Rapport SGC 170

Utveckling och demonstration av användning av metan/vätgasblandningar som bränsle i befintliga metangasdrivna bussar

©Svenskt Gastekniskt Center – Oktober 2006

Slutrapport i STEM-projekt nr 20658-1
Slutrapporten sammanställd av
Owe Jönsson, Svenskt Gastekniskt Center AB

Rapport SGC 170 •1102-7371 • ISRN SGC-R-170-SE

SGC Svenskt Gastekniskt Center AB

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare:
Svenska Gasföreningen, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

E.ON Gas Sverige AB
Skånetrafiken
Statens energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB

Jörgen Held

Sammanfattning

I ett projekt i Malmö har två naturgasdrivna bussar under perioden september 2003 – december 2005 drivit med blandningar av vätgas och naturgas. Proven har genomförts med bussarna i reguljär trafik. En buss har under hela perioden drivits med 8 vol-% vätgas och den andra ha drivits växelvis med ren naturgas, 8 vol-% vätgas och 25 vol-% vätgas.

I anslutning till försöken i reguljär trafik har det genomförts en serie olika stödaktiviteter som t.ex.

- Tester vid Lunds Tekniska Högskola med vätgasinblandning i encylindermotor och i 6-cylindermotor av samma typ som sitter monterad i bussarna.
- Säkerhetsanalys av hantering av vätgas/naturgasblandningar.
- Materialgenomgång av samtliga komponenter i bussens bränslesystem.
- Test av läcksökningsmetoder för vätgas.
- Utarbetande av säkerhetsrutiner för driftpersonal och underhållspersonal.
- Emissionsmätning med rullande laboratorium.
- Uppföljning av funktion hos tankstation.

Resultaten från projektet visar att:

- Bussarna behövde ej modifieras för att kunna köras med bränsle med 8 vol-% vätgas.
- Modifieringen för att kunna köra med 25 vol-% vätgas genomförs på ett ca 4 timmar och omfattar omprogrammering av motorstyrsystemet med byte av ett styrchip i motorns styrdator för att justera tändvinklar och bränsle/luft-blandning.
- Fordonets bränsleförbrukning minskar med 20-30% vid aktuell vätgasinblandning. Störst relativ effekt gav den lägre inblandningen (8%). Minskningen av bränsleförbrukningen i kombination med bränslets lägre kolinnehåll gjorde att CO_2-emissionerna från fordonet minskade med upp till 35% med 8% vätgasinblandning. Användningen av vätgas som tillsats i naturgas är således ett effektivare sätt att minska CO_2-emissioner än att använda ren vätgas som bränsle i t.ex. bränsleceller.
- Fordonets NO_x-emissioner visade sig vara extremt känsliga för motorinställningen. Vid emissionsmätningarna kunde förhöjda NO_x-emissioner jämfört med naturgasdrift påvisas. Orsaken till detta är sannolikt en något felaktig bränsle/luft-blandning efter omprogrammering av motor.
- Båda de gasblandningar som använts i Malmöprojektet ligger innanför det gränser som anges för naturgas i svensk lagstiftning vilket har gjort att fordonet ej behövt klassas om för något nytt bränsle.

De båda bussarna som deltagit i försöket har körts sammanlagt ca 160 000 km utan några som helst driftstörningar orsakade av vätgastillsatsen. Reaktionen från förarna har varit endast positiva och de har varit speciellt nöjda med fordonens förbättrade körbarhet.

Försöken inom projektet har avslutats i december 2005 men driften av bussarna fortsätter i Skånetrafikens egen regi. Det finns nu planer på att konvertera ytterligare bussar på samma bussdepå till drift med Hythane®8. Detta skulle i så fall bli världen största bussflotta som drivs med vätgasinblandning.

Summary

Two natural gas buses in Malmoe have in a project been converted to run on mixtures of hydrogen and natural gas. The buses have been in operation from September 2003 to December 2005 and have during the whole extent of the project been in commercial operation with passengers. One bus has been refuelled with a mixture containing 8% hydrogen and another with 25% hydrogen. One of the buses has during limited periods been refuelled with natural gas in order to establish differences in fuel consumption between the different fuels.

A number of different supporting activities have been performed in conjunction to the project:

- Tests at the Lund University with hydrogen addition to natural gas in a one cylinder test engine and in a 6 cylinder natural gas engine.
- Safety analysis for handling of hydrogen/natural gas blends.
- Hydrogen compatibility study of material and components in bus fuel system.
- Test of leak detection systems for hydrogen and hydrogen/natural gas blends.
- Development of safety routines for operation and maintenance staff.
- Emission measurement during road operation with mobile equipment.
- Follow up of filling station for hydrogen/natural gas blends.

The results from the projects are:

- The buses did not need to be modified in any way in order to run on mixtures with up to 8 vol-% hydrogen.
- The buses could in less than 4 h be modified to run on mixtures with 25 vol-% hydrogen. The conversion was accomplished by changing one computer chip in the engine control system, thus altering the air/fuel ratio and adjusting the ignition angle.
- The fuel consumption of the buses was reduced by 20-30% by hydrogen addition. The largest relative influence was achieved with 8% hydrogen addition. The reduced fuel consumption in combination with reduced carbon content in the fuel resulted in a total reduction in CO_2-emission by approximately 35% using 8% hydrogen (by volume). Addition of hydrogen to natural gas has thus proved to be a more efficient way of reducing CO_2-emissions than using pure hydrogen in e.g. fuel cell vehicles.
- NO_x-emissions have proved to be extremely sensitive to the adjustment of the engine. The on road emissions have proved to increase compared to natural gas operation when using 25% hydrogen addition. The cause for this is the control system of the engine (open loop control) and a slightly inaccurate reprogramming of the engine control system when going from natural gas to Hythane®25.
- Both of the hydrogen mixtures that have been used in the Malmoe project have been within the limits stated in the national specification for natural gas. This has facilitated the regulatory scope of the project since no special permits for operation of the buses had to be obtained.

The two buses have covered more than 160 000 km in the project without any operational problems caused by the hydrogen addition. The drivability of the vehicles has been improved through the hydrogen addition and the drivers are thus very satisfied with the vehicles and the project.

The activities in the project was finalised in December 2005 but the operation of the buses will continue using hydrogen/natural gas blends. Plans now exist to convert the major part of the CNG bus fleet in Malmoe to hydrogen/natural gas blends. This would make it the biggest bus fleet in the world using hydrogen addition.

Innehållsförteckning

1 Inledning och bakgrund ... 5
2 Projektbeskrivning ... 6
3 Motortester vid Lunds Tekniska Högskola ... 8
3.1 Prov med encylindermotor ... 8
3.1.1 Resultat ... 10
3.1.2 Slutsatser - encylinderförsök ... 12
3.2 Prov med fullmotor ... 12
3.2.1 Prov med 8 vol-% vätgasinblandning ... 13
3.2.2 Prov med 25 vol-% vätgasinblandning ... 17
3.2.3 Diskussion ... 22
4 Säkerhet vid hantering av blandningar av vätgas och naturgas ... 24
4.1 Säkerhetsrelaterade egenskaper hos vätgas och naturgas ... 24
4.1.1 Allmänna egenskaper ... 24
4.1.2 Läckage ... 24
4.1.3 Dispersion ... 24
4.1.4 Brännbarhet ... 25
4.1.5 Antändning ... 25
4.1.6 Brand ... 25
4.1.7 Explosion ... 25
4.1.8 Materialfrågor ... 25
4.1.9 Fysiologiska effekter ... 25
4.1.10 Ekotoxiska effekter ... 26
4.1.11 Sammanfattning ... 26
4.2 Säkerhetsaspekter för blandningar av naturgas och vätgas ... 26
4.2.1 Läckage ... 26
4.2.2 Materialkompatibilitet ... 27
4.2.3 Dispersion ... 27
4.2.4 Brännbarhet ... 27
4.3 Åtgärdsprogram ... 27
5 Fordonets kompatibilitet med Hythanblandningar ... 29
5.1 Fordon ... 29
5.2 Metodik ... 30
5.3 Resultat ... 30
6 Vätgastankstationen ... 31
6.1 Vätgasproduktion ... 31
6.2 Vätgasdispenser ... 32
6.3 Driftresultat ... 33
6.3.1 Tillgänglighet ... 33
6.3.2 Energianvändning ... 33
6.3.3 Gaskvalitet ... 33
7 Drifterfarenheter - Fordon ... 34
7.1 Bussarna ... 34
7.2 Tankning ... 36
7.3 Utbildning ... 38
7.4 Läcksökning ... 39
7.5 Emissionsmätning/omdömen ... 40
8 Emissionsmätningar ... 41
8.1 Utförda prov ... 41
8.2 Resultat ... 41
8.2.1 Prov i backe ... 41
8.2.2 Steady state (prov vid jämn hastighet ... 42
8.2.3 Start från hållplats ... 44
8.3 Diskussion ... 44
9 Slutsatser ... 45
10 Fortsatt verksamhet ... 46
Referenser ... 47

1 Inledning och bakgrund

Diskussionen om koldioxid (CO_2) som en av de viktigaste växthusgaserna blir allt hetare, och alternativa bränslen för fordonsdrift en viktig fråga. För att minska CO_2-utsläppen till atmosfären måste användningen av fossila bränslen minska, verkningsgraden öka i de processer som använder fossila bränslen eller fossila bränslen med lägre kolhalt användas. Ett annat, men inte så attraktivt sätt för jordens invånare, är att minska den totala energianvändningen.

Vid ersättning av bensin och diesel med naturgas minskas CO_2-emissionerna och vid övergång från naturgas till biogas minskas emissionerna ytterligare eftersom biogas är ett förnyelsebart bränsle.

Antalet naturgas- och biogasdrivna fordon i Sverige har ökat kraftigt de senaste åren och f n finns det ca 8000 gasfordon i Sverige varav ca 700 är stadsbussar eller regionbussar. Trots att antalet bussar endast uppgår till ca 10% av den totala gasfordonspopulationen så förbrukar dessa huvuddelen av den biogas och naturgas som används inom transportsektorn. Bussarna tankar dessutom på samma ställe varje dygn vilket gör det möjligt att genom en inblandning av vätgas till fordonsgasen på ett enkelt sätt skapa en betydande marknad för vätgas som drivmedel.

Naturgas innehåller ca 25% mindre kol per energienhet än bensin och anses vara ett steg mot vätgas som energibärare (i t.ex. bränsleceller). Vätgas kan produceras av vatten, via elektrolys, med vindenergi eller solenergi. Naturgas med inblandning av vätgas innebär då ännu lägre kolinnehåll per energienhet vilket skulle ytterligare minska utsläppen av CO_2.

Det finns, förutom marknadsskäl, flera andra olika skäl till att använda vätgas som tillsats till fordonsgas:

- Vätgas utsträcker tändintervallet för fordonsgas vilket gör att fordon utan återkopplad styrning av motorns luft/bränsleförhållande får en jämnare gång även då gasfördelningsmunstyckena efter en tids drift har fått beläggningar.
- Vätgas har en högre förbränningshastighet än kolvätebaserade bränslen [Ref 2,Ref 3]. Därför borde hythanebränsle ge snabbare förbränning, vilket i sin tur leder till att en magrare luft/bränsle blandning kan användas jämfört med ren naturgas med bibehållen eller ökad verkningsgrad och minskade emissioner som följd

Tre villkor uppfylls för minskade CO_2-emissioner; lägre kolinnehåll per energienhet i bränslet, icke fossilt bränsle (vätgas) och högre verkningsgrad i förbränningsprocessen.

Användningen av vätgas som tillsats till fordonsgas är en teknik som finns dokumenterad i ett flertal olika projekt.

De första försöken med vätgasinblandning i naturgas (Hythane®)[1] startades i Montreal i Kanada 1995. Detta projekt följdes av projekt i Kalifornien hos Sunline Transit agency som har två bussar i drift sedan 2000. Man hävdar att man reducerat NO_x-utsläppen med 43%.

Även lätta fordon kan drivas med blandningar av naturgas och vätgas. 1990 konverterades en pick-up i USA av företaget Hydrogen Components. Detta försök har sedan följts av konverteringar i Denver, Erie och Phoenix.

På många håll i världen (Kina, Frankrike, Indien, Norge, Singapore etc.) finns det ett ökande intresse för användning av vätgas/naturgasblandningar. I Kina planerar man att driftsätta 10 000 hythanebussar inför den kommande olympiaden 2008 och i Indien har man under 2005 öppnat den första tankstationen för Hythane® i New Dehli.

[1] Blandningar av vätgas och naturgas (metan) förkortas ibland HCNG (Hydrogen and Compressed Natural Gas) och kallas ibland Hythane® som är ett av Brehon Energy PLC registrerat varumärke. För enkelhets skull benämns bränslet som användes under projektet Hythane®x där x anger den volymandel av bränslet som är vätgas.

2 Projektbeskrivning

Vätgasinblandning i naturgas eller biogas kan, som nämnts ovan, vara ett sätt att marknadsintroducera vätgas som drivmedel utan att för den skull på samma gång introducera nya typer av fordon (bränslecellsfordon/ dedicerade vätgasfordon).

Projektet i Malmö har genomförts för att utveckla erfarenheter kring två frågeställningar:

- Vilken maximal vätgasinblandning kan vara möjlig att använda i metangasfordon utan att några modifieringar av fordonet är nödvändiga?
- Vilken halt av vätgas kan tillsättas till bränslet i modifierade naturgasbussar utan att bränslet klassas som annat än naturgas, vilka modifieringar av fordonet måste genomföras och vilka effekter får detta på fordonet (emissioner, bränsleförbrukning etc.)?

Projektet har drivits från augusti 2003 till december 2005 med Svenskt Gastekniskt Center som projektledare. Projektet har finansierats av Sydkraft Gas AB (sedermera E.ON Gas Sverige AB), Skånetrafiken, Malmö Stad och Statens Energimyndighet. Projektet har genomförts av följande parter:

Sydkraft Gas AB (nu E.ON Gas Sverige AB) – tankstation, leverans av Hythane®, projektsamordning.
Lunds Tekniska Högskola – test av hythaneblandningar i testcell, encylindermotor och 6-cylindermotor.
Skånetrafiken – utlåning av fordon, extra resurser för tankning + uppföljning.
Svenskt Gastekniskt Center AB – projektledning, administration, rapportering.
Ingenjörsfirman Ingemar Carlson – statistik bränsleförbrukning, uppföljning av fordonsfunktion, utbildning/information, kontroll av täthet.
Carl Bro AB Energikonsult – uppföljning av tankstationsfunktion och vätgasproduktion, rådgivning, samordning med internationella vätgasprojekt.
Raufoss Alternative Fuel Systems – rådgivning tanksystem.

På uppdrag av projektet har följande organisationer utfört arbete i projektet:

Volvo Technology AB - säkerhetsanalys av de specifika fordonen som använts inom projektet, utarbetande av anvisningar för hantering av hythaneblandningar.
Volvo Aero AB – emissionsmätningar.

Projektet har omfattat följande moment:

Bänkkörning av motor med vätgasinblandning.
Vid LTH finns en gasdriven bussmotor av typ Volvo TG100. I denna motor har det genomförts en komplett "mappning" med naturgas/vätgas som bränsle. Denna "mappning" hade som mål att ta fram ett komplett underlag avseende tändvinklar och λ-värden i hela motorns lastintervall med naturgas/vätgas som bränsle. Mappningen har gjorts med ett olika vätgashalter och omfattar även kartläggning av emissioner, verkningsgrad och andra driftegenskaper hos motorn.

Inledningsvis utfördes även försök i en encylindrig försöksmotor för att kartlägga vilka vätgashalter som kunde vara lämpliga i omodifierade respektive modifierade motorsystem.

System- och säkerhets studie fordon
Volvo Technology AB har gjort en genomgång av bussens komponenter och system för att undersöka om drift med vätgas/naturgas har någon inverkan och om några system var tvungna att modifieras eller bytas ut. Volvo Technology har även genomfört en översiktlig säkerhetsanalys och tagit fram förslag till säkerhetsrutiner vid användning av blandningar av naturgas och vätgas som drivmedel.

Systemstudie och systemanpassning av tankningsutrustning
Det tankningssystem som byggts i Malmö var ursprungligen byggt för tankning av ren vätgas varför det fick anpassas och testas för den applikation som det skulle användas för i projektet.

Konvertering av buss
Två bussar har använts i projektet. En buss har drivits i sitt originalutförande för att se vilka vätehalter som kan vara möjliga att applicera utan omprogrammering och vilka resultat som då kan uppnås. En annan buss i projektet har programmerats om för det nya bränslet Hythane®25 och en uppföljning av det nya bränslets påverkan på bussens bränslesystem och prestanda har genomförts.

Provkörning och test i stadstrafik
De konverterade fordonen har sammanlagt varit i drift under mer än två år. De har periodvis drivits med naturgas, 8% vätgas och 25% vätgas för att under längre tider samla statistik avseende körbarhet och bränsleförbrukning.

Emissionstester
För att verifiera emissionsdata från bänkprov, har en buss testas på landsväg med både naturgas och 25% vätgas för att påvisa ev. skillnader i emissionsbild. Emissionsmätningarna har genomförts med hjälp av rullande laboratorium från Volvo Aero Corporation i Malmö.

Rapportering och information
Förutom slutrapport från projektet har delresultat presenterats i artiklar i facktidskrifter, konferensbidrag och i delrapporter.

Projektresultat har bl a presenterats vid följande konferenser:

- SAE-konferens, Detroit, 2002.
- Energitinget 2004.
- Institute Francais Petrol, ”Which fuels for low CO_2-engines”, Paris, 2004.
- SIAT 2005, Pune, Indien, 2005.
- Risø International Energy Conference, Risø maj 2005.
- Clean Vehicles and Fuels, Stockholm 2005.

Projektet kommer även att presenteras vid 16th World Hydrogen Energy Conference 13-16 juni 2006 i Lyon och vid NGV2006, Kairo, november 2006.

3 Motortester vid Lunds Tekniska Högskola

Utgångspunkter för motortesterna vid LTH var att generellt kartlägga vilken påverkan vätgasinblandning i olika halter har på motorsystemet och med utgångspunkt från detta ta fram underlag för att kunna köra en buss med tillräcklig vätgashalt för att åstadkomma emissionsminskningar och verkningsgradsförbättringar men utan att behöva göra några modifieringar av motorsystemet. I ett andra steg skulle sedan underlag tas fram för att kunna bygga om en motor för drift med högre halt av vätgas. De vätgashalter som så småningom valdes var 8 vol-% respektive 25 vol-%.

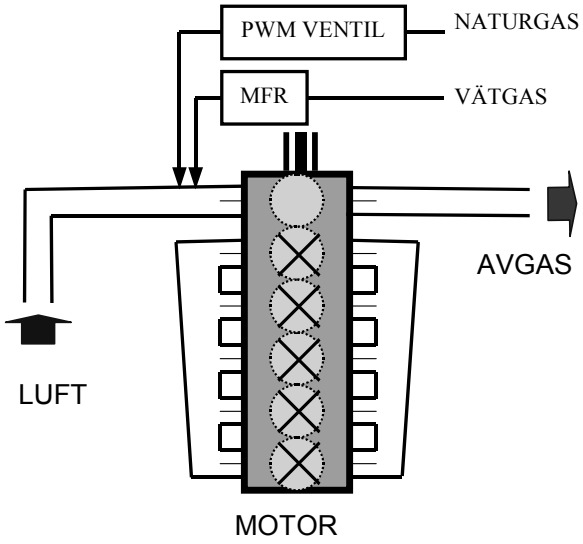
Motorprov genomfördes vid LTH där olika halter av vätgas har blandades i naturgas. En förstudie på en encylindermotor gjordes med varierad vätgashalt. I denna studie användes två olika förbränningsrum; ett med hög turbulens (snabb förbränning) och ett med normal turbulens (långsammare förbränning). Detta gjordes för att undersöka om vätgasens förbränningsegenskaper kan förbättra verkningsgraden med ett normalturbulent förbränningsrum. Förbränningsrummet är den urgröpning i kolven som behövs för att ge ett rätt kompressionsförhållande i ombyggda dieselmotorer. De flesta större fordonsmotorer som går på naturgas är ombyggda dieselmotorer och har då förbränningsrummet i kolvtoppen.

Efter förstudien gjordes prov på en fullmotor dvs. en sexcylindrig naturgasmotor. Här användes ren naturgas, 8% vätgas (vol-%) och 25% (vol-%) vätgasinblandning med ett normalturbulent förbränningsrum.

3.1 Prov med encylindermotor

För att utöka magergränsen krävs en snabb förbränning. En snabb förbränning kan åstadkommas med ett bränsle som har hög laminär flamhastighet (vätgas) eller med ett förbränningsrum som skapar hög turbulens vid rätt tillfälle under förbränningen. Frågan är om det är bättre att ha hög laminär flamhastighet eller hög turbulens, eller går dessa egenskaper att kombineras för att ytterliggare utöka magergränsen?

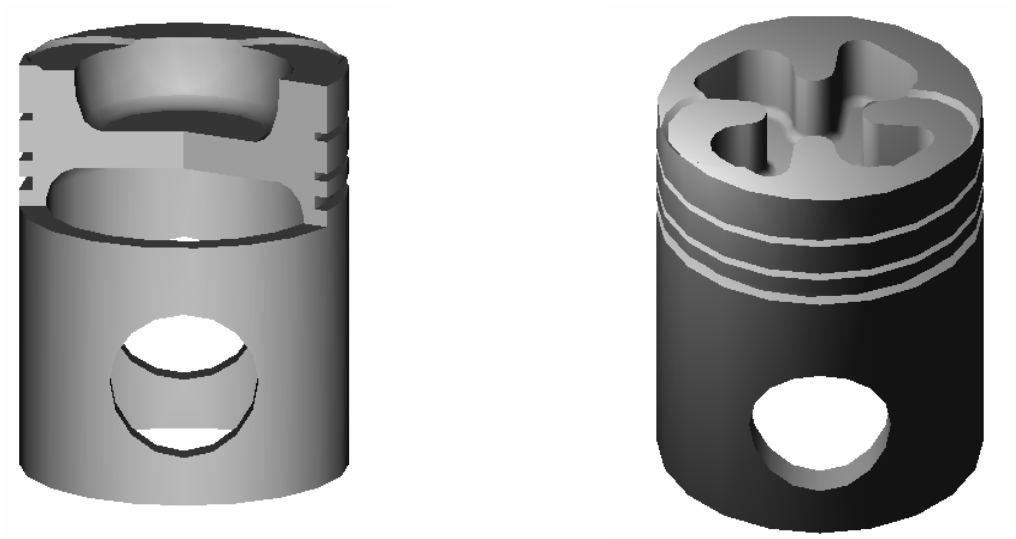
Motorn som användes vid försöken är en sexcylindrig TD100 diesel motor som konverterats till Ottodrift. Endast en cylinder har förbränning, de övriga fem är ej aktiverade Kompressionsförhållande är 12:1 och dieselinjektorerna är ersatta med tändstift. Det finns en vattenkyld tryckgivare som mäter trycket i cylindern. Naturgasen tillförs via en pulsviddsmodulerad ventil, och vätgasen via en massflödesregulator.



Figur 1 *Encylindermotor med bränslesystem*

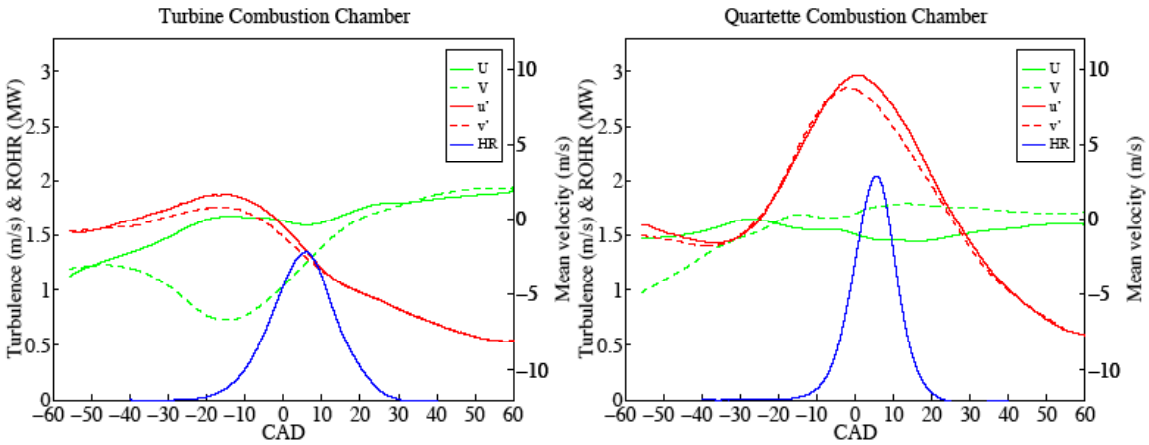
Emissionerna som mäts är; O_2, CO_2, CO, HC och NO_X. O_2 mäts med en paramagnetisk detektor (PMD), CO_2 och CO mäts med IR detektorer (NDIR), NO_X mäts med en CLD (kemiluminicens detektor) och HC med en HFID (flamjonisationsdetektor). Presenterade HC emissioner är metanekvivalenta (C_1).

Proven kördes med fullt öppen trottel (WOT) från lambda=1 till magergränsen, med varierande vätgasinblandning. Tändningen var satt för att optimera verkningsgraden (s k MBT tändning).



Figur 2 *Turbine (till vänster) och Quartette (till höger) förbränningsrum*

Turbulensen ändrades genom att använda två olika förbränningsrum, Turbine och Quartette. *Figur 2* visar de två förbränningsrummen. Turbulensen som skapas av dessa förbränningsrum har tidigare mätts upp med en laserbaserad teknik, LDV [Ref 4], *se Figur 3.*



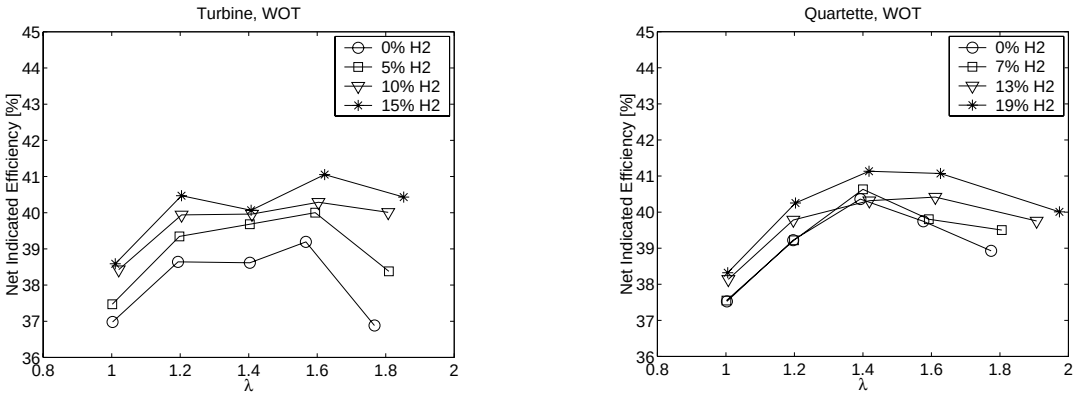
Figur 3 *Medelhastighet i två riktningar (U,V), turbulens i två riktningar, (u',v') och värmefrigörelse (HR) för de två förbränningsrummen*

Turbine-geometrin har en turbulenstopp på mindre än 2 m/s ca 15° före övre vändläget (ÖD) medan Quartette har sin topp på ca 3 m/s strax före ÖD. Jämförs värmefrigörelsen (HR) visar det sig att Quartettegeometrins turbulens gynnar snabb förbränning.

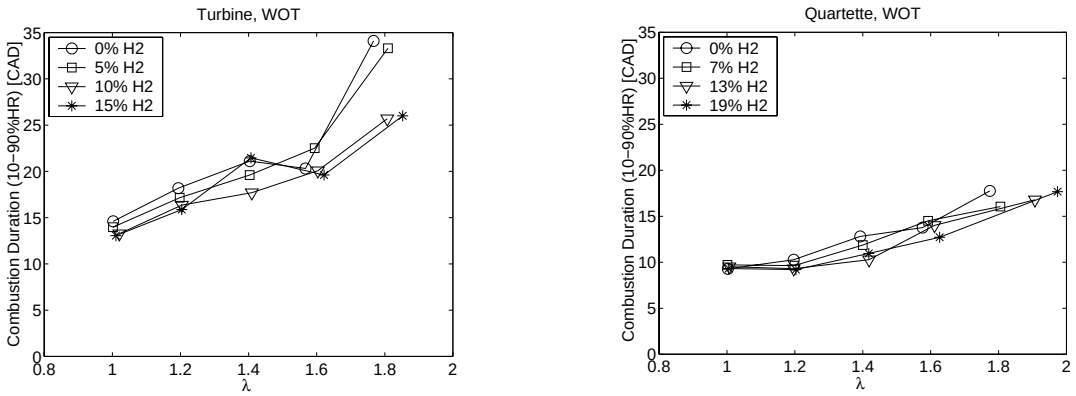
3.1.1 Resultat

Verkningsgrad och förbränningsduration
Resultaten presenteras i form av verkningsgrad, förbränningsduration, förbränningsstabilitet och emissioner.

Båda förbränningsrummen visar en ökad verkningsgrad med ökad inblandning av vätgas, även om effekten är mer uttalad med den lågturbulenta geometrin som är standard i den aktuella typen av gasmotorer (Turbine),*Figur 4*.



Figur 4 *Indikerad verkningsgrad med varierande vätgashalt*



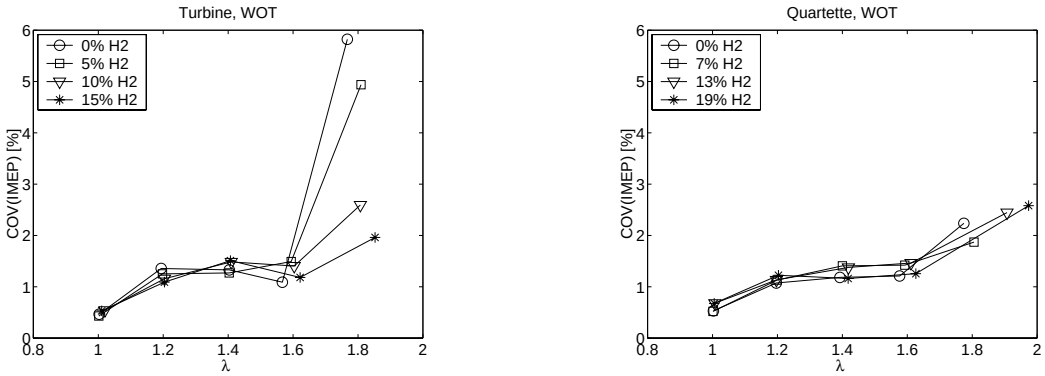
Figur 5 *Förbränningsduration i vevvinkelgrader*

Orsaken till verkningsgradsökningen är ökad förbränningshastighet och högre förbränningsverkningsgrad, speciellt för magra blandningar (lambda, λ>1). Lambda är definierat som det verkliga luft/bränsle förhållandet dividerat med det stökiometriska luft/bränsle förhållandet. Det stökiometriska förhållandet är fixt för ett specifikt bränsle och innebär att man har precis så mycket luft som krävs för att oxidera allt bränsle. Om den verkliga luftmängden är större än den stökiometriska kommer syre att finnas kvar efter förbränningen, blandningen är mager. Om det finns dubbelt så mycket luft än vad som krävs är lambda således 2. Det högsta lambda som kan köras kallas magergränsen. Här brinner det så långsamt att förbränningen blir ostabil och oförbrända kolväte släpps ut med avgaserna.

Förbränningsdurationen (hur lång tid huvudförbränningen tar) för det långsammare förbränningsrummet (Turbine) minskas med nästan 10 vevvinkelgrader för den magraste blandningen med 15% vätgasinblandning. Effekten med Quartette förbränningsrum är betydligt mindre med vätgasinblandning, Figur 5. Jämförs absolutvärden för förbränningsdurationen ses att förbränningshastigheten med Turbine och 15% vätgasinblandning är långsammare än med Quartette och ren naturgas. Detta förklarar varför verkningsgradsökningen är mindre med det snabba förbränningsrummet då vätgas tillförs i naturgasen.

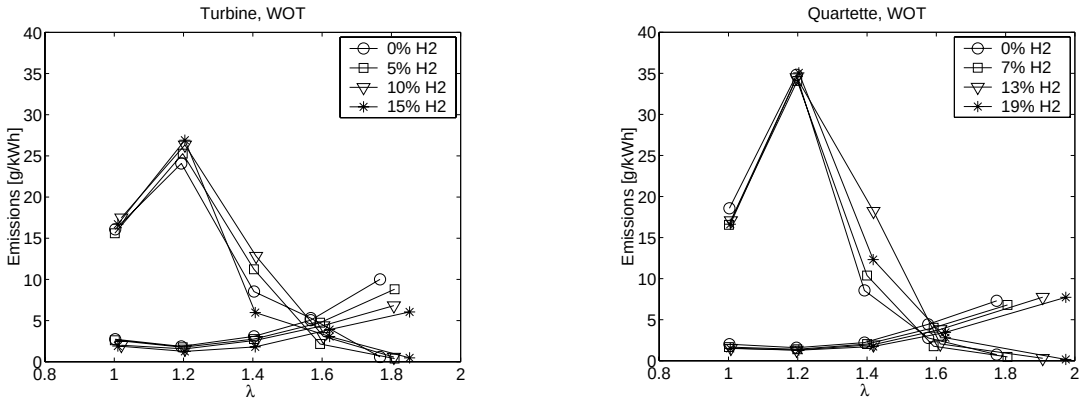
Förbränningsstabilitet
Dålig förbränningsstabilitet kan ses som variationer i motoreffekt på grund av kraftiga variationer i förbränningen mellan olika förbränningscykler. Den definieras som standardavvikelsen i indikerat medeltryck dividerat med medelvärdet av indikerat medeltryck, och beräknas utifrån det uppmätta cylindertrycket (COV för IMEP). Ett vanligt mått på instabil förbränning är då COV_{IMEP} > 5%.

Förbränningsstabiliteten påverkas av vätgasinblandning, speciellt för magra blandningar och förbränningsrum med låg turbulens. Figur 6 visar att förbränningen blir betydligt stabilare med Turbine förbränningsrum då vätgashalten ökar vid den magraste blandningen. COV_{IMEP} minskar från 6% till 2% mellan ren naturgas och 15% vätgasinblandning. Igen kan ses att vätgasen har mindre effekt med det snabba förbränningsrummet. Förbränningsstabiliteten är samma med Quartette vid λ=1.8 och ren naturgas som med Turbine vid λ=1.8 och 15% vätgasinblandning.

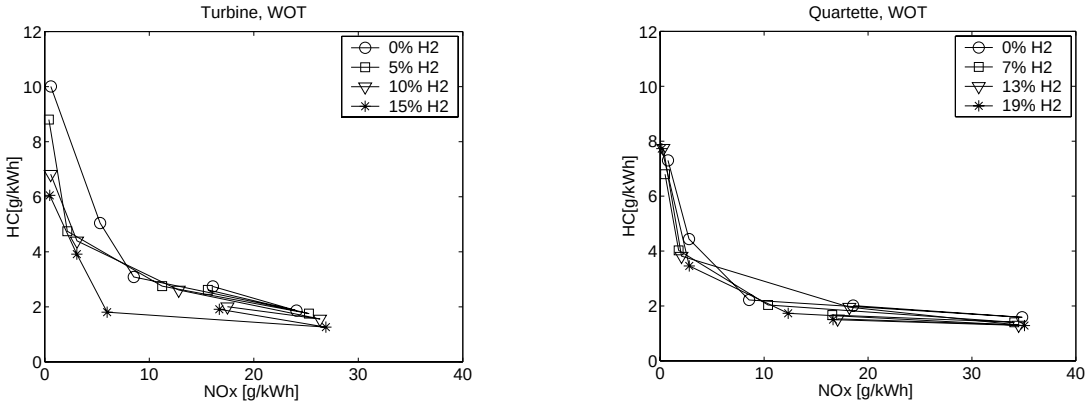


Figur 6 *Förbränningsstabilitet (COV_{IMEP})*

Emissioner
Specifika HC och NO_X-emissioner för olika lambda och vätgasinblandning visas i Figur 7. NO_X-emissionerna har sitt maximum kring λ=1.2 då finns tillgång till syre och förbränningstemperaturen är fortfarande hög. För att bilda NO_X krävs kväve, syre och en hög temperatur (>1800 K). NO_X emissionerna sjunker vid λ=1.0 för att syrehalten minskar, och de minskar vid magerkörning för att förbränningstemperaturen sjunker. Högre lambda minskar NO_X-emissionerna men HC emissionerna ökar för att förbränningen blir kallare och långsammare. Vätgasinblandning påverkar förhållandet mellan NO_X- och HC-emissioner eftersom en magrare blandning kan användas utan att HC emissionerna ökar drastiskt. Figur 8 visar förhållandet mellan HC och NO_X. Med Turbine förbränningsrum minskar båda emissionerna med vätgasinblandning. Eftersom förbränningshastigheten med Quartette inte påverkas så mycket av vätgasinblandning blir förhållandet mellan HC och NO_X relativt opåverkat.



Figur 7 *Specifika HC och NOx-emissioner för olika lambda och vätgasinblandning*



Figur 8 *Förhållande mellan HC och NO_x-emissioner*

3.1.2 Slutsatser - encylinderförsök

Tillsats av vätgas i naturgas ger snabbare förbränning och utökar därför magergränsen. Den snabbare förbränningen tillåter senare tändvinklar vilket minskar värmeförlusterna, som i sin tur resulterar i en högre verkningsgrad. Senare tändvinklar bidrar till en lägre maximal förbränningstemperatur, vilket leder till lägre NO_X-emissioner. Både HC- och NO_X-emissioner kan därför minskas vid magerkörning med vätgastillsatts i naturgasen.

Effekten med vätgastillsatts är mer uttalad för ett lågturbulent förbränningsrum nära magergränsen. Ett högturbulent förbränningsrum har redan de fördelar som vätgasen kan ge i form av förbränningshastighet och förbränningsstabilitet. Det lägre kolinnehållet per energienhet med vätgasinblandning, vilket resulterar i lägre CO_2-emissioner, finns oberoende av förbränningsrum.

3.2 Prov med fullmotor

Fullmotorn är av samma typ som encylindermotorn fast alla cylindrar har förbränning vilket medför att bromsade storheter kunde tas fram, Bild 1. Det är en sexcylindrig naturgasmotor med turbo (TG103/G10A), Tabell 1**.** Bränslet tillfördes före turbokompressorn. Bränsle med vätgasinblandning kördes från flaskor med känd vätgashalt, och körningar med ren naturgas gjordes via det befintliga naturgasnätet.

Tabell 1 *Motorspecifikation*

Svept volym/cyl.	1600 cm 3
Kompressionsförhållande	11.8:1
Max effekt	184 kW (2000 rpm)
Max moment	1150 Nm (1150 rpm)
Borrning	120.65 mm
Slag	140 mm
Tändsekvens	1-5-3-6-2-4

Samma typ av emissionsinstrument användes som vid encylinderförsöken. Cylindertrycken mättes i alla sex cylindrarna.

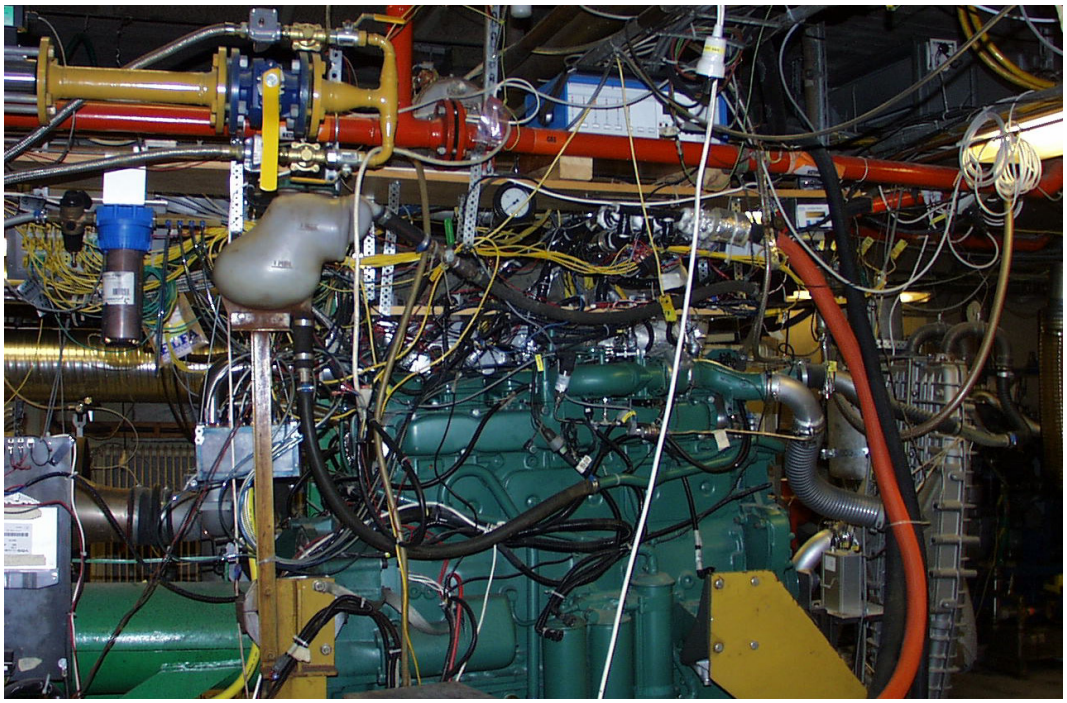


Bild 1 Fullmotorn

Två olika vätgashalter provades; 8% och 25% (vol%) och jämfördes med körningar på ren naturgas. 8 vol-% vätgas motsvarar ca 2,3 energi- % och 25 vol-% vätgas motsvara ca 8,3 energi-%.

Eftersom vätgasinblandning har större effekt med ett lågturbulent förbränningsrum användes Turbine geometrin vilket även är den kolv som används i de motorer som sitter i de bussar som används i Malmö. Tabell 2 visar bränsleegenskaper då ren naturgas jämförs med inblandning av 8% respektive 25% vätgas.

Tabell 2 Bränsleegenskaper (A/F = luft/bränsle-kvot, H/C= väte/kol-kvot, LHV = effektivt värmevärde)

	Naturgas	Naturgas + 8% H_2	Naturgas + 25% H_2
$A/F_{st\ mass}$	16.38	16.55	17.03
$A/F_{st\ vol}$	10.51	9.86	8.49
H/C	3.703	3.838	4.27
LHV[MJ/kg]	47.8	48.39	50.31
Dens. [kg/m^3] (273 K, 1 atm)	0.828	0.769	0.643
LHV[MJ/m^3]	39.56	37.26	32.37

3.2.1 Prov med 8 vol-% vätgasinblandning

Dessa försök gjordes för att kontrollera om det går att köra en befintlig naturgasmotor (Volvo buss) med 8% vätgasinblandning utan att ändra några motorstyrparametrar, och om detta hade någon positiv inverkan på verkningsgrad och emissioner.

Vätgasens positiva förbränningsegenskaper för magerdrift (lätt att antända och snabb förbränning) kan orsaka problem i form av knack. Knack är då luft/bränsle blandningen självantänder och orsakar kraftiga tryckvågor som kan förstöra motorn.

Detta kan inträffa om tändningen är för tidigt ställd. Knackningsrisken är mindre ju magrare blandningen är.

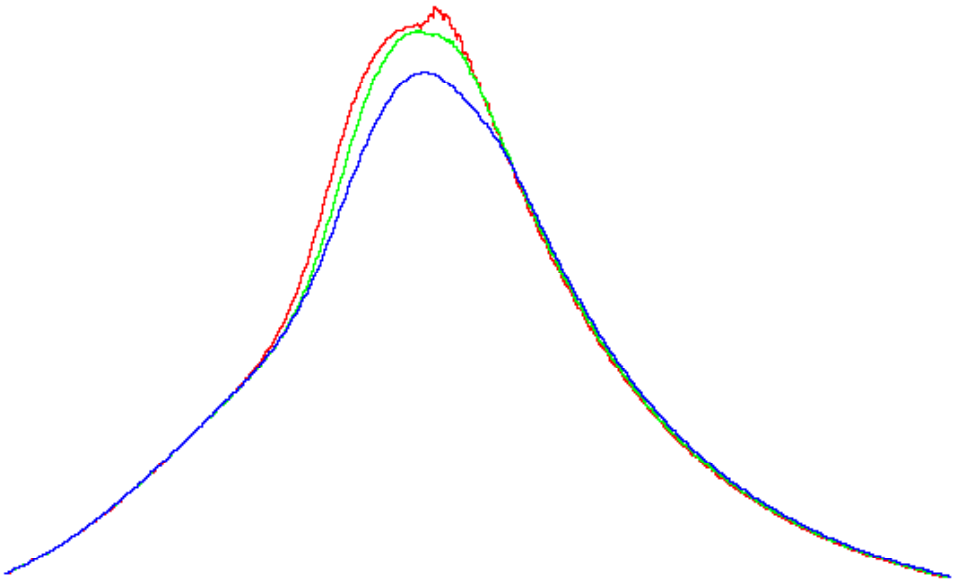
Försöken kördes på 2000 och 1300 varv på fullast och tomgång. Följande figurer visar data från 1300 varv och tomgång.

Lambda vid 1300 varv och fullast är 1.55 och tändvinkeln är 12.7° före ÖD enligt motorstyrsystemet. Eftersom den verkliga motorn i bussen inte har någon mätning av lambda kan luft/bränsle blandningen variera något ifrån det som styrsystemet tror att motorn körs på. Därför varierades lambda kring det värdet som styrsystemet lägger ut.

Knackning

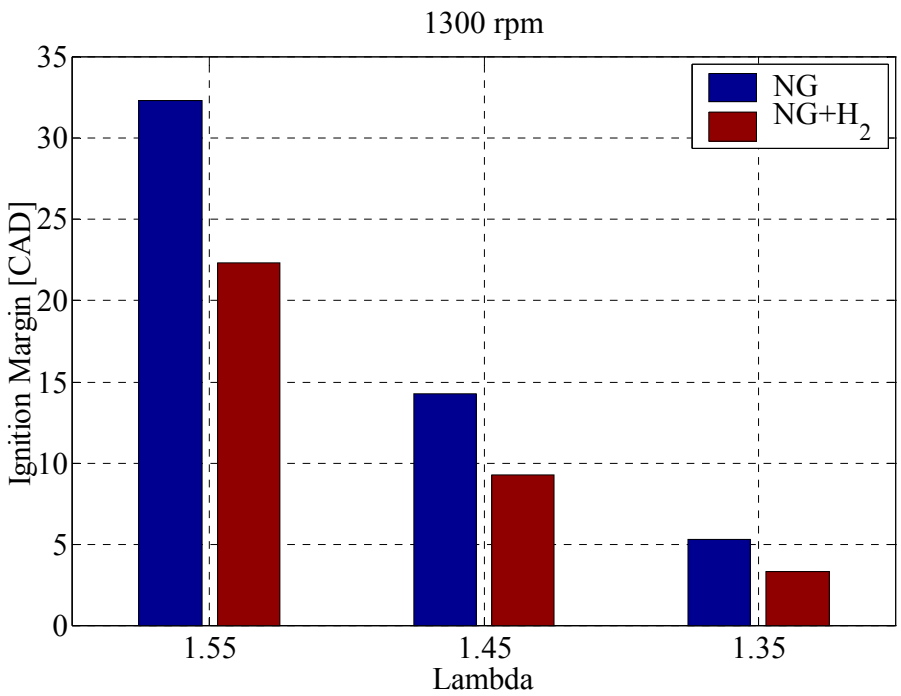
Knack kan ses på cylindertrycket i form av oscillationer strax efter tryckmaximum.

Figur 9 visar tre tryckspår varav ett med knack.



Figur 9 *Två tryckspår utan knack (blå/grön) och ett (röd) med knack*

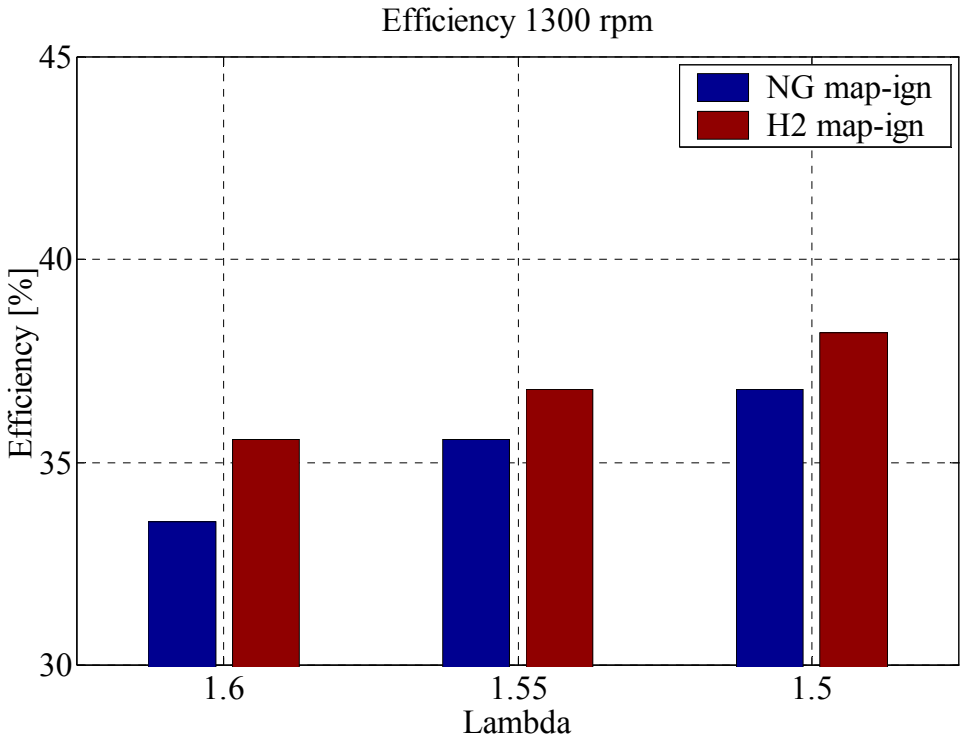
Marginalen till knack kan ses i Figur 10. Med marginal till knack menas antal vevvinkelgrader mellan motorstyrsystemets tändvinkel och den tändvinkel som ger knack. Marginalen till knack vid lambda 1.55 är stor även med vätgasinblandning, över 20°. Körs motorn med fetare blandning minskar marginalen till knack.



Figur 10 Marginal till knack för olika lambda vid 1300 rpm och full last, med ren naturgas (blå) och 8% vätgasinblandning (röd)

Verkningsgrad

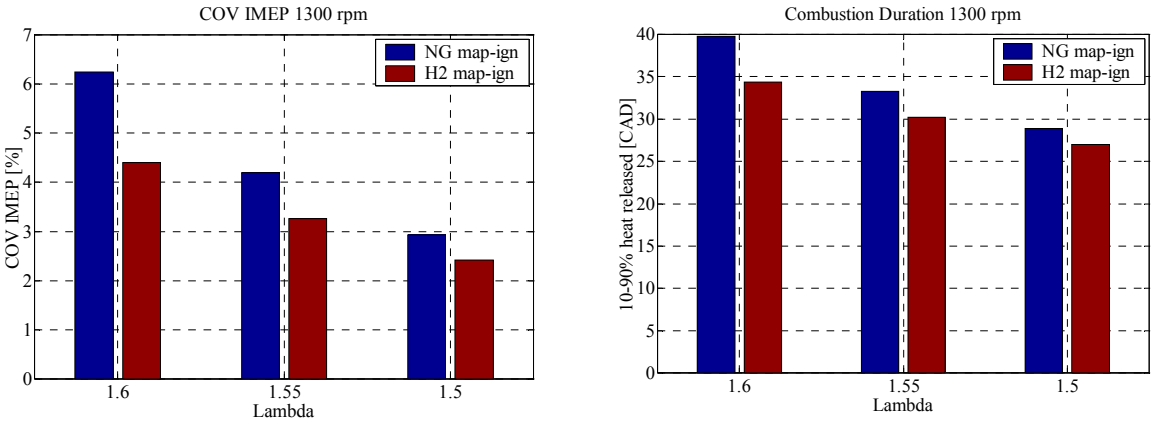
Verkningsgraden ökar med vätgasinblandning. Denna effekt är större ju magrare blandningen är. En verkningsgradsökning på ca 2 %-enheter uppnås med 8% vätgasinblandning, Figur 11.



Figur 11 *Verkningsgrad vid olika lambda, original tändvinkel enligt motorstyrsystem*

Förbränning

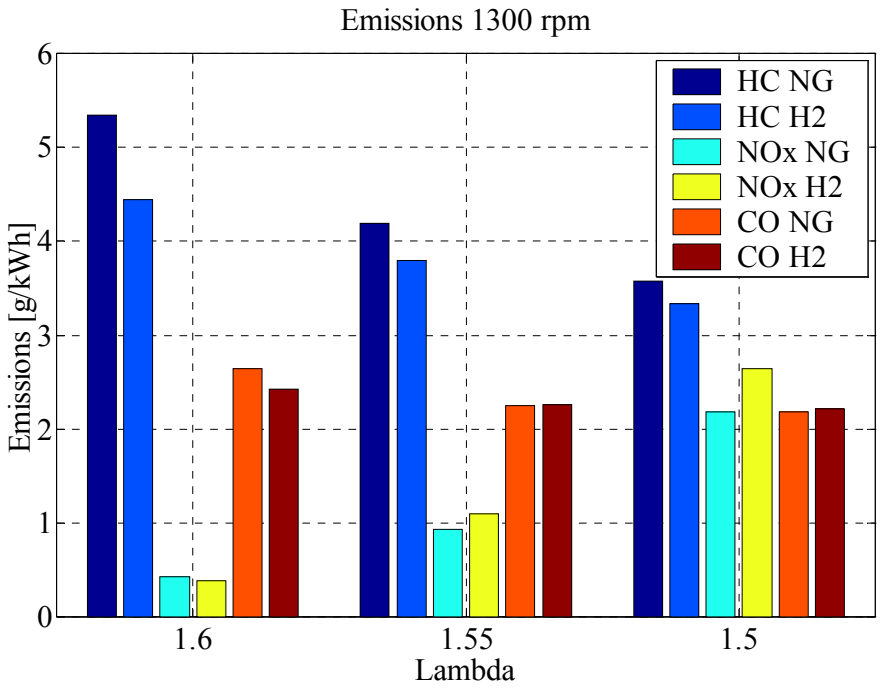
Som väntat brinner det stabilare och snabbare med vätgasinblandning, Figur 12, vilket gör att COV_{IMEP} minskar. Även här är effekten mer uttalad för magrare blandningar.



Figur 12 Förbränningsinstabilitet och förbränningsutsträckning vid olika lambda, original tändvinkel enligt motorstyrsystem

Emissioner

För en given tändvinkel är det förväntat att NO_X-emissionerna går upp något då förbränningen snabbas upp, på grund av högre maxtemperatur under förbränningen. Detta kan ses i Figur 13. Som väntat går HC-emissionerna ner eftersom magerförbränningen förbättras. CO-emissionerna går ner något för den magraste blandningen, i övrigt är den oförändrad.



Figur 13 *Specifika emissioner vid olika lambda, original tändvinkel enligt motorstyrsystem*

Slutsatser med 8 vol-% vätgasinblandning

Frågan var om det gick att blanda in 8% vätgas i naturgasen utan att ändra några motorstyrparametrar, och om inblandningen hade någon positiv effekt på verkningsgrad och emissioner. Följande kunde visas:

- Det finns god marginal till knack om motorn körs enligt originalparametrar i motorstyrsystemet.
- Verkningsgraden ökar, speciellt för magra blandningar.
- Förbränningen blir stabilare och snabbare.
- NO_X-emissionerna går upp och HC-emissionerna går ner för en given tändvinkel.

3.2.2 Prov med 25 vol-% vätgasinblandning

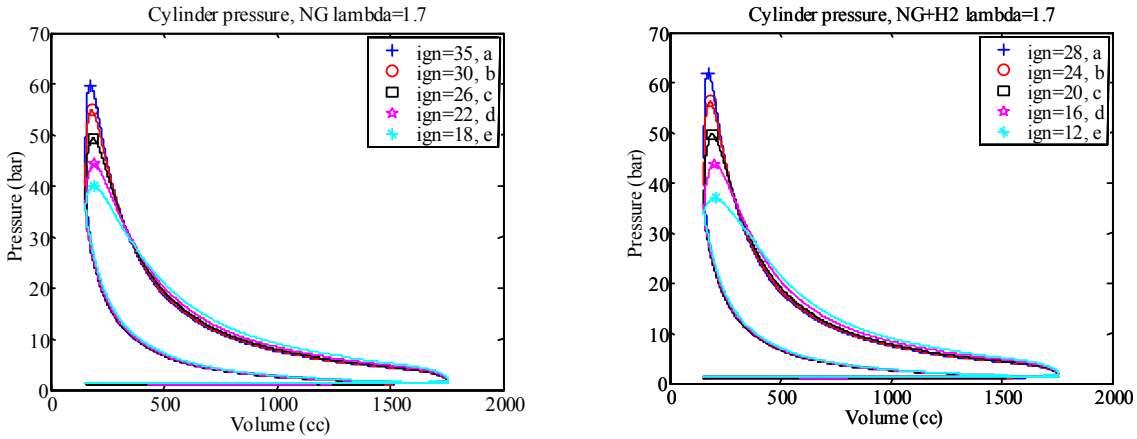
Det är inte säkert att samma lambda och tändvinkel är optimala för ren naturgas som för en blandning med 25% vätgas. För att ta fram underlag för omprogrammering av motorns styrsystem genomfördes därför utökade prov under detta test. För att kunna köra en full testmatris valdes en motoreffekt så alla punkter kunde köras på samma last. **Varvtalet valdes till 1000 varv och lasten ca 535 Nm (7 bar BMEP).**

Följande lambda och tändvinklar provades:

- Lambda - 1.8 till 1.0 i steg om 0.1.
- Tändvinkel *a* för maximal verkningsgrad.
- Tändvinklar *b, c, d* jämt fördelade mellan *a* och *e.*
- Tändvinkel *e* då förbränningen blir ostabil (COV_{IMEP} > 5%) eller avgastemperaturen överstiger 700° C.

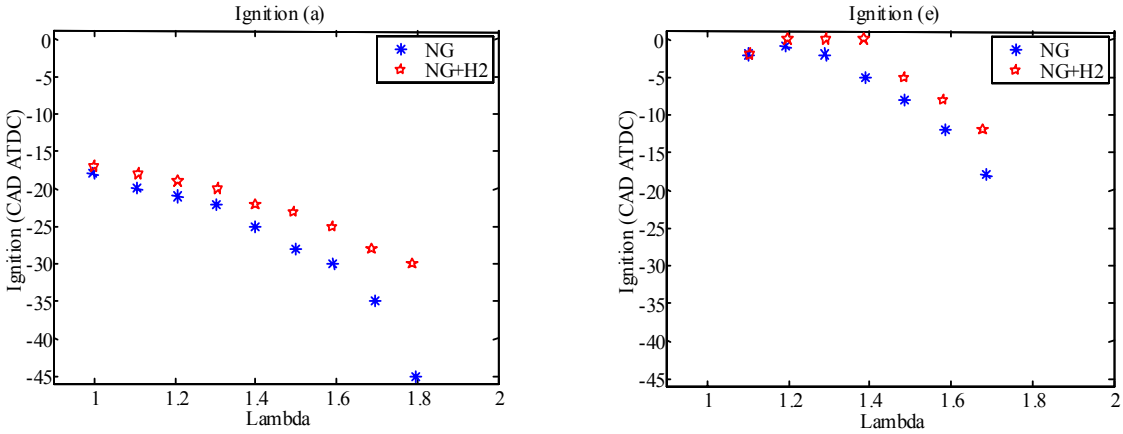
Tändvinklar och förbränningshastighet

Tändvinkel för maximal verkningsgrad, *a*, valdes som den tändvinkel som resulterar i att maximalt cylindertryck hamnar ca 11° efter ÖD. Tändvinklarnas inverkan på cylindertrycket visas i Figur 14. Tidigare tändning ökar maximalt cylindertryck, och vätgasinblandningen medför en förskjutning i tändningen på ca 6°.



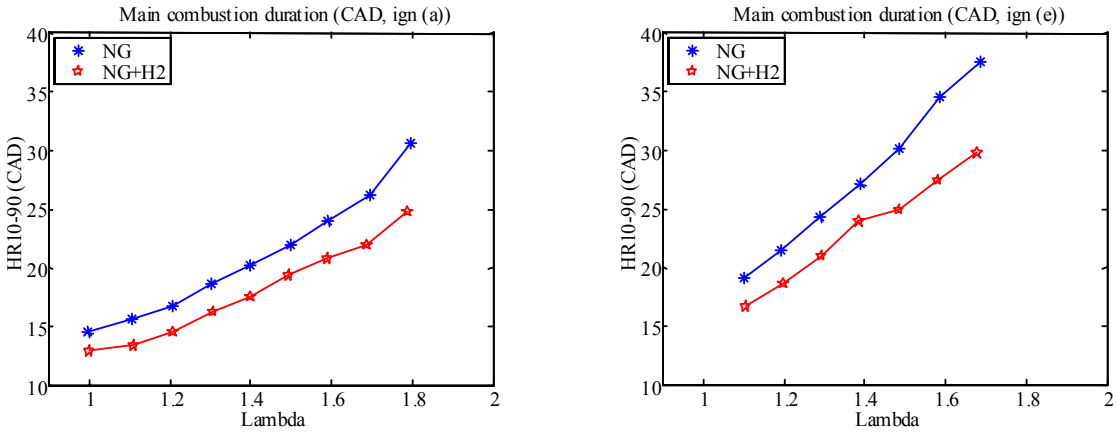
Figur 14 Tryck-volym diagram för tändvinklar a-e vid lambda 1.7, för naturgas (vänster) och 25% vätgasinblandning (höger)

Figur 15 visar tändvinklarna för alternativ a och e vid olika lambda och bränslen.



Figur 15 *Tändvinklar (° före ÖD) för tändning a och e för olika lambda och olika bränslen (naturgas= blå, 25% H_2=röd.)*

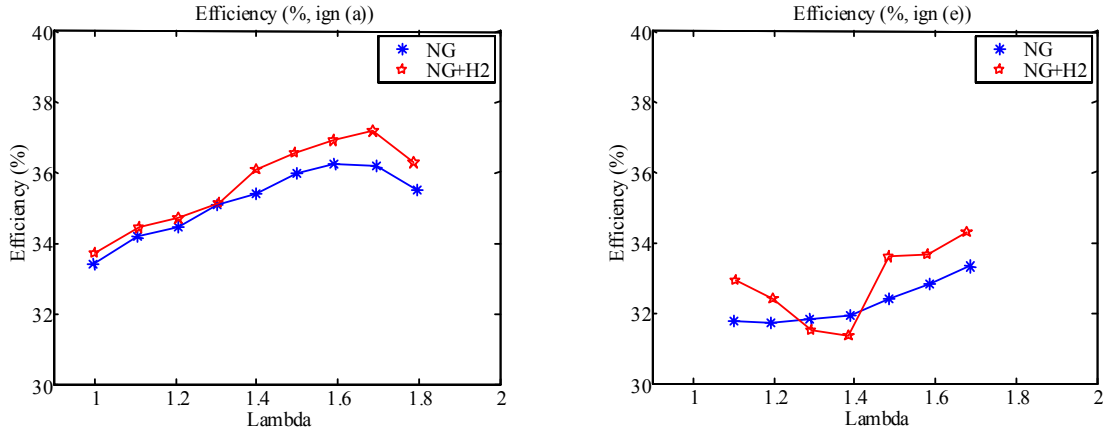
Vätgasinblandningens inverkan på förbränningen gör att senare tändvinklar måste användas. Tändvinklarna med vätgasinblandning har begränsats till att inte tända efter ÖD, eftersom detta inte är relevant i verkningsgradssynpunkt. Förbränningsdurationen för tändning *a* och *e* med olika lambda och bränslen kan ses i Figur 16. Som förväntat snabbar vätgasen upp förbränningen. Denna effekt kan ses för alla lambda och för båda tändstrategierna.



Figur 16 *Förbränningsduration för tändvinkel a och e med olika lambda och bränslen (naturgas= blå, 25% H_2=röd.)*

Verkningsgrad och CO_2-emissioner

Figur 17 visar bromsad verkningsgrad för tändvinklar *a* och *e* med olika lambda och bränslen. Som förväntat ökar verkningsgraden med vätgasinblandning, och detta är mer uttalat för magra blandningar. Trenden med tändvinkel *e* är inte konsekvent, vid lambda 1.3 och 1.4 är verkningsgraden lägre med vätgasinblandning. Detta kan förklaras med att tändvinkeln är *för* sen. Hythaneblandningen brinner så pass bra även med *för* sena tändvinklar att stabilitetsvillkoret (COV_{IMEP} > 5%) inte riktigt är passande som gräns för tändvinkeln.



Figur 17 *Bromsad verkningsgrad för tändvinklar a och e med olika lambda och bränslen (naturgas= blå, 25% H_2=röd.)*

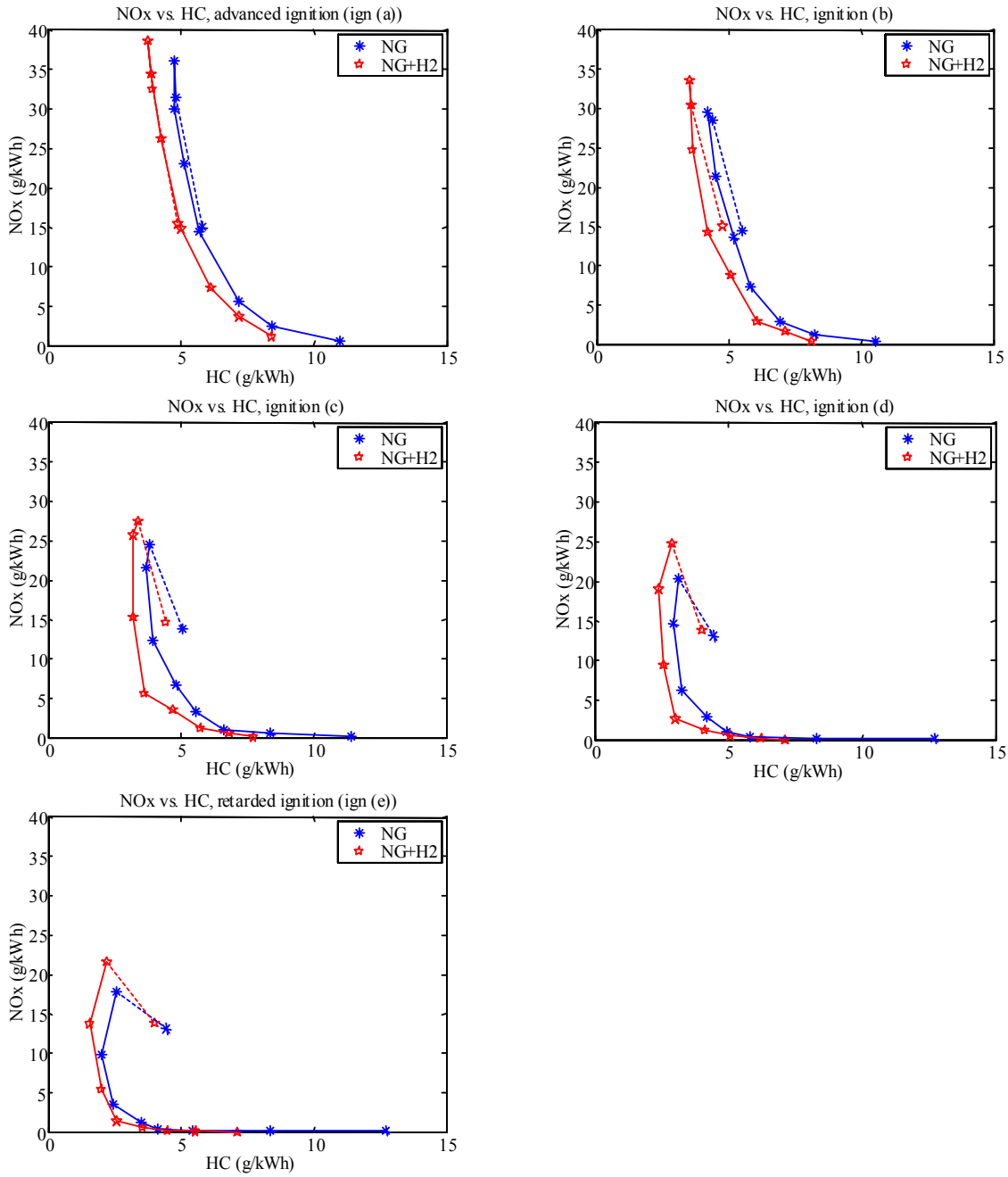
Även om verkningsgradsökningen inte är enorm med vätgasinblandning, är reduktionen av CO_2-emissioner väsentlig. Med 25% vätgastillsats kommer den specifika koldioxidemissionen från bränslet att minska från 57,4 g/MJ till 52,7 g/MJ, en reduktion med 8%.

Emissioner

När en motor går på dellast med en tändvinkel optimerad till maximal verkningsgrad finns det en mängd luft/bränsleblandningar som kan användas för varje last. Om blandningen magras ut (mer luft) får avgasspjället öppnas mer för att få ut samma last.

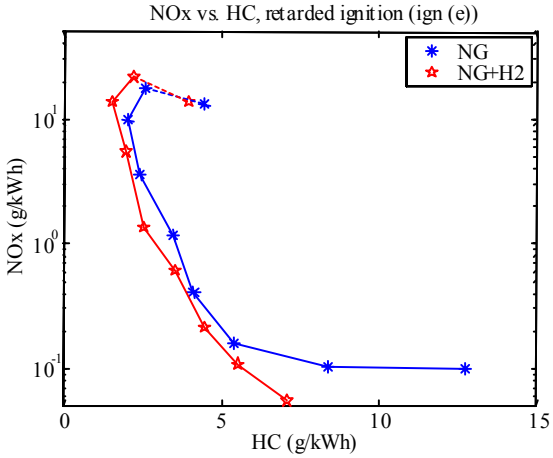
Det lambda som används kommer att påverka emissionerna, speciellt förhållandet mellan NO_X- och HC-emissioner. Det är förväntat, och visat vid försöken med encylindermotorn, att vätgasinblandning påverkar detta förhållande på grund av snabbare förbränning.

Figur 18 visar att för samma NO_X-emissioner reduceras HC-halten med 1-2 g/kWh för Hythane® jämfört med ren naturgas. Det är inte enbart den snabbare förbränningen som åstadkommer detta, utan även det lägre kolinnehållet per energienhet och en högre verkningsgrad. Den något udda trenden att NO_X-emissionerna sjunker efter sitt maximum beror på att NO_X-emissionerna har sitt maximum kring lambda 1.1-1.2 och minskar sedan på den fetare sidan för att O_2 minskar. NO_X minskar på den magra sidan för att maximal förbränningstemperatur minskar. Maximal NO_X är således vid lambda 1.1 och den punkt med lägre NO_X och högre HC är lambda 1.0.



Figur 18 *Förhållande mellan HC och NOx för olika tändvinklar, lambda och bränslen (naturgas= blå, 25% H_2=röd)*

En linjär representation av NO_X-emissionerna för tändstrategi *e* visar inte hela sanningen. Figur 19 visar NO_X-emissionerna med en logaritmisk axel. Här kan ses att NO_X-emissionerna är så låga som 0.06 g/kWh för den magraste punkten. Detta är lägre än några NO_X-krav idag, och således är efter-behandling inte nödvändigt.

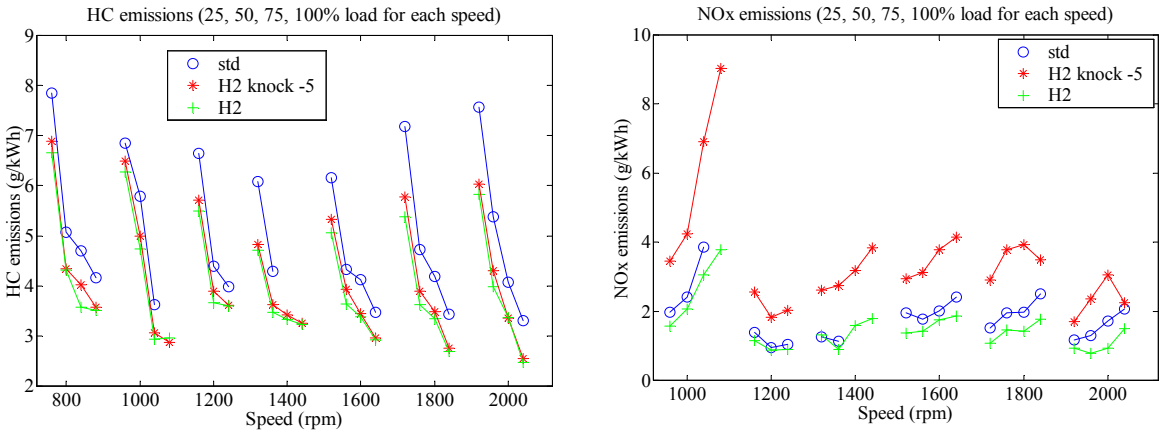


Figur 19 *Förhållande mellan HC och NO_X för olika tändvinklar, lambda och bränslen med logaritmisk NO_x-axel*

Figur 20 visar HC och NO_X emissioner för olika varvtal, last och bränslen med lambda enligt motor-styrsystem.

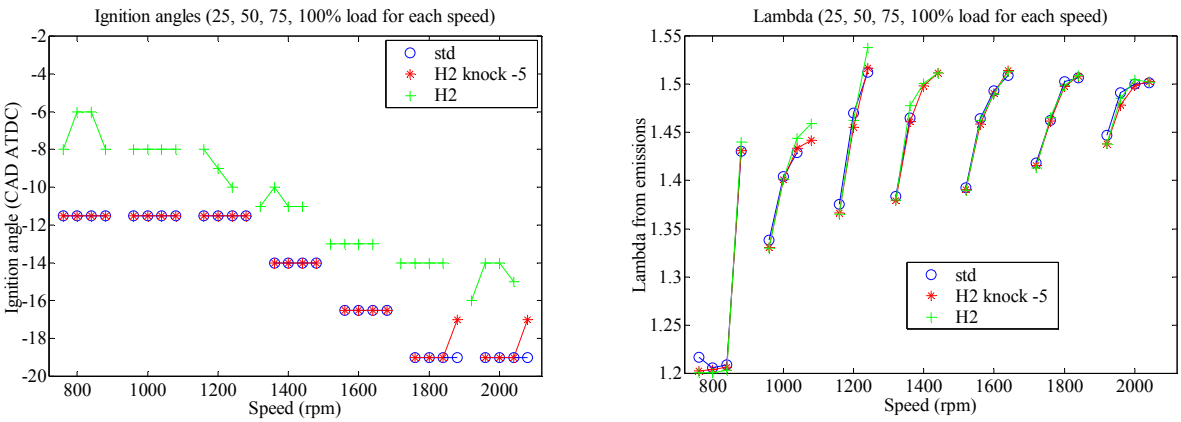
Std: Naturgas med tändvinkel enligt standard motorstyrsystem.
H2 knock-5: Hythane med tändvinkel enligt motorstyrsystem eller knack-5°.
H2: Hythane med tändvinkel satt så NO_X emissionerna blir samma eller lägre än med ren naturgas och tändvinkel enligt motorstyrsystem.

Figur 21 visar tändvinklarna (beskrivna ovan) samt lambda. HC emissionerna minskar med Hythane® och är oberoende av tändstrategi. NO_X-emissionerna ökar med Hythane® jämfört med ren naturgas om samma tändvinklar används. NO_X-emissionerna vid 800 varv visas ej eftersom de uppgår till 30 g/kWh.



Figur 20 HC och NOX-emissioner för olika varvtal, last och bränslen

Skillnaden mellan naturgas och Hythane® skulle då vara svåra att urskilja för de övriga punkterna. Anledningen till de höga NO_X-emissionerna vid 800 varv är att lambda ligger kring 1.2 där NO_X har sitt maximum.



Figur 21 *Tändvinklar och lambda for olika varvtal, last och bränslen*.

Slutsatser – 25 vol-% vätgasinblandning

Studien visar en något högre verkningsgrad med Hythane®25 än med naturgas. Ökningen beror troligen på den snabbare förbränningen vilken leder till att en större del av expansionsslaget utnyttjas till nyttigt arbete. CO_2-emissionerna är betydligt lägre än för en motsvarande bensinmotor. Detta beror på lägre kolinnehåll per energienhet som naturgasen bidrar till (25% lägre än bensin), lägre kolinnehållet som vätgasen bidrar till (8% lägre jämfört med naturgas) samt högre verkningsgrad (ca 2 %-enheter ökning jämfört med naturgas).

Förhållandet mellan HC- och NO_X-emissionerna förbättras med vätgasinblandning jämfört med ren naturgas. För en given NO_X-halt minskas HC-emissionerna med 1-2 g/kWh.

Den snabbare förbränningen med Hythane® medför att tändvinklar (eller lambda) måste ändras jämfört med ren naturgas för att få samma eller lägre NO_X-emissioner.

3.2.3 Diskussion

Vätgas framställt via elektrolys med hjälp av el producerad av sol, vatten eller vind bidrar inte till ökade CO_2-utsläpp, om inte de el-producerande maskinerna kräver fossila bränslen under tillverkningen. Debatten och forskningen kring vätgas som energibärare fortskrider i allt snabbare takt. Många fordonstillverkare lägger stora summor på forskning och utveckling av bränslecellsfordon som använder vätgas. Om detta skall bli verklighet krävs en utbyggd infrastruktur för gasformiga bränslen och erfarenhet om lagring och användning av sådana bränslen. Ett steg i riktningen mot ett ”vätgassamhälle” är att börja med inblandning av vätgas i befintliga bränslen, som naturgas. Naturgas har i sig ett lägre kolinnehåll per energienhet jämfört med bensin och diesel och genererar under förbränning lägre CO_2-utsläpp. Med en vätgasinblandning i naturgas på 25% (volym-%) reduceras CO_2-utsläppen med ca 30% jämfört med bensin, om samma verkningsgrad och lambda antas.

Att CO_2-emissionerna minskar går att visa med beräkningar. De andra emissionerna (HC och NO_X) är svårare att precis prediktera med beräkningar. Åt vilket håll trenderna för emissionerna går kan dock förutses. Vätgasinblandning borde medföra en snabbare förbränning eftersom den laminära flamhastigheten för vätgas är högre än för kolväte-bränslen. Detta borde i sin tur medföra att större del av expansionsslaget kan utnyttjas till nyttigt arbete, och därmed ge en högre verkningsgrad (lägre bränsleförbrukning). Den snabbare och stabilare förbränningen med vätgasinblandning borde även medföra lägre HC emissioner vid magerdrift. NO_X-emissionerna är väldigt temperaturberoende, och högre maximal förbränningstemperatur medför högre NO_X-utsläpp. En snabbare förbränning med en specifik luft/bränsle blandning och tändvinkel medför högre förbränningstemperatur, och därmed högre NO_X-emissioner. En snabbare och stabilare förbränning har dock den fördelen att magergränsen kan utökas, och därmed sänks förbränningstemperaturen och NO_X-emissionerna. Så är det då möjligt att samtidigt höja verkningsgraden och minska HC- och NO_X-utsläppen med vätgasinblandning i naturgas?

Prov på en encylindermotor med ett högturbulent och ett lågturbulent förbränningsrum visar att:

- Förbränningshastigheten ökar med vätgasinblandning (särskilt för ett lågturbulent förbränningsrum nära magergränsen). Detta medför att ännu magrare luft/bränsle blandningar kan användas vilket ger lägre NO_X-emissioner med bibehållna HC-utsläpp.
- En senare tändvinkel kan användas vilket minskar värmeförlusterna under förbränningen, och ger ökad verkningsgrad och ytterliggare lägre NO_X-emissioner. Ett förbränningsrum med hög turbulens har redan de positiva egenskaperna med snabb och stabil förbränning. Här har vätgasinblandningen mindre effekt, förutom det lägre kolinnehållet som ger lägre CO_2-utsläpp.

Prov på fullmotorn visar samma trender i emissioner och verkningsgrad som på encylindermotorn, med högre verkningsgrad och lägre HC- och NO_X-emissioner. Det krävs dock att motorstyrparametrarna (lambda och/eller tändvinklar) ändras om 25% vätgasinblandning skall användas eftersom NO_X-emissionerna annars ökar.

4 Säkerhet vid hantering av blandningar av vätgas och naturgas

På uppdrag av projektet genomförde Volvo Technology en utredning rörande säkerhetsaspekter vid hantering av blandningar av vätgas och naturgas som drivmedel i bussar. Studien omfattade tre delar:

- Jämförelse av säkerhetsrelaterade egenskaper hos vätgas och naturgas.
- Kartläggning av säkerhetsrelaterade egenskaper hos blandningar av naturgas och vätgas.
- Rekommendation till handlingsplan för hantering av vätgas/naturgas som drivmedel i bussar.

4.1 Säkerhetsrelaterade egenskaper hos vätgas och naturgas

Vätgas och naturgas är gaser som normalt hanteras inom industri och samhälle men vanligtvis inte som drivmedel. Naturgas och biogas har i allt större utsträckning börjat användas som drivmedel medan vätgas än så länge används endast inom isolerade försöksprojekt.

Naturgas innehåller huvudsakligen metan varför i många fall säkerhetsrelaterade egenskaper för metan har använts vid riskbedömningen.

Vid riskbedömning har en skala från 1 till 5 använts där **1** är **ingen risk** och **5** är **allvarlig risk.**

4.1.1 Allmänna egenskaper

Naturgas är en blandning av olika gasformiga kolväten och består huvudsakligen av metan. Beroende på ursprung så kan metanhalten variera mellan 75 och 99%. Den naturgas som används i Sverige kommer från de danska Nordsjöfälten och innehåller vanligtvis ca 88% metan.

Både vätgas och naturgas är gaser som är lättare än luft. Varken naturgas eller vätgas har någon egentlig lukt vilket gör dem svåra att detektera. Enligt svensk lagstiftning måste därför naturgas odoriseras före distribution medan någon sådan lagstiftning för närvarande ej finns för vätgas.

4.1.2 Läckage

System som är täta för luft kan drabbas av läckage med vätgas på grund av vätgasens mindre molekylstorlek. Vätgasens egenskaper gör också att volymflödet i en läcka kan bli ca 2.8 gånger större än motsvarande naturgasläcka. På grund av vätgasens lägre energiinnehåll blir dock energiflödet ca 12% lägre än för en naturgasläcka

4.1.3 Dispersion

Vätgas har vid rumstemperatur en densitet på 0.08 kg/m^3 och därför en mycket större blandningsförmåga jämfört med naturgas (0.79 kg/m^3). Vätgas har även en mycket större diffusionskoefficient jämfört med naturgas (0.61 resp. 0.16) vilket gör att vätgasen lättare sprider sig vilket kan öka risken för bildande av brännbara blandningar i slutna rum eller under tak. Den ökade dispersionen medför att brännbara blandningar med avsevärd volym snabbt kan bildas i slutna utrymmen.

4.1.4 Brännbarhet

Vätgas har ett brännbarhetsintervall på 4.0-75.0 vol-% vilket kan jämföras med naturgas som har ett intervall på 5.0-13.5 vol-%. Generellt kan man säga att brännbara blandningar bildas mycket snabbare med vätgas, speciellt i slutna utrymmen. Å andra sidan så reduceras risken för brännbara blandningar också mycket snabbare som ett resultat av vätgasens högre dispersionsförmåga.

4.1.5 Antändning

Vätgas fordrar en mycket lägre energi för tändning än naturgas (0.02 mJ jämfört med 0.28 mJ). I praktiken är denna skillnad oväsentlig eftersom normala tändkällor som t.ex. statisk elektricitet från en person har mycket högre energi (10-50 mJ).

Självantändningstemperaturen för naturgas och vätgas är mycket lika (580°C resp. 590°C).

4.1.6 Brand

Vätgasflammor är i teorin osynliga medan de i praktiken har visat sig vara mer eller mindre synliga på grund av att partiklar och föroreningar färgar flamman. Flamtemperaturen för naturgas och vätgas är likartade (2045°C för vätgas, 1973°C för naturgas).

Vätgasflammor har en lägre andel strålningsvärme än naturgasflammor (5-10% för vätgas, 10-33% för naturgas) vilket kan göra dem svårare att detektera men å andra sidan minskar även risken för sekundära bränder orsakade av hög strålningsvärme.

Personal som är ovana vid vätgasbränder kan löpa en ökad risk vid en vätgasbrand eftersom de kan riskera att gå in i en brand som de inte ser. Risken för brandpersonal är dock troligen mindre på grund av det mindre strålningsvärmet från branden.

4.1.7 Explosion

Explosionsrisken är mycket högre för vätgas än för naturgas eftersom det har ett mycket större detonationsintervall (40.7 vol-% för vätgas, 7.2 vol-% för naturgas). Samtidigt har vätgasblandningar på volymbasis ett lägre energiinnehåll. Vätgas har, till skillnad från naturgas, en tendens till övergång från deflagration till detonation på grund av sin höga flamhastighet.

Praktiska försök har visat att explosionstrycket blir mycket högre vid en vätgasexplosion än för naturgas.

4.1.8 Materialfrågor

Vätgas är vid rumstemperatur en icke korrosiv gas och påverkar inte i någon nämnvärd utsträckning metaller. Vätgasförsprödning kan förekomma hos vissa metalliska material som utsätts för vätgas men vanligtvis endast vid temperaturer över 500K/227°C vilket är temperaturer som endast kan förekomma i närheten av motorn. Vätgasförsprödning är ett fenomen som kan förekomma i tryckkärl, speciellt i kallbearbetade ferritiska stål. Aluminiumkärl påverkas inte av torr vätgas, medan ev. påverkan av fuktig vätgas inte är klarlagd.

Vätgasförsprödning initieras av väteatomer som absorberas i mikrostrukturer i anslutning till spänningsfält i materialet. Väteattacken resulterar i en bildning av hydrid eller gas i materialet, vilket i sin tur resulterar i en spricktillväxt.

Naturgas har inte kunna påvisas ha någon aggressiv påverkan på metalliska material under förutsättning att gasen är torr.

4.1.9 Fysiologiska effekter

Både vätgas och naturgas är ogiftiga gaser och har ingen annan hälsopåverkan. De kan båda medföra kvävningsrisk om inte behovet av tillräcklig ventilation är tillgodosett vid ett eventuellt utläckage.

4.1.10 Ekotoxiska effekter

Varken vätgas eller naturgas är kända för att medföra några som helst eko-toxiska effekter

4.1.11 Sammanfattning

I nedanstående tabell sammanfattas riskbedömningen för vätgas respektive naturgas.

Risk	Vätgas	Naturgas
Detektering	5	3
Läckage	5	4
Dispersion - utomhus	2	3
Dispersion - inomhus	5	4
Brännbarhet	5	4
Tändning	5	5
Brand (detektering)	5	3
Brand	3	4
Explosion	5	4
Material problem	3	1
Fysiologisk påverkan	2	2
Ekotoxitet	1	1
Summa:	**46**	**38**

1= ingen risk, 5=allvarlig risk

Riskbedömning kan sammanfattas:

- Vätgas är svårare att hantera på grund av större risk för läckage.
- Vätgas bildar lättare brännbara blandningar men riskerna är troligen mindre än för naturgas eftersom blandningarna lättare ventileras bort om läckaget sker utomhus.
- Det är i praktiken inga skillnader avseende antändningsrisk för naturgas och vätgas.
- Vätgasflammor är i dagsljus osynliga vilket gör dem farliga och svåra att upptäcka.
- Båda bränslena har likartade flamtemperaturer men vätgas har lägre strålningsvärme från flamman vilket kan ge mindre risk för sekundär antändning.
- Explosionsrisken är större vid hantering av vätgas.
- Både vätgas och naturgas är oskadliga för människor och ekosystem.

De huvudsakliga problemen med vätgas är relaterat till läckage vilket gör det vikigt att använda sig av effektiva system för att undvika läckage (rätt material etc.) samt för att detektera ev. läckage.

4.2 Säkerhetsaspekter för blandningar av naturgas och vätgas

En litteraturstudie har genomförts för att utreda vilka speciella säkerhetskrav som man behöver ta hänsyn till vid hantering av blandningar som består av naturgas och vätgas. Studien har utgått från naturgasblandningar med 8 respektive 20% vätgas.

4.2.1 Läckage

En av huvudfrågorna rörande läckage av naturgas/vätgasblandningar är huruvida det kan förekomma selektivt läckage av vätgas dvs. att vätgas kan separera tack vare sina annorlunda fysikaliska egenskaper.

Några belägg för detta har inte kunnat finnas i litteraturen. Tvärtom har man vid försök [Ref 6] visat att:

- Skarvar som inte läcker med naturgas läcker inte heller vid inblandning av upp till 40% vätgas.
- Skarvar som läcker naturgas läcker inte mer med gasblandningar med upp till 40% naturgas.
- Något selektivt läckage av vätgas har inte kunnat påvisas i litteraturstudien.

4.2.2 Materialkompatibilitet

Inga data rörande väteförsprödning hos blandningar av naturgas har kunnat hittas i litteraturen. Det är dock känt att högren vätgas är mera aggressivt mot metaller vilket kan vara ett tecken på att blandningar skulle vara mindre aggressiva. Detta är dock ej påvisat varför man måste utgå från att de material som kommer i kontakt med naturgas/vätgasblandningar måste vara kompatibla med 100% vätgas.

4.2.3 Dispersion

Några specifika data för dispersion hos blandningar av naturgas och vätgas har ej återfunnits i litteraturen. Skillnad i dispersionshastighet skulle kunna innebära att vätgas i brännbar blandning han finnas utanför det gasmoln där naturgasens odorisering gör den detekterbar.

Någon sådan risk är mycket osannolik om inte metan kondenserar vid utströmning ur en tryckbehållare och sådan kondensation kan inte förkomma vid omgivningstemperaturer över -40°C.

4.2.4 Brännbarhet

Tillsats av 20% vätgas till naturgas sänker den nedre brännbarhetsgränsen från 5 till 4.8%. Tillsats av 20% vätgas till naturgas höjer den övre brännbarhetsgränsen från 13.5 till 16.3%. Båda förändringarna är således marginella.

4.3 Åtgärdsprogram

Säkerhetsanalysen som genomfördes resulterade i ett åtgärdsprogram med följande punkter som följdes upp under projektet:

Utbildning av personal

Utbildning av den personal som kom i kontakt med de bussar som drivs med vätgas/naturgas genomfördes enligt ett program som utarbetades av Ingenjörsfirma Ingemar Carlson. Programmet baserades i tillämpliga delar på Volvo Technology's rekommendationer.

Läckagetestning

Läckagetestning av bussarna genomfördes med de metoder som normalt används för läckageövervakning av naturgasläckage. I projektet slutskede genomfördes även läckagetestning med specialinstrument för detektering av vätgasläckor (Sensistor-instrument).

Läckageövervakning

Några speciella gasdetektorer för vätgas installerades ej i garage och verkstadslokaler eftersom någon risk för selektivt läckage av vätgas ej anses föreligga. För detektering av eventuella flammor i motorrum infördes rutiner att man före arbete på bränslesystemet skall detektera eventuella flammor med en "trasa på en pinne".

Brandövervakning

I samband med utbildningen av busspersonal informerades brandförsvaret i Malmö om bussarna och skillnader i den brandtekniska hanteringen av dessa.

Ventilation av gasutsläpp

Inga speciella åtgärder genomfördes jämfört med vanliga naturgasbussar.

Märkning

Bussarna märktes på ett speciellt sätt och bussbolaget informerades om de speciella regler (hantering, tankning etc.) som gäller för dessa bussar. Tankning av 100% vätgas har omöjliggjorts genom begränsningar i de tankkort som delats ut till förarna.

Testprogram

Bussarna följdes via de loggböcker som fanns i varje buss och där alla förändringar och eventuella problem noterades. Alla incidenter skulle noteras och rapporteras till arbetsledningen.

Under hela testprogrammet har det inte några som helst incidenter, läckage eller tillbud rapporterats. Bussarna har under hela projekttiden varit i daglig drift.

5 Fordonets kompatibilitet med Hythaneblandningar

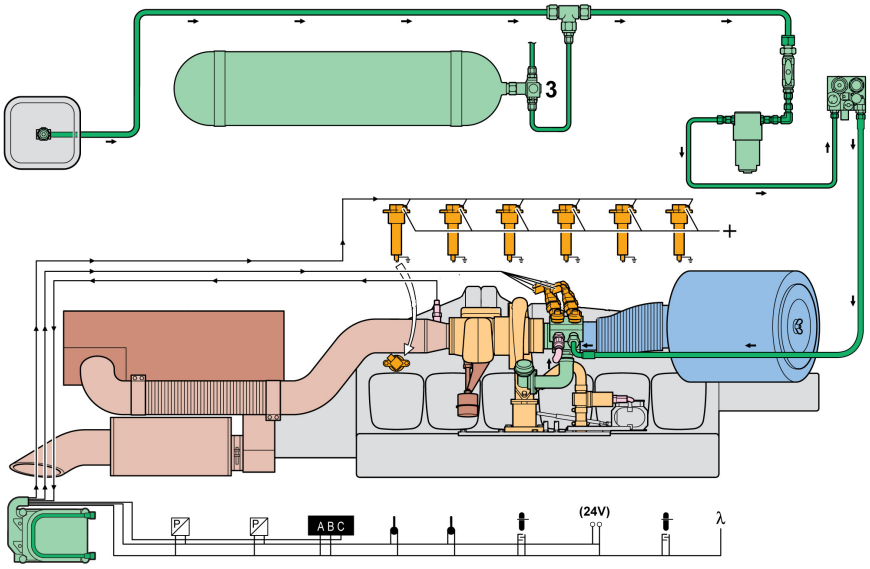
Som nämndes i kapitel 4 så förekommer väteförsprödning huvudsakligen vid temperaturer över 200°C vilket gör att väteförsprödning ej är sannolik i komponenter som ej är monterade i direkt anslutning till motorn. Väteförsprödning kan även förekomma vid rumstemperatur, speciellt i tryckkärl utsatt för höga spänningsnivåer. Forskning har visat att tryckkärl som inte utsätts för utmattning utan vätgaspåverkan, inte kommer att påverkas av vätgas. Däremot accelereras påbörjade utmattningsförlopp om materialet utsätts för vätgas.

Väteförsprödning kan inhiberas av olika typer av gaser t.ex. CO, O_2 och SO_2. Däremot har man inte kunnat påvisa att metan har någon inhiberande verkan. H_2S kan däremot förvärra påverkan av vätgas. För att kunna utesluta att inblandningen av vätgas skulle ha någon negativ påverkan på bränslesystem och motor så genomfördes en total genomgång av alla komponenter som skulle kunna komma i kontakt med bränslet. Eftersom det ej har kunnat påvisas att metan har någon inhiberande verkan på väteförsprödningsförlopp, har i studien antagits att 100% vätgas används eftersom några specifika data för blandningar av naturgas/vätgas ej funnits tillgängliga.

Genomgången utfördes av Volvo Technology i samarbete med Volvo Powertrain. Genomgången omfattade inte fordonets tankar, som är av typen aluminiumkomposit (SCI-ALT 653) och redan i sitt originalutförande är godkända för lagring av ren vätgas.

5.1 Fordon

Studien avser bussar av typen Volvo B10L med motor typ THG103KF och kan ej appliceras på någon annan typ av bussar. Det finns även skillnader i utrustning mellan olika bussindivider inom samma typ varför några generella slutsatser ej skall dras. Ett schema för bussarnas bränslesystem och motorsystem visas i Figur 22



Figur 22 *Bränsle- och motorsystem för bussarna som deltog i försöken* *(Bild: Volvo)*

5.2 Metodik

- Varje komponent i bränslesystemet efter fordonets högtrycksregulator och fram till motorns topplock identifierades och listades i en komponentförteckning.
- Ritningar och tekniskt specifikationer för de olika komponenterna hämtades från fordonstillverkarens register. Materialspecifikationer registrerade.
- Materialstandards för de olika materialen hämtades från olika databaser.
- Materialspecifikationer jämfördes med standards och komponenterna kunde identifieras rörande vätekompatibilitet.

Identifieringsprocessen försvårades av att många komponenter i systemet bestod av ett flertal subkomponenter. Flera komponenter hade dessutom hämtats från Volvos personvagnssida som har sålts till Ford, vilket försvårade identifieringsarbetet.

5.3 Resultat

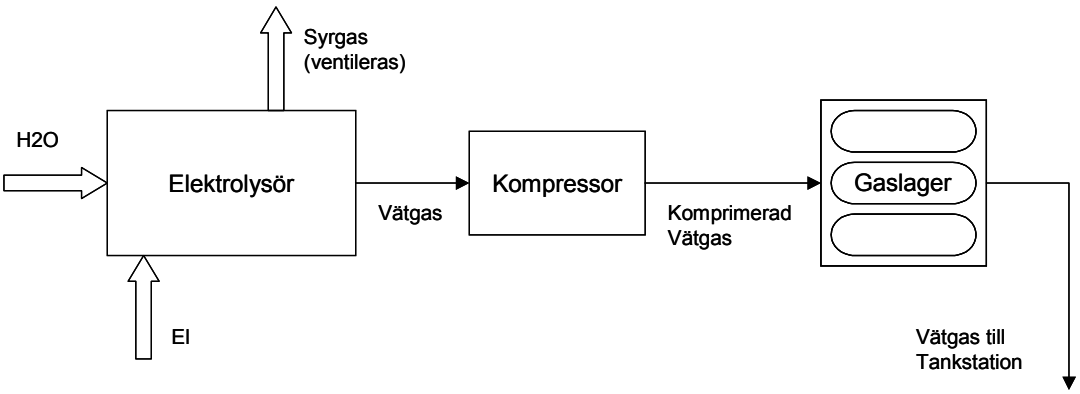
Sammanlagt identifierades 110 komponenter efter bränslesystemets högtryckregulator som varande utsatta för gasblandningen. Av dessa var det endast två komponenter som identifierades som varande inkompatibla med 100% vätgas. Eftersom båda dessa komponenter befinner sig i en omgivning där bränslet har blandats med luft bedömdes vätgashalten vara på en så låg nivå att riskerna för vätgaspåverkan vara minimal. Någon påverkan har ej heller kunnat påvisas efter 2 års drift.

För ytterligare 17 komponenter kunde det ej fastställas huruvida de var vätekompatibla eller ej. Med hänsyn tagen till material i övriga komponenter inom samma system och komponenternas exponering för gas bedömdes dock risken för väteförsprödning vara minimal.

6 Vätgastankstationen

Produktionsanläggningen och tankstationen för vätgas är placerade på Nobelvägen 66 i Malmö, ägs och drivs av E.ON Gas Sverige AB. Anläggningen togs i drift september 2003. På samma plats som vätgasstationen finns möjlighet för tankning av metangasfordon och elfordon.

6.1 Vätgasproduktion



Figur 23 *Principschema vätgasproduktionsanläggningen på Nobelvägen 66, Malmö*

Vätgasen produceras via elektrolys i en produktionsanläggning i direkt anslutning till tankstationen. Elektriciteten som används för vätgasframställningen produceras i närbelägna vindkraftverk och överförs till vätgasproduktionsanläggningen via det normala elnätet.

Hela vätgasanläggningen har levererats av Stuart Energy, Canada. Elektrolysenheten har tillverkats av Vandenborre Hydrogen Systems i Belgien, ett dotterbolag till Stuart Energy, Canada, numera ägt av Hydrogenics ltd, Canada.

Tekniska data för vätgasproduktionsanmläggningen (som angivits av tillverkaren):

- Kapacitet: 36 Nm^3H_2/h
- Elkonsumtion, elektrolysenhet: 4,2 kWh/ Nm^3H_2
- Total elkonsumtion: 5,5 kWh/ Nm^3H_2
- Vattenförbrukning: 36 l/h
- H_2-tryck från elektrolysenhet:10 bar
- Effektbehov: 210 kW
- Regleområde: 25-100%

Bild 2 *Lager för vätgas, med (t v) och utan (t h) inklädnad*

Bild 2 ovan visar vätgaslagret. Vätgaslagret är placerat i omedelbar anslutning till produktionsanläggningen. Lagret består av kompositflaskor med en sammanlagd volym av 4m^3 och ett maximalt lagringstryck på 393 bar.

Bild 3 *Dispenser för ren vätgas, Hythane®8 och Hythane®25*

6.2 Vätgasdispenser

Dispensern (Bild 3) har levererats av FTI, Canada och har två anslutningar, en för ren vätgas och en för blandningar av vätgas och naturgas. Blandningen av naturgas och vätgas görs direkt i dispensern när ett fordon tankas.

Följande alternativa fyllningsmöjligheter finns tillgängliga:

- Vätgas 350 bar
- Vätgas 200 bar
- Hythane®8 Naturgas med 8%vol vätgas, 200 bar
- Hythane®25 Naturgas med 25%vol vätgas, 200 bar

6.3 Driftresultat

Anläggningen togs i drift i september 2003 och har sedan dess använts för att förse bussarna i projektet med Hythane®. Försöken inom projektet avslutades 31/12 2005 men de båda bussarna som använts i projektet kommer även fortsättningsvis att använda Hythane®8 som drivmedel på grund av de positiva resultat som uppnåtts.

Ett mindre antal personbilar har under projekttiden tankats med Hythane®8 men dessa försök har ej utvärderats.

Total har bussarna i projektet stått för mer än 95% av vätgasanvändningen från tankstationen.
Den årliga förbrukningen hos de båda bussarna var ca 3600 Nm^3 ren vätgas.

6.3.1 Tillgänglighet

Under den tid som bussarna har drivits med Hythane®8 har det varit möjligt att även köra bussarna med ren naturgas, vilket visat sig vara en fördel, eftersom tillgängligheten på anläggningen inledningsvis var relativt låg. Under 2004 tankades bussen endast ca 50% av gångerna med Hythane®, resterande gånger tankades de med ren naturgas. I den buss som drevs med Hythane®25 var det tvunget att göra modifieringar i motorns styrsystem vilket gjorde att den ej kunder köras regelmässigt på naturgas. Försöken med Hythane®25 genomfördes under 2005 och under 2005 hade lyckligtvis tillgänglig-heten på vätgasstationen ökat till ca 70%. Detta är dock en genomsnittssiffra för året och under mars-september 2005 var tillgängligheten 82% vilket var tillräckligt för att i de allra flesta fall kunna köra en buss på Hythane®25 under dessa månader. Den bristande tillgängligheten har huvudsakligen orsakats av problem i dispenserenheten.

6.3.2 Energianvändning

Anläggningen har under hela projektet drivits vid en last som är ca 1% av nominell last, 36 Nm^3/h. Detta, tillsammans med omfattande driftprov med åtföljande energiförbrukning, har gjort att den specifika energianvändningen för vätproduktionen har blivit oproportionerligt hög under projektet. Under 2004 var den specifika energianvändningen i genomsnitt ca 20 kWh/Nm^3 vilket är ca 4 gånger högre än den förbrukning som angetts av tillverkaren vid optimala driftbetingelser.

6.3.3 Gaskvalitet

Anläggningen har under inga perioder haft några problem att upprätthålla önskad vätgaskvalitet. Det skall dock påpekas att förbränningsmotorer ej har de höga krav på renhet i vätgasen som ett bränslecellsfordon erfordrar.

För Hythane®8 har kvaliteten varit relativt jämn medan för Hythane®25 har det stundvis förekommit fluktuationer mellan 20 och 25% vätgas[2]. Sättet som naturgas blandas, genom att periodvis vätgas och naturgas fylls i tanken, kan även ha bidragit till att provtagningen varit missvisande.

[2] I rapporten kan det förekomma varierande uppgifter om vätgashalten för Hythan®25, mellan 20 och 25%. Detta orsakas av de variationer som har förekommit i kvaliteten. Generellt sett har vätgashalten för Hythan®25 i regel varit ca 25%.

7 Drifterfarenheter - Fordon

Projektet i Malmö har genomförts med de stadsbussar som normalt trafikerar Malmös gator. Detta har ställt mycket höga krav på tillgänglighet hos fordonen och tankstationen eftersom bussarna under projektet har gått i reguljär trafik med passagerare.

Projektet har genomförts med den primära målsättningen att minska bränsleförbrukningen och därmed CO_2-emissioner från bussarna. Genom att minska bränsleförbrukningen kan vätgasens höga produktionskostnad rättfärdigas och en marknad för vätgas som drivmedel successivt byggas upp.

7.1 Bussarna

I Skånetrafikens fortlöpande arbete med att minska miljöpåverkan från kollektivtrafikens fordon, var ett deltagande i projektet med inblandning av väte i naturgasen ett naturligt steg.

I direkt anslutning till den vätgas/hythanemack som E.ON Gas Sverige AB byggt ligger Connex bussdepå, det var därför ett naturligt val att använda deras bussar för projektet.

Normalt tankas alla Connex bussar helt automatiskt vid nattparkeringsplatsen. Då Hythane® endast gått att få vid en separat tankningsplats på den publika tankningsstationen, har bussarna på fått förflyttas dit och tankas under uppsikt.

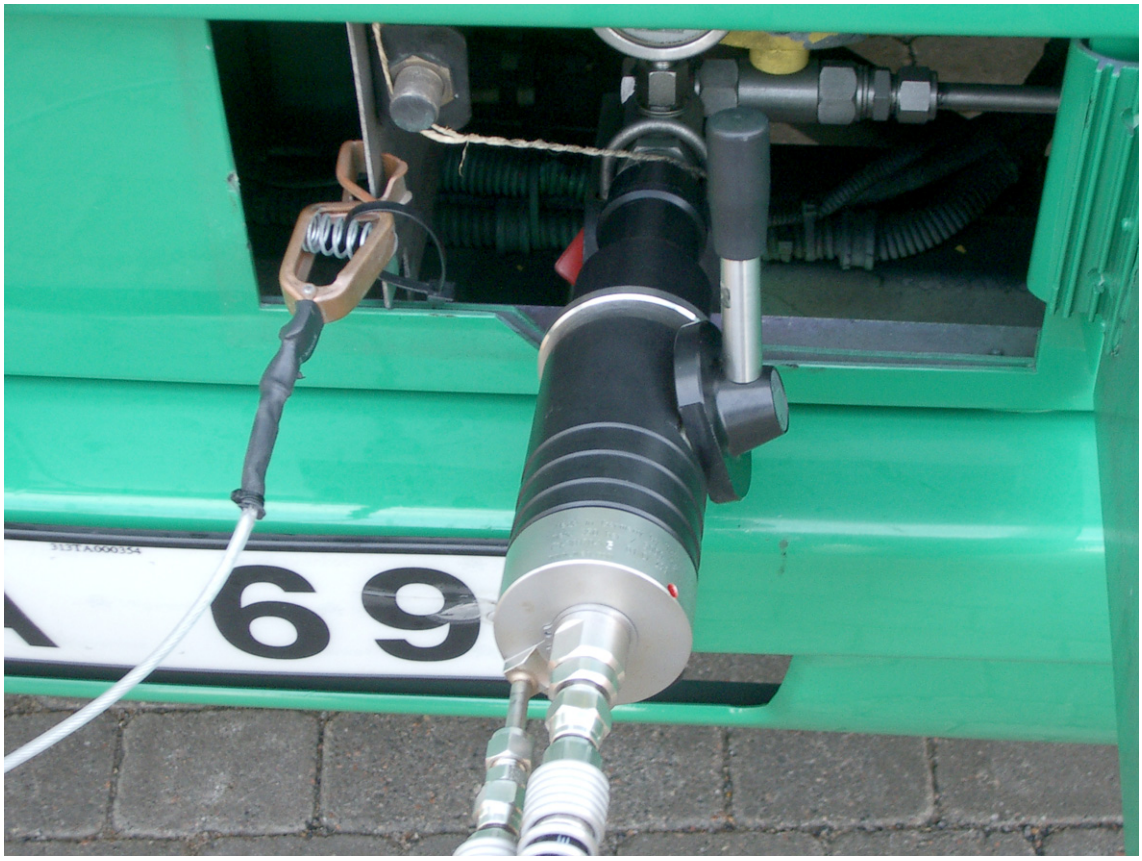


Bild 4 *Buss ansluten för tankning, med jordningsledning*

Detta har gjort att bussarna endast använts under högtrafiktid morgon och kväll för att kunna tankas under dagtid. Tankningen har enbart genomförts av trafikledare och utvald verkstadspersonal. Skånetrafiken har bekostat alla Connex's extrakostnader för tankning och annan hantering av bussarna.
De bussar som valdes ut för projektet var Connex SE 3402 som körde på Hythane®8 och Connex SE 3403 som kördes på Hythane®25, ren naturgas för jämförelse samt användes för emissionsmätningar. Båda bussarna är av fabrikat Volvo B10L.

Tabell 3 ***Bussar som använts inom projektet***

Inventarie-nr.	Regnr	Årsmodell	Tillverkare	Typ	Motor
3402	ASA 691	1996	Volvo	B10L-3000 CNG	THG 103KF
3403	ASA 891	1996	Volvo	B10L-3000 CNG	THG 103KF

Nettoeffekt vid 2200 r/min enligt ISO 1585 -185 kW.
Max moment vid 1000 - 1200 r/min - 950 Nm.
Kompressionsförhållande 12,7:1.
Elektroniskt datorstyrt tändsystem (12 V) med individuell tändspole/slutsteg för varje cylinder.

Volvo Technology har gjort en genomgång av alla komponenter i bränsle och motorsystem och funnit det stora flertalet kompatibla med vätgastillsatsen.

Bussarna fick dessutom en extra motorgenomgång före projektstarten för att vi skulle försäkra oss om att de var i så bra skick som möjligt. Samtidigt fick de en yttre reklamtext som visade att de kördes på ett nytt bränsle.

Med vätgas i naturgasen räknade vi med att få en något starkare motor, en mera stabil gång, lägre kolväte- och koloxidutsläpp, högre verkningsgrad och därmed lägre bränsleförbrukning. En ökning av motorverkningsgraden skulle tillsammans med det lägre kolinnehållet i bränslet sänka bussens emissioner av växthusgaser med ca 10-20%.

Eftersom tidigare erfarenheter visat på stora svårigheter att få signifikativa resultat från emissionsmätningar i bussar på väg, var det den stabilare gången och den minskade bränsleförbrukningen som var det primära målet.

Emissionsförbättringarna har ju klart påvisats av mätningar i provbänk på LTH (se kapitel 3). Connex har ett större antal av dessa äldre bussar i drift, att uppnå jämnare, stabilare motoruppförande i dessa bussar var klart önskvärt. Kunde dessutom en bränsleförbrukningsminskning påvisas var målet uppnått. Den framtida emissionsförbättringen kan ju först uppnås med införandet av Hythane® som bränsle i en större grupp bussar. Kunde dessa äldre modeller visa ett gott resultat skulle införandet av vätgasinblandning för hela flottan ge en önskad emissionsförbättring.

För att köra bussarna på 8% vätgasinblandning krävs inga förändringar i bussen, däremot behöver motorstyrningen programmeras om för att kunna hantera 25% inblandning. Dessa motorer har ingen återkoppling från lambdasond till motorstyrningen utan all reglering sker enligt förutbestämda parametrar. Det är alltså inte lämpligt att använda ett bränsle som har annat energiinnehåll än vad motorstyrningen är inställd för. På grund av detta var det viktigt att tankningen endast sköttes av utvald personal. Vid skifte mellan Hythane®8 och Hythane®25 krävs några åtgärder:

Dels måste man tillse att tankarna är så tomma som möjligt och därefter fylls med rätt bränsle. Därefter byts ett chip i motorstyrningen så att rätt gas/luftblandning tillförs motorn. Detta är inga konstiga åtgärder och tar ca 20 minuter.

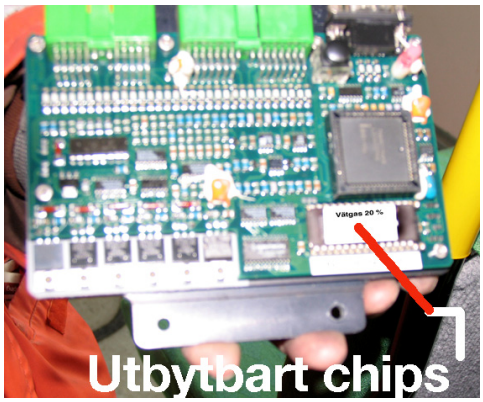


Bild 5 *Elektronikkort i motorns styrsystem. Chip för motorstyrning syns nederst t h. Chipet byts vid drift med Hythane®25*

7.2 Tankning

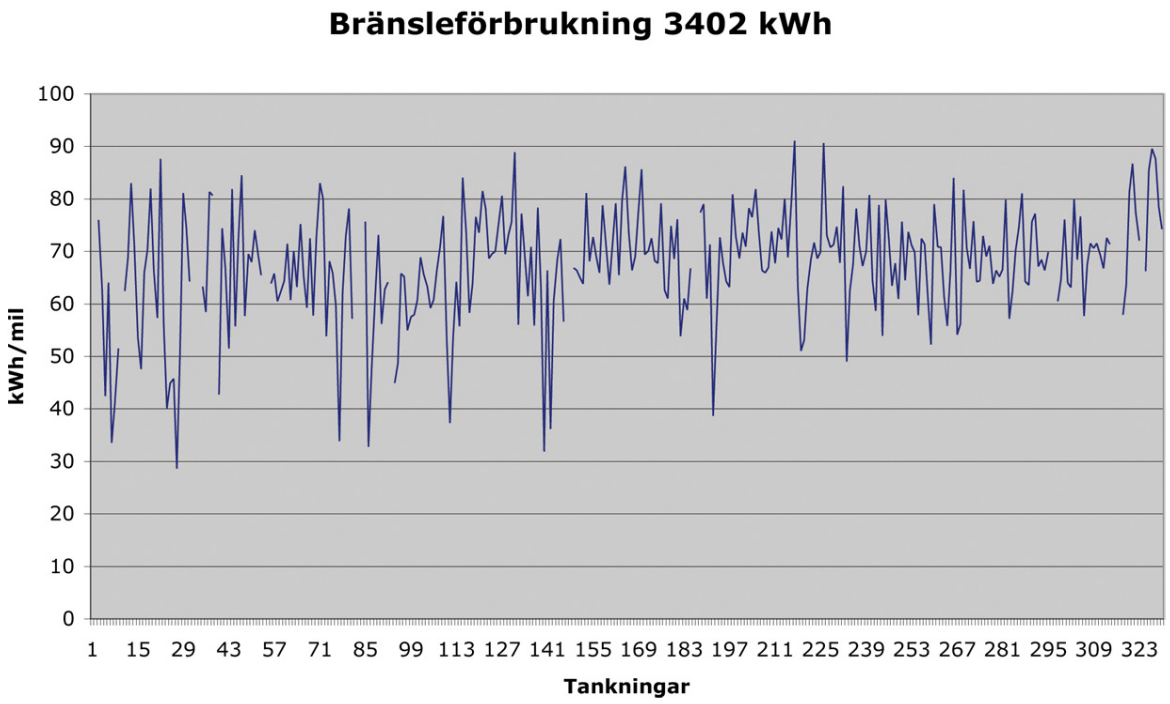
Tankningspersonalen skulle fylla i en loggbok vid varje tankningstillfälle. Under projekttiden har det genomförts 474 tankningar med Hythane®8, en total mängd på ca 33 ton. 95 tankningar med Hythane®25, ca 6 ton, har genomförts. Dessutom har 75 loggboksförda tankningar ren naturgas, ca 7500 kg gjorts i jämförelsesyfte.

Bussarna har tillsammans kört nästan 16 000 mil. Tyvärr har de tvingats tanka en odokumenterbar mängd ren naturgas under denna tid (då på den normala nattparkeringsplatsen) på grund av stillestånd i vätgasproduktionen, på grund av misstag av Connex personal eller av andra skäl. Ovanstående siffror kan alltså inte ligga till underlag för några exakta förbrukningskalkyler.

Av olika skäl har inte loggböckerna givit den exakta information som var förväntad. Skall motsvarande försök göras vid annat tillfälle, rekommenderas att bussarna förses med något slag av elektronisk gasvolymmätare ombord. Detta är kostbart, men den insats som gjorts för att föra loggbok motsvarade tyvärr inte resultatnivån.

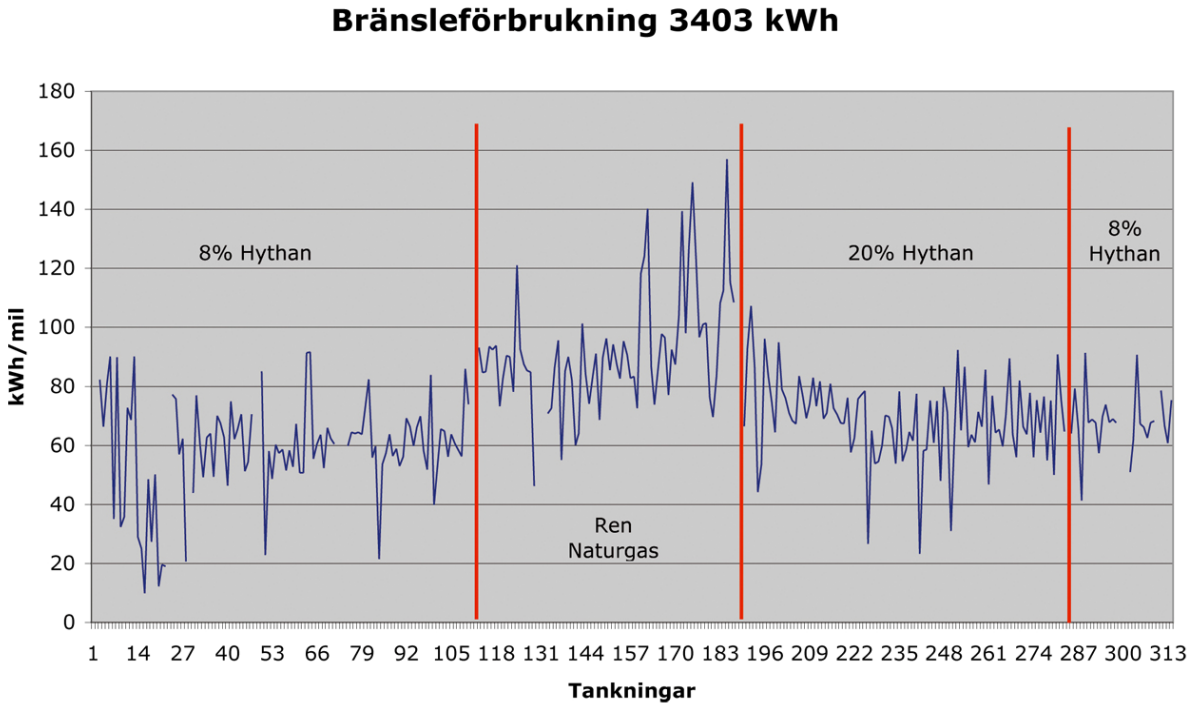
Bild 6 *Loggbok för tankning*

Figur 24 och Figur 25visar förbrukningsvärdena mellan tankningar som bokförts. En viss rensning av värdena har gjorts. Detta eftersom det har förekommit värden mellan 0,8 och 22,5 kg/mil, orimliga värden som måste härledas till antingen den mänskliga faktorn eller visningsfel i tankningsdispensern.



Figur 24 *Bränsleförbrukning för vagn 3402 under projektet. Drift med enbart Hythane®8*

Bränsleförbrukning för denna buss (Figur 24)har varit mycket stabil under testperioden med en snittförbrukning på 70 kWh/mil, ingen synbar förändring har förekommit.



Figur 25 *Bränsleförbrukning för vagn 3403 under projektet. Drift med Hythane®8, ren naturgas, Hythane®25 och Hythane®8*

Denna buss (Figur 25) hade en bränsleförbrukning med Hythane®8 på i snitt 60 kWh/mil, på ren naturgas steg genomsnittet till 90 kWh/mil, medan den vid körning på Hythane®25 låg runt 70 kWh/mil. Påpekas skall att optimeringen för Hythane®25 inte var helt optimal då testkörningen i motorlaboratoriet genomförts på en något nyare motormodell.

7.3 Utbildning

Att använda vätgas är naturligtvis inte vanligt förekommande inom bussbranschen, det krävs därför omfattande utbildning för att inte användningsriskerna skall öka.

En mycket stor fördel har varit att personalen på denna depå har mångårig vana vid naturgashantering. Det är ingen större skillnad på att använda natur/biogas och Hythane®. Säkerhetstänkandet skiljer sig däremot lite, därför har vi tagit fram en enkel informationsbroschyr och ett OH-baserat föredrag för att belysa dessa. Speciellt det senare innehåller dessutom av allmänkunskapsintresse ganska mycket information om ren vätgas och de alldeles speciella säkerhetsrutiner som krävs då ren vätgas används.

Utbildningen har genomförts mer för att betona att riskerna vid hythaneanvändning inte är samma som för hantering av ren vätgas utan mer påminner om riskerna vid hantering av naturgas (se kap. 4). Eftersom vätgas ofta förekommer i media ansåg vi det vara viktigt att personalen kunde skilja på de båda bränslena.

Hythane® och naturgas är mycket lika till sitt uppförande och dom farhågor om behov av annat säkerhetstänkande som fanns vid projektets start har inte bekräftats. Det handlade då mest om behovet av att upptäcka så kallat differentierat läckage, dvs. att ren vätgas skulle kunna läcka ut vid små läckor utan att metangas kom ut.

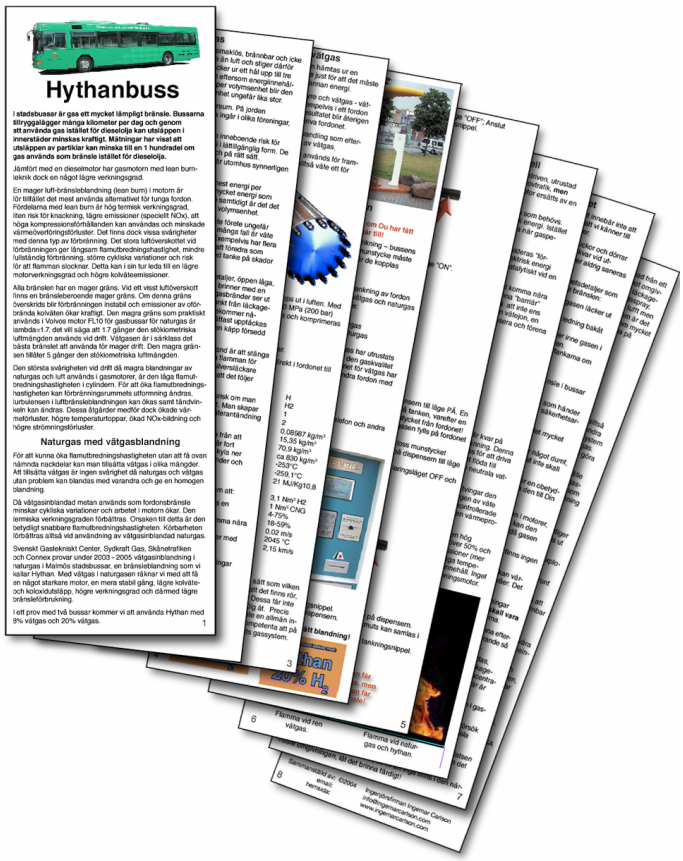


Bild 7 *Informationsbroschyr. Kan laddas ner som läsbart pdf dokument från: www.ingemarcarlson.com*

Bild 8 *Bildspel om Vätgas – Hythane® och säkerhet! En del av bilderna består av filmklipp, varför innehållet inte alltid framgår klart här*

7.4 Läcksökning

Metangas brinner endast i en blandning 5-15% metan i luft, vätgastillsatsen ökar endast detta område med någon enstaka procent i vardera riktningen varför riskökningen knappast är praktiskt märkbar. Det handlar om att helt enkelt inte ha något läckage även med tanke på att redan ett obetydligt läckage snabbt tömmer tankarna på dyrbart bränsle.

I verkstaden har det gjorts läcksökningar på bussarna med jämna mellanrum. Förutom de som görs av Connex personal på alla gasbussar, har det inom projektet gjorts läcksökningar på bussarna med några speciella gasindikeringsinstrument, dels E.ON Gas Sverige AB´s små standardinstrument dels på ett större, mer avancerat vätgasindikeringsinstrument från Sensistor eftersom farhågor fanns från början om att så kallat differentierat läckage skulle kunna uppstå. Vi har dock inte funnit några tecken på att detta förekommit.

Under våra mätningar har vi inte kunnat finna några läckor överhuvudtaget. För att se hur instrumenten fungerar har vi gjort “läcksökning” på fingerade vätgasläckor.

Det är inte alltid lätt att arbeta med de mer avancerade instrumenten. Det krävs både utbildning och vana. Görs inte läcksökningen på rätt sätt kan lätt en frånvaro av indikatorsignal ge intrycket av att ingen läcka finns trots att det då kan bero på att sökningen skett på ett sätt där instrumentet inte getts en möjlighet att indikera.

Därför rekommenderar projektet att den enklare metoden med läcksökningsspray används som förstahandsmetod för verkstadsbehov. Här ges en läckindikation på ett naturligt rättframt sätt som är lätt att hantera även för en ovan person. Eftersom inget läckage accepteras är även en enkel bubbla i läcksökningsvätskan en indikation på att något inte är helt rätt.

Bild 9 *Sensistors vätgasindikator*

7.5 Emissionsmätning/omdömen

I augusti 2005 genomfördes emissionsmätningar på buss 3403 dels med Hythane®25 dels med ren naturgas som bränsle. Detta gav möjlighet att köra samma buss samma dag på båda bränslena. Skillnaden var större än vad vi hade förväntat oss. Det var påtagligt lättare att hålla jämn hastighet med Hythane®25. Motorn arbetade lugnare och jämnare på hythanebränslet. Samtidigt var motorn då också starkare och bussen accelererade snabbare till önskade hastighet.

Bild 10 *Under emissionsmätning med vagn 3403.*

Samma uppfattning om bussarnas uppförande har förarna även fått i normal trafik. Trafikledarna hos Connex har haft som en stående uppgift att förhöra sig hos dessa om synpunkter om bussarna. Eftersom Connex har många bussar av samma typ och årsmodell har de gått att få bra jämförelser och åsikterna har genomgående varit mycket positiva. Bussarna går jämnare och lugnare på hythanebränslet. Eftersom busstypen har en egenhet att normalt gå ganska ryckigt har detta setts som en stor förbättring.

Förutom åsikter om det merarbete det inneburit att tanka bussarna på annan plats än vid den normala nattparkeringen har enbart positiva omdömen om projektet framförts. Det som kan förbättra miljö och arbetsförhållanden, i det här fallet stabilare drift, emottages positivt. Självklart har de båda provbussarna haft sin beskärda del av tekniska problem under provtiden men inget utöver vad som har varit normalt för busstypen och heller inget som varit relaterat till bränslet. Serviceintervallen har varit de normala för Connex.

8 Emissionsmätningar

En av bussarna i projektet har genomgått emissionsmätningar på landsväg. Bussen, som normalt går i reguljär trafik hos Connex, studerades vid två tillfällen före provningen för att förbereda installationen av mätutrustningen, första tillfället på bussverkstaden och andra tillfället på Volvo Aero Corporation, då även mätutrustningen provmonterades.

Provningen utfördes sedan på en dag (1/9 2005) mellan kl. 7:30 till ca 21:30, varefter bussen återlämnades för att kunna gå i trafik dagen efter.

Provningen omfattade fullgasprov i backe, körning på jämn väg samt start från hållplats.

Backproven kördes mellan södra och norra avfarten i Lund, medan körning på jämn väg gjordes på flygrakan mellan Södra Sandby och Revinge i Skåne.

Efter första provomgången med Hythane®25 kördes bussen först till Connex depå i Lund för att tanka CNG, men tankstationen fungerade inte tillfredställande varför CNG tankades i Malmö. Tanken var i det närmaste tom (ca 20 bar) när CNG fylldes. Samtidigt byttes tändslutsteget (på Volvo Aero Corporation) eftersom motorn börjat misstända i slutet av Hythane®-provningen.

8.1 Utförda prov

Proven omfattade fyra typer av körsätt enligt nedan:

1. Prov under max belastning i backe på motorvägen mellan avfart Lund C och Lund N (3 ggr).
2. Steady state körning vid hastigheter mellan 20 till 70 km/h i två riktningar.
3. Tomgångskörning vid hållplats.
4. Start och acceleration från hållplats upp till ca 40 km/h.

Under de olika proven mättes emissioner, luftmängd, hastighet samt motorvarvtal. Proven kördes med de olika bränslena under så likartade former som möjligt. Kolvätemissionerna , HC, mättes som ppm Propan C_3H_8.

8.2 Resultat

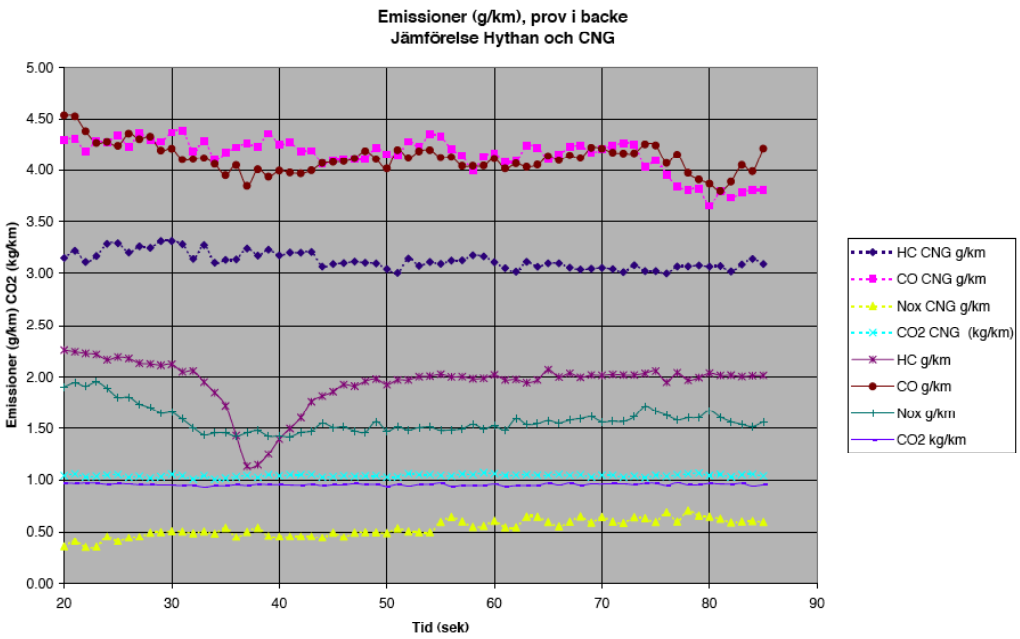
8.2.1 Prov i backe

Proven visade att sluthastigheten i backen strax före norra avfarten var ca 10 km/h högre med hythanebränsle jämfört med CNG (Figur 26).

Vätgasens positiva inverkan på brännbarhetsområdet gör att de eventuella misständningar som inträffar vid magerdrift med CNG, t.ex. på grund av smutsiga spridare, är betydligt färre eller helt borta vid drift med Hythane®. Detta ger en högre förbränningsverkningsgrad och därmed högre effekt.

Det medför även att kolväteemissioner (HC) är ca 50% högre med CNG än med Hythane®25, medan NO_X-emissionerna stiger från 0,5 g/km till 1,5 g/km med Hythane®25. CO-emissionerna är i stort sett oförändrade vid skifte mellan Hythane®25 och CNG (4-4,5 g/km).

Resultaten är avlästa vid 50-60 km/h och full gas.



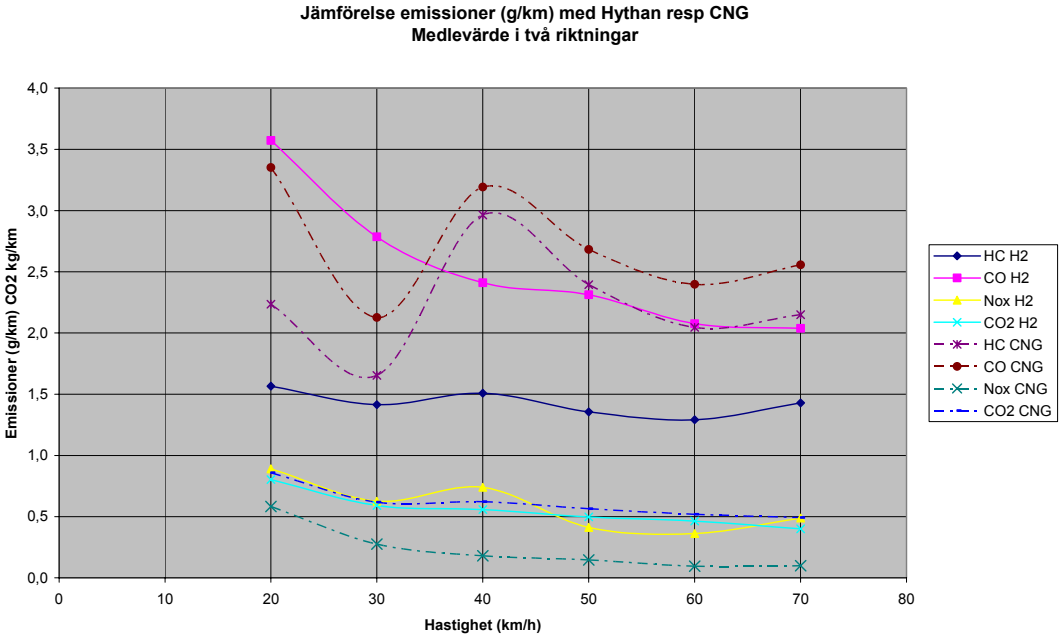
Figur 26 *Emissioner vid prov i backe*

8.2.2 Steady state (prov vid jämn hastighet)

Proven kördes på flygrakan mellan Södra Sandby (SS) och Revinge by (R), i båda riktningarna för att minska inverkan från lutning och vind (se Figur 27). Sträckan utnyttjades så att hastigheterna 20 och 30 respektive 40 och 50 km/h kördes i vardera riktningen. Vid hastigheterna 60 och 70 km/h användes hela vägsträckan för att få stabila värden.

Resultaten från steady state proven visar ungefär samma mönster som vid prov i backe:

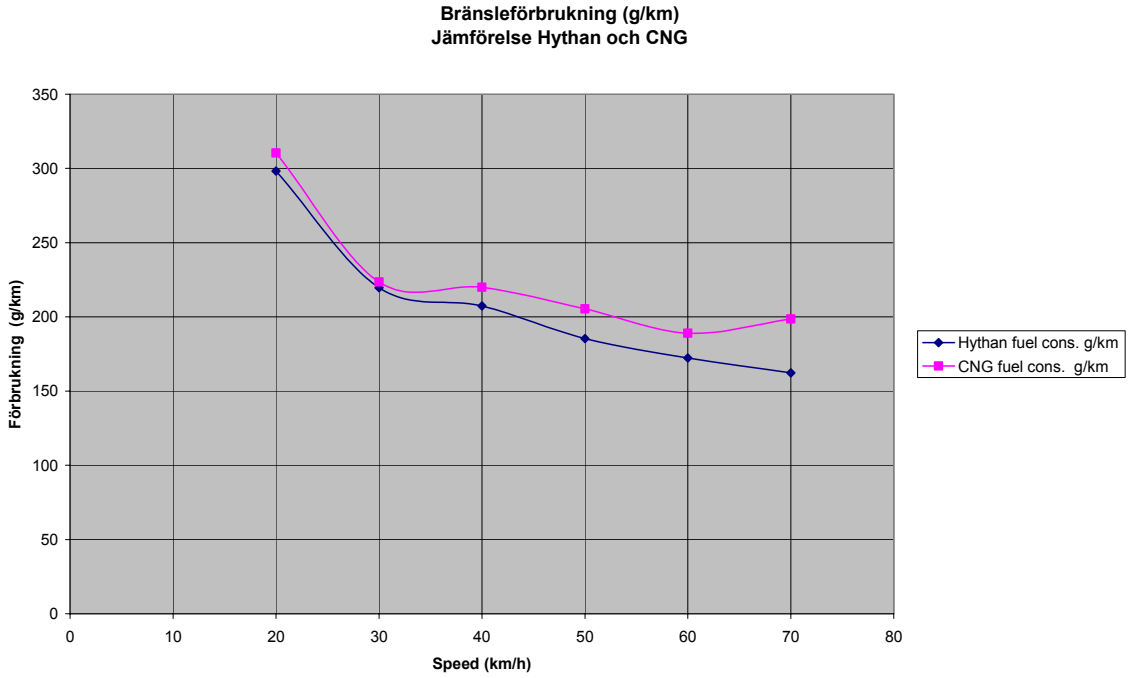
- Hythane®25 sänker HC-emissionerna med 30-50%. Störst förbättring vid hastigheter över 40 km/h.
- Hythane®25 ger högre NO_X-emissioner (ökning från 0,2-0,5 g/km till 0,4-0,9 g/km.
- CO-emissionerna är högre med Hythane®25 upp till 40 km/h men lägre över 40 km/h.



Figur 27 *Emissioner vid konstant hastighet mellan 20 och 70 km/h*

En trolig orsak är att motorn vid CNG-drift går magrare vid hastigheter över 40 km/h vilket ger mer CO-emissioner. Växellådan växlade också vid detta varvtalet/hastighet vilket försvårade mätningarna.

Skillnader i CO_2 är inte entydiga, men visar något högre värde med CNG. Bränsleförbrukningen (se Figur 28) är över lag högre med CNG, ca 7 % i medel mätt i g/s men ca 3% om man tar hänsyn till gasernas värmevärde. (70 km/h är inte inräknad).

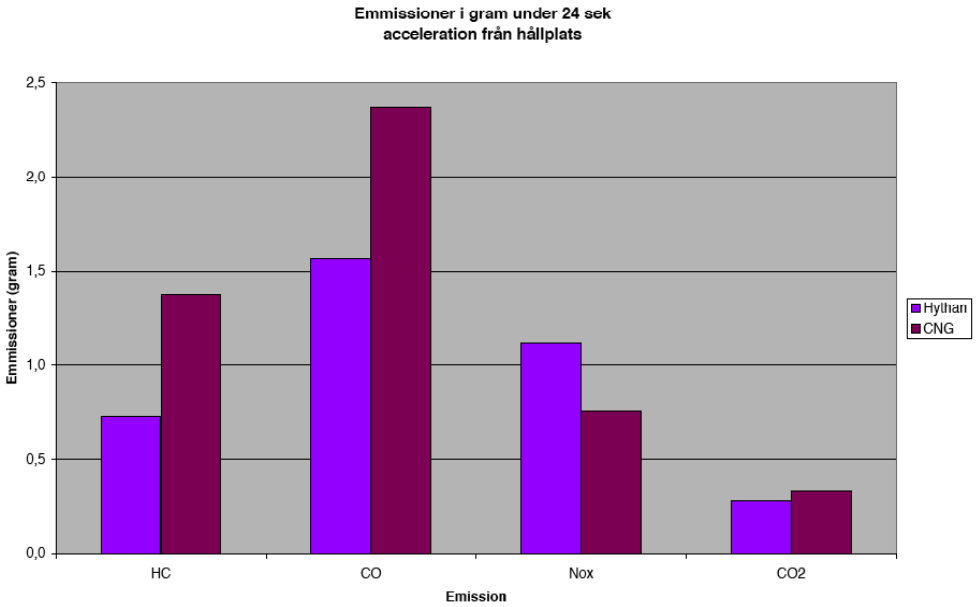


Figur 28 *Bränsleförbrukning vid prov vid konstant hastighet*

Vid slutet av provningen med Hythane®25 uppstod ett fel på tändslutsteget vilket medförde misständningar på 3 cylindrar. Detta gjorde att resultaten från 70 km/h inte är representativa för driftpunkten. Emissionsvärdena är över lag omräknade från ppm till g/km eftersom ppm-värdet är beroende av avgasmängden, vilken kan variera med de olika bränslena och driftpunkterna.

8.2.3 Start från hållplats

Acceleration från hållplats (se Figur 29) visar entydigt att HC och CO är mer än 50% högre med CNG medan NO_X-emissionerna är ca 30% lägre med CNG jämfört med Hythane®25. Bränsleförbrukningen är ca 10% lägre med Hythane®25 då man tagit hänsyn till skillnader i värmevärde.



Figur 29 *Emissioner vid start från hållplats och acceleration upp till 40 km/h*

Resultaten baseras på summan av emissioner mätta vid accelerationen under 24 sekunder. Registrering av mätvärde har skett 1 gång per sekund.

8.3 Diskussion

Emissionsmätningen som har genomförts inom projektet har inte haft som syfte att ta fram emissionsdata som kan jämföras med certifieringsvärden för andra fordon. Mätningarna har genomförts för att ta fram jämförbara värden mellan samma fordon då det drivs med naturgas och då det drivs med Hythane®25. De slutsatser som generellt kan dras av emissionsmätningen är:

- Bränsleförbrukningen och därmed CO_2-emissionerna minskar. Reduktion av bränsleförbrukningen på mellan 3 och 10% har uppmätts vilket är lägre än den reduktion som uppmätts under långtidsförsöken (20-30% reduktion).
- NO_X-emissionerna ökar vid drift med Hythane®. Detta är ett resultat av man vid omprogrammering av motorns styrsystem ej hamnade helt rätt avseende tändvinklar och bränsle/luftförhållande. Motorn programmerades om enligt de försök som genomfördes i laboratorium men sannolikt var ej motorns grundinställning helt oförändrad efter den långa tid som bussen varit i drift vilket medförde att motorns bränsle/luftförhållande ej blev så lågt som avsågs vilket kan ha gett den ökning av NO_X-emissioner som observerats.
- Emissioner av CO och HC minskade kraftigt vid drift med Hythane®. Minskningen hade sannolikt varit mindre om motorn programmerats för bibehållna NO_X-emissioner. Eftersom kolväteemissionena består till största delen av metan är det mycket positivt för fordonets totalt GHG-emissioner att kolväteemissionerna reduceras.

Det bör påpekas att bussmotorn inte var optimerad för Hythane med avseende på emissioner och inte nyservad vilket innebär att även CNG-utförandet inte var optimalt, vilket syntes på de relativt höga lambda-värdena. Man får också ta hänsyn till att bussen använts i trafik sedan 1996 och gått 53 000 mil. En ny/annan buss kan ge andra resultat, men generellt kan man säga att en inblandning av vätgas i naturgasen har en positiv inverkan på körbarheten, och ger mindre risk för misständningar. Emissionsberäkningarna bygger på mätta emissioner och luftmängdsmätning. Bränsleförbrukningen är beräknad med hjälp av dessa mätvärden.

9 Slutsatser

Två naturgasdrivna bussar har under två år drivits med blandningar av naturgas och vätgas som bränsle. Den största delen av proven har genomförts med inblandning av 8% vätgas vilket var den halt som kunde köras utan att några modifieringar i motorns styrsystem behövde genomföras. Fältproven har föregåtts av laboratorieförsök där motorernas egenskaper har testats vid inblandning av varierande halter av vätgas, upp till 25 vol-%. Vidare har en säkerhetsanalys av bussarnas konstruktion avseende kompatibilitet mot vätgas/naturgas-blandningar genomförts och säkerhetsinstruktioner för förare och underhållspersonal utarbetats. Fältproven har avslutats med emissionsmätningar på väg.
Följande slutsatser kan dras av det genomförda projektet:

- Bussarna har totalt tillryggalagt ca 160 000 km inom projektet och förbrukat 33 ton Hythane®8 och 6 ton Hythane®25. Några driftproblem med fordonen har ej förekommit och fordonen har ej krävt något onormalt underhåll.
- Bussarna behövde ej modifieras på något sätt när de drevs med Hythane®8 och kunde därför även drivas med naturgas. När fordonet skulle drivas med Hythane®25 byttes ett styrchip i motorn vilket innebar förändrat bränsle/luft-förhållande och minska förtändning. De ändrade styrparametrarna innebar att fordonet ej kunde köras några längre sträckor på naturgas varför tillgängligheten på tankningsanläggningen var av ännu större vikt än vid drift med 8% vätgas.
- Bussarna har ej uppvisat några som helst tendenser till vätgaspåverkan i bränslesystem eller andra skador som ev. skulle kunna orsakas av vätgastillsatsen. Bussarna har regelmässigt läcksökts utan några att några läckage kunnat indikeras.
- Bränsleförbrukningen för bussarna har följts upp med hjälp av körjournaler. Bränsleförbrukningen var 20-30% lägre med Hythane® jämfört med drift med CNG. Tillförlitligheten i bränsleförbrukningsstatistiken stördes av driftproblem med tankstationen vilket gjorde att bussarna ibland fick tanka ren naturgas.
- Den minskade bränsleförbrukningen + bränslets lägre kolinnehåll gjorde att CO_2-emissionerna från fordonet minskade med ca 35% vid drift med Hythane®8 och med ca 29% vid drift med Hythane®25. Andelen energi som tillförs bussen är med Hythane®8 2,3% och i Hythane®25 8,2% Anledningen till att minskningen är större vid 8% vätgastillsats än med 25% vätgastillsats är att motorn troligen ej blev helt optimalt inställd för hög verkningsgrad med 25% vätgastillsats.. Genom att låginblanda 8 vol-% vätgas i naturgas uppnås en CO_2-reduktionseffekt som är 15 ggr högre jämfört med att driva fordonet med ren vätgas. Som en initial åtgärd för CO_2-reduktion kan det därför vara ett mycket attraktivt sätt att använda vätgas innan bränslecellen nått kommersiell status.
- Vid drift med Hythane®25 har fordonet uppvisat tendenser till ökade NO_X-emissioner. Detta beror på att motorns styrsystem fick programmeras om i fält baserat på de resultat som tagits fram i laboratorium under statiska prov. NO_X-emissionerna är mycket känsliga för små ändringar i bränsle/luftförhållande och tändvinkel och resultaten från emissionsmätningarna i fält pekar på att inställningen av motorn ej blev helt optimal vid omprogrammeringen. Vid laboratorieprov var det inga som helst problem att bibehålla eller minska NO_X-emissionerna med minskade emissioner av oförbränt (HC och CO) och ökad verkningsgrad.
- Omställningen till att köra med Hythane®25 genomfördes under ca 4 h inkl. provkörning av det nya styrsystemet i trafik. Denna enkla konvertering var således mycket billig att genomföra och omfattade förutom ca 4 h arbetstid endast ett nytt elektronikkort i motorn. Totala konverteringskostnaden understiger 10 000 kr. Användning av Hythane® är, jämfört med användning av ren vätgas i bränslecellsfordon, således ett mycket kostnadseffektivt sätt att få fram fordon som kan använda vätgas som drivmedel.
- Genom låginblandning av vätgas i naturgas har vätgas kunnat introduceras på ett smidigt sätt eftersom de specifikationer som finns för naturgas vanligtvis inte har några gränsvärden för vätgas. Sådana gränsvärden kommer sannolikt att utarbetas inom EU för att underlätta gränsöverskridande handel med naturgas och i så fall måste en speciell standard för blandningar av vätgas och naturgas utarbetas. Som jämförelse kan nämnas att det i Sverige idag finns en nationell standard för biogas som fordonsbränsle vilken ej skulle kunna tillämpas om vätgas skulle tillåtas som tillsats.

10 Fortsatt verksamhet

Projektet som genomförts i Malmö visar att man med mycket enkla medel kan konvertera naturgasbussar för att kunna drivas med 25 vol-% vätgas. Det har även visats att bussar helt utan modifiering kan drivas med 8 vol-% vätgas. Som en naturlig följd av detta avses ytterligare ett antal aktiviteter att genomföras under 2006 – 2010 för att öka marknaden för vätgas och för att bygga upp ytterligare kunnande kring användningen av Hythane® och vätgas som drivmedel i lätta och tunga fordon.

- De förbättringar avseende bränsleförbrukning som bussarna uppvisade med 8% tillsats av vätgas var så avsevärda att man nu i Malmö överväger att driva ytterligare bussar vid busstterminalen på Industrigatan (i anslutning till vätgastankstationen) med 8% vätgas. För att kunna genomföra en sådan ombyggnad föreslås att en förstudie genomförs för att fastställa om en sådan ombyggnad är praktiskt och säkerhetstekniskt möjlig.
- I Malmöprojektet har bussar från 90-talet använts. I dessa blandas bränsle och luft före motorns turbokompressor. Ett sådant förfarande är sannolikt inte acceptabelt vid högre inblandning av vätgas. För att fastställa vilka motorkoncept som är lämpliga för hythanedrift och ren vätgasdrift föreslås ett forskningsprojekt där man 1) utformar motorkoncept för 0-100% vätgas (bränsleinsprutning, överladdning, kompression, förbränningsrum etc. 2) genomför praktiska prov med dessa motorkoncept och fastställer om det finns några optimala gassammansättningar avseende verkningsgrad och emissioner.
- MAN har tagit fram en bussprototyp med förbränningsmotor som drivs med 100% vätgas. Eventuellt kan ett sådant fordon finnas tillgängligt för tester i Sverige. Fältprov med ett sådant fordon kan i så fall med fördel genomföras i Malmö där nu landets enda tankstation för vätgas är belägen.
- Under 2006 bör det organiseras en internationell konferens med vätgasinblandning i naturgas som tema. Konferensen hålls i Malmö under hösten 2006 och resultaten från Malmöprojektet redovisas samtidigt som de internationella projekten som är på gång presenteras. Syftet med konferensen är att på sikt bilda en intressegrupp för Hythane® som kan agera kraftfullt mot myndigheter, leverantörer etc. för att öka intresset för användningen av Hythane®. Detta kan vara en möjlighet att på ett effektivt sätt, genom inblandning i naturgas, använda vätgas som drivmedel.
- I Malmö finns Sveriges för närvarande enda tankstation för Hythane® och vätgas. Det finns därmed möjlighet att genomföra flottförsök med Hythane® som drivmedel för personbilar. Under 2006 kommer möjligheterna till detta att undersökas och lämpliga personbilstyper att kartläggas. Före användning av Hythane® i personbilar bör försök göras i provbänk för att kartlägga påverkan på verkningsgrad, emissioner och andra motoregenskaper. På samma sätt bör även fordonens bränslesystem kartläggas med avseende på vätgaskompatibilitet.

Referenser

Ref 1 Hekkert, M. P., Faaij, A. P. C., Hendriks, F., Neelis, M. L. (2003), *Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development*, Journal of Energy Policy.

Ref 2 Strahle, W. C. (1993), *An Introduction to Combustion, Combustion Science and Technology Book Series*, Vol. 1, Gordon and Breach Publishers, Amsterdam.

Ref 3 Apostolescu, N., Chiriac, R. (1996), *A Study of Hydrogen-Enriched Gasoline in a Spark Ignition Engine*, SAE Paper No. 960603.

Ref 4 P. Einewall and B. Johansson: *Combustion Chambers for Supercharged Natural Gas Engines*, SAE Technical Paper 970221.

Ref 5 Per Tunestål, Patrik Einewall, Ola Stenlåås, Bengt Johansson: *Possible Short-Term Introduction of Hydrogen as Vehicle Fuel / Fuel Additive*, Which Fuels For Low CO2 Engines?, IFP Paris 2004.

Ref 6 Guerra, C.R. et al, *Natural Gas Supplementation With Refinery Gases And Hydrogen*, Symp. Papers: New Fuels And Advances InCombustion Technologies, Inst. Of Gas Technology, New Orleans USA, 26-30 March 1979.

SGC Svenskt Gastekniskt Center AB

Scheelegatan 3, 212 28 Malmö ● Tel 040-680 07 60 ● Fax 040-680 07 69
www.sgc.se ● info@sgc.se