, alkohol och RME, Agrodiesel 15

En analys av bränslesammansättningen redovisas i tabell S1.

Tabell S1 Bränslesammansättning

Ämne	Enhet	MK1	Ecopar	Etamix D3	Agrodiesel15
Kol	% mass	86.2	84.8	83.5	83.9
Väte	% mass	14.6	14.9	13.9	13.6
Syre	% mass	<0.1	0.2 ^a	2.6	2.4
Kväve	mg/kg	21	<1	21	297
Svavel	mg/kg	<5	<5	<5	5.7
Cetan tal	-	56.2	52.1	54.4	59.8
Totalaromater	% mass	6.3	<0.1	3.8	3.6 ^b
Lägre värmevärde	MJ/kg	43.7	44.2	42.5	42.4
Densitet vid 15°C	kg/m ³	813	798	814	821

^a Mätosäkerhet motsvarar 0,2 %-mass

^b Summa av mono- och di-aromater

Sammansättningen av de olika bränslena var jämförbar, t.ex. varierade kol/väte kvoten mellan 5,7 och 6,2. En av de större skillnaderna mellan bränslena var kvävehalten vilken varierade från 1 till 300 mg kg⁻¹. Tre av bränslena bestod till minst 85 % av MK1 diesel. I princip var samtliga bränslen tillverkade för att efterlikna och ersätta konventionell MK1 diesel vilket även resulterade i förhållandevis små men detekterbara skillnader i emissioner.

Resultaten visade att det var cirka 5 procents skillnad i bränsleförbrukning under statiska belastningar mellan Ecopar, som hade den lägsta specifika förbrukningen och Agrodiesel 15 som hade den högsta förbrukningen. Däremot var det ingen skillnad på bränsleeffektivitet mellan bränslena, den högre förbrukningen berodde på en lägre energidensitet. Den högre förbrukningen med Agrodiesel 15 och till viss del Etamix D3 leder till maskinen måste tankas oftare och därmed får en kortare aktionsradie.

De största skillnaderna i emissioner registrerades för kväveoxider och partiklar. Agrodiesel 15 uppvisade de högsta utsläppen av kväveoxider och de näst lägsta utsläppen av partiklar. Även användandet av Etamix D3 resulterade i låga utsläpp av partiklar. Utsläppen av partiklar från Etamix D3 och Agrodiesel 15 var knappt 40 % lägre än utsläppen från MK1 och Ecopar.

För att studera inverkan av transienter under verkliga arbetsförhållanden valdes 5 vanliga arbetsoperationer ut. De transienta effekterna beräknades som skillnaden mellan uppmätta mängder under transienta belastningar och motsvarande statiska belastning. För de inspelade arbetsoperationer var de transienta effekterna störst vid snabba belastningsändringar i kombination med högt effektuttag. Bland annat studerades transienta effekter på reglerade emissioner av två olika lastningsarbeten, ett med en hjullastare och ett med en lantbrukstraktor. Båda arbetsoperationerna hade jämförbara transienter men arbetet med lantbrukstraktorn utfördes vid en lägre genomsnittlig belastning och resulterade i lägre transienta effekter. Agrodiesel 15 och Etamix D3 resulterade i lägre emissioner av partiklar även under de inspelade arbetsoperationerna. Resultaten indikerade även att transienter under vissa driftsfall kan resultera i lägre emissionsnivåer.

För enskilda isolerade transienter i både moment och varvtal uppmättes mycket stora skillnader i utsläpp, speciellt för partiklar men även för kolmonoxid. Dessa isolerade transienter ger en indikation på hur känslig den aktuella kombinationen av motor och bränsle är för förändrade driftssituationer. För samtliga studerade emissioner med undantag för emissioner av HC visade resultaten på mindre kraftiga effekter av transienter i moment än i varvtal. Detta var dock ett relativt rimligt resultat med tanke på den generella funktionen hos en dieselmotor samt den förändrade rörelsemängden vid varvtalsändringar.

Resultaten indikerar att framförallt emissioner men även bränsleförbrukning är förhållandevis känsliga för förändrade driftsförhållanden. Detta leder till att de faktiska emissionerna och den faktiska bränsleförbrukningen från en motor inte bara är beroende av den momentana belastningen utan även hur belastningen har förändrats beroende av accelerationer, mot- och medlut etc. Ju större och snabbare förändringen än desto större blir effekten. Transienta motorbelastningar är relativt vanliga under verkligt operationer med arbetsmaskiner och kan ge upphov till kraftigt ökade emissioner.

Inledning	8
Existerande kunskap	9
Statiska motorbelastningar	9
Transienta motorbelastningar	10
Metod	11
Motorlabb.....	11
Motorbroms.....	11
Uttag av avgasprov	13
Analysutrustning	15
Datainsamling	15
Bränslen	16
Motor.....	18
Testcykler.....	18
Statisk testcykel	18
Inspelade arbetsoperationer	20
Fiktiva belastningsmönster	21
Dataanalys.....	23
Semi-statisk emissionsberäkning.....	24
Transienta effekter	24
Resultat och diskussion.....	26
Referenspunktsmätning.....	26
Statiska mätningar.....	30
Fiktiva belastningsmönster	38
Transientier i varvtal	38
Transientier i moment	43
Inspelade arbetsoperationer	47
Övergripande diskussion.....	56
Slutsatser	56
Referenser	58

Inledning

Transienta belastningar av motorn uppstår vid all körning och är vanligt förekommande vid olika arbetsoperationer. Snabba förändringar av motorns varvtal eller belastande moment medför att förbränningen av drivmedlet sker under icke optimala förhållanden och utan att jämvikt råder. I utvecklingen av lagkrav och provningsmetoder för godkännande av motorer tar man hänsyn till detta. Till exempel gäller för tunga dieselmotorer avsedda för vägfordon att de sedan 1999/2000 provas enligt en transient testcykel, "European Transient Cycle" (ETC) (EU, 1999).

För arbetsmaskiner finns ett tillägg till avgasdirektivet 97/68/EG, 2004/26/EG, enligt vilket en transient provningscykel ska introduceras i det kravsteg som benämns steg IIIB samt det efterföljande steg IV, vid provning för mätning av partikelförekomst (EU, 2004). Testcykeln benämns "Non-Road Transient Cycle" (NRTC) och är framtagen i samarbete mellan EU och USA:s naturvårdsverk (EPA). NRTC baseras på faktiska motorbelastningar mätta i fält med flertalet olika arbetsmaskiner. Mätningarna har presenterats av Starr et al. (1999) och Ullman et al. (1999) och representerar typiska, amerikanska, arbetsoperationer. Denna testcykel är föreslagen att introduceras i EPA-normernas steg 4 (Tier 4).

Dieseldrivna arbetsmaskinsmotorer har vid mätningar inom projekt EMMA (Utveckling av relevanta arbetscykler och emissionsfaktorer samt reduktion av bränsleförbrukning för arbetsmaskiner) under transienta belastningar visat på momentant mycket stora ökningarna av både bränsleförbrukning och emissioner jämfört med förbrukning och emissioner vid motsvarande statiska belastningar (Hansson et al., 2003; Lindgren et al., 2003). Mätningar har bl.a. påvisat en momentant dubblerad bränsleförbrukning vid snabba transienter (Lindgren och Hansson, 2004a). Effekterna på de reglerade emissionerna var ännu större, speciellt för partiklar där mängden partiklar (mätt som vikten av partiklar mindre än 10 μm , PM_{10}) ökade med mer än tio gånger (Lindgren och Hansson, 2004a, 2004b). Stora skillnader i effekter av transienter har dessutom uppmätts mellan olika motorer med skilda utrustningar (t.ex. insprutningspump och turboaggregat).

Beroende på de alternativa bränslenas annorlunda kemiska innehåll, ångbildningsentalpi, viskositet etc. sker en förändring av de termokemiska och termodynamiska skeendena i förbränningsrummet vid användning av sådana bränslen, jämfört med dieselolja. Tidigare mätningar har visat på betydande skillnader i verkningsgrad och emissionsbildning vid statiska förhållanden (Wetterberg et al., 2003). Vid transienta icke optimala förhållanden är skillnaderna sannolikt ännu mycket större mellan olika bränslen. Några mätningar för att studera detta är dock inte kända, trots att sådana skulle vara mycket värdefulla innan ett nytt bränsle får stor användning, och som grund för reglering av insprutningssystem för alternativa bränslen.

För flera aktuella alternativa drivmedel, vilka kan få stor användning redan i existerande motorer och fordon, är kunskapen ofullständig redan när det gäller egenskaper vid statiska belastningsförhållanden. Sådana drivmedel är olika blandbränslen med inblandning av t.ex. Fischer-Tropsch (FT) diesel, etanol,

etanolderivat, andra alkoholer, rapsmetylester (RME) etc. (se dock Wetterberg et al., 2003).

Speciellt är kunskapen ofullständig när det gäller oreglerade emissioner. Dessutom saknas nästan helt kunskap om hur de förändrade förbränningsförhållandena vid användning av alternativa bränslen påverkar partiklarnas antal samt storleksfördelning. Detta behandlas i en parallell rapport till denna.

Denna rapport behandlar bränsleförbrukning, energieffektivitet samt utsläpp av reglerade avgaskkomponenter under både statiska och transienta förlopp. Fyra olika bränslen ingår: en konventionell diesel av miljöklass 1 (MK1), en Fischer-Tropsch diesel, ett blandbränsle mellan MK1 och alkohol, samt ett blandbränsle mellan MK1, alkohol och RME.

Existerande kunskap

Flertalet studier har vid mätningar med konventionell diesel visat att inverkan av körsätt och framförallt transienta laständringar har stor betydelse för både bränsleeffektivitet och emissionsbildning (Ullman mfl, 1999; Starr mfl, 1999; Lindgren och Hansson, 2004; Rakopoulos och Giakoumis, 1999). Den dokumenterade kunskapen rörande inverkan av transienta laständringar på bränsleeffektivitet och emissionsbildning vid användandet av alternativa drivmedel är dock i princip obefintlig.

Statiska motorbelastningar

Kunskapen rörande bränsleeffektivitet och emissioner från dieselmotorer vid användandet av alternativa drivmedel är begränsad. En av de senaste och mer omfattande studierna genomfördes av SMP och SP (Wetterberg et al., 2003). Studien omfattade ett flertal olika bränslen så som ren MK1, MK1 med inblandning av RME, MK1 med inblandning av etanol, syntetiskt dieselbränsle samt MK3, vilket motsvarar europeiskt dieselbränsle. Mätningar skedde av bränsleförbrukning, samt reglerade och oreglerade emissioner under statiska förhållanden. Dessutom genomfördes mätningar av partiklarnas antal samt storleksfördelning.

En annan studie av emissioner från alternativa drivmedel som fått stort nationellt genomslag genomfördes av Skogforsk i samarbete med Luleå tekniska universitet (Nord & Haupt, 2002). Studien omfattade ett FT-bränsle (Eco-Par®) och ett referensbränsle, MK1. Både reglerade och oreglerade komponenter registrerades, dock genomfördes inga studier av partiklarnas antal eller deras storleksfördelning. Clark et al. (1999) studerade inverkan av bränslesammansättningen på emissionerna från en dieselmotor. Tre olika FT-bränslen med varierande sammansättning, t.ex. svavelhalt, aromathalt och isobutanol inblandning, studerades och jämfördes med diesel från Kalifornien (15 ppm svavel). Studien visade att FT-bränslena, framförallt de med låg svavel- och aromathalt, hade potential att sänka samtliga reglerade emissioner jämfört med Kalifornisk diesel. Dessutom registrerades partiklar via ett TEOM-instrument (Tapered Element Oscillating Microbalance).

Internationellt sett är forskningen om emissioner från vegetabiliska oljor, exempelvis från soja, safflor (färgtistel), palm, kokosnöt och rapsfrö relativt omfattande (Kalam et al., 2003; Asami et al., 1992; Bernardo et al., 2003; Almeida et al., 2002).

Williamson och Badr (1998) konstaterade att emissionsnivåerna från olika studier av RME-bränslen varierade kraftigt beroende på variationer i använd motortyp, mätförhållande och bränsleformulering. Som exempel kan nämnas att emissionerna av partiklar varierade från 31 till 180 % av de från konventionella dieselbränslen.

Bara under det senaste året har ca 60 artiklar rörande emissioner från dieselmotorer drivna med etanolbränsle publicerats av Society of Automotive Engineers (SAE). Förbränning och emissionsegenskaper vid användandet av etanol-inblandning i diesel har studerats av bland annat He et al. (2003). Via Kommunikationsforskningsberedningen (KFB) har flertalet nationella fältstudier och undersökningar av förutsättningar, körbarhet och emissioner från alternativa bränslen initierats. Bucksch och Egebäck (1999) har sammanställt en del av dessa resultat, framförallt för alkoholer och biogas.

Transienta motorbelastningar

Hansson et al. (2003) studerade bränsleeffektiviteten hos en dieselmotor för arbetsmaskiner vid olika arbetsoperationer. Arbetsoperationerna varierade i belastningsmönster från relativt statiska till kraftigt transienta. Vid arbete med frontlastare, vilket är att betrakta som en kraftigt transient operation, sjönk bränsleeffektiviteten med 13 % jämfört med motsvarande statiska förlopp.

Flera forskare har studerat effekterna av transienta laständringar på bland annat turbotryck, regulator samt temperatur i cylinder och i motorblock (Benajes et al., 2000; Bane 2002; Rakopoulos and Giakoumis, 1999; Rakopoulos et al., 1998). De fann att motorn och motorutrustningen led av en tidsfördröjning på från några få sekunder (t.ex. för cylindertemperatur och turbotryck) till upp till hundratals sekunder (t.ex. för temperaturer i motorblocket). Genom dessa och andra orsaker påverkades förbränningen i cylindern, vilket medförde att både bränsleförbrukning och emissionsbildning avvek från det statiska fallet. Arcoumanis et al. (1994) har t.ex. visat att emissionerna av partiklar, mätt i form av dess opacitet, ökar kraftigt vid varvtalsaccelerationer under konstant momentbelastning.

För att detaljerat kunna studera effekterna av transienter i motorns varvtal och moment utvecklade Lindgren och Hansson (2004a) speciella syntetiska lastcykler. Resultaten från mätningar på moderna turboladdade dieselmotorer, vilka uppfyllde avgaskrav för steg I enligt 97/68/EG, visade på en, momentant, dubblerad bränsleförbrukning vid snabba förändringar i motorns varvtal och moment. Den momentana effekten på de reglerade emissionerna var ännu större, speciellt för partiklar där mängden, PM_{10} , ökade med mer än 10 gånger (Lindgren och Hansson, 2004a; 2004b). Callahan et al. (1985a; 1985b; 1987) presenterade liknande resultat, men för en äldre sugmotor.

Vid framtagandet av nationell och internationell emissionsstatistik tas allt mer hänsyn till verkliga motorbelastningar vilka inkluderar transienta förlopp (Joumard, 1999, Sjödin et al., 2003). Som exempel kan nämnas att i det pågående EU-projektet ARTEMIS tas speciella korrektionsfunktioner fram för att kompensera för skillnaden mellan statiska emissionsvärden, ofta baserade på motormappar och vägbeskrivningar, och verkliga emissioner.

Utvecklingen inom lagkraven för godkännande av motorer visar på samma tendenser, en tydlig övergång från statiska testcykler till transienta. För tunga dieselmotorer avsedda för vägfordon har sedan 1999/2000 en transient testcykel, ETC, använts (EU, 1999). För arbetsmaskiner finns ett förslag, KOM(2002) 765, till ändring av avgasdirektivet 97/68/EG, enligt vilket en transient provningscykel ska introduceras i det kravsteg som benämns steg IIIB samt det efterföljande steg IV, vid provning för mätning av partikelförekomst (EU, 2004). Testcykeln benämns "Non-Road Transient Cycle" (NRTC) och är framtagen i samarbete mellan EU och USA:s naturvårdsverk (EPA). NRTC baseras på faktiska motorbelastningar mätta i fält med flertalet olika arbetsmaskiner. Mätningarna har presenterats av Starr et al. (1999) och Ullman et al. (1999) och representerar typiska, amerikanska, arbetsoperationer. Denna testcykeln är föreslagen att introduceras i EPA-normernas steg 4.

Metod

Motorlab

Studien genomfördes i SMP:s motorlab i Umeå. Nedan följer en kortfattad beskrivning av motorlab och utrustning.

Motorbroms

Motorn, se separat beskrivning nedan, var monterad i en fast bädd och direktkopplad mot en virvelströmsbroms, Froude Concine AG400 HS, med tillhörande styrenhet, Texcel V4. Försöksupställningen redovisas i figur 1. Till systemet hörde även en styrenhet för motorns varvtalsreglage. Eftersom motorns varvtal styrdes med en spänningssignal hade den mekaniska styrenheten byggts om så att man via en fast spänningsskälla fick ut en varierande spänningssignal som gick till motorns styrenhet. Denna uppkoppling användes vid körning vid fasta punkter.

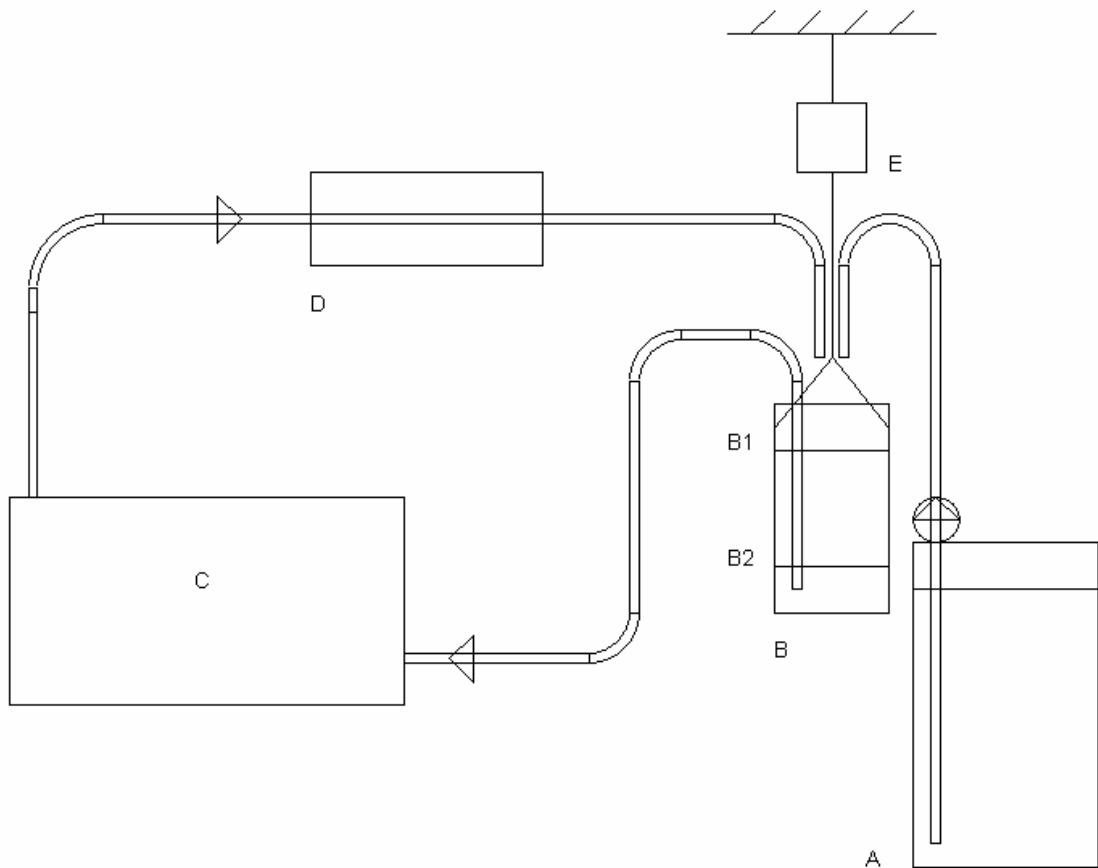
Vid styrning av transienta belastningar användes en två kanalig spänningsgenerator styrd av en extern dator. Motorns varvtal styrdes direkt från den externa datorn via spänningsgeneratoren medan det bromsande momentet styrdes från bromsens styrenhet. Denna lösning valdes för att de studerade transienta förloppen var för snabba och kraftiga för bromsens styrenhet. Från bromsens styrenhet lästes utbromsat moment och varvtal av till mätsystemet.



Figur 1. Motor och bromsutrustning.

Bränslesystem

Figur 2 visar bränslesystemet för försörjning, kylning och bränsleförbrukningsmätning. Bränslet lagrades i ett 200L fat som pumpades till ett kärl upphängt i lastcell. När vikten underskred en miniminivå startade pumpen och fyllde på kärlet till en maxnivå. Mellan påfyllningarna gick det att mäta bränsleförbrukningen genom viktminskningen mellan två avläsningar. Motorns bränslesystem sög bränsle i vågbehållaren och returflödet passerade en värmeväxlare med styrt kylvattenflöde för att hålla bränsletemperaturen på en konstant nivå.



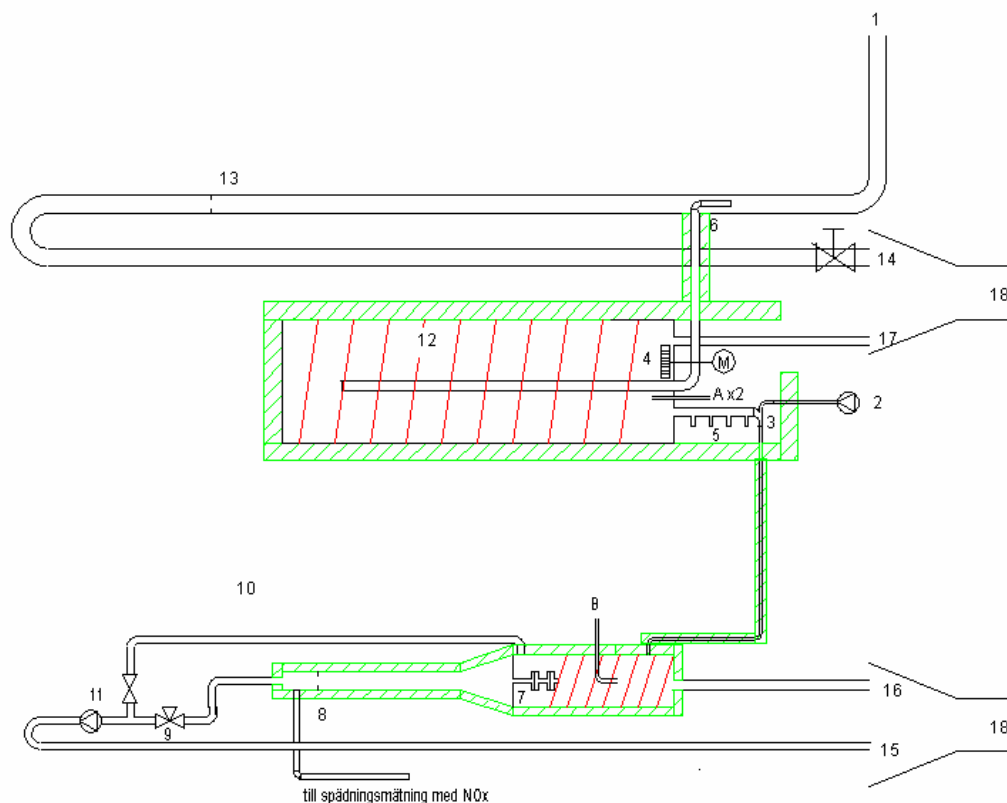
Figur 2. Principskiss bränsleförbrukningsmätning

Förklaring till figur 2.

- A Bränslefat med pump styrd av lastcell (E)
- B Våγκάρl upphängt i lastcell (E)
när nivån sjunkit till B2 (3500 g) fylls det på till B1 (8500 g) från A
- C Motor
- D Styrd bränslekylare
- E Lastcell (noggrannhet +- 1 g)

Uttag av avgasprov

De använda emissionsmätninginstrumenten och försöksupställningen var inte anpassade för mätning av transienta förlopp med önskad tidsupplösning. Istället samlades ett delflöde av avgaserna upp i en "utjämnarbehållare", se figur 3, en metod som påminner om insamling i säck. På detta sätt erhöles en flödesviktad avgasblandning i utjämnarbehållaren. Verifieringsmätningar visade att denna metod gav representativa resultat både vid statiska och vid transienta belastningar.



Figur 3. Principskiss avgassystem och uttag av gaser för analys

Förklaring till figur 3.

1	Avgaser från motor	11	Vakuumpump	för
2	Filtrerad tryckluft	12	Uppvärm� utjämnarbehållare	
3	Ejektor	13	Strypfläns för reglering av flöde till utjämnare	
4	Omblandarfläkt	14	Justering av avgasmottryck	
5	Provuttag	15	Avluft till utsug	
6	Uttag av delflöde med strypning	16	Överskott av utspädda avgaser till utsug	
7	Uppvärm� spädtunnel med filterhållare	17	Överskott av utjämnade avgaser till utsug	
8	Strypläns för flödesmätning	18	Utsug	
9	Ventil för flödesjustering	A	Provuttag för PAH	
10	Bypassflöde	B	Provuttag för aldehyder och partiklar	

Principerna för utjämnarbehållaren fungerade enligt följande: Strypflänsen (13) reglerade flödet till utjämnaren så att man även vid tomgång och uttag av provgas fick ett överflöde (17) till utsuget. Utjämnarens volym (1 m^3) var så stor att variationerna i avgaserna i stort sett jämnades ut.

Utjämnaren var försedd med värmeslinga (200°C) för att inga utsläpp skulle kondensera och med en fläkt (4) för omrörning och turbulens för att inget stoft skulle sedimentera. I denna studie användes TEOM (se avsnittet nedan om partiklar) för mätning av partiklar, varför spädtunneln (7) endast användes som buffert efter ejektorn (3). Provgas för THC, NO_x, CO, CO₂, och O₂ togs vid (5). Provgas för PAH togs vid (A) och provgas för aldehyder och partiklar togs vid (B).

Analysutrustning

I motorlabbet fanns analyserer för reglerade emissioner. Instrumenten beskrivs kort i tabell 1.

Tabell 1 Analyserer för mätning av reglerade emissioner

Gas	Instrument	Mätprincip	Mäts på torr/våt gas
CO	Maihak Unor 610	Icke dispersiv infrarödabsorption	Torr
CO ₂	Maihak Multor 610	Icke dispersiv infrarödabsorption	Torr
O ₂	M&C Instruments PMA30	Paramagnet	Torr
THC	JUM Engineering 109A	Uppvärmad flamjoniserings detektor	Våt
NO _x	ECO Physics CLD 700	Kemiluminiscens	Våt

Partiklar

Partiklar skall enligt standard mätas genom att väga uppsamlat material på ett standardiserat filter från utspädda avgaser. Detta är dock mycket tidskrävande varför en annan metod som ger snabbare svar och en spänningssignal som kan registreras av datainsamlingssystemet valdes. Instrumentet kallas TEOM, vilket står för Tapered Element Oscillating Microbalance (Rupprecht & Patashnick Teom 1400a).

Kort kan instrumentet beskrivas som ett filter, genom vilket provgasen sugas. Filtret är monterat på ett rör av kristall, som man mäter resonansfrekvens på. Med ökad beläggning på filtret minskar resonansfrekvensen och vikten kan beräknas. Instrumentet ger en kontinuerlig onlinesignal. Vid mätningarna har standarduppsättningen använts, förutom att ett glidande medelvärdesfilter på 180 sekunder valdes.

Datainsamling

För insamling av data användes National Instrument's system SCXI tillsammans med ett insamlingsprogram designat i LabView. Datan lagrades i textfiler som efterbearbetades. I tabell 2 redovisas de variabler som registrerades.

Tabell 2. Registrerade variabler vid emissionsmätning

Variabel
Lufttryck i lokal
Lufttemperatur vid motorinsug
Luftfuktighet vid motorinsug
Vikt på bränslevåg
Moment på dynamometer
Varv på dynamometer
THC
NO _x
O ₂
CO
CO ₂
Avgasttemperatur
Temperatur kylvatten till motor
Temperatur motorolja
Temperatur kylvatten till laddluftkylare
Temperatur kylvatten från laddluftkylare
Temperatur laddluft
Temperatur utjämnarkammare, gavel
Temperatur i spädtunnel
Temperatur avgaser till utjämnarkammare
Temperatur bränsle i vågkärl
Omgivningstemperatur
TEOM värde

Bränslen

I tabell 3 finns en sammanställning över analyser av de använda bränslena. MK1 är ett konventionellt dieselbränsle med en renhållande tillsats, ACP diesel från Preem. Ecopar är ett syntetiskt dieselbränsle vilket levererades från Oroboros, senare Ecopar. De båda övriga bränslena är blandbränslen med MK1 som bas. Det ena, Etamix D3 diesel från SEKAB, hade en inblandning av 10 % etanolderivat. Det andra, Agrodiesel 15 från Agrofuel, bestod av 5 % RME och 10 % högre alkoholer.

MK1 och Ecopar levererades färdigblandade i fat om 200 L. För att ta bort eventuell inverkan av olika MK1 bränslen användes MK1 från samma leverantör och batch till Etamix- och Agrodieselblandningarna. Etamix D3 blandades på plats hos SMP av personal från leverantören. Agrodiesel blandades på plats hos SMP av SMP:s personal enligt instruktion från leverantören.

Tabell 3. Bränsleegenskaper

Ämne	Enhet	Metod	MK1	Ecopar	Etamix	Agrodiesel
					D3	15
Kol	%-mass	ASTM D 5291	86,2	84,8	83,5	83,9
Väte	%-mass	ASTM D 5291	14,6	14,9	13,9	13,6
Syre	%-mass	ASTM D 5291	<0,1 ^a	0,2 ^a	2,6	2,4 ^b
Kväve	mg/kg	ASTM D 4629	21	<1	21	297
Svavel	mg/kg	ASTM D 5453	<5	<5	<5	5,7
Kolrest	%-mass	ISO 10370	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Askhalt	%-mass	ISO 6245	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cetan nummer	-	ISO 5156	56,2	52,1	54,4	59,8
Mono aromater	%-mass	SS-EN 12916	6,1	<0,1	3,7	3,4
Di aromater	%-mass	SS-EN 12916	0,2	<0,1	0,2	0,2
Tri aromater	%-mass	SS-EN 12916	<0,1	<0,1	<0,1	- ^c
Polycykliska aromater	%-mass	SS-EN 12916	0,2	<0,1	0,2	- ^c
Total aromat	%-mass	SS-EN 12916	6,3	<0,1	3,8	- ^c
Parafin	% V/V	ASTM D 1319	94,8	96,9	94,6	95,3
Olefin	% V/V	ASTM D 1319	1,3	2,3	1,2	0,5
Effektivt värmevärde	MJ/kg	ASTM D 240	43,7	44,2	42,5	42,4
Densitet vid 15 °C	kg/m ³	ISO 12185	813	798	814	821
Flampunkt	°C	SS-ISO 2719	68,5	97,5	33,5	67,5
Viskositet	mm ² /s	ISO 3104	1,91	2,83	1,56	2,00

^a Felmarginalen i analysmetoderna angavs till 0,2 %-mass, vilket betyder att det sannolik inte förekom något syre.

^b Syrehalten beräknad

^c Tri aromater kunde inte analyseras, därav kunde inte heller polycykliska eller total aromater anges

Vid bränslebyten användes följande rutin för att i möjligaste mån minimera risken att fel bränsle användes och för att minimera mängden av det föregående bränslet:

1. Töm vågkärl
2. Töm vågkärllets påfyllning från fat
3. Töm värmeväxlare
4. Led returslang från motor till spill dunk
5. Byt till fat med nytt bränsle
6. Montera rätt pump från fat (varje bränsle har haft en egen pump)
7. Fyll nytt bränsle i vågkärl
8. Starta motor och kör ut 4 L till spill dunk
9. Byt bränsle filter, lufta och kör ur ytterligare 4L liter till spill dunk
10. Anslut returslang till värmeväxlare
11. Klart för oljebyte

Vid varje bränslebyte byttes även olja och oljefilter enligt följande rutin:

1. Tappa ur motorolja (varmkörd motor)
2. Byt oljefilter
3. Fyll ny olja
4. Kontrollera åtdragning på filter och oljeplugg
5. Kör motorn 15-20 minuter med 30 % belastning.
6. Tappa ut olja och byt filter igen
7. Fyll ny olja
8. Kontrollera åtdragning på filter och oljeplugg
9. Oljebyte klart

Oljebyte gjordes inte inför körningar av kontrollpunkter om nästa bränsle har något annat än MK1.

Motor

Motorn som användes var en Volvo D7D LBE2 med styrbox (ECU) D7D LBE2. Motorn var en 6-cylindrig, överladdad, fyrtaktsdiesel med laddluftkyllning, 12 ventiler och 7,15 liters slagvolym. Motorn satt normalt i en lastmaskin, Volvo L110

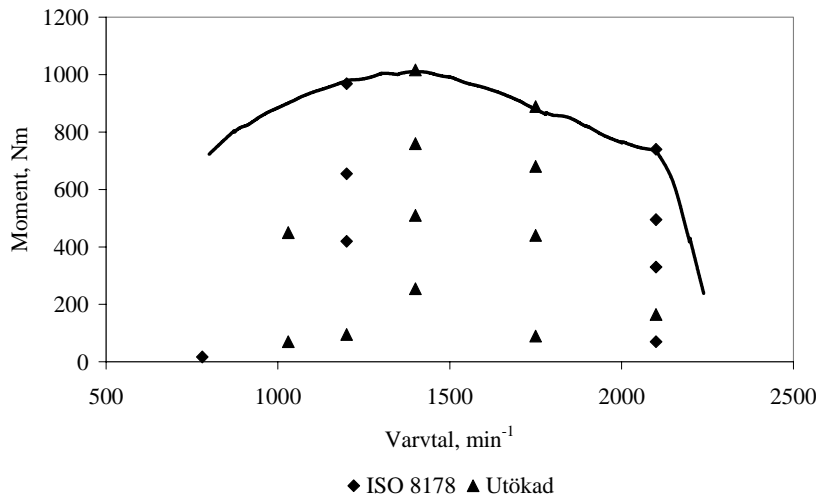
Bränslesystemet hade ett matartryck efter bränslefiltret på 0,28 MPa och ett bränsleflöde på 600 L/h vid 1500 min⁻¹. Insprutningspumpen var av enhetspump-typ (Bosch PF33) och öppningstrycket för spridarna var 275 bar.

Testcykler

I anslutning till projektet utvecklades ett flertal testcykler som upprepades i SMP:s motorlaboratorium i Umeå. Testcyklerna var av både statisk och transient karaktär, d.v.s. med över tiden varierande varvtal och belastande moment. Den statiska testcykeln bestod av 20 individuella belastningspunkter, medan de transienta testcyklerna bestod av både inspelade belastningsmönster och helt fiktiva belastningsmönster.

Statisk testcykel

Den statiska testcykeln var baserad på den internationella testcykeln ISO 8178 C1 (ISO, 1996) och utökad med ytterligare 12 belastningspunkter. Totalt bestod testcykeln av 20 belastningspunkter jämt fördelade över motorns hela arbetsområde, se figur 4.



Figur 4. Statisk testcykel baserad på 8 belastningspunkter från ISO 8178 C1 samt utökad med ytterligare 12 belastningspunkter

Samtliga emissionskomponenter samt bränsleförbrukning mättes individuellt i alla 20 belastningspunkter. I tabell 4 anges absoluta varvtals- och momentnivåer för de 20 belastningspunkterna.

Tabell 4. Varvtal och moment nivåer enligt den statistiska testcykeln

Belastningspunkt	Varvtal min ⁻¹	Moment Nm	Belastningspunkt	Varvtal min ⁻¹	Moment Nm
Punkt 1	2100	650 ^a	Punkt 11	1400	760
Punkt 2	2100	490	Punkt 12	1400	510
Punkt 3	2100	330	Punkt 13	1400	255
Punkt 4	2100	165	Punkt 14	1200	935 ^a
Punkt 5	2100	65	Punkt 15	1200	655
Punkt 6	1750	890 ^a	Punkt 16	1200	420
Punkt 7	1750	680	Punkt 17	1200	95
Punkt 8	1750	440	Punkt 18	1030	450
Punkt 9	1750	90	Punkt 19	1030	70
Punkt 10	1400	1016 ^a	Punkt 20	780	30 ^b

^a Maximalt moment vid aktuellt varvtal kunde variera beroende av t.ex. bränsleegenskaper och omgivningsförhållanden

^b Tomgångsbelastning, i regel överförs alltid ett mindre moment

Förutom att registrera bränsleförbrukning och emissionsmängder individuellt för samtliga belastningspunkter användes även en belastningspunkt, punkt 7, som referenspunkt. Mätning av bränsleförbrukning och emissionsmängder vid referenspunkten genomfördes rutinmässigt före och efter varje mätsekvens, i regel minst två gånger per dag. Resultaten från dessa mätningar behandlades med enklare statistiska modeller för att erhålla information rörande variation och mätosäkerhet. Bland annat beräknades ett 95 % konfidensintervall enligt:

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

där x var medelvärdet, t var en konstant beräknade utifrån student's T-fördelning (vars värde var en funktion av antalet mätpunkter), s var standardavvikelsen och n antalet oberoende mätpunkter. Dessutom genomfördes en mätning av referenspunkten med referensbränslet mellan varje bränsle som ingick i projektet.

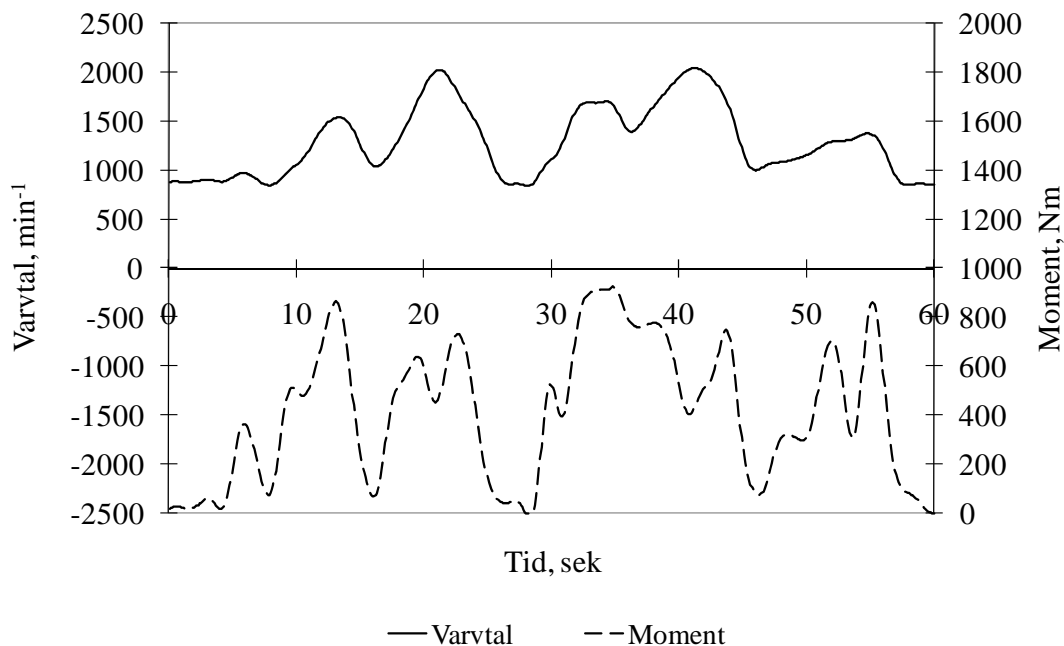
Förutom de statistiska mätningarna bestäms även motorns vridmomentkurva för samtliga bränslen i enlighet med metoden för stegkurva i direktiv 2004/26/EG (EU, 2004).

Inspelade arbetsoperationer

För att i laboratoriemiljö kunna återskapa de situationer och arbeten som motorer i arbetsmaskiner utsätts för användes inspelade belastningsmönster, beskrivande verkliga motorbelastningar vid arbete med arbetsmaskiner från tidigare emissionsrelaterade projekt som forskargruppen utfört (EMMA). Dessa belastningsmönster beskrev tidserier av kombinationer av varvtal och belastande moment för en rad typiska användningsområden med vanligt förekommande arbetsmaskiner. Totalt användes fem olika typbelastningar med både varierande totalbelastning och innehåll av transienta belastningar. De aktuella arbetena var:

1. frontlastararbete med lantbrukstraktor, lastning av grus från en hög till en annan, med (mycket) låg medelbelastning,
2. upprepade accelerationsförlopp, med tung trailer kopplad till lantbrukstraktor, från stillastående till ca 35 km/h vilket i stort sett krävde maximalt uttag av motormoment vid samtliga varvtal, förhållandevis stora variationer i varvtal i princip från tomgång till maxvarv,
3. transportarbete i terräng med dumper, relativt moderata transienter och medelbelastning,
4. lastarbete vid sorteringsverk med hjullastare, kraftiga varvtals och belastningsförändringar,
5. enklare markarbete med hjulgrävmaskin, i princip konstant varvtal och mindre förändringar i belastande moment.

Inspelad arbetsoperation 5 användes även som referens för att kompensera för nollpunktsdrift och andra systematiska felkällor, eftersom detta var en arbetsoperation med mycket begränsade laständringar, vilka antogs ge ett försumbart bidrag till eventuella transienta effekter. Samtliga inspelade belastningsmönster normaliserades och denormaliserades för att möjliggöra överföring från en motorindivid till en annan. I figur 5 redovisas varvtal och belastande moment för lastarbete med hjullastare anpassat för den i projektet aktuella D7D-motorn.

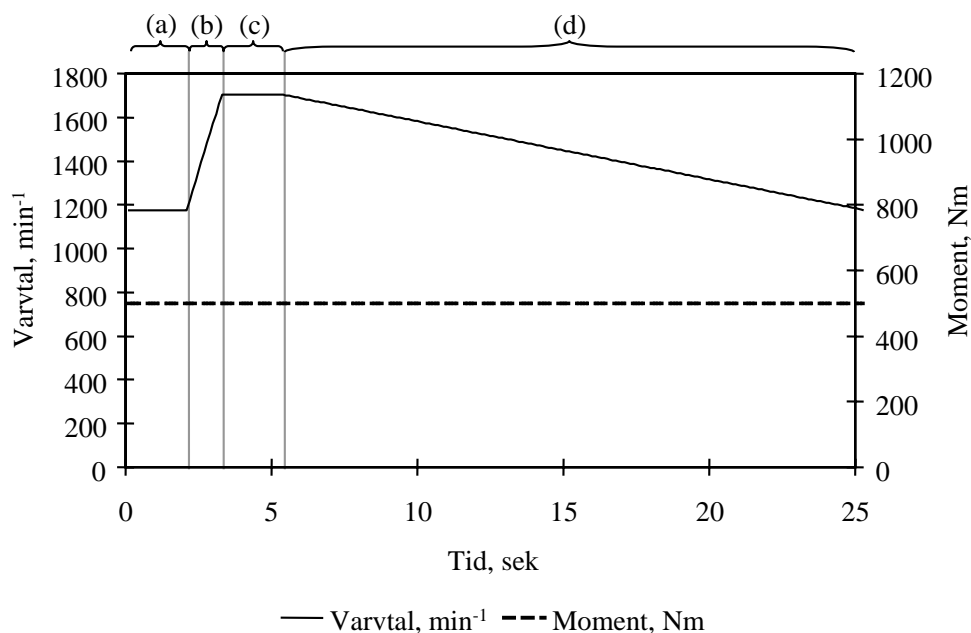


Figur 5. Variationer i varvtal och belastande moment enligt belastningsmönster nr 4, anpassat till motor D7D

Fiktiva belastningsmönster

Förutom de statistiska belastningarna och inspelade belastningsmönster användes specialutvecklade belastningsmönster anpassade för att studera inverkan av specifika belastningsändringar så som ökning eller minskning i varvtal. Ett av syftena med dessa fiktiva belastningsmönster var att kunna studera effekten av transienter i varvtal och belastande moment oberoende av varandra.

I figur 6 visas ett exempel över en positiv transient belastning i varvtal, ett accelerationsförlopp.



Figur 6. Exempel på fiktivt belastningsmönster för positiv transient i varvtal

För den belastningscykel som finns beskriven i figur 6 var motorns moment låst till ett fixt värde, 500 Nm, under hela cykeln, medan varvtalet förändrades linjärt i olika etapper. Sektion (b) i figur 6 beskriver en positiv transient i varvtal, d.v.s. ett accelerationsförlopp under konstant moment, medan sektion (d) beskriver motsvarande negativa transient i varvtal, en varvtalssänkning eller deceleration.

Detta belastningsmönster användes för att studera effekterna av en positiv transient i varvtal d.v.s. en varvtalsökning, på bränsleförbrukning och emissionsbildning. Anledningen till att cykeln även innefattade en negativ transient eller minskning i varvtal var att det därmed gick att skapa ett cykliskt förlopp där den sista kombinationen av varvtal och moment motsvarade den första kombinationen av varvtal och moment i cykeln. Utöver dessa sektioner ingick även två sektioner med konstant varvtal, sektion (a) och sektion (c), mellan varje förändring i varvtal för att öka kontrollen och minimera diverse regler tekniska bieffekter så som "overshoot" när belastningsmönstret repeteras i bromsbänk.

I sektion (a) och sektion (c) hölls samtliga variabler, varvtal och moment, på en fix nivå under två sekunder oberoende av vilken typ av transient belastning som studerades. Förändringshastigheten i sektion (b), d.v.s. hur snabbt varvtalet förändrades från nivån i sektion (a) till nivån i sektion (c), varierade mellan 2, 10, 20 och 30 %s⁻¹ medan förändringshastigheten i sektion (d) hölls på en konstant nivå av -2 %s⁻¹ under studier av positiva transienter i varvtal. Förändringshastigheten beräknades som normaliserad förändring i varvtal respektive moment per sekund i enlighet med ekvation 1 och 2

$$dn = \frac{n_i - n_{i-1}}{n_{rated} - n_0} \bigg/ (t_i - t_{i-1}) \times 100 \quad \text{Ekv. 1}$$

$$d\tau = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\tau_{max}} \bigg/ (t_i - t_{i-1}) \times 100, \quad \text{Ekv. 2}$$

där dn och $d\tau$ är förändringshastigheten i varvtal respektive moment i %s⁻¹, n är varvtalet i min⁻¹ (där subindexen i , $i-1$, $rated$ och 0 representerar nuvarande varvtal, föregående varvtal, varvtal vid motorns märkeffekt respektive motorns låga tomgångsvarvtal), τ är moment i Nm (där subindex max representerar motorns maximala moment vid aktuellt varvtal) och t är tid i sekunder där samma subindex som för förändringshastigheten används.

Studier av negativa transienter genomfördes enligt samma metodik som användes för de positiva transienterna med skillnaden att förändringshastigheterna i sektion (b) och (d) var de omvända. Förändringshastigheten i sektion (b) hölls på en konstant nivå av 2 %s⁻¹ medan förändringshastigheten i sektion (d) varierade mellan -2, -10, -20 och -30 %s⁻¹. Effekterna av transienter i moment på bränsleförbrukning och emissionsbildning studerades enligt samma upplägg som transienter i varvtal, d.v.s. variationer i moment under konstant varvtal.

Totalt utvecklades fyra olika kategorier av fiktiva belastningsmönster för att studera effekterna av transienter i varvtal och moment oberoende av varandra. Dessa var:

1. Ökning i varvtal från 30 till 70 % av varvtalet vid märkeffekt för två olika konstanta nivåer på moment. För den aktuella D7D motorn motsvarade detta en ökning i varvtal från ca 1 200 min⁻¹ till 1 700 min⁻¹ vid 250 och 500 Nm.
2. Minskning i varvtal från 70 till 30 % av varvtalet vid märkeffekt för två olika konstanta nivåer på moment. För den aktuella D7D motorn motsvarade detta en minskning i varvtal från ca 1 700 min⁻¹ till 1 200 min⁻¹ vid 250 och 500 Nm.
3. Ökning i moment från 30 till 70 % av maximalt tillgängligt moment vid aktuellt varvtal. Två olika konstanta nivåer på varvtal studerades, 1 400 min⁻¹ samt 1 800 min⁻¹. För den aktuella D7D motorn innebar detta en ökning av momentet från ca 300 Nm till 700 Nm vid 1 400 min⁻¹ samt från 270 Nm till 635 Nm vid 1 800 min⁻¹.
4. Minskning i moment från 70 till 30 % av maximalt tillgängligt moment vid aktuellt varvtal. Samma varvtalsnivåer som vid punkt (3) användes.

Totalt utvecklades 28 individuella fiktiva belastningscykler. För samtliga fyra kategorier av fiktiva belastningsmönster ovan fanns två belastningsmönster med samma absoluta förändringshastighet, 2 %s⁻¹, för både den positiva och negativa transienten. En förändringshastighet av 2 %s⁻¹ ansågs vara så pass långsam att motorn i princip skulle förbruka samma mängd bränsle och generera samma nivå av emissioner som under statiska förhållanden. För den aktuella motorn innebar en förändringshastighet av 2 %s⁻¹ att t.ex. varvtalet ökade från 1 200 min⁻¹ till 1 700 min⁻¹ på 20 sekunder.

Dessa cykler användes för att kompensera för t.ex. nollpunktsdrift och andra systematiska fel. Barsic (1984) har visat att variationen mellan kontrollmätningar för tunga dieselmotorer inom ett och samma motorlaboratorie kan vara betydande trots att åtgärder har vidtagits för att minimera variationer i omgivningsförhållanden.

Dataanalys

Varje statisk belastningspunkt och transient belastningsmönster upprepades i motordynamometer under ca 15 minuter för att temperaturer, bränsleförbrukning och emissionsbildning skulle stabiliseras. Därefter registrerades bland annat genomsnittlig bränsleförbrukning och emissionsnivå under minst fem minuter. Totalt registrerades 30 parametrar, varav 1/3 var emissionskomponenter. Övriga mätsignaler berörde främst omgivningsfaktorer och motorövervakning, så som tryck och temperaturer. Samtliga komponenter registrerades med en frekvens på 1 Hz, förutom moment- och varvtalssignalerna, som registrerades med 5 Hz under stabiliseringsförloppet.

Registrerade koncentrationer av analyserade emissionskomponenter räknades om till massa per timme, i.e. gram per timme (gh⁻¹), via beräknat avgasflöde enligt proceduren beskriven i "ISO 8178 Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement" (ISO, 1996). Baserat på befintlig teknologi i

motorlaboratoriet och registrerade mätsignaler valdes kolbalansmetoden som mest tillförlitlig för att beräkna avgasflöde. Vidare viktades resultaten från de 20 individuella belastningspunkterna samman till ett genomsnittligt bränsleförbruknings- eller emissionsvärde i g kWh^{-1} enligt viktningförfarandet beskrivet i ISO 8178 C1 standarden (ISO, 1996). Dessutom genomfördes en medelvärdesberäkning där samtliga 20 belastningspunkter värderades lika högt.

Semi-statisk emissionsberäkning

Baserat på uppmätt bränsleförbrukning och emissionsnivåer för de 20 statiska belastningspunkterna beräknades, teoretiska, statiska nivåer för samtliga tänkbara heltalskombinationer av varvtal och belastande moment inom motorns arbetsområde med hjälp av bilinjär interpolation. Antalet belastningspunkter var av tids- och kostnadsskäl begränsade till 20 st. Fler punkter hade resulterat i en säkrare bedömning, dock är effekten troligtvis relativt begränsad då fördelningen av de 20 belastningspunkterna var anpassad till övriga studerade belastningsmönster.

Utifrån dessa matriser över bränsleförbrukning och emissioner under statiska förhållanden kunde momentana värden hämtas för valfri kombination av varvtal och moment inom motorns arbetsområde. Genom att avläsa statiska värden från matriserna för inspelade tidserier av varvtal och moment erhöles motsvarande tidserier över bränsleförbrukning och emissioner under statiska förhållanden d.v.s. som om inga transienta effekter fanns.

Transienta effekter

Effekterna av transienter i motorns varvtal och moment på bränsleförbrukning och emissionsbildning beräknades genom att jämföra uppmätt nivåer med semi-statiskt beräknad nivå. Analysen utfördes enligt följande:

1. registrering av varvtal, moment, bränsleförbrukning och emissionsdata från 20 statiska belastningspunkter,
2. beräkning av matriser över bränsleförbrukning och emissioner genom bilinjär interpolation av de i (1) registrerade data för samtliga heltalskombinationer av varvtal och moment inom motorns arbetsområde,
3. registrering av varvtal, moment, bränsleförbrukning och emissioner vid fiktiva belastningsmönster,
4. kalibrering av nollpunktsförskjutning av bränsleförbruknings- och emissionsmatriserna i (2) till de vid (3) rådande förhållandena genom registrerad bränsleförbrukning och emissionsnivå för speciella kalibreringsmätningar d.v.s. fiktiva belastningsmönster med maximal förändringshastighet av $\pm 2 \% \text{s}^{-1}$,
5. beräkning av bränsleförbrukning och emissioner som om de transienta effekterna vore obefintliga genom semi-statisk emissionsberäkning av de i (3) registrerade varvtals och momentsignalerna och bränsleförbruknings- och emissionsmatriserna från (4), och

6. beräkning av effekter av transienter i varvtal och moment på bränsleförbrukning och emissioner, x i $g g^{-1}$ vid statistiska förhållanden enligt:

$$x = \left(\frac{E_M - E_C}{E_C} \right) \left(\frac{t_{cykel}}{t_{transient}} \right) + 1, \quad \text{Ekv. 3}$$

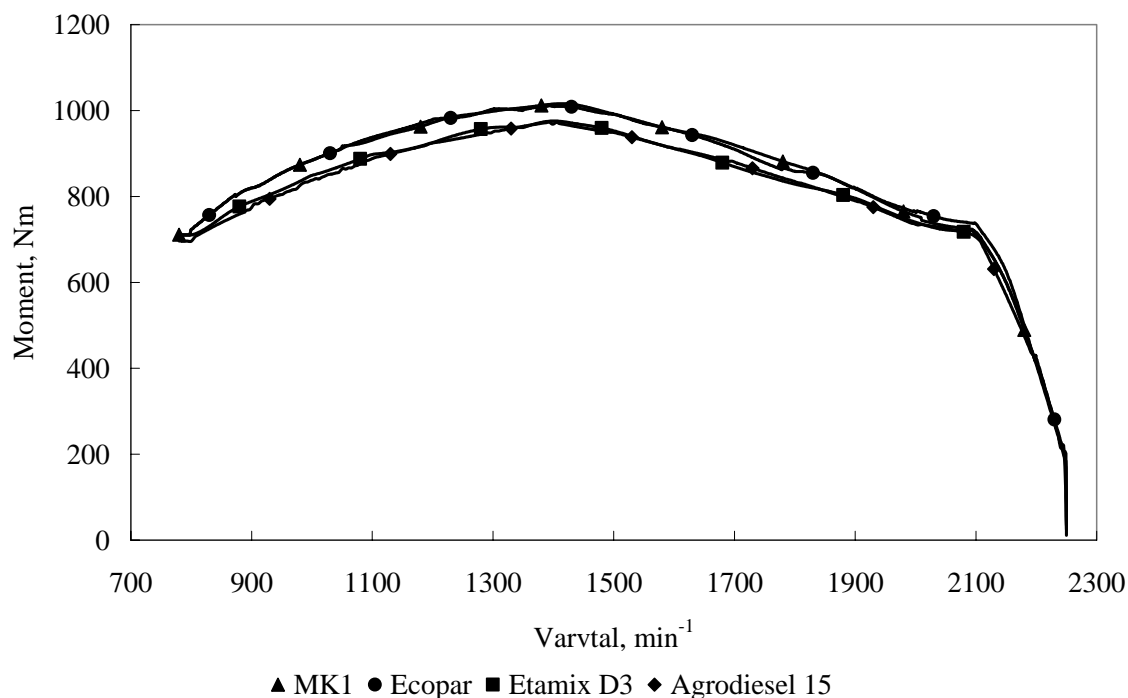
där E_M är registrerad transient bränsleförbrukning och emissionsmängd från (3) i $g \text{ cykel}^{-1}$, E_C är beräknad semi-statisk bränsleförbrukning och emissionsmängd från (5) i $g \text{ cykel}^{-1}$, t_{cykel} är total längd på belastningsmönstret i sekunder och $t_{transient}$ är längd på det studerade transienta förloppet, sektion (b) respektive sektion (d) i figur 6 för positiva respektive negativa transienter, i sekunder.

Skillnaden mellan uppmätt och med semi-statiska metoden beräknad bränsleförbrukning och emissionsmängd antogs vara helt orsakad av det studerade transienta förloppet, därav tidskvoten i ekvationen ovan. Vid en förändringshastighet av $\pm 2 \% s^{-1}$ eller mindre, *i.e.* vid statistiska förhållanden, antogs skillnaden mellan uppmätt och beräknad bränsleförbrukning och emissionsmängd vara noll, vilket resulterade i att kvoten i ekvation 3 blev ett.

För inspelade arbetsoperationerna genomfördes samma beräkningar som för fiktiva belastningsmönster med undantag för punkt (6) ovan. Dessutom användes inspelade arbetsoperation nummer 5, en förhållandevis statistisk arbetsoperation med endast mindre förändringar i moment och i princip inga förändringar i varvtal, som kalibrering av nollpunktsförskjutning etc. i likhet med punkt (4) ovan. Transienta effekter vid inspelade arbetsoperationer beräknades som relativ skillnad mellan beräknad semi-statisk bränsleförbrukning och emissionsmängd och motsvarande uppmätt mängd. Vidare redovisades även absolut bränsleförbrukning och emissionsmängd i $g h^{-1}$ för varje inspelad arbetsoperation.

Resultat och diskussion

Förutom de statistiska och transienta mätningarna registrerades även en momentkurva för samtliga bränslen, vilket redovisas i figur 7.



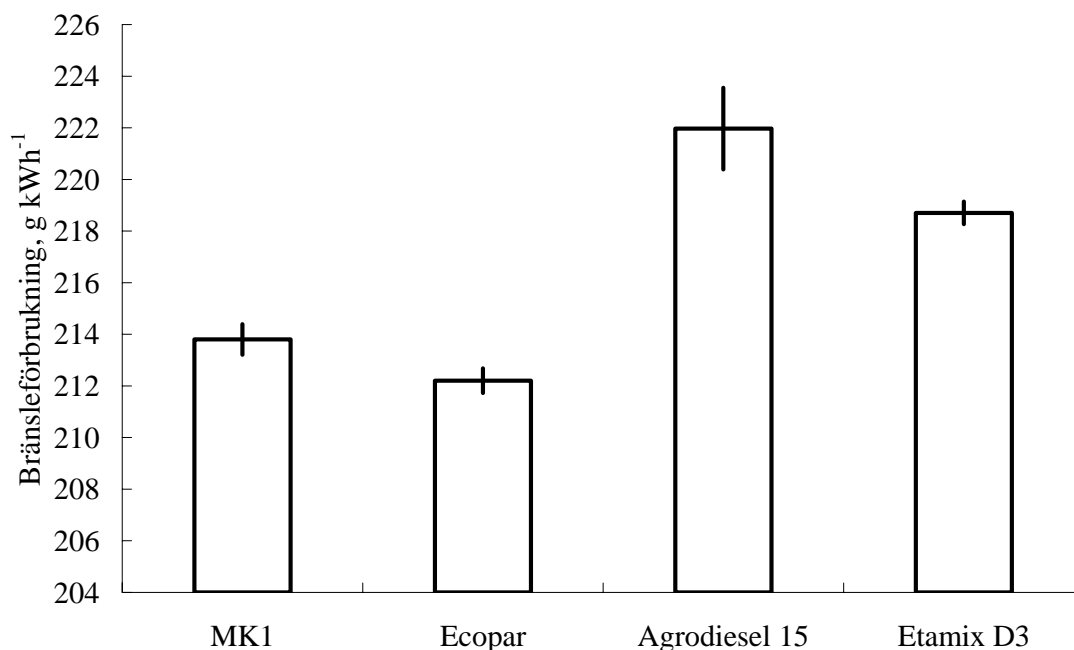
Figur 7. Momentkurva för MK1, Ecopar, Etamix D3 och Agrodiesel 15

Momentkurvorna i figur 7 uppvisar liknande form för samtliga studerade bränslen. Momentkurvorna för Etamix D3 och Agrodiesel 15 bränslena uppvisade dock en relativt tydlig skillnad mot de två övriga bränslena. Speciellt tydlig var skillnaden vid uttag av maximalt moment där referensbränslet och Ecopar bränslet uppvisade ett ca 45 Nm högre värde, en skillnad på ca 4 %. Detta var dock att förvänta då skillnaden i effektivt värmevärde mellan bränslena var ca 4 %.

Referenspunktsmätning

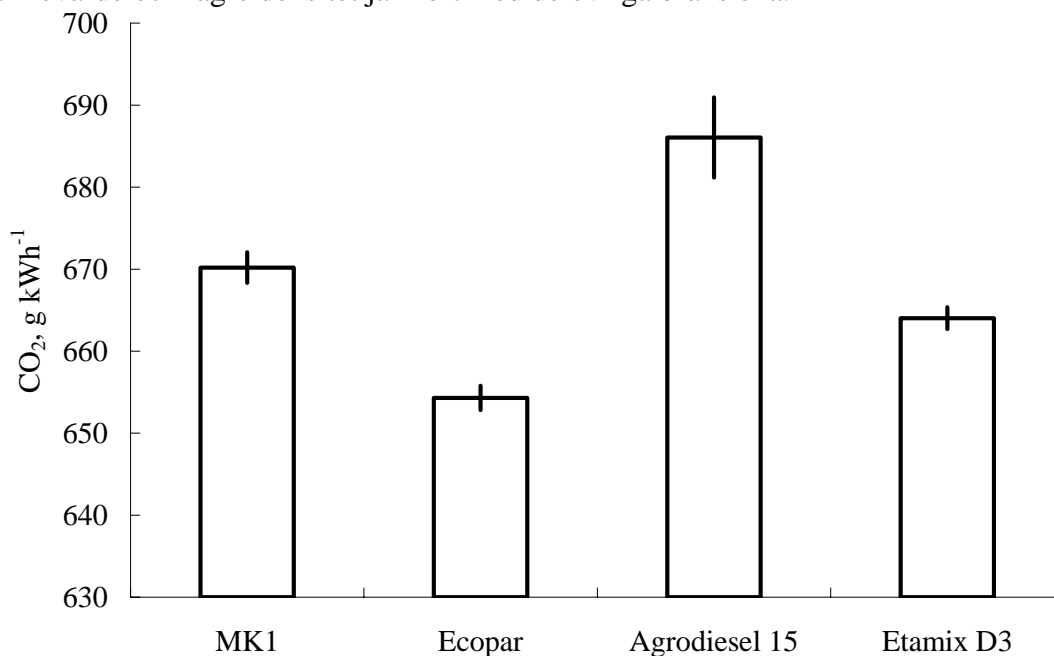
För samtliga i projektet ingående bränslen genomfördes referenspunktsmätningar vid ett specifikt lastfall, 1 750 min⁻¹ och 680 Nm. Vid dessa referenspunktsmätningar registrerades samma variabler som vid övriga mätpunkter. För varje bränsle genomfördes mellan 11 och 20 individuella mätningar. Då dessa referenspunktsmätningar endast var baserade på en specifik belastningspunkt kan de inte användas för att bedöma eventuella skillnader mellan bränslena utan de användes bara för att beräkna variation och repeterbarhet i hela mätsystemet inklusive motordynamometer, bränsle och beräkningsmetod.

I figur 8 redovisas uppmätt genomsnittlig bränsleförbrukning inklusive 95 procentigt konfidensintervall.



Figur 8. Genomsnittlig bränsleförbrukning inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

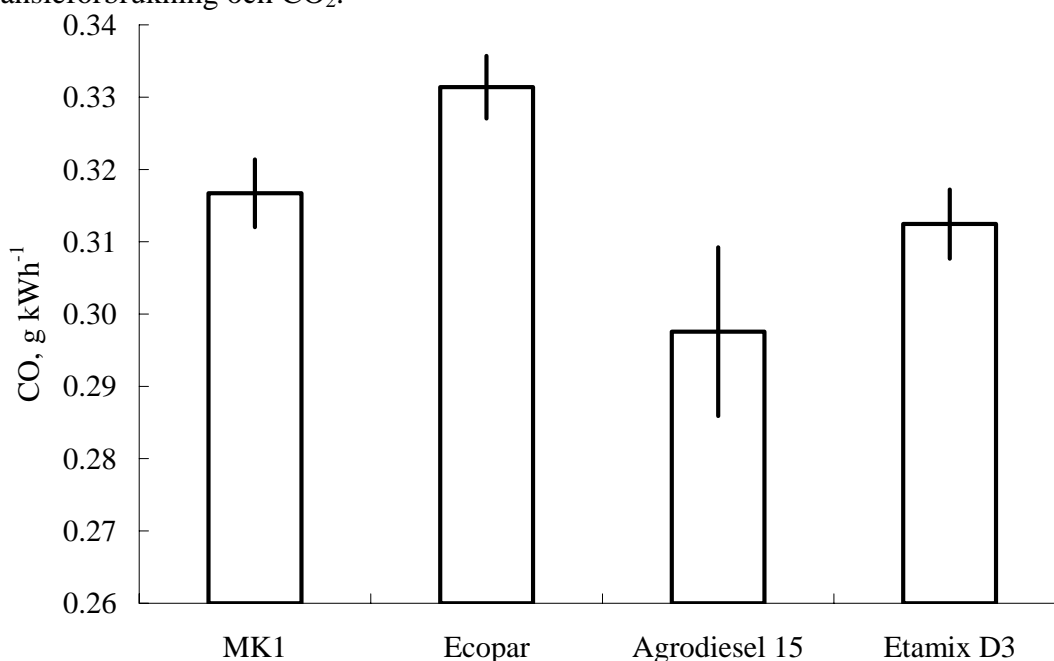
För uppmätt bränsleförbrukning var konfidensintervallet mycket smalt för samtliga bränslen, i genomsnitt var konfidensintervallet mindre än 0,25 % av det totala värdet, förutom för Agrodiesel 15 där det var 0,70 %. Den genomsnittliga bränsleförbrukningen i g kWh⁻¹ speglade även skillnaden i värmevärde och densitet hos de olika studerade bränslena, där både MK1 och Ecopar hade ett högre värmevärde och lägre densitet jämfört med de övriga bränslena.



Figur 9. Genomsnittliga emissioner av CO₂ inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

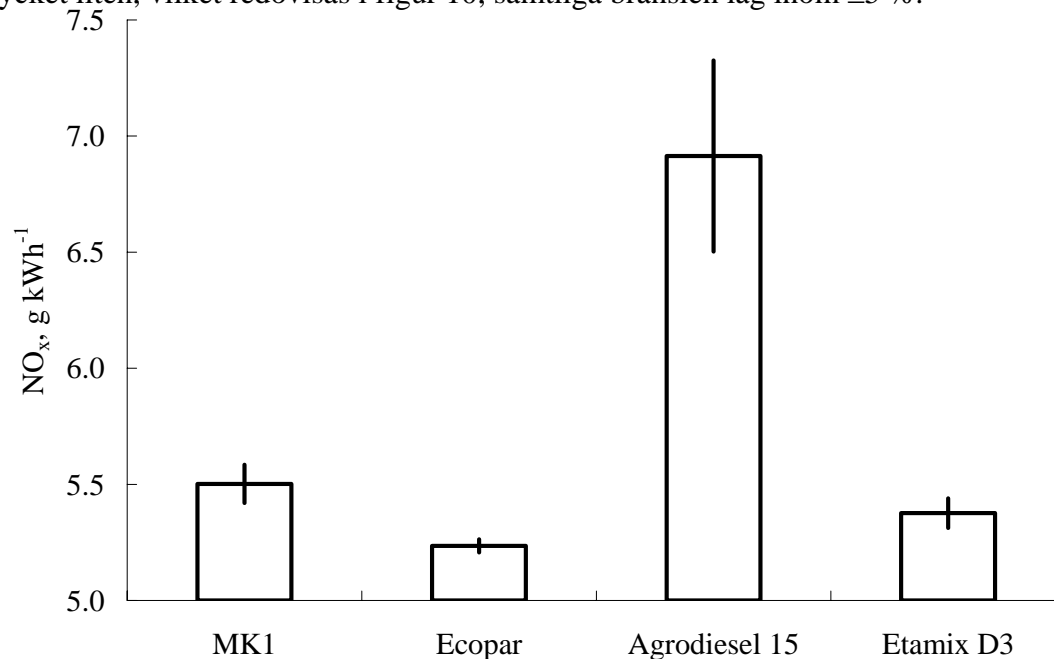
Uppmätt variation i emissioner av CO₂ var på samma nivå som för bränsleförbrukning, d.v.s. mindre än 0,25 %. Vid omräkning av uppmätt bränsleförbrukning till utsläpp av CO₂ erhöles samma nivåer som uppmättes direkt och redovisas i figur 9.

Den goda stabiliteten och repeterbarheten i uppmätta nivåer av bränsleförbrukning och emissioner av CO₂ är mycket positiv då beräkningen av avgasflöde var baserad på kolbalansmetoden där de två största och mest betydelsefulla flödena var just bränsleförbrukning och CO₂.



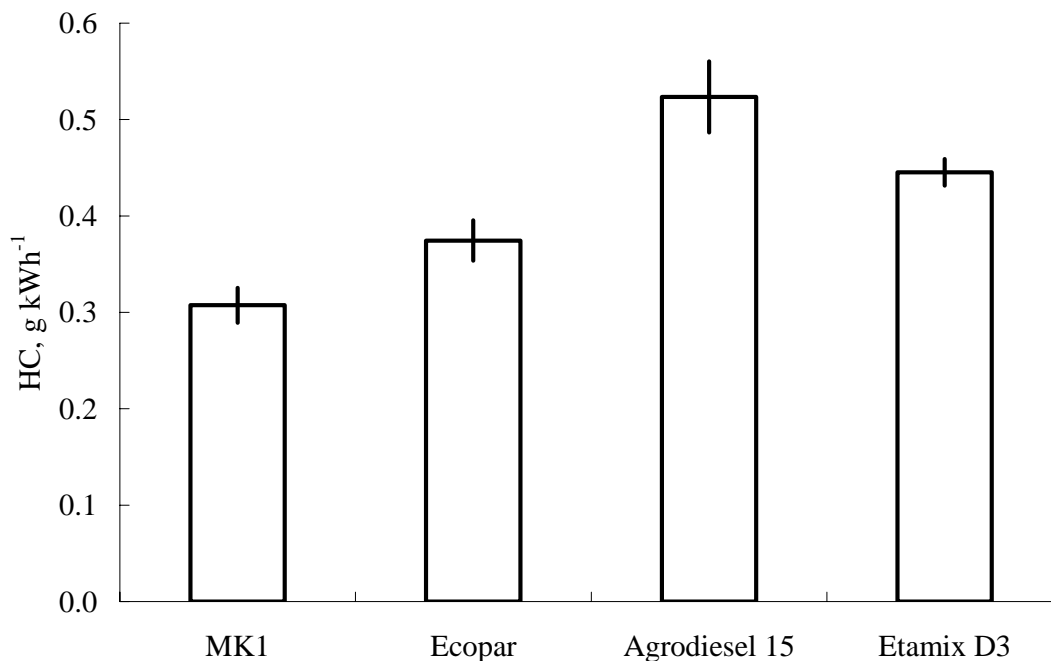
Figur 10. Genomsnittliga emissioner av CO inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

Variationen i uppmätt nivå av kolmonoxid (CO) uppvisade lite högre värden än vad bränsleförbrukningen och CO₂ resulterade i. Dock var repeterbarheten god även för CO, i genomsnitt runt 2 %. Skillnaden i variation mellan de olika bränslena var mycket liten, vilket redovisas i figur 10, samtliga bränslen låg inom ±5 %.



Figur 11. Genomsnittliga emissioner av NO_x inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

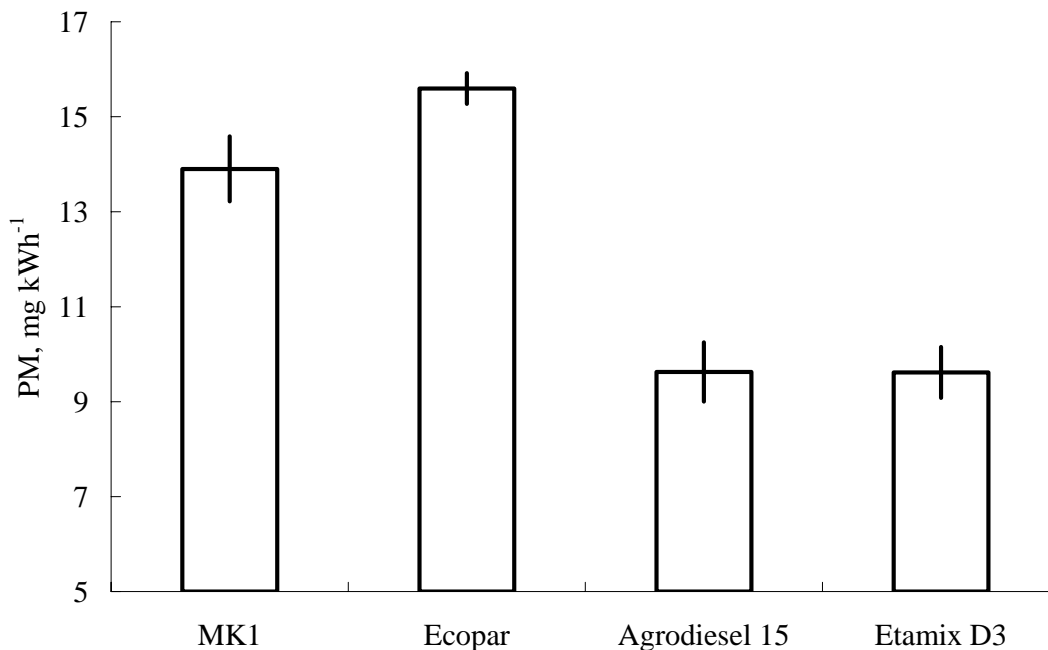
Genomsnittliga variation i uppmätt emission av kväveoxider var endast drygt 1 %, med undantag för Agrodiesel 15. Dock var variationen mellan de olika bränslena något större än för ovan beskrivna analyser. Variationen i emission av NO_x från Ecopar var märkbart lägre jämfört med de övriga bränslena, medan Agrodiesel 15 hade tydligt högre variationer, 6 %.



Figur 12. Genomsnittliga emissioner av HC inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

Emissionen av kolväten (HC) var den emissionskomponent som uppvisade störst variation. I genomsnitt var variationen i uppmätt emission av HC drygt 5 %, med förhållandevis små skillnader mellan de olika bränslena. En möjlig orsak till de, relativt övriga emissioner, stora variationen kan vara den förhållandevis långa provtagningsledning mellan provtagningspunkt och analysutrustning.

Den provtagningsledning som användes värmdes till en temperatur av 191°C. Icke uppvärmda delar, så som kopplingar och anslutningar, var kraftigt isolerade för att inte utgöra kondensationspunkter. Trots användandet av uppvärmda provtagningsledningar rådde det en förhållandevis stor risk för att provet påverkades. Speciellt känsligt är det för kolväten med hög kokpunkt (Burtscher och Majewski, 2004).



Figur 13. Genomsnittliga emissioner av PM inklusive 95 procentigt konfidensintervall.

Även för uppmätta nivåer av emissioner av partiklar (PM) var variationen relativt hög, drygt 4 %. Detta bedömdes dock vara en förhållandevis god repeterbarhet. I likhet med resultatet från mätningarna av NO_x uppvisade Ecopar de lägsta variationerna även för uppmätta emissioner av PM.

Enligt en studie av Barsic (1984) var den relativa variationen för uppmätta partikelhalter mellan 3 och 4 gånger högre jämfört med uppmätt variation hos emissioner av NO_x och HC. Dock var studien av Barsic (1984) baserad på filtermätning medan denna studie använde ett TEOM för partikelmätning, vilket verkar ha resulterat i stabila resultat.

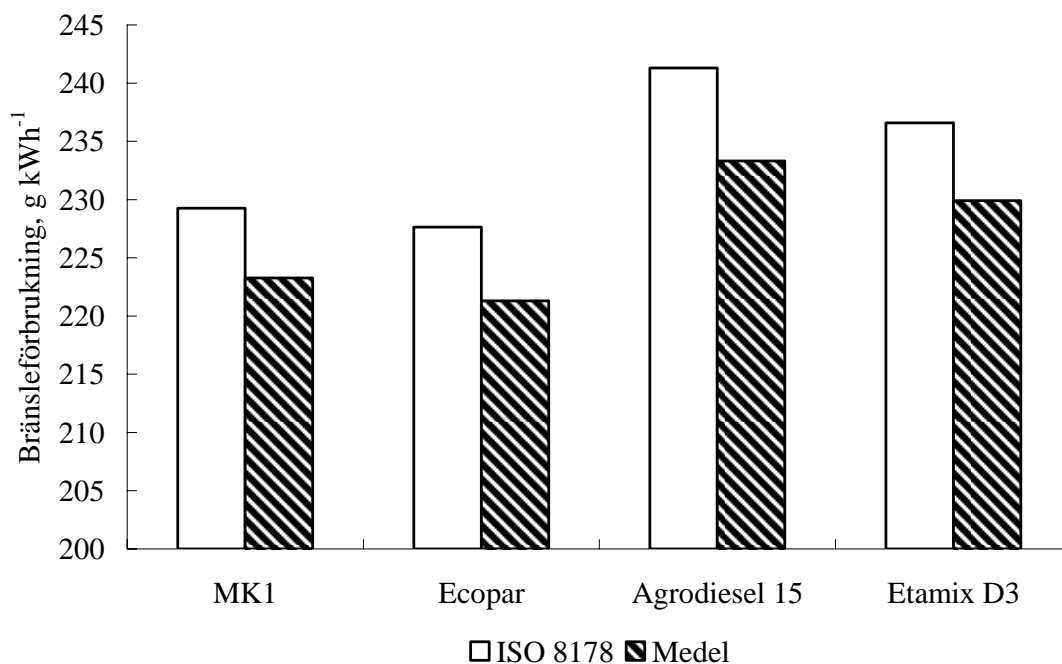
En stor fördel med ett TEOM jämfört med traditionell filtermätning är att ett TEOM kontinuerligt registrerar partikelhalt under hela mätperioden, medan ett filter endast ger ett ackumulerat värde för hela exponeringstiden.

Statiska mätningar

De statiska mätpunkterna viktades samman till ett värde per bränsle och emissionskomponent enligt den princip som finns beskriven i ISO 8178 C1 (ISO, 1997). Enligt viktningsprincipen C1 viktas punkterna 1, 2, 3, och 20 i den 20 belastningspunkter stora statistiska testcykeln beskriven ovan med 15 % per punkt, medan punkterna 5, 14, 15 och 16 viktas med 10 % per punkt; övriga mätdata inkluderas inte alls.

För att även inkludera övriga punkter i jämförelsen redovisas ett medelvärde för samtliga 20 uppmätta belastningspunkter. Dessutom används det 95-procentiga konfidensintervall som beräknades för referenspunkterna som ett relativt mått för att

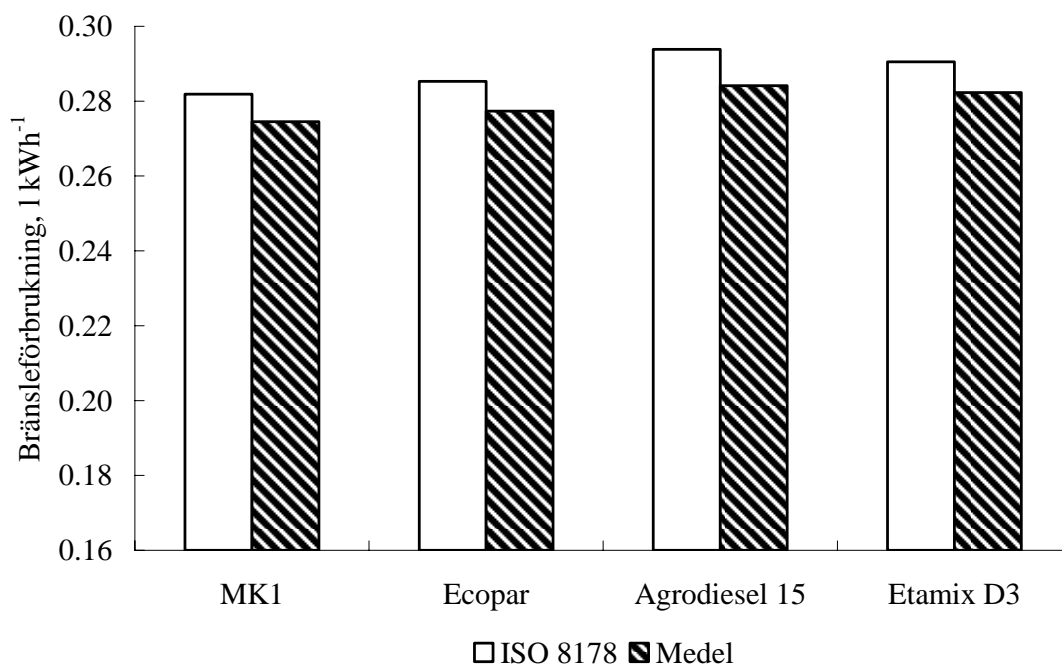
avgöra om det förekom några signifikanta skillnader mellan de studerade bränslena eller ej.



Figur 14. Genomsnittlig specifik bränsleförbrukning viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

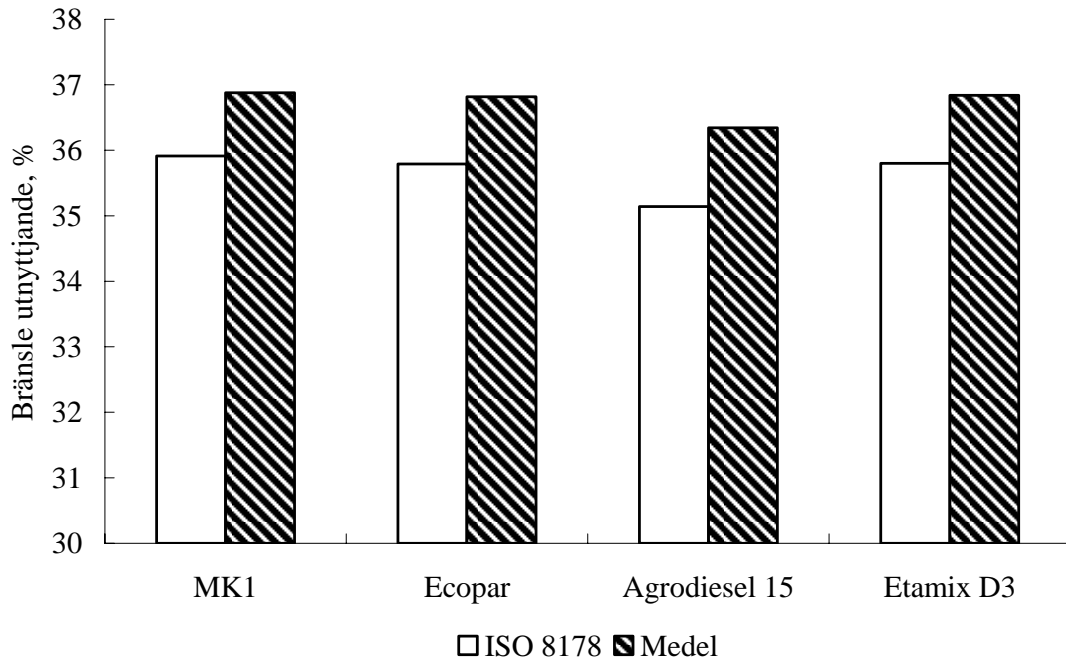
Enligt den specifika bränsleförbrukningen, redovisad i figur 14, förekom signifikanta skillnader mellan samtliga bränslen. Både viktning enligt ISO 8178 och som medelvärde visar att Ecopar har den lägsta specifika bränsleförbrukningen tätt följt av referensbränslet, MK1. Av de studerade bränslena uppvisade Agrodiesel 15 den högsta specifika bränsleförbrukningen.

Agrodiesel 15 och Etamix D3 hade dock lägre energidensiteten än de båda övriga bränslena vilket leder till att den specifika bränsleförbrukningen är mindre betydelsefull för energiomvandlingen i motorn. Dock har den betydelse för bland annat hur stor mängd energi som kan tillsättas vid varje injektion av bränsle samt hur ofta fordonet måste tankas. Dock var den maximala skillnaden mindre än 4 % vilket är förhållandevis lite jämfört med en rad andra faktorer så som förarbete, arbetsoperation och underhåll (Lindgren et al., 2003; EEA, 2005; Davidsson och Pettersson, 2006).



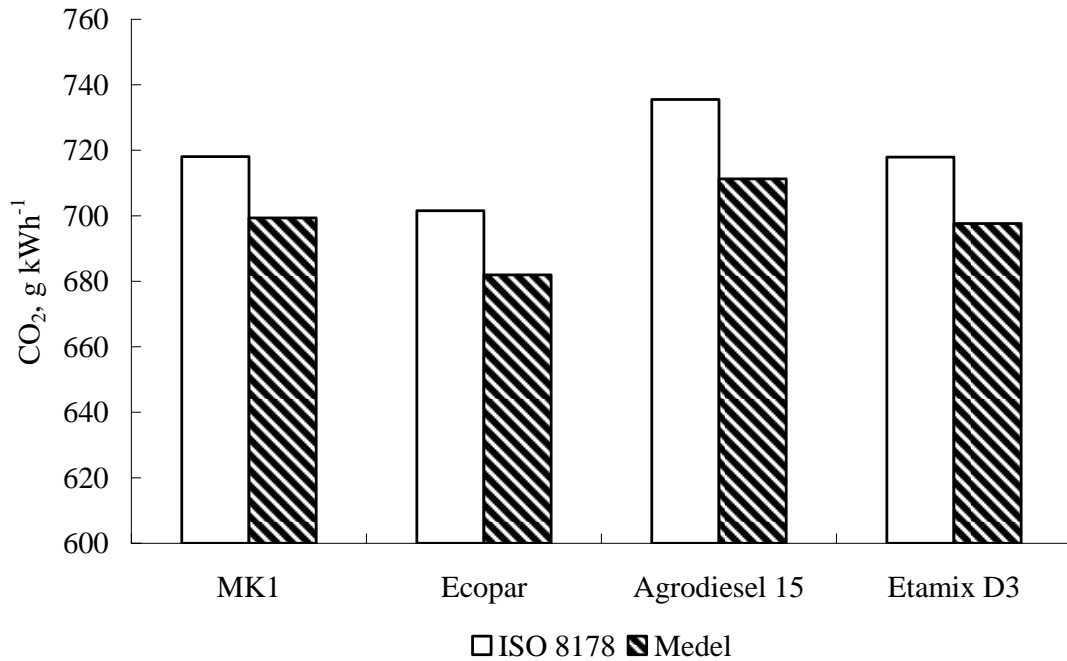
Figur 15. Genomsnittlig bränsleförbrukning i liter per kWh viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

Redovisas den specifika förbrukningen som volym per kWh istället för massa per kWh blir skillnaderna mellan bränslena mindre, se figur 15. Agrodiesel 15 uppvisade fortfarande den högsta specifika förbrukningen medan referensbränslet MK1 resulterade i den lägsta specifika förbrukningen. Dock var skillnaden mellan MK1 och Agrodiesel 15 mindre än 4 %.



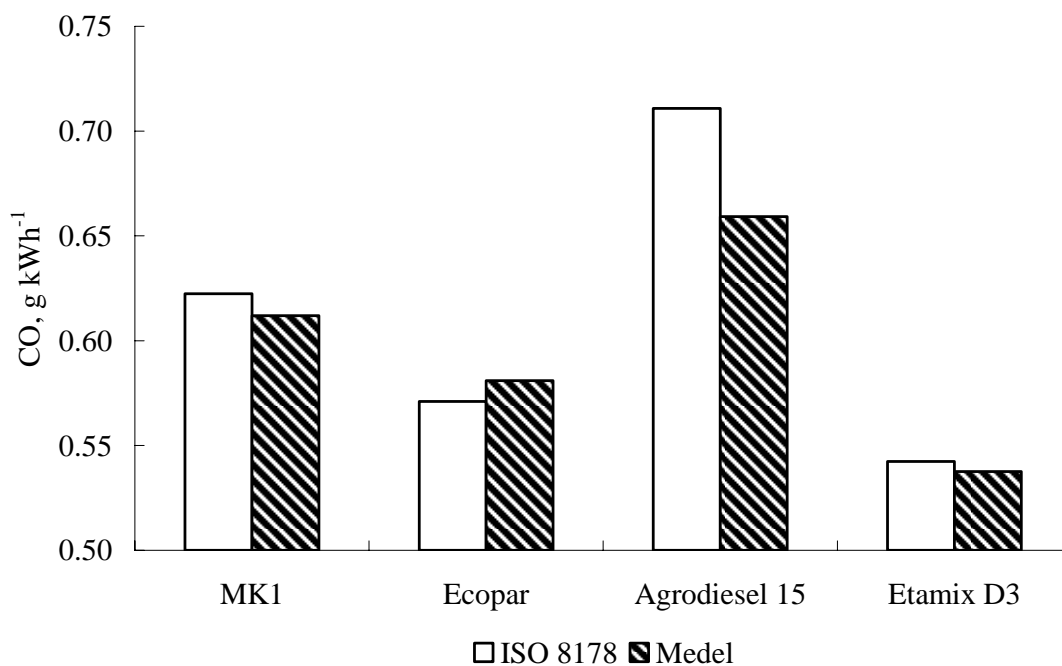
Figur 16. Genomsnittlig energieffektivitet viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

En jämförelse av energieffektivitet, d.v.s. hur stor del av det effektiva värmevärdet som omvandlats till nyttig effekt på motoraxeln, ger ett bättre mått på energianvändning än enbart bränsleförbrukning baserat på massa eller volym. Skillnaden i energieffektivitet var relativt liten, ca 2 % mellan det bränsle med högst effektivitet och det med lägst, vilket visas i figur 16. Skillnaderna energieffektivitet mellan MK1, Ecopar och Etamix D3 var försumbara, medan energieffektiviteten för Agrodiesel 15 var ca 2 % lägre. Resultaten var oberoende av viktningssmetod.



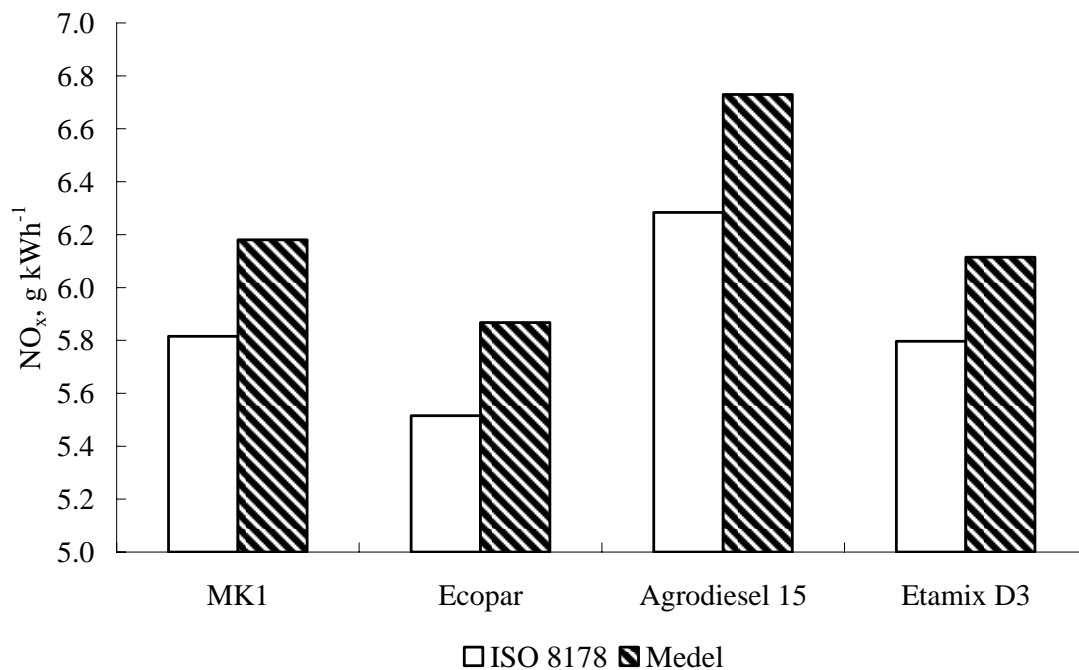
Figur 17. Genomsnittliga emissioner av CO₂ viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

Emissioner av CO₂ är starkt kopplat till mängden bränsle som förbrukas, dock inverkar även bränslets sammansättning (andelen kol, redovisad i tabell 3), vilket visas i figur 17. Trots att det förekom signifikanta skillnader i bränsleförbrukning mellan referensbränslet, MK1, och Etamix D3 kunde ingen skillnad i emissioner i CO₂ fastställas. De enda signifikanta skillnaderna var Ecopar som uppvisade en något lägre nivå jämfört med de övriga bränslena, mindre än 2 % skillnad och Agrodiesel 15 som hade högre utsläpp av CO₂.



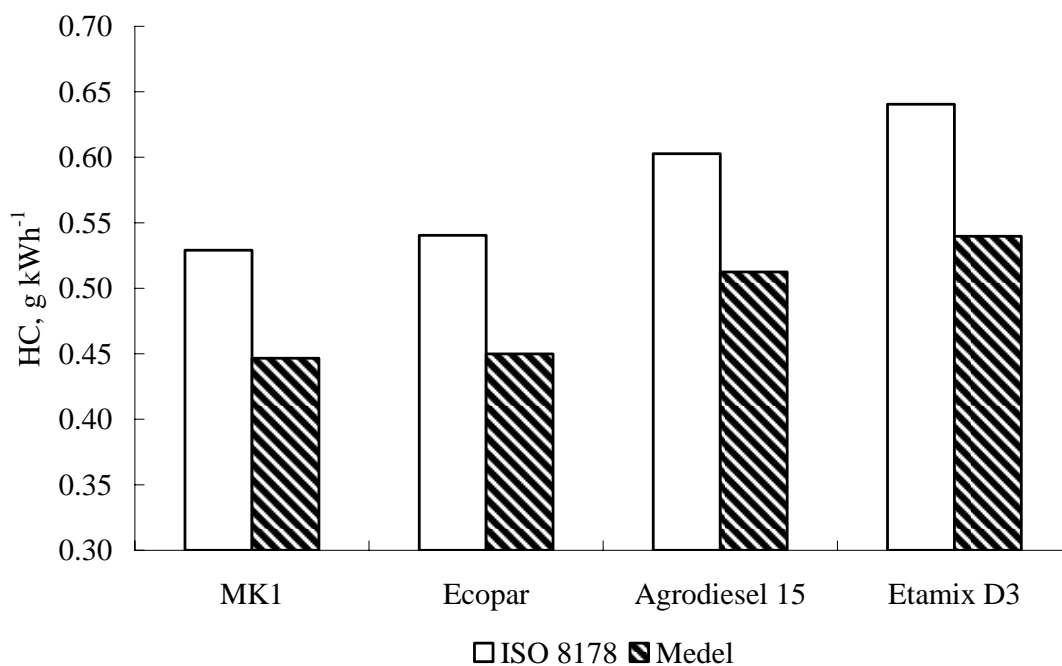
Figur 18. Genomsnittliga emissioner av CO viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

För emissioner av CO uppmättes förhållandevis stora skillnader mellan de studerade bränslena, figur 18. Etamix D3 resulterade i de lägsta nivåerna medan Agrodiesel 15 uppvisade den högsta nivån. Skillnaden mellan Etamix D3 och Agrodiesel 15 var drygt 30 %, samtliga skillnader signifikanta med 95 % konfidensintervall. Resultaten visar att den aktuella motorn klart understiger de maximalt tillåtna nivåerna i steg II enligt den europeiska emissionslagstiftningen (EU, 1997).



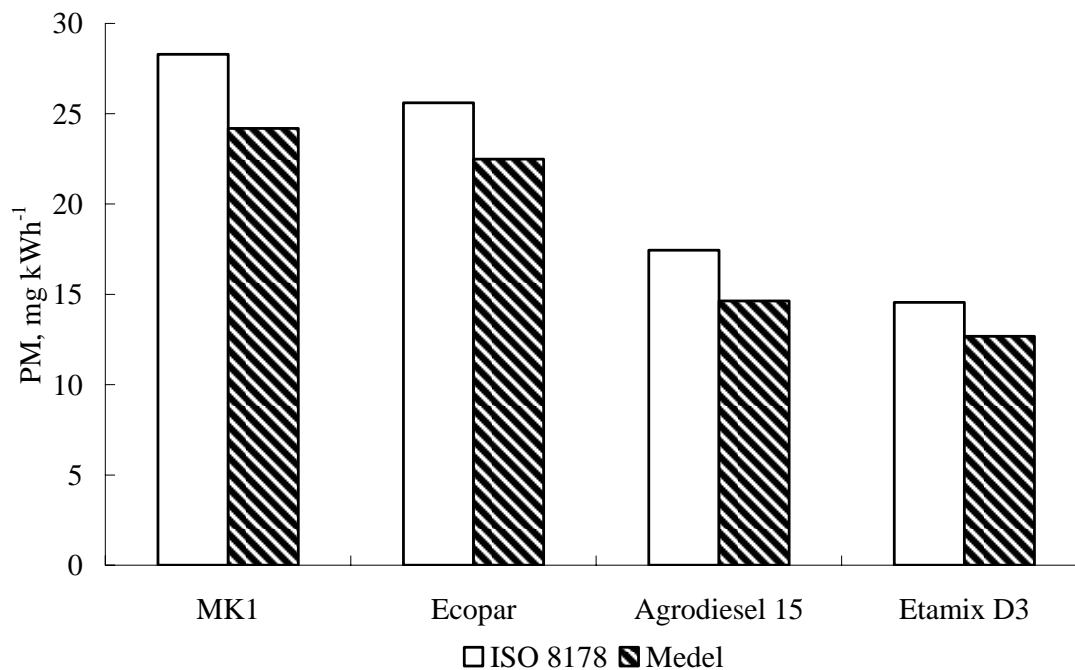
Figur 19. Genomsnittliga emissioner av NO_x viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

Resultaten från de statistiska testcyklerna visade att det var relativt liten skillnad mellan emissioner av NO_x för de studerade bränslena, vilket visas i figur 19. Den enda signifikanta skillnaden var något lägre nivåer av NO_x från Ecopar jämfört med de övriga bränslena samt högre från Agrodiesel 15. Ecopar uppvisade ca 4 % lägre värde än referensbränslet och 14 % lägre än Agrodiesel 15. Gränsvärdet för typgodkännande enligt steg II motsvarar 6,0 g kWh⁻¹ vilket den aktuella motorn klarade med samtliga studerade bränslen förutom Agrodiesel 15, dock var marginalen förhållandevis liten.



Figur 20. Genomsnittliga emissioner av HC viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

I figur 20 redovisas uppmätta emissionsnivåer av HC för de studerade bränslena. Referensbränslet MK1 och Ecopar hade liknande nivåer, ingen säkerställd skillnad kunde dokumenteras. Däremot var emissionerna av HC från Etamix D3 och Agrodiesel 15 klart högre (ca 20 %) än från MK1 och Ecopar, vilket även var en statistiskt säkerställd skillnad. Samtliga bränslen hade emissionsnivåer klart under gränsvärdet för steg II, 1,0 g kWh⁻¹.



Figur 21. Genomsnittliga emissioner av PM viktad enligt ISO 8178 C1 samt som aritmetiskt medelvärde

Skillnaden i uppmätta nivåer av emissioner av PM var förhållandevis stor, vilket visas i figur 21. Referensbränslet, MK1 hade de högsta utsläppen av PM, en nivå som var signifikant högre än utsläppen för de övriga bränslena. De lägsta emissionsmängderna av PM uppmättes för Etamix D3, vilka var hälften så stora jämfört med nivåerna för MK1.

Samtliga uppmätta mängder av PM var signifikant åtskiljbara mellan de studerade bränslena. Oberoende av bränsle uppfyllde den aktuella motorn typgodkännande enligt steg II för PM, 2 g kWh^{-1} . Dock är inte mätmetoderna helt kompatibla. Enligt direktiv 97/68/EG ska partiklar mätas med hjälp av ett standardiserat filter, vilket vägs före och efter exponering, medan den aktuella studien har använt TEOM.

Den aktuella motorn uppfyllde, enligt ovan redovisade mätningar, typgodkännande för steg II enligt direktiv 97/68/EU (EU, 1997). Däremot skulle motorn inte uppfylla kraven för steg III A då summan av HC och NO_x , ca $6,4 \text{ g kWh}^{-1}$, överstiger gränsvärdet på $4,0 \text{ g kWh}^{-1}$.

Fiktiva belastningsmönster

De fiktiva belastningsmönstren användes för att studera effekter på momentan bränsleförbrukning och emissioner av enskilda förändringar i motorns varvtal och belastande moment oberoende av varandra.

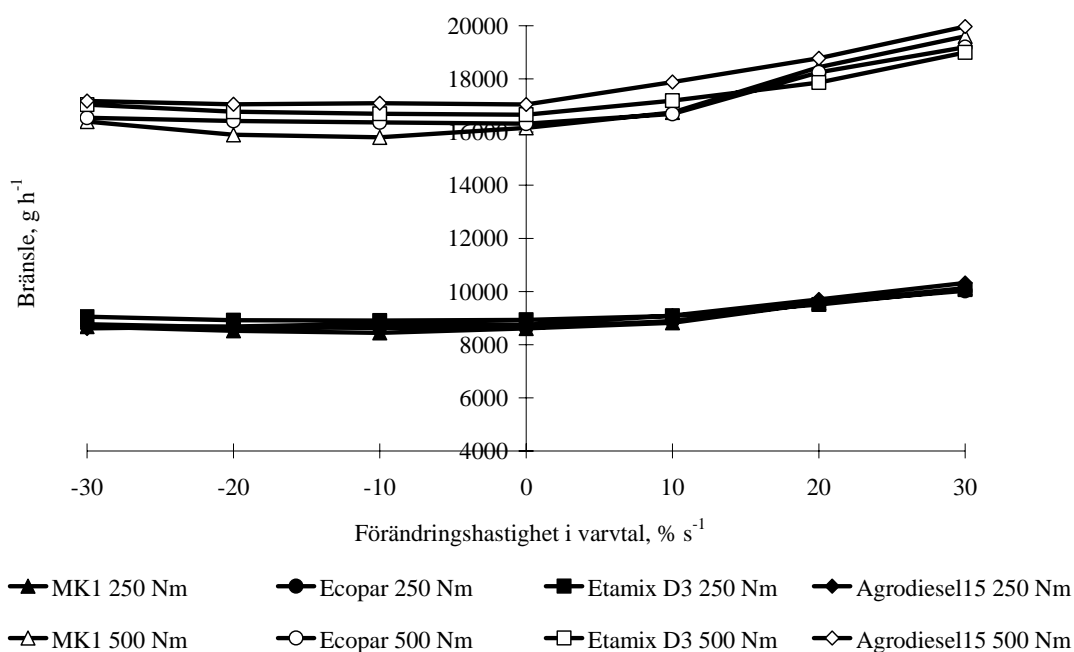
Transienter i varvtal

Effekter av transienter i varvtal studerades vid två separata nivåer av belastande moment, 250 respektive 500 Nm. Resultaten från dessa båda nivåer redovisas separat för varje bränsle. De genomförda testcyklerna, för respektive belastningsnivå,

genererade samma genomsnittliga arbete oberoende av transientens hastighet. Detta betyder att en utsläppsnivå över nivån för referensbelastningen, nollscenariot, skall betraktas som ökade utsläpp vid transienta belastningar, medan en lägre nivå indikerar sänkta utsläpp.

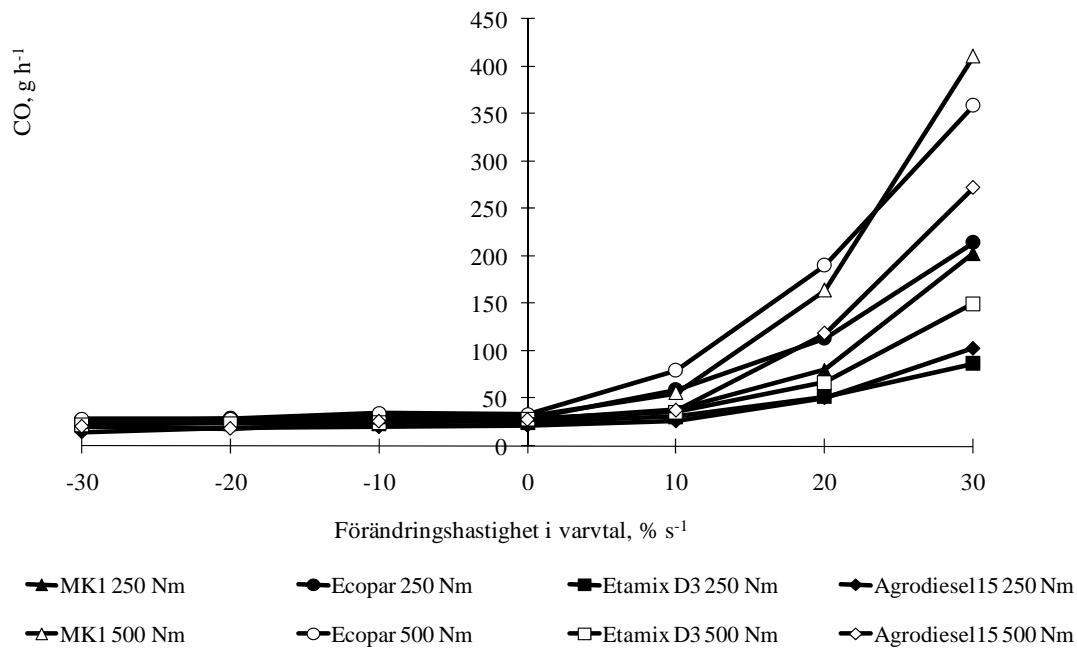
I figur 22 redovisas de effekterna av transienter i varvtal på bränsleförbrukning. Resultaten visar att det i princip inte förekom några transienta effekter vid negativa transienter i varvtal, i.e. vid varvtalssänkningar. Vid varvtalssänkningar under konstant moment förbrukade motorn motsvarande mängd bränsle som under statiska förhållanden för samtliga bränslen. Referensbränslet MK1 uppvisade en svag minskning i uppmätt bränsleförbrukning vid förändringshastigheten $-20\% \text{ s}^{-1}$. Dock bedöms denna skillnad ligga inom felmarginalerna för mätningarna och bör därför tolkas med försiktighet.

Andra studier har ansett att bränslesystemet kraftigt stryper bränsletillförseln vid snabba avlastningar av varvtal och moment, vilket därigenom borde resultera i en motsvarande sänkning av bränsleförbrukningen jämfört med statiska förhållanden, vilket inte kan bekräftas av resultaten från denna studie (Arcoumanis, 1992).



Figur 22. Effekter av transienter i varvtal på bränsleförbrukning

För positiva transienter i varvtal, d.v.s. varvtalsökningar, visade resultaten på relativt moderata ökning av bränsleförbrukningen jämfört med motsvarande statiska belastning. Resultaten visade även att effekterna ökade med ökande förändringshastighet d.v.s. snabbare varvtalsökning; speciellt för referensbränslet MK1, vilket uppvisade en något kraftigare effekt än de övriga studerade bränslena. Dock var skillnaderna i uppmätta effekter av transienter i varvtal på bränsleförbrukning mellan de studerade bränslena mycket små

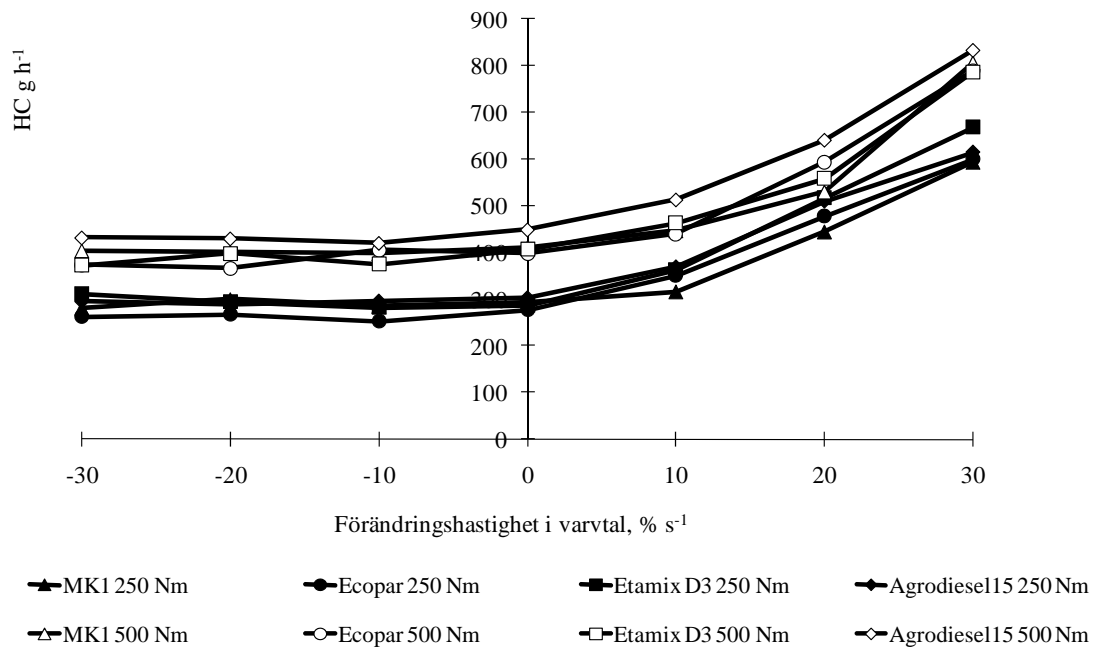


Figur 23. Effekter av transienter i varvtal på emissioner av CO

Figur 23 visar att emissionerna av CO ökade kraftigt vid positiva transienter i varvtal, vilket tyder på försämrade förbränning. Detta överensstämmer även med resultaten för transienta effekter i bränsleförbrukning. Effekterna ökade med ökad förändringshastighet, speciellt för MK1 och Ecopar, vilka uppvisade mer än 10 gånger det statistiska värdet under snabba varvtalsökningar.

Resultaten indikerar även att Agrodiesel 15 och speciellt Etamix D3 var mindre känsliga för transienter i varvtal gällande emissioner av CO. En möjlig orsak till detta kan vara tillsatsen av RME och högre alkoholer i Agrodiesel 15-bränslet och etanolderivat i Etamix D3-bränslet. Dessa tillsatser tillförde bränslena extra syre, d.v.s. de var oxygena bränslen.

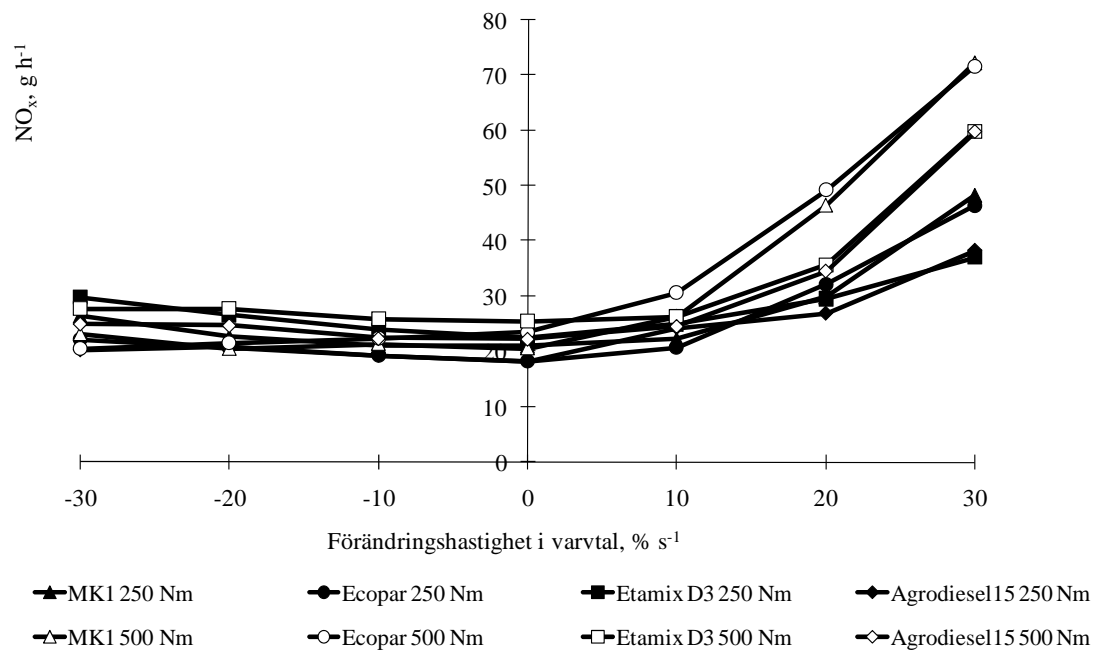
I övrigt tyder de ökade emissionerna av CO på, åtminstone lokalt, låga luft/bränsle-förhållanden under förbränning, troligen beroende av turbolag (Benajes et al., 2000; Bane, 2002; Rakopoulos och Giakoumis, 1999; Rakopoulos et al., 1998). Effekterna av transienter var kraftigare vid uttag av ett högt moment. Även detta tyder på att låga luft/bränsle förhållanden var en betydande orsak till de ökade utsläppsnivåerna. Effekterna på emissioner av CO under negativa transienter i varvtal var små eller obefintliga för samtliga studerade bränslen.



Figur 24. Effekter av transienter i varvtal på emissioner av HC

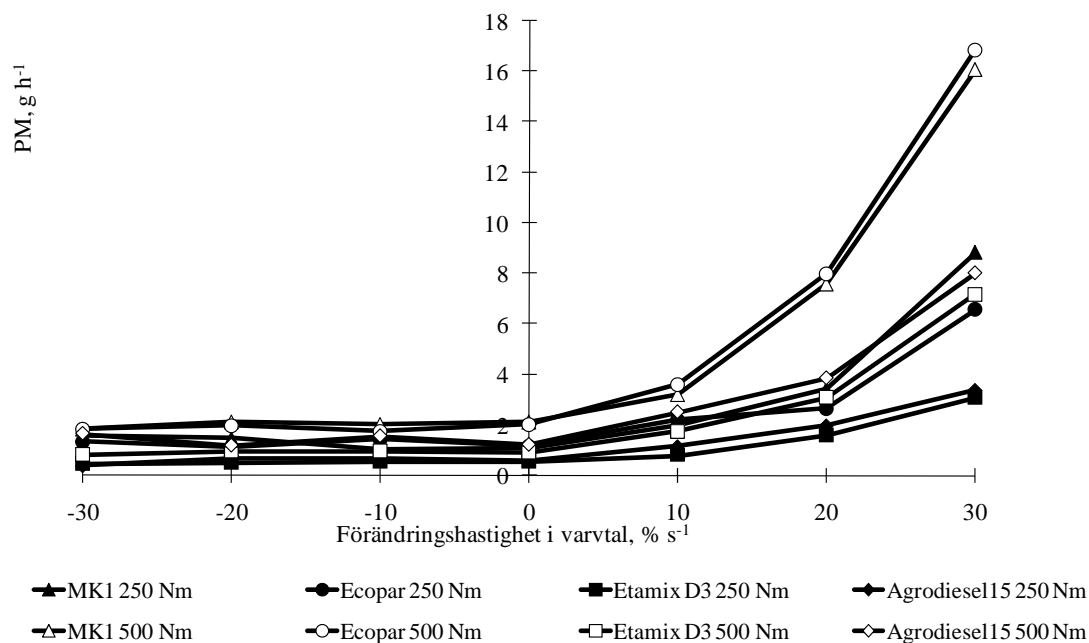
Resultaten tyder på att emissioner av HC fördubblas vid snabba varvtalsförändringar, figur 24. Emissionerna av HC ökade jämfört med statiska förhållanden för både negativa och positiva transienter i varvtal. Dock var effekterna av positiva transienter betydligt kraftigare än vid negativa transienter i varvtal. Inga betydande skillnader mellan bränslena kunde säkerställas.

Även för emissioner av HC var effekterna av transienter kraftigare vid det högre momentuttaget. De förhållandevis tydliga effekterna av transienter i varvtal på emissioner av HC och delvis CO tyder på att bränsle- och lufttillförsel samt blandningsförhållandena i förbränningsutrymmet påverkades under dessa förhållanden.



Figur 25. Effekter av transienter i varvtal på emissioner av NO_x

Figur 25 visar effekterna av transienter i varvtal på emissioner av NO_x. Enligt resultaten var effekterna av negativa transienter i varvtal på emissioner av NO_x svagt ökade emissionsmängder med ökande absolut förändringshastighet. Dock är effekterna mycket små och inom de uppmätta variationerna för respektive bränsle. För positiva transienter var effekterna mer påtagliga, en ökande förändringshastighet i varvtal gav upphov till ökade mängder av emissioner av NO_x, framförallt vid högre momentuttag. Vidare indikerar resultaten att effekterna av positiva transienter i varvtal på emissioner av NO_x för Agrodiesel 15 och Etamix D3 var något lägre än för de övriga bränslena. Oavsett momentbelastning resulterade emissionerna av kväveoxider i en lägre nivå jämfört med MK1 och Ecopar. För de statistiska mätningarna uppvisade Agrodiesel ett jämförelsevis högt utsläpp av kväveoxider, något som inte hade genomslag vid den transienta testen.

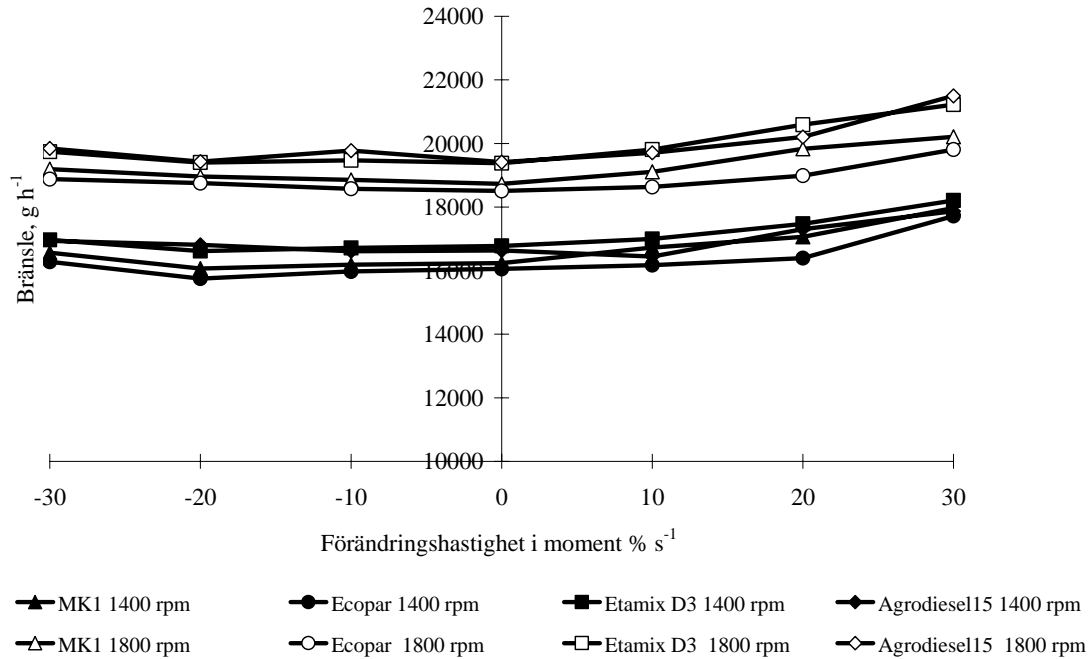


Figur 26. Effekter av transienter i varvtal på emissioner av PM

Resultaten från mätningar under transienter i varvtal tyder på att emissioner av PM från MK1 och Ecopar relativt sett ökade mer än de övriga bränslena, speciellt vid ett högre uttaget belastande moment, se figur 26. Både Agrodiesel 15 och Etamix D3 hade lägre utsläpp av PM jämfört med de övriga bränslena, i likhet med vad som uppmättes för både emissioner av CO och NO_x. Etamix D3 uppvisade de lägsta effekterna av positiva transienterna i varvtal på emissioner av PM. Resultaten visade även på att emissioner av PM var förhållandevis känsliga för förändringar i varvtal, vid snabba varvtalsökningar ökade partikelmängderna med upp till 8 ggr jämfört med motsvarande statiska belastning.

Transienter i moment

Effekter av transienter i moment studerades vid två separata nivåer av varvtal, 1 400 respektive 1 800 min⁻¹. Effekterna av transienter i moment på bränsleförbrukning redovisas i figur 27. Samtliga bränslen uppvisade liknande trender som vid transienter i varvtal, en obetydlig ökning av bränsleförbrukning vid negativa transienter och en moderat ökning vid positiva transienter. Vid mycket snabba ökning av moment ökade bränsleförbrukningen med ca 10 %. Vidare visade resultaten endast på obetydliga skillnader mellan bränslena. I absoluta mått var förbrukningen högre för Agrodiesel 15 och Etamix D3 jämfört med MK1 och Ecopar. Skillnaden i förbrukning motsvarade skillnaderna i densitet och energiinnehåll för respektive bränsle.

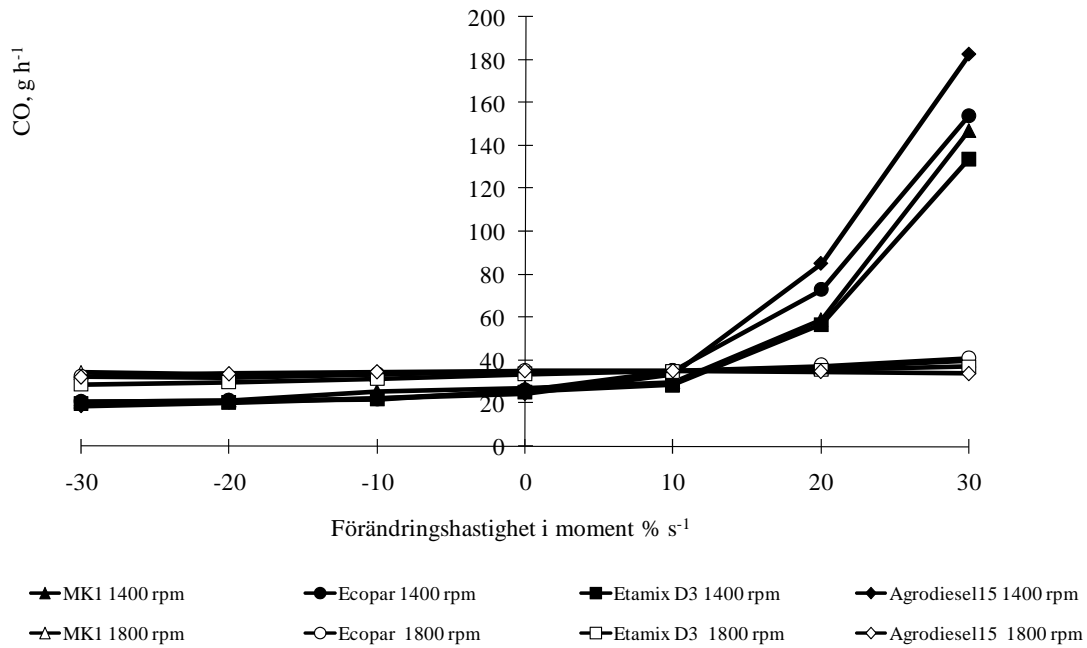


Figur 27. Effekter av transienter i moment på bränsleförbrukning

Effekterna av transienter i moment vid höga varvtal var i princip obefintliga, speciellt i jämförelse med effekterna vid lägre varvtal. Detta beror troligtvis på att turbon gav tillräckligt med laddtryck, vilket annars resulterade i låg syre/bränsle-kvot vid låga varvtal och höga belastningar.

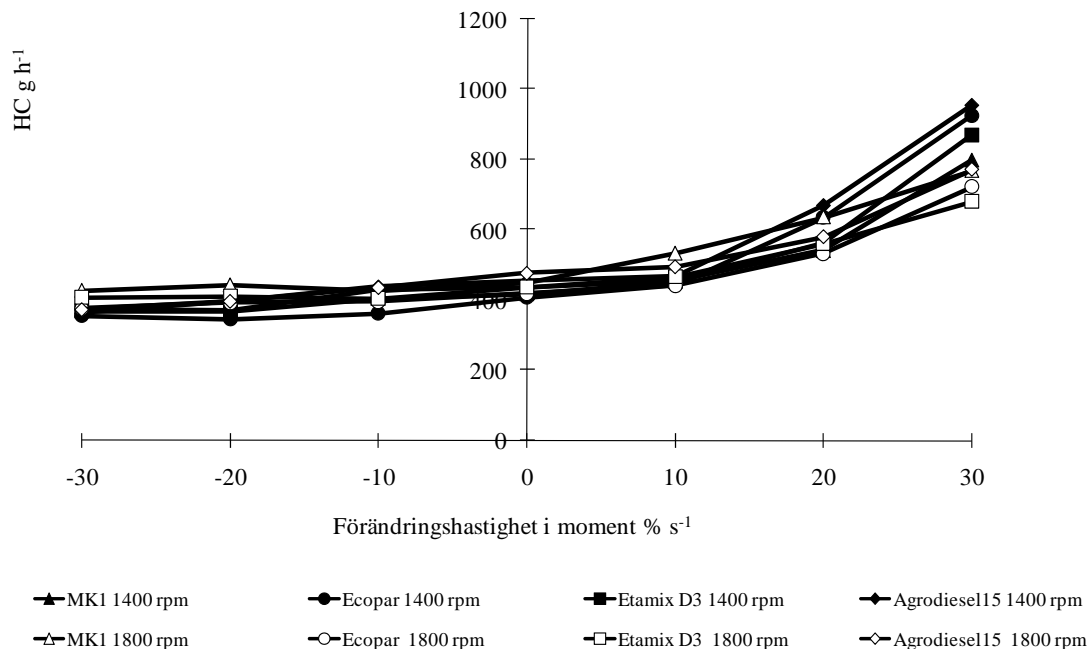
Etamix D3 uppvisade förhållandevis något mindre ökning av emissioner av CO under positiva transienter i moment jämfört med de övriga studerade bränslena vilket redovisas i figur 28. Vidare resulterade mätningarna i något högre effekter för Ecopar och Agrodiesel 15 jämfört med referensbränslet MK1. Dock var dessa skillnader inom den för bränslena uppmätta variationen i mätningarna.

För negativa transienter i moment uppvisade resultaten inga skillnader varken mellan transient och statisk belastning eller mellan de olika bränslena. Jämfört med transienter i varvtal var effekterna halverade för transienter i moment vilket indikerar att motor/bränsle kombinationerna var mindre känsliga för variationer i moment.



Figur 28. Effekter av transienter i moment på emissioner av CO

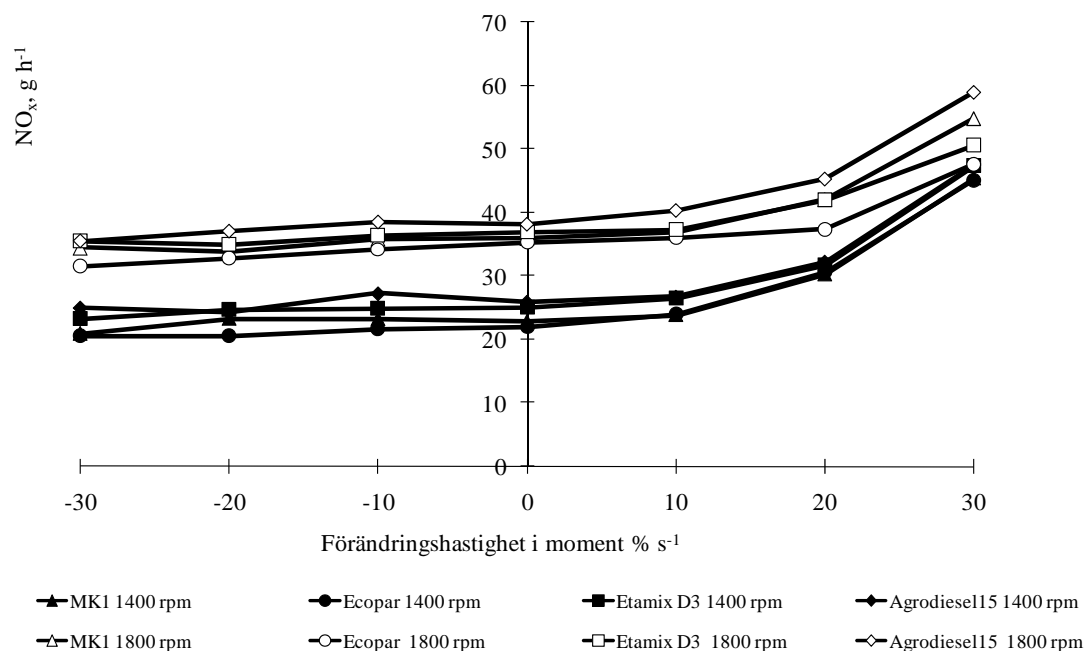
Vid kraftiga positiva transienter i moment ökade emissionerna av HC jämfört med motsvarande statiska belastning med 2 till 3 ggr för samtliga studerade bränslen, se figur 29. Motsvarande effekt vid negativa transienter i moment var en ökning med upp till 50 %.



Figur 29. Effekter av transienter i moment på emissioner av HC

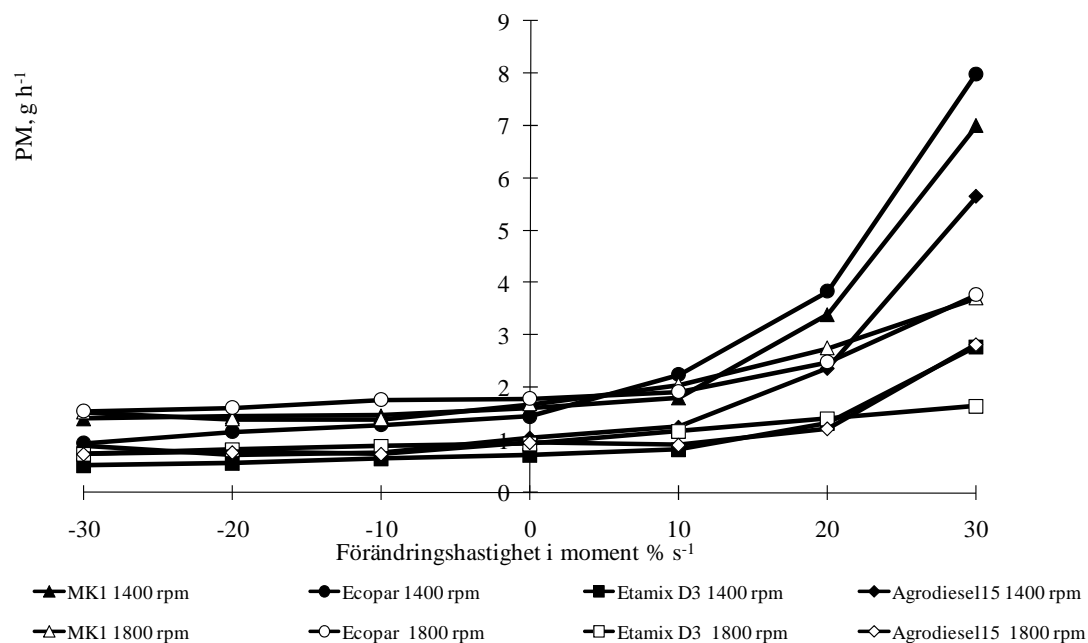
Emissionerna av NO_x uppvisade en tydlig, dock relativt moderat, ökning vid positiva transienter i moment, vilket visas i figur 30. Vid en förändringshastighet på $30 \% \text{ s}^{-1}$

ökade emissionerna av NO_x med drygt 50 %. Skillnaderna mellan de olika bränslena var mycket liten. Vidare visade resultaten på en minskning av emissionerna av NO_x med upp till 20 % vid negativa transienter i moment. Den lägre nivån av NO_x tyder på att förbränningstemperaturen eller maxtrycket var något lägre vid kraftiga negativa transienter i moment jämfört med motsvarande statiska belastning.



Figur 30. Effekter av transienter i moment på emissioner av NO_x

Resultaten tydde på att även emissioner av PM minskade något vid negativa transienter i moment, dock var effekten relativt begränsad. Dessutom uppmättes en förhållandevis stor variation i mätningarna av emissioner av PM vilket ytterligare försvårade tolkningen av små förändringar. För positiva transienter i moment visade resultaten på klart ökande emissioner av PM jämfört med motsvarande statiska förhållanden, figur 31.



Figur 31. Effekter av transienter i moment på emissioner av PM

För Etamix D3 uppmättes märkbart lägre effekter av transienter på utsläppen av partiklar jämfört med de övriga bränslena. De transienta effekterna för Agrodiesel 15 hamnade på en nivå mellan Etamix D3 och de övriga två bränslena.

Inspelade arbetsoperationer

För de inspelade arbetsoperationerna redovisas både specifika utsläpp i g kWh^{-1} och transienta effekter. Ett värde över ett innebär att de transienta effekterna i genomsnitt genererar en större emissionsmängd än om inga transienta effekter fanns, d.v.s. mer emissioner än under stabila och optimala förhållanden. Resultaten i detta avsnitt indikerar hur känslig den aktuella kombinationen av motor och bränsle är för kontinuerliga förändringar i varvtal och moment s.k. transienter. Förutom effekterna av transienter redovisas även absoluta emissionsmängder för varje bränsle och belastning. Genomsnittlig effekt, varvtal och moment för de olika arbetsoperationerna redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Genomsnittlig effekt, varvtal och moment för inspelade arbetsoperationer

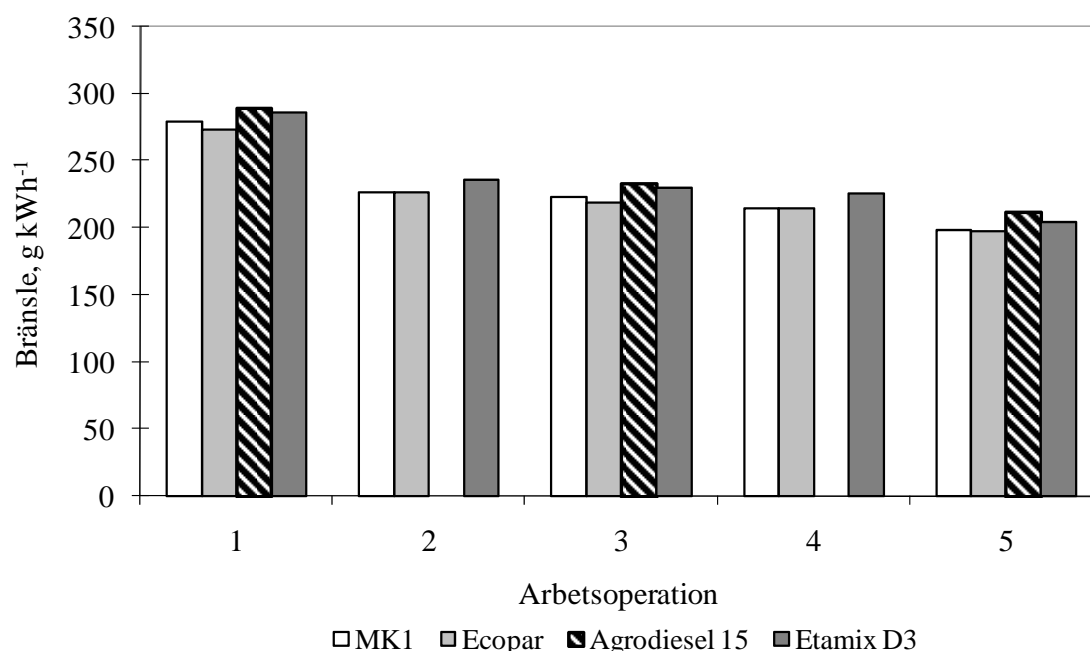
Arbetsoperation	Effekt, kW	Varvtal, min^{-1}	Moment, Nm
1	21	1416	140
2	85	1737	447
3	119	1897	604
4	67	1335	423
5	121	1561	738

På grund av mätmissöde kan inga resultat redovisas från arbetsoperation 2 och 4 med Agrodiesel 15. Skillnaden i motorbelastning för dessa arbetsoperationer med

Agrodiesel 15 skilde sig för mycket mot motsvarande arbetsoperationer med de övriga bränslena. Eventuella uppmätta skillnader skulle sannolikt hänföras till varierande motorbelastning och inte skillnader i bränslesammansättning eller karaktäristik.

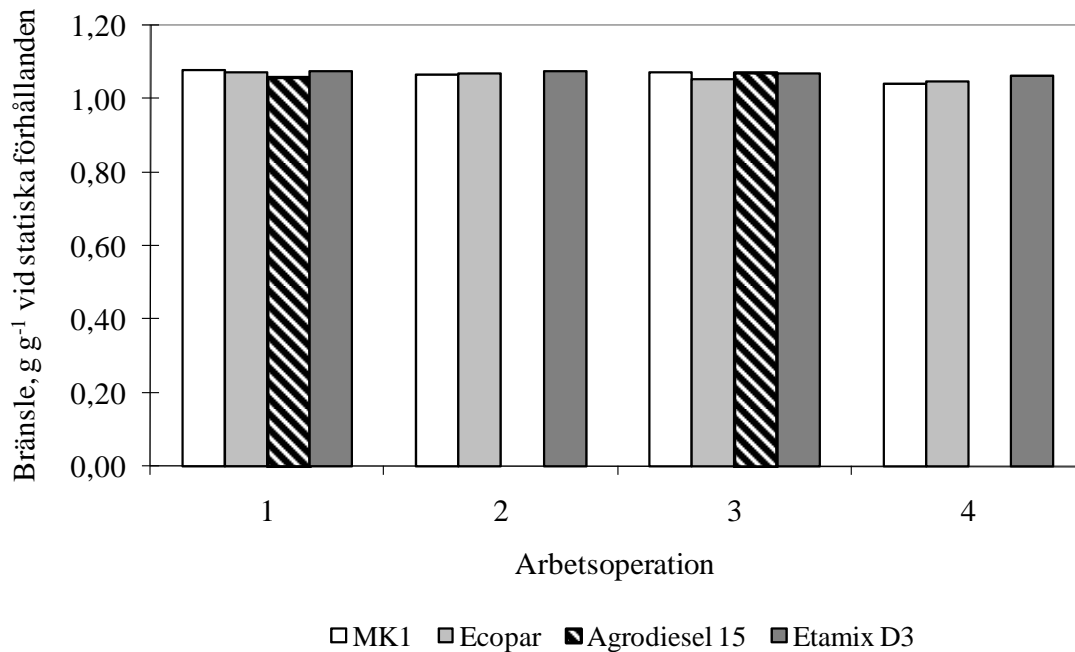
I figur 32 redovisas uppmätt specifik bränsleförbrukning från de inspelade arbetsoperationerna. Skillnaden i bränsleförbrukning mellan de olika arbetsoperationerna är relativt liten, dock skilde de sig markant vad gällde t.ex. genomsnittlig belastning och transient innehåll, ju högre genomsnittlig effekt desto högre absolut bränsleförbrukning.

Arbetsoperation 1 resulterade i den sämsta specifika bränsleförbrukningen, vilket var rimligt med tanke på den låga genomsnittliga belastningen. De flesta dieselmotorer uppvisar en relativt dålig verkningsgrad vid låga belastningar. I likhet med uppmätta resultat från de statiska mätningarna visar resultaten från de inspelade arbetsoperationerna att bränsleförbrukningen för Agrodiesel 15 och Etamix D3 var större än för MK1 och Ecopar, dock var skillnaden i genomsnitt endast 5 %.



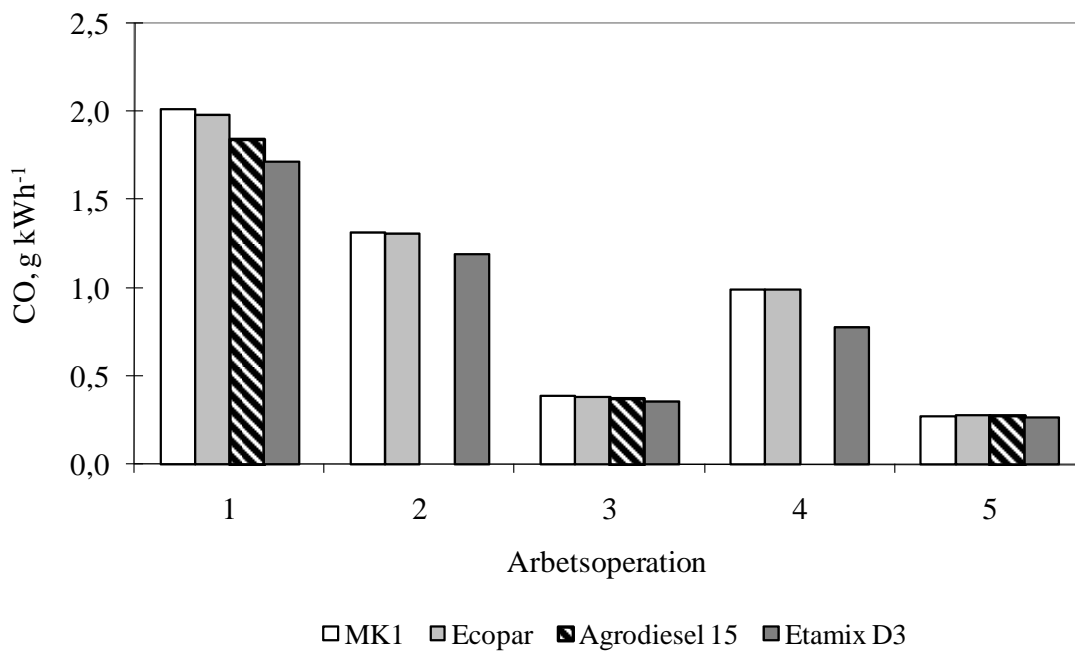
Figur 32. Specifik bränsleförbrukning i g kWh⁻¹

De genomsnittliga effekterna av transienter på bränsleförbrukning vid de inspelade arbetsoperationerna varierade mellan 5 och 7 %. Samtliga studerade bränslen uppvisade en ökad bränsleförbrukning vid transienta förlopp jämfört med motsvarande semi-statiska bränsleförbrukning. Inga betydande skillnader mellan bränslena kunde fastställas.



Figur 33. Transienta effekter på bränsleförbrukning vid inspelade arbetsoperationer

De transienta effekterna på emissioner av CO₂ vid olika inspelade arbetsoperationer motsvarade de som uppmättes för bränsleförbrukning, d.v.s. genomsnittlig ökning av emissioner av CO₂ med ca 7 % samt inga betydande skillnader mellan de studerade bränslena.

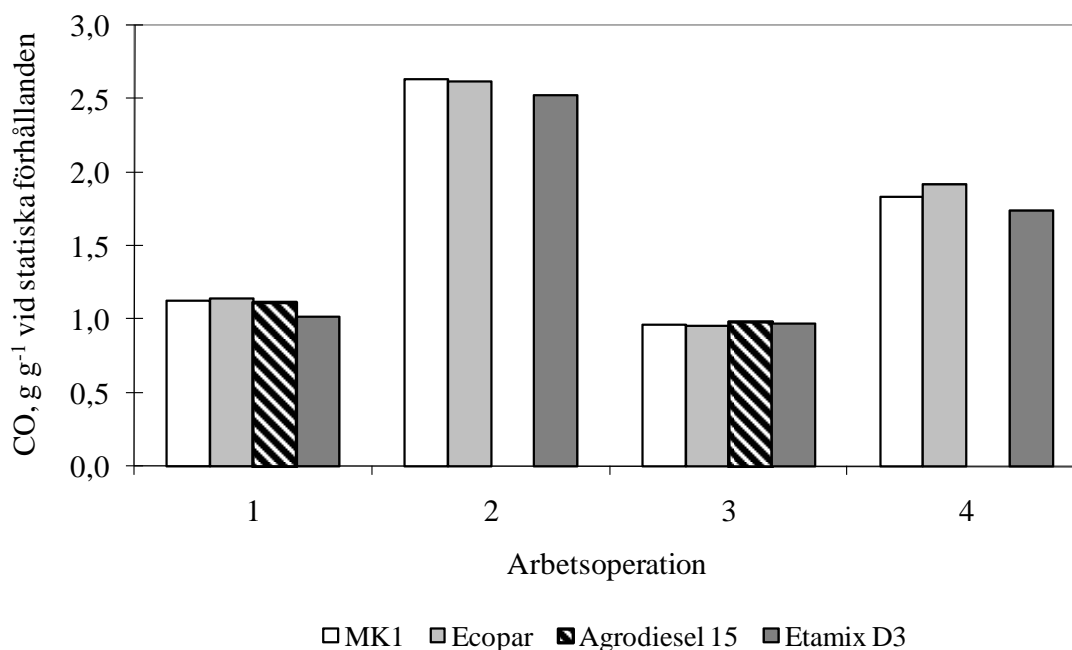


Figur 34. Specifika emissioner av CO i g kWh⁻¹

För specifika emissioner av CO resulterade arbetsoperation 3 och 5 i påtagligt lägre nivåer jämfört med de övriga arbetsoperationerna, se figur 34. Både arbetsoperation 3 och 5 hade en förhållandevis hög genomsnittlig belastning vilket medförde låga specifika nivåer av CO. Utsläppen av CO ökar, som framgick av figur 28, kraftigt vid positiva transienter och med låga varvtal, detta pga. att turbolag (att turbon inte hinner förse motorn med tillräcklig mängd luft) minskar mängden tillgängligt syre. CO uppkommer som ett resultat av brist på syre.

Även om dessa situationer tidsmässigt motsvarar en mycket liten andel av den totala tiden för arbetsoperationen kan de lokalt mycket höga emissionsnivåerna av CO kraftigt påverka de genomsnittliga nivåerna för hela arbetsoperationen.

Detta är troligen orsaken till de höga utsläppen för arbetsoperation 2 och 4. Även arbetsoperation 1 innebar relativt transienta belastningar, dock vid ett lågt genomsnittligt effektuttag, vilket i sig ger höga specifika emissioner av CO. Skillnaderna mellan referensbränslet och Ecopar var i princip obefintliga medan specifika emissionerna av CO från Etamix D3 resulterade i en lägre nivå för samtliga studerade arbetsoperationer.

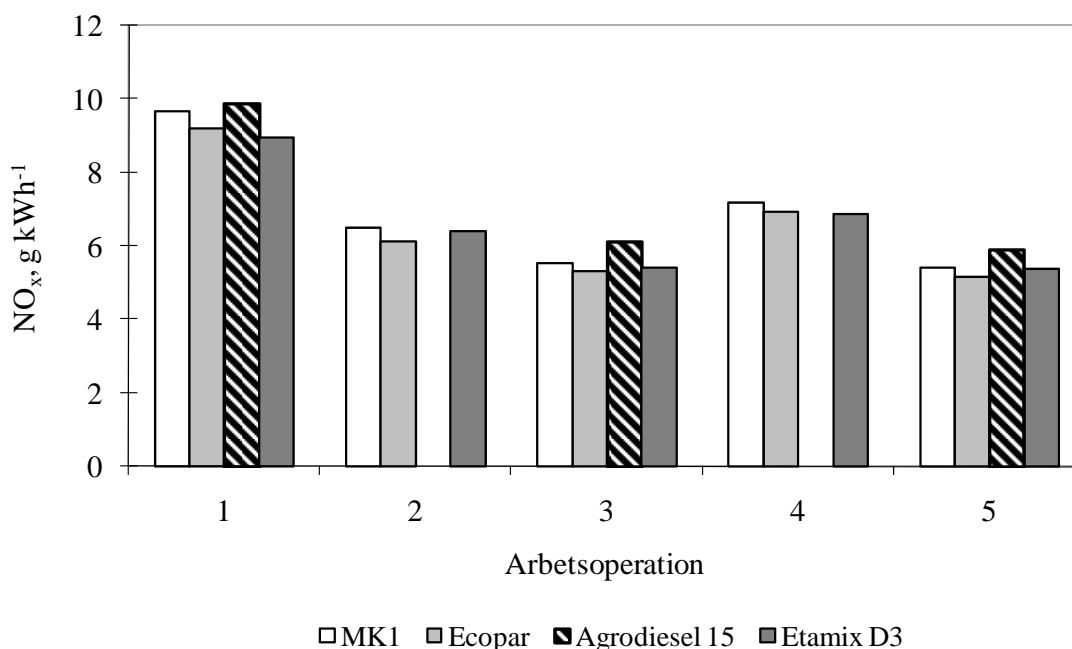


Figur 35. Transienta effekter på emissioner av CO vid inspelade arbetsoperationer

Resultatet från de transienta studierna av emissioner av CO från olika inspelade arbetsoperationer redovisas i figur 35 och visar att för arbetsoperation 3, vilken innehöll förhållandevis begränsade transienter, var effekterna i stort sett obefintliga. Även för arbetsoperation 1 kan de transienta effekterna tyckas vara begränsade, dock uppgick de i genomsnitt till nästan 15 % för referensbränslet och Ecopar, resultaten för Etamix D3 var något lägre.

De transienta effekterna var störst för arbetsoperation 2, acceleration med tungt släp, trots att förändringarna i varvtal och moment var mindre än för t.ex. arbetsoperation 4.

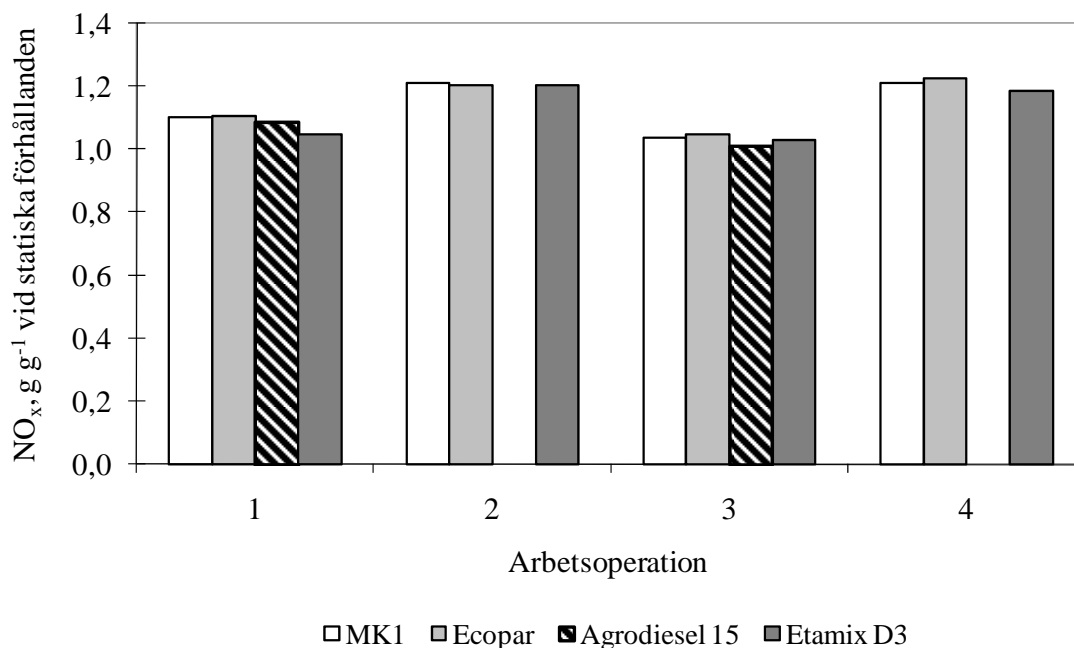
Den mest troliga förklaringen till de stora effekterna för arbetsoperation 2 var att motorn arbetade i en region som var mycket ogynnsam ur emissionssynpunkt, hög belastning vid låga varvtal i kombination med måttliga transienter. I genomsnitt var de transienta effekterna på emissioner av CO mindre påtaglig från Etamix D3 jämfört med referensbränslet och Ecopar, skillnaden var dock mycket liten.



Figur 36. Specifika emissioner av NO_x i g kWh⁻¹

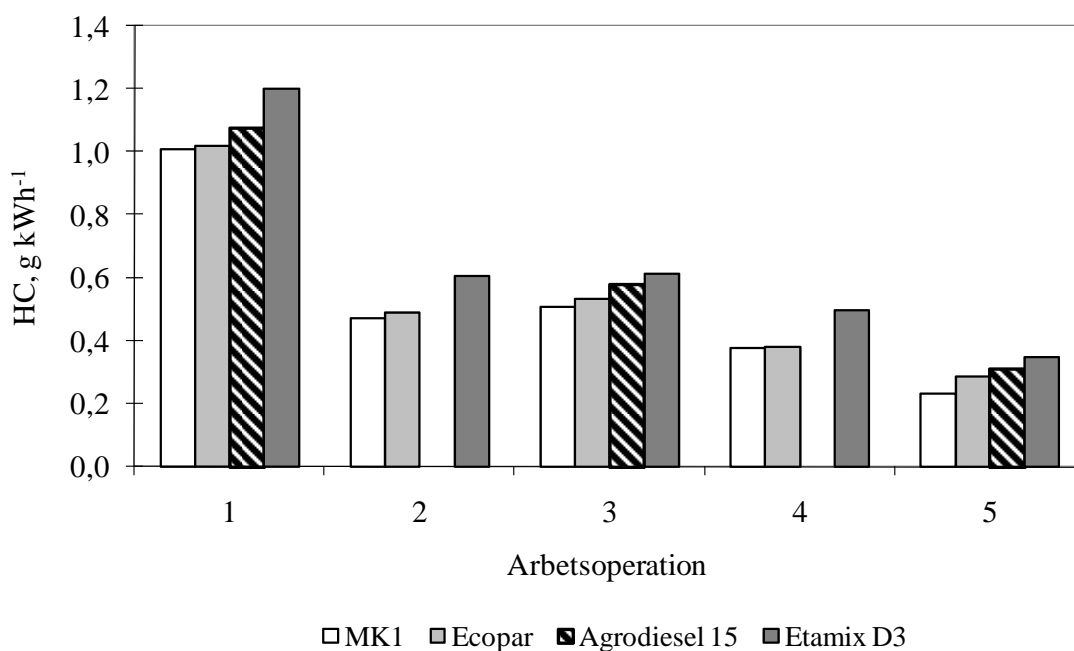
Specifika emissioner av NO_x från inspelade belastningsmönster var omvänt proportionella mot genomsnittlig effekt för samtliga studerade bränslen vilket visas i figur 36. Generellt sett genererade arbetsoperationer med tydliga transienta belastningar högre specifika emissioner av NO_x jämfört med arbetsoperationer med högre och mindre transient belastning.

I genomsnitt resulterade specifika emissionerna av NO_x från både Ecopar och Etamix D3 i en lägre nivå än referensbränslet. Skillnaden jämfört med referensbränslet uppgick maximalt till 7 % för Etamix D3. Emissionerna av NO_x från Agrodiesel 15 var generellt sett högre än från de övriga bränslena, i likhet med vad som uppmättes under statiska förhållanden. En anledning till detta kan vara det högre innehållet av kväve i bränslet, ca 300 mg kg⁻¹ jämfört med under 21 mg kg⁻¹ för de övriga bränslena.



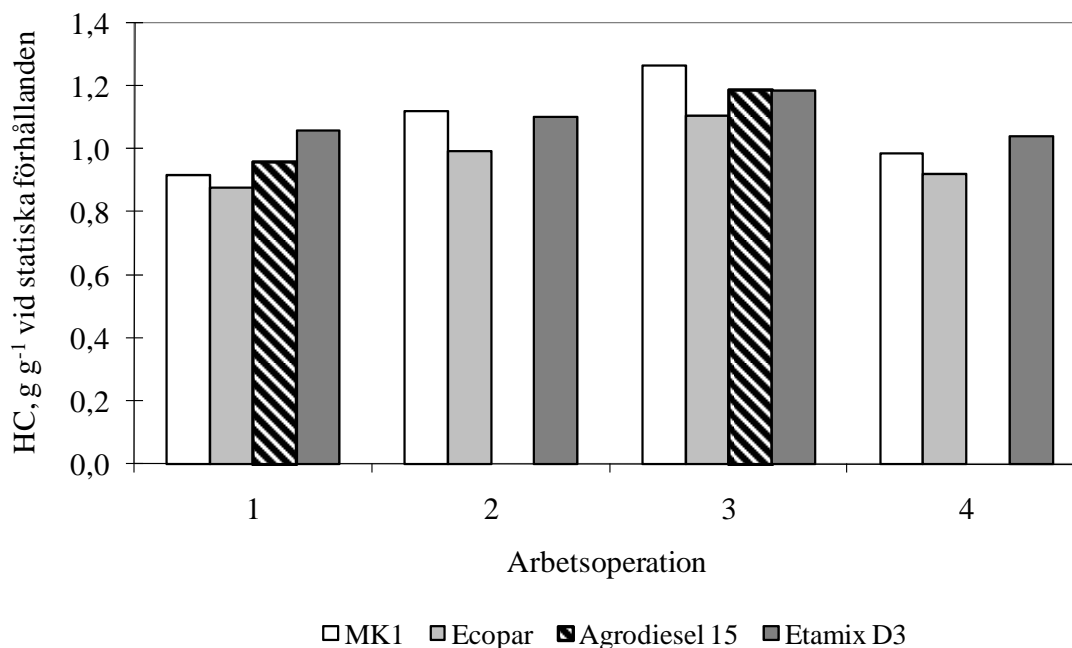
Figur 37. Transienta effekter på emissioner av NO_x vid inspelade arbetsoperationer

Samtliga inspelade arbetsoperationer resulterade i ökade emissioner av NO_x jämfört med motsvarande semi-statiska nivåer, figur 37. Arbetsoperation 2 och 4 resulterade i de högsta transienta effekterna, medan arbetsoperation 3 endast uppvisade en smärre effekt, en ökning med några få procentenheter. Både arbetsoperation 2 och 4 innefattade sekvenser med kraftiga varvtalsförändringar under förhållandevis höga moment vilket innebar ett momentant högt effektbehov vilket gynnade bildningen av NO_x. Även arbetsoperation 1, frontlastararbete med lantbrukstraktor, innebar relativt omfattande varvtalsförändringar men vid mycket lägre belastning.



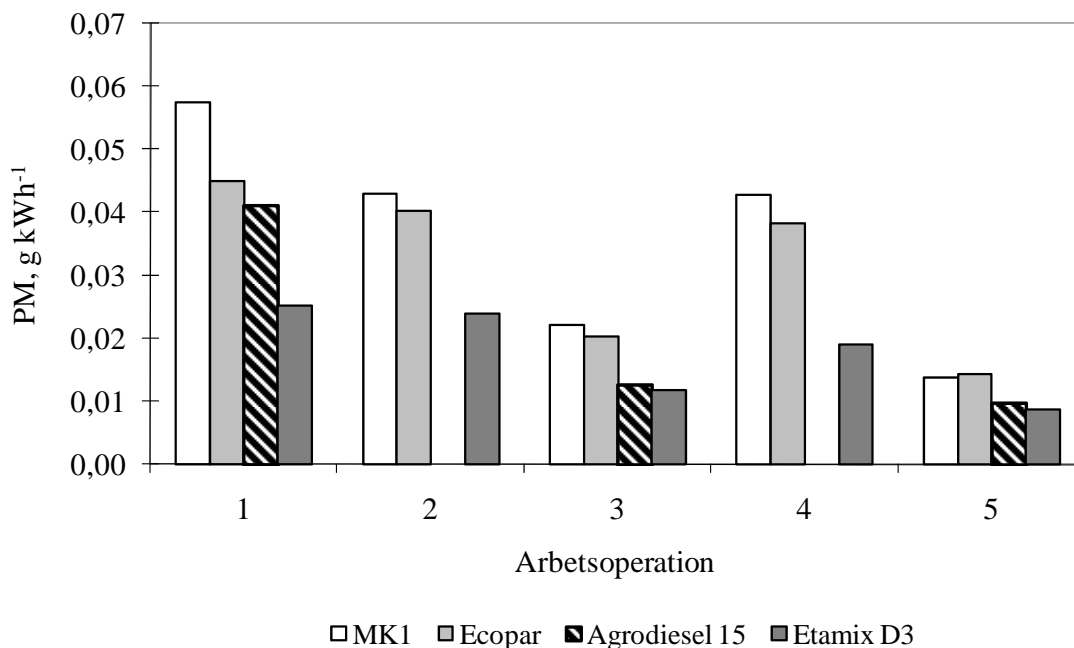
Figur 38. Specifika emissioner av HC i g kWh⁻¹

Specifika emissioner av HC från de inspelade arbetsoperationerna varierade förhållandevis lite med undantag för arbetsoperation 1 som resulterade i ett betydligt högre värde än de övriga arbetsoperationerna vilket visas i figur 38. I samtliga fall resulterade mätningarna i högre emissioner av HC från Etamix D3 och Agrodiesel 15 jämfört med övriga bränslen. Dessutom indikerade resultaten att även Ecopar resulterade i högre emissioner än referensbränslet, dock var skillnaderna mindre än för Etamix D3 samt inte entydiga.



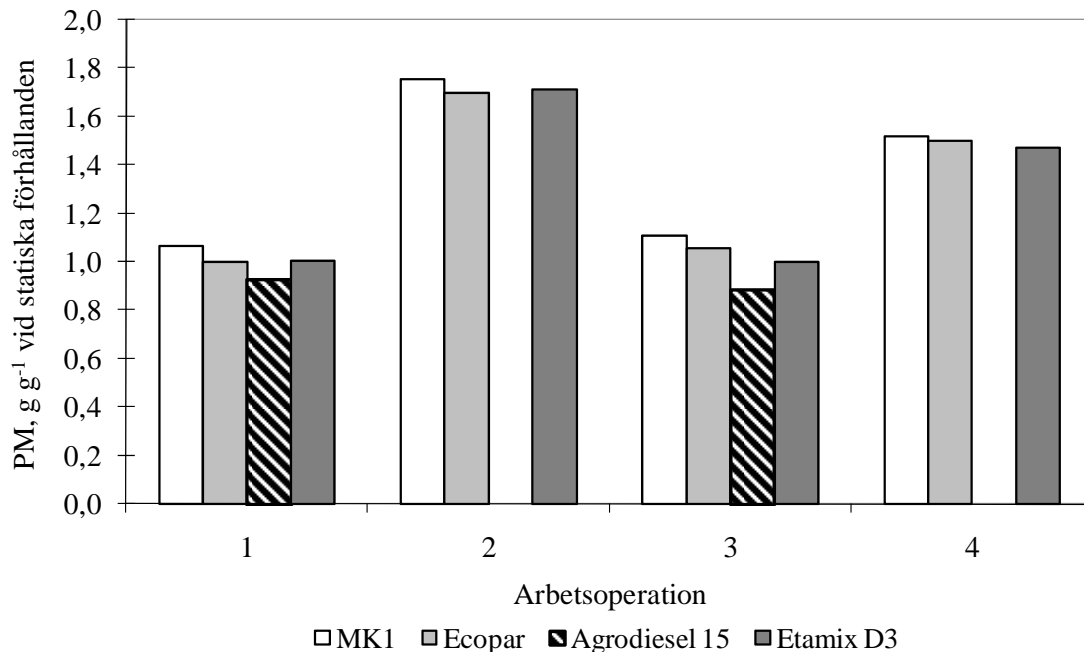
Figur 39. Transienta effekter på emissioner av HC vid inspelade arbetsoperationer

Emissioner av HC uppvisade relativt stora transienta effekter samt relativt stor skillnad både inom och mellan de studerade bränslena. För arbetsoperation 1 uppmättes negativa transienta effekter för både referensbränslet och Ecopar, d.v.s. lägre uppmätta emissioner av HC än semi-statiskt beräknade nivåer. Ecopar resulterade generellt i lägre transienta effekter på emissioner av HC jämfört med övriga bränslen medan Agrodiesel 15 och Etamix D3 i flera fall gav högre transienta effekter än referensbränslet.



Figur 40. Specifika emissioner av PM i g kWh⁻¹

Resultaten från mätningar av partiklar vid inspelade arbetsoperationer med transienta belastningar genererade högre specifika nivåer av partiklar än arbetsoperationer med högre genomsnittlig belastning, men mindre omfattande transienter, se figur 40. Förutom arbetsoperation 1, som hade en mycket låg genomsnittlig belastning, resulterade arbetsoperation 2 och 4 i de högsta uppmätta specifika nivåerna; troligtvis på grund av de stora variationerna i varvtal och moment. Även skillnaderna mellan de studerade bränslena var relativt påtaglig, där Etamix D3 resulterade i de lägsta partikelemissionerna av samtliga inspelade arbetsoperationer. I genomsnitt var partikelemissionerna från Etamix D3 nästan 20 % lägre än från referensbränslet. Emissionerna från Ecopar var lägre än från referensbränslet men högre än från Etamix D3, i medeltal ca 10 % lägre än referensbränslet. Agrodiesel 15 resulterade i relativt låga nivåer jämfört med referensbränslet MK1.



Figur 41. Transienta effekter på emissioner av PM vid inspelade arbetsoperationer

Uppmätta transienta effekter på partikelemissionerna följde samma trend som övriga emissioner förutom NO_x , d.v.s. stor skillnad mellan uppmätta partikelemissioner och semi-statiskt beräknade partikelemissioner för arbetsoperation 2 och 4, vilka innehöll relativt påtagliga transienter i både varvtal och moment, figur 41. Arbetsoperation 1, med framförallt en låg genomsnittlig momentnivå, samt arbetsoperation 3, som omfattande en i sammanhanget statisk belastning, resulterade i endast marginellt höjda nivåer av emissioner av partiklar.

Agrodiesel 15 resulterade dock i märkbart lägre transienta effekter för arbetsoperation 1 och 3. Referensbränslet resulterade i de högsta transienta effekterna på emissioner av partiklar. Skillnaden var dock relativt liten, ca 5 % i genomsnitt för MK1 jämfört med Ecopar och Etamix D3. Mellan Ecopar och Etamix D3 kunde ingen klar skillnad påvisas utan effekten av transienter på emissioner av partiklar var jämförbar mellan bränslena.

Generellt för de inspelade arbetsoperationerna var de specifika emissionsnivåerna lägre ju högre den genomsnittliga belastningen var, vilket var förväntat då de motorer har högre verkningsgrad vid högre belastning. Vidare syntes en viss tendens att de arbetsoperationer som omfattade påtagliga förändringar i både varvtal och moment s.k. transienta belastningar gav ökade specifika emissioner, framförallt för partiklar och CO. Emissioner av CO var även kraftigt beroende av förekomsten av höga belastningar i kombination med låga varvtal.

Arbetsoperation 2 och 4 samt delvis arbetsoperation 1, vilka alla innehöll relativt transienta belastningar, genererade genomgående högre transienta effekter. Arbetsoperation 1 resulterade dock i mindre transienta effekter än de övriga transienta arbetsoperationerna, troligtvis beroende av den genomsnittligt låga belastningen.

Övergripande diskussion

I det aktuella projektet har bränsleförbrukning och emissioner från fyra olika dieselbränslen studerats under både statiska och transienta belastningar. Viktiga kriterier vid urval av bränsle var att bränslena skulle kunna användas i befintlig maskinpark utan modifiering av motorerna samt att de var introducerade eller på väg att introduceras på marknaden.

Sammansättningen på de olika bränslena var jämförbar, t.ex. varierade kol/väte kvoten mellan 5,7 och 6,2. Tre av bränslena bestod till minst 85 % av konventionell MK1 diesel. I princip var samtliga bränslen tillverkade för att efterlikna och ersätta konventionell MK1 diesel vilket även resulterade i förhållandevis små skillnader i emissioner.

Resultaten indikerar att framförallt emissioner, men även bränsleförbrukning är förhållandevis känsliga för förändringar i driftsförhållanden. Detta leder till att de faktiska emissionerna och den faktiska bränsleförbrukningen från en motor inte bara är beroende av den momentana belastningen utan även av hur belastningen har förändrats *dvs.* accelerationer, mot- och medlut etc. Ju större och snabbare förändringen är, desto större blir effekten.

För samtliga studerade emissioner med undantag för emissioner av HC visade resultaten på mindre kraftiga effekter av transienter i moment än i varvtal. Detta är dock ett relativt rimligt resultat med tanke på den generella funktionen hos en dieselmotor samt den förändrade rörelsemängden vid varvtalsändringar.

För enskilda isolerade transienter i både moment och varvtal uppmättes mycket stora skillnader i utsläpp, speciellt för partiklar och i de flesta fall även kolmonoxid. Dessa isolerade transienter ger en indikation på hur känslig den aktuella kombinationen av motor och bränsle är för förändrade driftssituationer. Transienta motorbelastningar är relativt vanliga under verkligt operationer med arbetsmaskiner och kan ge upphov till kraftigt ökade emissioner (Lindgren et al., 2003, Starr et al., 1999; Ullman et al., 1999).

För att studera inverkan av transienter under verkliga arbetsförhållanden valdes 5 vanliga arbetsoperationer ut. Även i detta fall var effekterna störst för partiklar. Vid bedömning av lokala och regionala utsläpp från specifika maskiner eller sektorer är det viktigt att hänsyn tas till de transienta effekterna.

Effekten av isolerade, simultana förändringar i både varvtal och moment kunde dock inte studeras med den aktuella försöksuppsättningen. En kombination som skulle ha varit intressant att studera var simultan ökning och eller minskning av både varvtal och moment alternativt en momentökning under minskande varvtal. Vidare kunde inte effekterna av motorbromsning studeras då den använda virvelströmsbromsen inte kunde driva motorn utan endast bromsa. En elektroniskt styrd motor kommer med största sannolikhet att helt stänga av insprutningen under motorbromsning vilket får tydliga effekter på bränsleförbrukning och emissioner.

Slutsatser

Inom projektet studerades reglerade emissioner från fyra olika dieselbränslen

- Konventionell diesel av miljöklass 1, MK1
- Fischer-Tropsch diesel, Ecopar
- Blandbränsle mellan MK1 och alkohol, Etamix D3
- Blandbränsle mellan MK1, alkohol och RME. Agrodiesel 15

Samtliga bränslen kunde användas i vanliga dieselmotorer utan anpassning. Uppmätta skillnader i emissioner mellan bränslena var relativt begränsade. Detta berodde delvis på att bränslena antingen till större delen bestod av MK1 eller hade en sammansättning som påminner starkt om MK1. Några skillnader kunde dock upptäckas.

- Agrodiesel 15 och Etamix D3 uppvisade en högre förbrukning jämfört med de övriga bränslena på grund av lägre energidensitet, dock förekom det inga detekterbara skillnader i energieffektivitet,
- Agrodiesel 15 resulterade i högre utsläpp av kväveoxider, delvis beroende på ett högre innehåll av kväve i bränslet,
- Agrodiesel 15 och Etamix D3 hade lägre partikelutsläpp, troligen beroende på deras syreinhåll,
- Effekterna av transienter var kraftigare vid högre belastningar,
- Vid negativa transienter var utsläppen oförändrade eller minskade svagt

Referenser

- Arcoumanis C (1992). Measurement and prediction of transient NO_x emissions in DI diesel engines. Institution of Mechanical Engineers Paper C448/039/92
- Arcoumanis C; Megaritis A; Bazari Z (1994). Analysis of transient exhaust emissions in a turbocharged vehicle diesel engine. Institution of Mechanical Engineers Paper C484/038/94
- Asami Y; Shitani M; Watanabe Y (1992). Effects of Fuel Properties on Diesel Engine Exhaust Emission Characteristics. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 922214
- Bane B (2002). A comparison of steady state and transient emissions from a heavy-duty diesel engine. Ms Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, USA
- Barsic, N. 1984. Variability of heavy-duty diesel engine emission for transient and 13-mode steady-state test methods. Society of Automotive Engineers Technical Paper Series 840346. Warrendale, Pa.:SAE
- Benajes J; Luján J; Serrano J (2000). Predictive modeling study of the transient load response in a heavy-duty turbocharged diesel engine. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 2000-01-0583
- Bernardo A; Howard-Hildige R; O'Connell A; Nichol R; Ryan J; Rice B; Roche E; Leahy J (2003). Camelina oil as a fuel for diesel transport engines. *Industrial Crops and Products* 17(3), 191-197
- Bucksch S; Egebäck K (1999). The Swedish program for investigations concerning biofuels. *The Science of the Total Environment* 235, 293-303
- Burtscher H; Majewski A (2004). Exhaust Gas Sampling. Revision 2004,04b DieselNet Technology Guide, Measurement of Emissions
- Callahan T; Ryan T; Dietzmann H; Waytulonis R (1985a). The effects of discrete transient in speed and load on diesel engine exhaust emissions. Society of Automotive Engineers, SAE Transactions Paper No 850109, 1646-1657
- Callahan T; Ryan T; Dietzmann H; Waytulonis R (1985b) The effects of engine and fuel parameters on diesel engine exhaust emissions during discrete transient in speed and load. Society of Automotive Engineers, SAE Transactions Paper No 850110, 1658-1671
- Callahan T; Ryan T; Martin S; Waytulonis R (1987). Comparison of predicted and measured diesel exhaust emission levels during transient operation. Society of Automotive Engineers, SAE Transactions Paper No 872140, 7846-7853

- Clark N; Atkinson C; Thompson G; Nine R (1999). Transient Emissions Comparisons of Alternative Compression- Ignition Fuels. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 1999-01-1117
- Davidsson C; Pettersson O (2006). Sköt om din traktor och minska risken för haveri. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik
- de Almeida S; Belchior C; Nascimento M; Vieira L; Fleury G (2002). Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. Fuel 81(16), 2097-2102
- EEA. (2005). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2005. Technical report No 30 European Environment Agency, Copenhagen Denmark
- EU (1997). Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. Official Journal of the European Union L 059, 1-86
- EU (1999). Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles and amending Council Directive 88/77/EEC. European Union Official Journal L 044 , 1-155
- EU (2004). Directive 2004/ 26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. European Union Official Journal L 146 , 1-107
- Hansson P; Haupt D; Holmgren K; Johansson B; Lindgren M; Löfgren B; Nord K; Norén O; Pettersson O; Wetterberg C (2003). Utveckling av relevanta arbetscykler och emissionsfaktorer samt reducering av bränsleförbrukning för arbetsmaskiner (EMMA). Report Agriculture and Industry 309, Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering.
- Hansson P; Lindgren M; Nordin M; Pettersson O (2003). A methodology for measuring the effects of transient loads on the fuel efficiency of agricultural tractors. Applied Engineering in Agriculture, 19(3), 251-257
- He B; Wang J; Yan X; Tian X (2003). Study on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines Using Ethanol-Blended Diesel Fuels. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 2003-01-0762
- ISO. (1996). ISO 8178-4; Reciprocating internal combustion engines - exhaust emission measurements - Part 4: test cycles for different engine applications. International Organisation of Standardisation, Geneva, Switzerland

- Joumard R (editor) (1999). Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: and scientific state-of-the-art, action COST 319 final report, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, INRETS report No LTE 9901, France
- Kalam M; Husnawan M; Masjuki H (2003). Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine. *Renewable Energy* 28, 2405–2415
- Lindgren M; Hansson P (2004a). Effects of transient conditions on exhaust emissions from two non-road diesel engines. *Biosystems Engineering*, 87(1), 57-66, doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.001
- Lindgren M; Hansson P (2004b). Effects of Transient Conditions on Particulate Matter Emissions from a Non-road Diesel Engine. Submitted to *Transactions of the ASAE* 2004-03-02.
- Lindgren M; Pettersson O; Hansson P; Norén O (2003). Jordbruks- och anläggningsmaskiners motorbelastning och avgasemissioner samt metoder att minska bränsleförbrukning och avgasemissioner [Engine load pattern and engine exhaust gas emissions from off-road vehicles and methods to reduce fuel consumption and engine exhaust gas emissions]. Report Agriculture and Industry 308, Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering.
- Nord K; Haupt D (2002). Evaluating a Fischer-Tropsch Fuel, Eco-Par in a Valmet Diesel Engine. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 2002-01-2726
- Rakopoulos C; Giakoumis E (1999). A computer program for simulating the steady-state and transient behaviour of direct-acting engine governors. *Advances in Engineering Software*, 30, 281-289
- Rakopoulos C; Mavropoulos G; Hountalas D (1998). Modeling the structural thermal response of an air-cooled diesel engine under transient operation including a detailed thermodynamic description of boundary conditions. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 981024
- Sjödin Å; Flodström E; Ekström M; Grennfelt P (2003). Nationell emissionsstatistik för vägtrafiksektorn – ökad kvalitet, trovärdighet och konsensus. Förstudie [National emission statistics for the road transport sector – improved quality, credibility and consensus]. IVL report B1537, IVL Swedish environmental research institute Ltd, Gothenburg
- Starr M; Buckingham J; Jackson Jr C (1999). Development of transient test cycles for selected nonroad diesel engines. The American Society of Mechanical Engineers, 32-1, 145-156
- Ullman T; Webb C; Jackson Jr C; Doorlag M (1999). Nonroad engine activity analysis and transient cycle generation. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper Series No 1999-01-2800

Wetterberg C; Holmgren K; Rosell L; Johansson L; Magnusson R (2003). The influence of the fuel on emissions from diesel engines in large off-road machines. Rapport AL90B 2002:16295, Vägverket, Borlänge, Sverige

Williamson A; Badr O (1998). Assessing the viability of using rape methyl ester (RME) as an alternative to mineral diesel for powering road vehicles in the UK. *Applied Energy* 59(2-3), 187-214

Tidigare publikationer/ Earlier publications

Rapport/Report

- 001 2008 Nilsson, D. & Bernesson, S. Pelletering och brikettering av jordbruksvaror – En systemstudie
- 002 2008 Bernesson, S., Olsson, J., Rodhe, L., Salomonsson, E. & Hansson, P-A. Inblandning av aska från biobränslen i flytande biogasrötrest
- 003 2008 Gunnarsson, C., Olsson, J., Lundin, G. & de Toro, A. Spannmål till energi – ökad lönsamhet genom anpassning av odlingsystemet
- 004 2008 Johansson, T. & Lundh, J-E. Försök med upprepad röjning av björk och sälg
- 005 2008 Cardoso, M. Olsson, J. & de Toro, A. Manual till JTI/SLUs kalkylprogram för maskinkostnader i Excel
- 006 2008 de Toro, A., Cardoso, M. & Olsson, J. Manual till JTI/SLU:s kalkylator för maskinkostnader i latbruket
- 007 2009 Amiri, S. On variance estimation and a goodness-of-fit test using the bootstrap method
- 008 2009 Johansson, T. Avverkningstidpunktens inverkan på rot- och stubbskottutvecklingen hos 15-årig klibbal och 8-årig grail. Biomassaproduktionens variation beroende på avverkningstidpunkten
- 009 2009 Sundberg, C. Minimisation of odour from composting of food waste through process optimisation – a Nordic collaboration project
- 010 2009 Cuvilas, C.A. Characterisation of available and potential sources of wood fuels in Mozambique
- 011 2009 Nilsson, D, & Bernesson, S. Halm som bränsle – Del 1: Tillgångar och skördetidepunkter
- 012 2009 Olsson, O. European bioenergy markets: integration and price convergence
- 013 2009 Ladanai, S. & Vinterbäck, J. Global potential of sustainable biomass for energy
- 014 2009 Johansson, T. Root biomass production and distribution in young birch stands planted at four spacings on two different sites in Sweden

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.et.slu.se

SLU
Department of Energy and Technology
Box 7032
S-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000
