

Fördjupad analys av vätgaskonvertering av arbetsmaskiner

Publik rapport



Författare: Björn Samuelsson, Uppsala universitet
Anders Pettersson, Luleå tekniska universitet
Datum: 2023-09-30
Projekt inom Delprogrammets namn alt strategisk satsning exempelvis
Trafiksäkerhet och automatiserade fordon

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning.....	3
2 Executive summary in English	4
3 Bakgrund	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	6
5 Mål	6
6 Resultat och måluppfyllelse	7
7 Spridning och publicering	16
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	16
7.2 Publikationer	16
8 Slutsatser och fortsatt forskning	16
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	17

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

I detta projekt var målet att undersöka tekniska och ekonomiska möjligheter för att konvertera en befintlig lastmaskin av typ Volvo L120F från diesel- till vätgasdrift. Vår studie visar att det tekniskt sätt är fullt möjligt att genomföra denna konvertering. En vätgasdriven förbränningsmotor har i princip samma grund som den dieseldrivna motorn. Vissa justeringar måste göras, dock inte mer än att en befintlig motor kan konverteras till vätgasdrift. Det finns idag företag som erbjuder konvertering av dieselmotorer till vätgasdrift.

Att motorerna är så pass lika innebär att det utrymmesmässigt går att genomföra bytet av motor. En större utmaning finns kring bränsletankar. Vätgasen har ett mycket energiinnehåll per viktenhet, ett kg vätgas innehåller lika mycket energi som 3.4 l diesel, samtidigt är tyvärr den volymetriska densiteten väldigt låg, vid 200 bars tryck väger 1 m³ vätgas cirka 17 kg. Detta innebär att arbetsmaskinen inte kommer att kunna bära med sig lika mycket bränsle som en dieseldriven dito. I vår fallstudie sattes målet att det skulle finnas nog med vätgas för att klar en halv dags arbete, dvs. maskinen fylls med vätgas på morgonen och vid lunch. Eftersom fyllning av vätgas går relativt fort ansåg vi inte detta vara någon stor nackdel. För att underlätta fyllningen bestämdes att arbetstrycket skulle vara 350 bar, på så sätt undviks behov av kylning och utrustningen blir enklare jämfört med 700 bars tryck, vilket tenderar att bli standard på lastbilar.

För att kunna genomföra en konvertering krävs självfallet tillgång på vätgas, ska det fylla en uppgift i omställningsarbetet krävs också att vätgasen är producerad på ett hållbart sätt, s.k. grön vätgas. Idag är produktionen av grön vätgas dock mycket liten, ny produktionskapacitet måste tillföras. Som ovan beskrivits har vätgasen stor volym i förhållande till energiinnehållet, detta medför stora utmaningar i utformningen av effektiva transport- och distributionssystem. I ett längre 10-årsperspektiv kommer vi troligen att se en utbyggnad av storskaliga pipelinesystem, i det kortare perspektivet är dock snarast lösningen att bygga regional eller lokal produktion av vätgas för att minimera transportbehovet. Som underlag för beräkningar av kapacitet och kostnader har vi i projektet studerat den anläggning Norwegian Hydrogen har sökt Klimatklivsmedel för. Denna anläggning är tänkt att placeras i Roma på Gotland. Våra analyser visar att priset för vätgas är på väg att vara i paritet med fossila bränslen, även om det fortfarande finns en del ekonomisk osäkerhet. En viktig faktor för att få en god ekonomi ligger i att ha en hög utnyttjandegrad av anläggningen, varför arbete med att utveckla marknaden är av största vikt.

En sista del i detta lokala vätgassystem är att kunna distribuera vätgasen på ett kostnadseffektivt sätt ut till arbetsställen. Som en del i projektet har vi utvecklat ett förslag på en enkel trailer för att distribuera vätgasen.

Hypotesen för projektet var att det är möjligt att konvertera en befintlig lastmaskin till vätgasdrift. Vi kan styrka att detta är tekniskt möjligt, de ekonomiska förutsättningarna är inte klarlagda på samma sätt. Tidiga projekt att konvertera lastmaskiner måste på något sätt subventioneras för att kunna genomföras. I projektet har ett CAD-underlag tagits fram för att underlätta ett möjligt genomförandeprojekt.

2 Executive summary in English

In this project, we have investigated the technical and economic possibilities for converting an existing Volvo L120F truck from diesel to hydrogen operation. Our study shows that it is technically possible to carry out this conversion. A hydrogen-powered internal combustion engine has basically the same basis as the diesel-powered engine. Some adjustments must be made, but no more than an existing engine can be converted to hydrogen operation. There are companies today that offer conversion of diesel engines to hydrogen operation.

The fact that the engines are so similar means that, in terms of space, it is possible to change the engine. A bigger challenge is around fuel tanks. Hydrogen has a high energy content per unit weight, one kg of hydrogen contains as much energy as 3.4 l of diesel, at the same time, unfortunately, the volumetric density is very low, at 200 bar pressure, 1 m³ of hydrogen weighs approximately 17 kg. This means that the work machine will not be able to carry as much fuel as a diesel-powered ditto. In our case study, the goal was that there would be enough hydrogen to complete half a day's work, i.e. the machine is filled with hydrogen in the morning and at lunch. Since filling with hydrogen is relatively fast, we did not consider this to be a major disadvantage. To facilitate filling, it was decided that the working pressure would be 350 bar, thus avoiding the need for cooling and making the equipment simpler compared to 700 bar pressure, which tends to be standard on trucks.

In order to be able to carry out a conversion, of course, access to hydrogen is required, it must fulfill a task in the conversion work, it is also required that the hydrogen is produced in a sustainable way, so-called green hydrogen. Today, however, the production of green hydrogen is very small, new production capacity must be added. As described above, hydrogen gas has a large volume in relation to the energy content, this entails major challenges in the design of efficient transport and distribution systems. In a longer 10-year perspective, we will probably see an expansion of large-scale pipeline systems, in the shorter perspective, however, the most immediate solution is to build regional or local production of hydrogen to minimize the need for transport. As a basis for calculations of capacity and costs, in the project we have studied the facility Norwegian Hydrogen has applied for Klimatklivsmedel for. This facility is supposed to be located in Roma on Gotland. Our analyzes show that the price of hydrogen is on the way to parity with fossil fuels, although there is still some economic uncertainty. An important factor in achieving a good economy lies in having a high utilization rate of the facility, which is why work on developing the market is of the utmost importance.

A final part of this local hydrogen system is to be able to distribute the hydrogen in a cost-effective manner to workplaces. As part of the project, we have developed a proposal for a simple trailer to distribute the hydrogen gas.

The hypothesis for the project was that it is possible to convert an existing loader to hydrogen operation. We can prove that this is technically possible, the financial conditions are not clear in the same way. Early projects to convert loaders had to be subsidized in some way in order to be implemented. In the project, a CAD background has been produced to facilitate a possible implementation project.

3 Bakgrund

Arbetsmaskinernas andel av växthusgaser uppgår till cirka 6% av de totala utsläppen i Sverige. Preliminär statistik visar på att under 2022 skedde en minskning jämfört med året före med 11% [1]. Dessa siffror är dock ganska osäkra då de baseras på leveranser av bränslen, vilket inkluderar såväl arbetsmaskiner som vägtrafik. En stor del av denna minskning kan antas vara en effekt av ökad inblandning av biodrivmedel. Sett över en längre period har utsläppen från arbetsmaskiner ökat sedan 1990, och uppgår idag till över 1 miljon ton CO₂-ekvivalenter.

Omställningen av sektorn har hittills gått relativt långsamt, huvudsakligen sker omställningen genom en ökad användning av biobränslen. I projektets samarbetsföretag Roma Grus nåddes under 2021 en fullständig omställning till fossilfrihet genom användning av HVO och RME. På grund av kostnadsskäl och bristande tillgång på biodrivmedel har man dock nu återgått till större andel fossila bränslen.

För att klara omställningen till en fossilfri sektor krävs flera olika lösningar, det finns inte en lösning som kommer att klar alla segment inom arbetsmaskiner. Mindre maskiner kan med fördel batterielektrifieras, är maskinerna relativt stationära kan de elektrifieras med direkt anslutning till nätet. Det finns dock ett relativt stort segment där elektrifiering med hjälp av batterier inte fungerar, på grund av att batterier väger för mycket och/eller att laddning tar för lång tid. Sådantillvida inte maskinerna är väldigt stationära – och skulle då kunna elektrifieras med hjälp av anslutning med kabel – krävs då någon form av fossilfritt bränsle, vilket kan vara biobränsle, e-bränsle eller vätgas.

Detta projekt fokuserar på användningen av vätgas och är en fortsättning på förstudien *Vätgasbaserade bränslen* [2]. Vätgas är en utmärkt energibärare med ett energiinnehåll på 119 MJ/kg vilket kan jämföras med diesel som innehåller 43 MJ/kg. Eftersom vätgas inte finns naturligt måste det produceras, vilket kan göras på flera olika sätt. Idag produceras mer än 95% av vätgasen genom ångreforming av naturgas, vilket innebär att den de facto är fossil, s.k. grå vätgas. Det vanligaste sättet att framställa fossilfri vätgas är genom att med elektrolys spjälka vatten i vätgas och syre, framställs vätgasen med förnyelsebar el fås förnyelsebar vätgas, s.k. grön vätgas. Typiskt krävs ca 50-55 kWh el för att framställa 1 kg vätgas, vilket innehåller 33 kWh, vi har därmed en verkningsgrad på drygt 60%.

Målet med detta projekt är att undersöka hur en fossildriven befintlig lastmaskin kan konverteras till [fossilfri] vätgasdrift, vilket förutsätter att det finns tillgång till grön vätgas. Den producerade vätgasen kan användas dels för att med hjälp av bränsleceller producera el, och därmed fås ett eldrivet fordon, dels i en förbränningsmotor och mekanisk kraftöverföring.

Vätgasen kan användas för framdrift dels genom att med bränsleceller producera el, och på så sätt fås ett eldrivet fordon, dels i en förbränningsmotor kombinerat med mekanisk kraftöverföring. Då detta projekt studerar hur en befintlig lastmaskin kan konverteras är det naturligt att välja lösningen med en vätgasdriven förbränningsmotor. Förbränningsmotorn har förvisso lägre verkningsgrad än bränsleceller, men genom att välja detta alternativ begränsas ombyggnaden av maskinen till ett motorbyte och installation av gasttankar. Vidare kräver inte förbränningsmotorn, till skillnad från bränslecellen, ren vätgas. Ytterligare potentiell fördel med förbränningsmotorn jämfört med bränslecell är att förbränningsmotorn är effektivare på att föra bort överskottsvärmen.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med projektet är att tydliggöra möjligheter och utmaningar kopplade till segmentet arbetsmaskiner förbränningsmotorer för vätgas. Givet att de tekniska och ekonomiska förutsättningarna är tillräckligt positiva, förbereda för en fullskalig pilotstudie.

Vidare syftar projektet till att konkretisera införandet av vätgas som ett potentiellt bränsle samt även belysa möjligheter kring en lokal/regional produktion av förnyelsebart bränsle. Projektet kommer även att belysa indirekta effekter av en lokal/regional vätgastillverkning såsom överskott av värme och syrgas.

Projektets hypotes är att förbränningsmotorer för vätgas är relevanta för vissa användningsområden, framför allt inom ett visst tidsfönster för att effektivt kunna utnyttja gjorda investeringar i utveckling av maskiner och produktionssystem.

5 Mål

Projektets mål var att förbereda och möjliggöra konvertering av fossildrivna lastmaskiner och hamntraktorer till vätgasdrift. Under projektets gång har vi tvingats begränsa studien till att enbart omfatta en lastmaskin. För att uppnå målet ska projektet

- Definiera hur en konvertering av en dieselmotor för en lastmaskin av typ Volvo L120 kan ske
- Uppskatta tekniska prestanda för den konverterade motor
- Dimensionera vätgastankar för maskinen
- Studera möjligheten till lokal/regional produktion av vätgas
- Studera enkla lösningar för att transportera vätgas
- Uppskatta kostnader investerings- och driftskostnader för den konverterade maskinen
- Analysera värdet av vätgasproduktionens biprodukter, värme och syrgas

6 Resultat och måluppfyllelse

Konvertering av förbränningsmotor till vätgasdrift

I princip alla förbränningsmotorer (ICE) kan konverteras till att använda vätgas i stället för traditionella bränslen så som bensin eller diesel. Komplexiteten varierar beroende på om det är en diesel eller bensinmotor samt om man vill ha direkt eller indirekt insprutning av vätgasen.

Varför H₂ ICE, möjligheter och utmaningar?

Med sitt höga energiinnehåll är förnyelsebar, grön, vätgas en möjlig väg för omställningen till fossilfria transportsystem. I mobila applikationer kan vätgasen användas såväl i förbränningsmotorer som i bränslecell, med sina respektive för- och nackdelar.

Fördelarna med en förbränningsmotor bland annat att det är lätt att bli av med spillvärmen eftersom kylvätsketemperaturen är hög. Det är också beprövad teknik som kan tillverkas i befintliga produktionssystem, därmed kan kapital investerat i konstruktioner och produktionssystem utnyttjas samtidigt som fossilfria lösningar introduceras.

En vätgasdriven förbränningsmotor har en verkningsgrad som är i paritet med en dieseldriven dito [3], ca 40-50%. Används i stället vätgasen i bränsleceller fås en högre verkningsgrad, ca 60%. Ytterligare en fördel med bränsleceller är att drivlinan kan göras lättare då det i detta fall är elektrisk framdrift. En vätgasdriven förbränningsmotor kan ge upphov till NOX-utsläpp [4], vilka kan behöva hanteras med efterbehandling. Ytterligare potentiell nackdel med förbränningsmotorer är att det kommer att vara ett litet men mätbart utsläpp av CO₂ p.g.a. förbränning av motorolja. De exakta gränserna för att en motor ska få klassas som en nollutsläppsmotor är inte fastställda. Om det blir ett problem att klara det så finns det tekniker för att ersätta fossil basolja i motoroljan med förnyelsebar råvara i sådan mängd så att kravet klaras.

Förutsättningar för konverteringen

I denna rapport fokuserar vi på konvertering av 6-cylindringa dieselmotorer i storleksordningen 7-8 L slagvolym, dessa återfinns i hjullastare i 20 tons klassen.

I denna studie har vi använt oss av en Volvo L120F som plattform för en demonstrator och beräkningar. I tabell 1 återfinns de viktigaste prestandauppgifterna för L120F:s motor.

Tekniska data		Enhet
Benämning	Volvo D7E LAE3	-
Cylinderantal	6	st
Cylindervolym	7,150	L
Max effekt	179	kW
Max Vridmoment	1059	Nm

Tabell 1. Tekniska data för Volvo D7E LAE3

Nödvändiga ändringar vid konvertering

Vid konvertering av en dieselmotor behöver ett antal delsystem modifieras eller kompletteras jämfört med den ursprungliga konfigurationen. Ett antal komponenter måste modifieras och andra tillföras [5]

. Kortfattat kan man lista modifieringarna enligt nedan.

- Ny styrelektronik, ECU med tillhörande programvara
- Spjällhus, Luftmassemätare
- Tändstift, tändsystem
- Nya injektorer, bränslesystem
- Positiv vevhusventilation, minskad explosionsrisk
- Sensorer: Knacksensor, lambda-sensor, diverse gassensorer

För att få det att fungera måste topplocket anpassas och bearbetas för att spridare och tändstift ska kunna monteras. Motorns bränslesystem måste även kopplas ihop med maskinens gastank.

Det är även troligt att turboladdaren kan behöva uppgraderas till en modell som är bättre anpassad för de förändrade luftvolym och avgasflödena.

Den konverterade motorn beräknas få liknande prestanda som originalmotorn. Det finns ett antal aktörer som erbjuder sådana konverteringar men de är mestadels att betrakta som "start-ups", därmed är tillgängligheten för konverteringar av befintliga motorer mycket små. Deras kapacitet går i huvudsak åt till att driva pilotprojekt med de större etablerade fordonstillverkarna.

Projektet har tittat närmare på vad som krävs i form av utveckling, bearbetning och mekaniskt arbete och kommit fram till följande.

Att ta fram ett kit där man konverterar sin befintliga lastmaskin är fullt möjligt. Dock kräver detta ett omfattande arbete för att utveckla konverteringsatsen så pass enkelt att montera så att det kan göras hos maskinägaren.

Att sätta in en utbytesmotor som konverterats av en 3:e parts aktör kan i många fall vara mer kostnads och tidseffektivt jämfört med att konvertera den befintliga motorn.

Än så länge är konvertering till vätgasdrift ganska ovanligt och under stark utveckling. Man kan jämföra med konvertering till Naturgas/Biogas som är en mogen etablerad marknad. I detta segment finns ett flertal aktörer som har färdiga lösningar för att konvertera allt från små elverk till personbilar, traktorer och stationära motorer. Eftersom detta är en mogen marknad med flera aktörer så är kostnaden för en sådan konvertering till Naturgas/Biogas relativt låg.

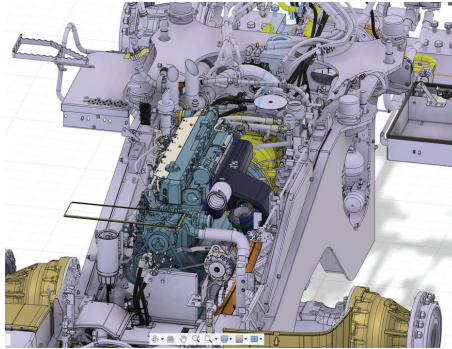
Projektet förutspår att med tiden kommer en liknande situation att uppstå för vätgaskonvertering av olika motorer, dock kommer kostnaden att vara högre än för Naturgas/Biogaskonverteringar pga högre tryck och mer avancerad teknik i tex. bränsleinjektorer och övrig kringutrustning.

Digitalt konstruktionsunderlag

Som ett förberedande steg för att kunna genomföra en konvertering eller ett motorbyte införskaffades en digital modell av en lastmaskin i lämplig storlek. Underlaget importerades till CAD systemet NX samt Fusion 360 för att kunna arbetas vidare med.

Planen var att ta fram ritningar för motorns alla interface så som motorfästen mot ramen, mot växellådan samt noggrant bestämma tillgängligt utrymme. Om projektet fortsätter med att konvertera en lastmaskin i verkligheten så kommer det CAD modellen vara en stor tillgång.

Projektet bedömer att det inte kommer vara några problem att rymma hela installationen, förutom gastanken, under den befintliga motorhuven.



Figur 1, Motorinstallationen i CAD modellen.

Vätgasdriven utbytesmotor

Ett alternativ till att konvertera lastmaskinens befintliga motor kan vara att byta ut den mot en motor som är avsedd att drivas med vätgas. Detta segment är relativt nytt och ett antal av de etablerade motortillverkarna har annonserat att de kommer att börja erbjuda sådana motorer. Största problemet är tillgängligheten, i skrivande stund finns inga kommersiellt tillgängliga motorer. Det är stor konkurrens om de fåtal prototyper som har tagits fram, dessa är främst reserverade för stora viktiga aktörer. Detta innebär att sannolikheten att ett mindre oberoende forskningsprojekt ska komma en vätgasmotor är mycket små. I detta projekt har inte kunnat komma över någon vätgasmotor.

Projektet bedömer utsikterna att kunna integrera en utbytesmotor mot en befintlig maskin som goda. Att göra adapterar för att montera motorn i ramen och mot växellådan bedöms att vara relativt enkelt med hjälp av CAD underlaget. För nyare lastmaskiner så kan problem uppstå genom att integrera den nya motorns kontroll och styrsystem mot det befintliga systemet för själva maskinen. För lite äldre maskiner så som L120F är det inte något problem. Om man kan involvera tillverkaren av maskinen att vara behjälplig att ta fram ett konverterings kit så bedöms det fullt görbart att integrera en utbytesmotor även med senaste maskiner på ett fullgott sätt.

Tanksystem

Vätgas har ett högt energiinnehåll per kilo, 119 MJ/kg, vilket jämföras med diesel som har ett energiinnehåll på 43 MJ/kg. Detta innebär att 1 kg vätgas har samma energiinnehåll som 3,4 liter diesel. När vi jämför kostnader kommer vi därför att tala om dieselevivalenter, där 1 kg vätgas är lika med 3,4 dieselevivalenter.

Den volymetriska densiteten för vätgas är dock signifikant lägre än för andra bränslen, framförallt jämfört med fossila. I rumstemperatur och omgivande tryck innehåller 1 m³ vätgas endast 10,7 MJ och väger 0,09 kg. Under dessa förhållanden motsvarar därmed 1 m³ vätgas 0,3 liter diesel. En uppenbar slutsats är att i praktiken kunna använda vätgas som bränsle måste den volymetriska densiteten ökas. Detta kan ske på tre olika sätt: komprimerad i gasfas, i förvätskad (kryogen) fas eller lagrad i en metallhydrid.

Metallhydrider adderar relativt mycket vikt per lagrad mängd vätgas varför detta anses som en orealistisk lösning vid konvertering av en befintlig maskin. Att lagra vätgas såväl i en metallhydrid som i flytande fas ökar komplexiteten och därmed kostnaden, givet att det fysiska utrymmet är tillräckligt är därför lagring av vätgas som komprimerad gas att föredra.

I detta projekt sattes målsättningen att den konverterade lastmaskinen skulle kunna köras minst i 4 timmar utan att fylla vätgas.

Roma Grus AB har i sin maskinpark två maskiner av typ Volvo L120. Tabellen nedan redovisar data för dessa två maskiner

Maskin	Maskintyp	Vikt (ton)	Årsmodell	h/år	Bränsleförbrukning (l/h)	Årsförbrukning (l)
Volvo L120G	Hjullastare	22	2014	1800	13	23 400
Volvo L120F	Hjullastare	21	2008	1000	14	14 000

Tabell 1

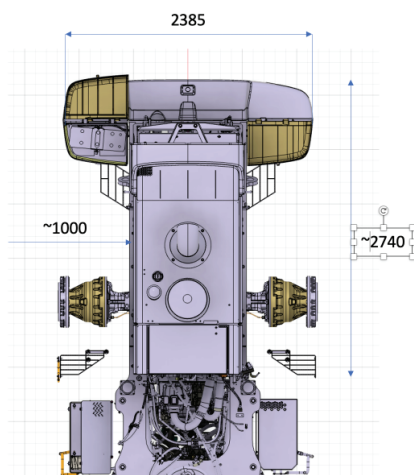
Givet den antagna omräkningsfaktorn 3.4 mellan diesel och vätgas och en antagen förbrukning av 14 l/h, behövs minst 16.6 kg vätgas i tankarna för att klar 4 timmars arbete.

Bränsletankarna för vätgas kommer att utgöras av gascylindrar, typiskt kolfiberarmerade kompositcylindrar med en diffusionstät innerliner. Ju högre tryck som används, desto mindre volym krävs, dock medför högre tryck dels större hållfasthetskrav på cylindrarna, dels högre tryck i tankstationen, vilket leder till högre kostnader. I vår fallstudie där vi undersöker möjligheten att konvertera en befintlig lastmaskin till vätgasdrift har vi av valt att använda cylindrar med 350 bars kapacitet framför allt för att underlätta fyllning av dem.

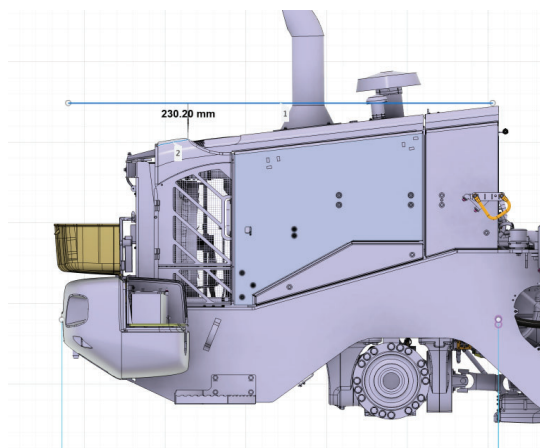
Utrymmet att placera vätgastankar på en befintlig lastmaskin är relativt begränsad, vi utgår även från att kommersiellt tillgängliga cylindrar ska användas. För att inte öka maskinens yttre mått finns i princip bara en placering av vätgascylindrarna, bakom hytten på motorhuven.

Bränsletankarna för vätgas kommer att utgöras av gascylindrar, typiskt kolfiberarmerade kompositcylindrar med en diffusionstät innerliner. Ju högre tryck som används, desto mindre volym krävs, dock medför högre tryck dels större hållfasthetskrav på cylindrarna, dels högre tryck i tankstationen, vilket leder till högre kostnader. I vår fallstudie där vi undersöker möjligheten att konvertera en befintlig lastmaskin till vätgasdrift har vi av valt att använda cylindrar med 350 bars kapacitet framför allt för att underlätta fyllning av dem.

Utrymmet att placera vätgastankar på en befintlig lastmaskin är relativt begränsad, vi utgår även från att kommersiellt tillgängliga cylindrar ska användas. För att inte öka maskinens yttre mått finns i princip bara en möjlig placering av vätgascylindrarna, bakom hytten på motorhuven. Motorhuven kommer att modifieras på ett antal sätt. Avgassystemet kommer att dras om så att avgaserna släpps ut nedtill den bakre delen av maskinen i stället för genom en "skorsten" uppåt. Även andra genomföringar så som luftintag mm flyttas så en helt ren ovansida på motorhuven erhålls.



Figur 2



Figur 3

En möjlig kommersiellt tillgänglig cylinder för denna applikation är Luxfer G-Stor H2, en kolfiberarmerad kompositcylinder med innerliner i metall.



Bild 1

Alternative fuel: G-Stor™ H2 – carbon composite type 3 cylinders

(METRIC)									Metric Imperial
Part number	Service pressure bar	Length mm	Diameter mm	Weight kg	Water volume l	Total weight tank and fuel kg	H2 capacity kg	Neck mount	Thread size
Q042H35	350	740	340	26	42	27.01	1.01	No	2.000-12UN-2B
Q095H35	350	1458	340	48	94	50.27	2.27	No	2.000-12UN-2B
V074H35	350	900	400	39	74	40.79	1.79	No	2.000-12UN-2B
W150H35	350	1614	415	73	150	76.63	3.63	Yes	2.000-12UN-2B
W205H35	350	2110	415	95	205	99.96	4.96	Yes	2.000-12UN-2B
W322H35	350	3165	415	138	322	145.79	7.79	Yes	2.000-12UN-2B

Bild 2

Det befintliga utrymmet skulle i längdled rymma cylindrar av typen W205H35, vilka har ett arbetstryck på 350 bar.

Dimension			Tryck			
L	D	Vol	Antal cyl	200	350	700
				15,045	24,2	42
2,11	0,415	0,205	4	12,3	19,8	34,4
				41,9	67,5	117,1
				2,8	4,8	7,8
						Densitet
						Kg H2
						Dieselekv
						Arbetstimmar

Tabell 2

Vid 350 bars tryck och fyra cylindrar fås en total maxvolym om 19,8 kg vätgas, vilket tillåter ca fem timmars arbete med maskinen. Priset för dessa cylindrar inklusive ventiler och kopplingar är enligt Luxfer (230927) €34.500, till detta tillkommer montering i ett rack, vilket uppskattas till €2.000

Slutsatsen från ovan är att det går tekniskt att placera vätgascylindrar på en lastmaskin vilka skulle ge energi tillräckligt för cirka fem timmars arbete. Kostnaden för cylindrarna är relativt hög, vilket kan förklaras med att tillverkningsserierna ännu är väldigt låga. Det ska också ytterligare poängteras att vårt arbete har enbart studerat vad som är tekniskt möjligt, vi har inte gjort någon analys av vilka regelverk som är tillämpliga och vilka krav som ställs i dem för installation av vätgas på lastmaskinen.

Vätgastillverkning

För att en konvertering av lastmaskiner till vätgasdrift ska göra någon klimatnytta krävs att vätgasen har ett icke-fossilt ursprung, dvs inte tillverkad genom ångreforming av naturgas. Ska vätgasdriften tillföra ett klimatvärde måste den tillverkas med elektrolys, med den nuvarande svenska elmixen är den då till 98% fossilfri.

Tillgången på fossilfri (grön) vätgas är dock fortfarande väldigt begränsad. Idag finns endast ett fåtal anläggningar som tillverkar vätgas genom elektrolys, merparten med en effekt under 1 MW. Längre var AGAs anläggning i Sandviken störst med två elektrolysörer vardera på 1.5 MW. Under hösten 2023 har dock Ovako Steel färdigställt en elektrolysör med total kapacitet på 20 MW. I de stålprojekten H2GS och Hybrit planeras för ytterligare betydligt större anläggningar, i H2GS fall minst 600 MW.

Med vätgasens låga volymetriska densitet är det förenat med stora utmaningar att transportera den långa sträckor. Transport av vätgas på väg sker i så kallade tube-trailers, där vätgasen typiskt är komprimerad till 500 bar och en trailer kan transportera ca 1 ton vätgas (bild 3). Som jämförelse lastar ett tankbilsekipage (bild 4) ca 20 ton på bilen och ytterligare ca 40 ton på släpet.



Bild 3



Bild 4

Även givet det faktum att vätgasen har ett betydligt högre energiinnehåll per viktenhet, så blir transporteffektiviteten för vätgas betydligt sämre än motsvarande dieselförtransport. Omräknat i dieselekvaliteter kan tankbilsekipaget transportera ca 15-20 gånger mer än vätgastrailern. Ett sätt att öka transporteffektiviteten vore att transportera vätgasen i flytande, kryogen, form. Den volymetriska densiteten ökar då till ca 70 kg/m³, vilket fortfarande är betydligt lägre än för fossila bränslen. Att göra vätgasen kryogen kräver dock stora investeringar och ökar energiåtgången varför det i detta fall är utanför rimliga ramar att ha ett kryogent system.

Givet att vätgasens användning kommer att öka som förutspås, kommer på längre sikt pipelinesystem att byggas för att kunna producera vätgas storskaligt och samtidigt få en hög transporteffektivitet. Flera sådana storskaliga projekt har konceptuellt presenterats, *H₂ESIN* [6] kring bottniska viken och *Baltic Hydrogen Collector* [7] som sträcker sig genom östersjön ned till Tyskland.

För att i närtid kunna introducera vätgas i mindre skala, att exempelvis kunna användas i arbetsmaskiner, krävs dock småskaligare regionala eller lokala lösningar för produktion och distribution. För detta projekts fallstudie, Roma Grus på Gotland, gäller detta i synnerhet. Vätgas som kontinuerligt ska användas på Gotland måste av praktiska och ekonomiska skäl produceras på Gotland.

Norwegian Hydrogen A/S projekterar i samarbete med Roma Grus AB för närvarande en vätgasproduktion i Roma på Gotland. Denna anläggning har en tänkt effekt på 3 MW och kan som mest producera ca 1.5 ton vätgas per dygn.

I tabell 2 redovisas estimerade investeringar för denna anläggning. Posten utbytesstackar refererar till att den förväntade livslängden för stackarna uppskattas till ca 80-90.000 timmar [8], övriga komponenters livslängd estimeras till 20 år.

De estimerade operationella kostnaderna (förutom el) fördelar sig enligt tabell 3. Priset som en funktion av anläggningens utnyttjandegrad och elpris visas i tabellerna 4 och 5

Utnyttj.grad	Kg H2/år	Dieselekv./år	Pris SEK/kg H2	Dieselekv. Pris
100%	547 500	1 861 500	53,6 kr	15,8 kr
80%	438 000	1 489 200	60,2 kr	17,7 kr
60%	328 500	1 116 900	71,1 kr	20,9 kr
40%	219 000	744 600	92,8 kr	27,3 kr
20%	109 500	372 300	158,2 kr	46,5 kr

Tabell 2

Utnyttj.grad	Kg H2/år	Dieselekv./år	Pris SEK/kg H2	Dieselekv. Pris
100%	547 500	1 861 500	67,4 kr	19,8 kr
80%	438 000	1 489 200	73,9 kr	21,7 kr
60%	328 500	1 116 900	84,8 kr	24,9 kr
40%	219 000	744 600	106,6 kr	31,3 kr
20%	109 500	372 300	171,9 kr	50,6 kr

Tabell 3

Komponent	CAPEX (MSEK)
Elektrolysör	43
Kompressor	5,5
Projektleddning	4,3
Nätanslutning	2,2
Mark	2
Markarbete	2,2
Utbytesstackar	12
Total	71

Tabell 4

	OPEX MSEK/år
Administration	0,4
Försäkringar	0,2
Drift och underhåll	3,7
Serviceavtal	2,5

Tabell 5

Nedanstående antagande har gjorts för prisberäkningar:

Elpris: 50 resp. 75 öre/kWh

Ränta: 5%

Avskrivningstid: 20 år

Vinstmarginal: 10%

Observera att ovanstående beräkningar inkluderar kostnader till och med elektrolysören, kostnader för eventuell distribution och fyllningsutrustning är inte medräknade.

Som framgår av tabellerna ovan är anläggningens utnyttjandegrad kritisk för det ekonomiska utfallet. Att skapa en marknad är därför av yttersta vikt, för att nå en utnyttjandegrad på 80% krävs en årlig avsättning av strax under 450.000 kg/år. För att nå denna avsättning krävs i storleksordningen 20 – 40 vätgasdrivna tunga lastfordon eller lastmaskiner.

Distribution

I fallföretaget Roma Grus AB arbetar i många fall lastmaskinerna i bergtakter och andra arbetsställen belägna på sådant avstånd att bränsle måste levereras ut till dessa platser. Idag görs detta med mobila dieseltankar. För att vätgasdrivna arbetsmaskiner ska kunna vara

realistiskt alternativ måste därmed distributionen kunna lösas på ett praktiskt och kostnadseffektivt sätt.

Som en del i detta projekt utvecklades i ett studentprojekt en enklare lösning för transporter ut till arbetsställen. Kriterierna för projektet var att ta fram underlag för en transportlösning som på ett kostnadseffektivt och säkert sätt löser detta problem. I förslaget *Vätgastransport3500* (bild 5) presenteras ett släp med totalvikt 3.458 kg som kan hanteras av en person med BE-körkort och nödvändig ADR-kompetens. Släpet har en totallängd på 7.5 m och har lastytan 2.44 x 6.02 m. Ekipaget är utrustat med 6 stycken gascylindrar för 250 bars tryck med längd 5.7 m och diameter 0.65 m, total kan ekipaget transportera 166.8 kg vätgas, vilket motsvarar ca 570 liter diesel. Givet den förbrukningsdata som redovisas av Roma Grus, är detta tillräcklig mängd för åtta timmars drift av fem arbetsmaskiner typ Volvo L120F.

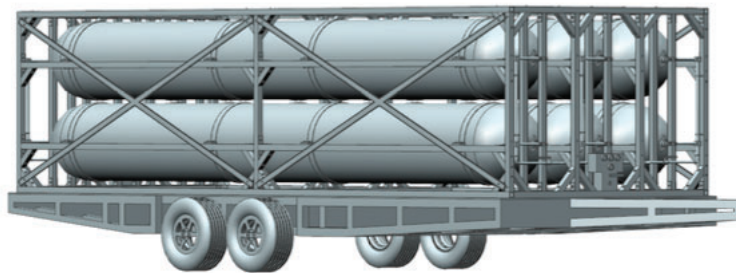


Bild 5

Kostnaden för denna lösning är uppskattad till 1.030.000 SEK, i detta ingår inte utrustning för tankning av fordonen. Denna lösning kan jämföras med en befintlig containerbaserad lösning från norska UMOE Advanced Composite AS som lastar 435 kg vätgas med en totalvikt på 17 ton (Bild 6). Priset för denna är ca 2.4 MSEK.

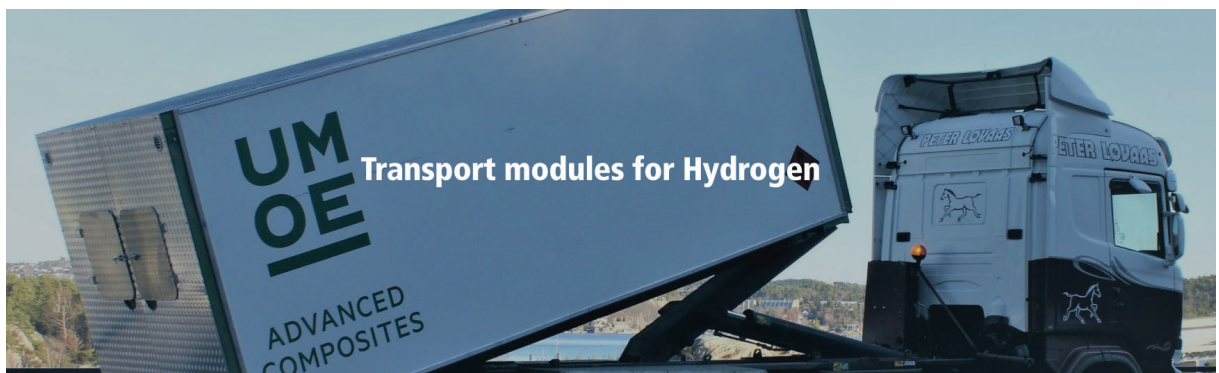


Bild 6

Biprodukter från vätgasproduktion

Produktion av vätgas genom elektrolys har en verkningsgrad om ca 60-70%, med 50-55 kWh tillförd elektrisk energi produceras 1 kg vätgas, vilket innehåller 33 kWh energi. En stor del av energiförlusterna är att värme avges genom vatten med 60° temperatur. Potentiellt skulle denna energi kunna användas för uppvärmning av lokaler och ytor.

Den andra biprodukten från vätgasproduktion är syrgas, för varje kg vätgas fås 8 kg syrgas. Användningsområden för syrgasen kan vara att förbättra förbränningsprocesser eller att användas i fiskodlingar. Där vätgas kommer att produceras i större skala kan syrgasen användas för att syresätta döda havsbottnar.

I den vätgasanläggning som Norwegian Hydrogen nu uppför i norska Hellesylt kommer överskottsvärmen att användas för att värma upp en fotbollsplan och syret kommer att användas i en lokal fiskodling.

En ökad användning av vätgasproduktionens biprodukter kommer att öka systemets totala verkningsgrad och kan vara viktigt för att erhålla tillräckligt goda ekonomiska förutsättningar.

Summering av resultaten

Projektet har visat att det finns tekniska förutsättningar för att konvertera befintliga lastmaskiner till vätgasdrift. Tekniska lösningar för att möjliggöra detta finns i viss mån kommersiellt, eller nästan kommersiellt, tillgängligt. De ekonomiska förutsättningarna är fortfarande något oklara. För vissa komponenter som gascylindrarna finns en kostnad, man kan dock förvänta sig att priset kommer att minska när längre serier kan produceras. Priset på utbytesmotorer och konverteringskit är mycket svårbedömt då dessa för närvarande byggs i princip hantverksmässigt i enstaka exemplar.

Estimaten kring kostnaden för vätgas visar dock att priset för vätgas kan förväntas vara i paritet med fossila bränslen, skatter exkluderat.

För att vätgas ska kunna introduceras inom transport och anläggningssektorn krävs att inköp eller konvertering av fordon subventioneras under en introduktionsfas.

Genom detta projekt har kunskap kring vätgasdrivna fordon spridits regionalt på Gotland till ett flertal större aktörer. En konsekvens av projektet är att Norwegian Hydrogen AS har ansökt i Klimatklivet om stöd för att uppföra en vätgasproduktion i Roma i samarbete med Roma Grus AB.

När projektet ursprungligen planerades (innan ansökan) fanns en förhoppning om att praktiskt genomföra en konvertering av en befintlig arbetsmaskin. Tyvärr visade det sig vara mycket svårt att få tillgång till en utbytesmotor. På den positiva sidan kan dels nämnas det stora intresset från regionala aktörer. På något års sikt är vi övertygade om att konvertering av lastmaskiner är en möjlighet för omställningen av denna bransch.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Forskningsarbetet har ökat kunskapen kring vätgasdrivna förbränningsmotorer
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt		
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Det finns ett intresse hos medverkande företag att genomföra ett pilotprojekt där en konvertering genomförs. Detta är avhängigt hur finansiering kan lösas och tillgången på vätgas
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

En vetenskaplig artikel kring forskningsprojektet kommer att färdigställas under Q1 2024.
Ett seminarium för branschen kring resultaten är planerat till november 2023

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Den viktigaste slutsatsen av detta arbete är att det är tekniskt möjligt att konvertera arbetsmaskiner till vätgasdrift. Vidare ser vi att kostnaden för vätgas som bränsle närmar sig punkten då det, förutom skatter, är i paritet med fossila bränslen och biobränslen. Det finns behov av att via subventioner stötta tidiga initiativ inom vätgasproduktion. Investeringarna för att sätta upp en vätgastillverkning kommer att sjunka, men till dess detta händer behövs Klimatklivet och liknande insatser.

För fordonen ser vi att det finns ett snabbt ökande intresse kring vätgas som bränsle för tunga fordon, arbetsmaskiner inkluderat. Vår slutsats är också att det finns ett behov av att åtminstone under en tid framöver använda vätgasen i förbränningsmotorer. Det finns dock ännu bara några få kommersiellt tillgängliga arbetsmaskiner på marknaden. Detsamma gäller för motorer, det finns ett stort intresse bland tillverkare, men ännu sker det i en utvecklingsfas. Det är därför oerhört svårt att estimerat kostnaderna för att konvertera en arbetsmaskin.

I dagsläget är det oklart om en övergång till vätgasdrivna arbetsmaskiner med förbränningsmotorer omfattas av de stöd som finns för omställningen. I vår syn ska även förbränningsmotorer omfattas då de i vissa segment är bästa lösningen för omställningen. En översyn av regelverken är därför viktig.

Ytterligare en viktig del i ett vätgassystem är distributionen av vätgasen ut till arbetsställen. Det är nya utmaningar att hantera gasformiga bränslen, i Sverige har vi dessutom ganska liten erfarenhet av att använda gas i ett generellt perspektiv. Det måste utvecklas säkra och enkla lösningar på att internt transportera vätgas, en "farmartank" för vätgas behövs.

Vätgas har en potential att bli en viktig del i omställningen av transport- och anläggningssektorn, det finns dock ett antal tekniska och ekonomiska utmaningar att lösa. Det behövs genomföras forsknings- och utvecklingsarbeten för att dels hantera dessa utmaningar, dels för att visa branschen vilka möjligheter som finns.

Ett större projekt tillsammans med större industriella partners där en konvertering genomfördes skulle vara av stort värde.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Förstudiens har utförts av:

Björn Samuelsson, projektledare, Uppsala universitet

Anders Pettersson, Luleå tekniska universitet

I samarbete med:

Magnus Lindby, VD Roma Grus AB

Emil Höglund, Roma Grus AB

Jens Berge, VD Norwegian Hydrogen AS

Per Öyvind Voie, Norwegian Hydrogen AS

Jonas Åkermark, Sverigechef Norwegian Hydrogen



Referenser

1. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-arbetsmaskiner/>
2. Samuelsson B., Pettersson A: Vätgasbaserade bränslen för arbetsmaskiner, FFI-rapport 2022
3. Kang-da Wang, Bai-gang Sun, Qing-he Luo, Qian Li, Xuesong Wu, Tiegang Hu, Ling-Zhi Bao, Xi Wang, Performance optimization design of direct injection turbocharged hydrogen internal combustion engine, Applications in Energy and Combustion Science, Volume 16, 2023,
4. Onur Barış, İlker Güler, Anıl Yaşgöl, The effect of different charging concepts on hydrogen fuelled internal combustion engines, Fuel, Volume 343, 2023,
5. Balu Jalindar Shinde, Karunamurthy K., Recent progress in hydrogen fuelled internal combustion engine (H2ICE) – A comprehensive outlook, Materials Today: Proceedings; Volume 51, Part 3, 2022,
6. Vendt, M., & Wallmark, C. (2022). Prestudy H2ESIN: Hydrogen, energy system and infrastructure in Northern Scandinavia and Finland. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-61532>
7. <https://balticseahydrogencollector.com/>
8. Carlson A., Nordin Fördös A., Lindborg J., Wickström A., Studie över elektrolys-teknologier, RISE 2021