

FUEL CELL VEHICLES AND SYSTEMS FOR TRANSPORTS OF CONSTRUCTION MATERIALS IN CITIES

REPORT 2019:600



TEKNIKBEVAKNING
BRÄNSLECELLER



Swedish
Electromobility
Centre



Fuel cell vehicles and systems for transports of construction materials in cities

Teknikbevakning av bränsleceller

ANGELIKA TREIBER

PETER BARK

ISBN 978-91-7673-600-5 | © Energiforsk augusti 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I syfte att koordinera teknikbevakningen, men också för att sammanställa, analysera och sprida information om utvecklingen inom bränslecellsområdet finansierar Energimyndigheten projektet Teknikbevakning av bränsleceller. Projektet och dess resultat vänder till svenska intressenter och genomförs under 2016 – 2019 som ett temaområde inom kompetenscentret Swedish Electromobility Centre med Energiforsk som koordinator och projektledare.

I denna rapport, som tagits fram inom teknikbevakningen, har transporter av massgods mellan olika typer av deponier eller materialterminaler och arbetsplatser i städer och tätorter undersöktes, för att ge en bild av forskningsläget och att identifiera trender avseende användning av vätgas och bränsleceller. Projektet har genomförts av Angelika Treiber och Peter Bark, TFK.

Styrgruppen för teknikbevakningsprojektet har bestått av följande ledamöter: Pontus Svens/Annika Ahlberg-Tidblad, Scania, Mats Andersson/Staffan Lundgren/Johan Svenningstorp, AB Volvo, Stefan Bohatsch, Volvo Cars, Jörgen Westlinder, Sandvik Materials Technology, Andreas Bodén, Powercell, Bengt Ridell, Sweco Energuide, Göran Lindbergh, Swedish Electromobility Centre/KTH, Peter Smeds/Magnus Lindgren, Trafikverket, Elna Holmberg, Swedish Electromobility Centre och Bertil Wahlund, Energiforsk. Energiforsk framför ett stort tack till styrgruppen för värdefulla insatser.

Samtliga rapporter från projektet kommer att publiceras och fritt kunna laddas ner från Energiforsks webbplats under Teknikbevakning bränsleceller på www.energiforsk.se och på Swedish Electromobility Centres webbplats www.emobilitycentre.se.

Stockholm juni 2019

Bertil Wahlund Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.



Swedish Electromobility Centre är ett nationellt kompetenscentrum för forskning och utveckling av el- och hybridfordon och laddinfrastruktur. Vi enar Sveriges kompetens och utgör en bas för samverkan mellan akademi, industri och samhälle.

Sammanfattning

För att nå ambitionen om att godstransporterna inom en snar framtid ska vara i huvudsak utsläppsfria krävs en fortsatt energieffektivisering samt en utveckling av elektrifierade fordon och drivsystem. En målbild är en fossiloberoende fordonsflotta år 2030 och en utsläppsfri fordonsflotta år 2050. Inom godstransportsektorn förmodas kortväga transporter inom städer och tätorter elektrifieras tidigare än de långväga transporterna. I denna studie har möjligheterna att använda vätgasdrivna fordon med bränsleceller för massgodstransporter i städer och tätorter undersökts.

Över 50 % av den transporterade godsmängden i Stockholms län utgörs av massgods, till exempel jord, sten, sand och grus. För massgodstransporter i städer och tätorter är avstånden ofta korta (under 10 mil), samtidigt som fordonens lastvikt (nyttolast) har stor betydelse eftersom massgods har en hög densitet och ett lågt varuvärde. Detta innebär att bränsleceller antas vara av särskilt intresse inom detta tillämpningsområde.

I denna studie undersöktes transporter av massgods mellan olika slag av deponier eller materialterminaler och arbetsplatser i städer och tätorter. En avsikt var att ge en bild av forskningsläget, identifiera trender avseende användning av vätgas och bränsleceller samt att undersöka om och hur detta kan bidra till hållbara och energieffektiva transporter av massgods i städer och tätorter. Vidare undersöktes eventuella ekonomiska incitament som finns för aktörer som transporterar massgods i städer och tätorter att anskaffa bränslecellsutrustade vätgasdrivna fordon. Det studerades även hur uppbygg för massgodstransporter kan anpassas och infrastruktur för vätgasförsörjning kan utformas. Fordon med bränsleceller jämfördes med fordon med andra drivlinor, såsom batterielektriska plug-in fordon, batterielektriska fordon som kan tillföras energi från elvägars kontaktledningar samt fordon drivna med biodiesel eller fossil diesel.

I de studerade transportuppläggen medförde vätgasdrift 10 % – 30 % lägre energiförbrukning, 70 % – 80 % lägre koldioxidutsläpp och 10 % – 20 % lägre energikostnader jämfört med dieseldrift med fossilt bränsle. En fördel med bränsleceller är att de kan drivas med vätgas som framställs med fossilfri el. Vätgasdrift erbjuder lång räckvidd och medger flexibla transportupplägg som inte måste anknyta till platser för energi-påfyllning. Jämfört med batterielektriska fordon kan vätgasdrivna fordon utföra tyngre och längre transportuppdrag vilket kan minska kostnader per transporterat ton gods och per utfört transportarbete. De sammanlagda kostnaderna för energi samt anskaffning av fordon och utrustning för påfyllning av energi, såsom vätgas respektive elladdning, är dock lägre för batterielektriska fordon när dessa jämförs med bränsle-cellsdrivna fordon. Om batterielektrisk drift är möjlig kan ytterligare energi-, miljö- och kostnadsbesparingar uppnås, beroende på hur energibehovet påverkas av lastvikter och transportsträckor. Batterielektrisk drift är därför att föredra när så är möjligt. Stora energibehov kräver dock högre batterikapacitet vilket ökar fordonets vikt samt reducerar lastvikten och medför fler fordonsrörelser vilket ökar energiförbrukningen.

För transporter över längre sträckor, med höga bruttovikter samt för transporter där det krävs energi till andra system än framdrift, såsom betongroterare, är vätgasdrift av intresse. Vätgasdrift medger även en snabb påfyllning av energi och begränsar inte lastkapaciteten i samma omfattning som en batterielektrisk drift gör. Vätgasdrifter och batterielektriska drifter erbjuder dessutom en tystare drift i jämförelse med dieseldrift.

Summary

In order to achieve the ambition that freight transport in the near future will be essentially zero emission requires a continued energy efficiency and development of electrified vehicles and drive systems. A vision is a fossil-free fleet year 2030 and a zero emissions vehicle fleet in 2050. In the goods transport sector it is likely that short-distance transports in cities and urban areas will be electrified before the long-range transports. In this study the possibility of using hydrogen-powered fuel cell vehicles for bulk freight transports in cities and urban areas was studied.

Over 50 % of the volume of goods transported in Stockholm County is made up of bulk, such as soil, stone, sand and gravel. Bulk transports in towns and cities are often short (under 60 miles), while the vehicle's payload is of great importance. This means that fuel cells are assumed to be of particular interest in this field of application.

In this study transport of bulk between different types of landfills or terminals and construction sites in town and city areas was investigated. The intention was to give a picture of the state of research, identify trends regarding the use of hydrogen power and fuel cells as well as to examine if and how this can contribute to sustainable and energy-efficient bulk transports in towns and cities. Further investigated were possible financial incentives for actors carrying the bulk of the cities and towns to raise fuel cell equipped hydrogen-powered vehicles. Vehicles with fuel cells were compared with vehicles with other powertrains, such as battery-electric plug-in vehicles, battery-electric vehicles that can be supplied with energy from electrified highway catenary and vehicles fueled with biodiesel or fossil diesel.

In the studied routes hydrogen powered transports resulted in 10 % – 30 % lower power consumption, 70 % – 80 % lower carbon-dioxide emissions and 10 % – 20 % lower energy costs compared to fossil diesel powered operations. One advantage of fuel cells is that they can be fueled with hydrogen produced with fossil-free electric power. The hydrogen offers a long range and flexible transport arrangements which do not need to link to the sites of energy replenishment. Compared with battery-electric vehicles, hydrogen-powered vehicles can carry out heavier and longer operations which can provide lower costs per transported tonnes as well as per the transport work carried out. The total cost of energy as well as the acquisition of vehicles and equipment for the energy areas, such as hydrogen refueling respectively electric charging, however, is lower for battery-electric vehicles when they are compared with fuel cell-powered vehicles. If battery electric operation is possible, additional energy, environmental and cost savings can be achieved, depending on how the energy demand is affected by transport routes and cargo weights. Battery-electric operation is therefore preferable when distances and schedules allow it. Major energy need, however, require higher battery capacity which increases the weight of the vehicle and reduce the load weight and carries more vehicle movements which will raise the energy consumption.

For transports over longer distances, with high gross weights, and for shipments that require energy to systems other than propulsion, such as concrete rotators, hydrogen is of interest. Hydrogen also allows a quick recharge of energy and do not limit the load capacity to the same extent as a battery electric operation makes. Hydrogen and battery-electric operation also offers a quieter operation compared to diesel operations.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte	9
1.3	Metod	10
2	Omvärldsbevakning	11
2.1	Utveckling	11
2.1.1	Insatser i Kaliforninen	11
2.1.2	Fordonsutveckling – lastbilar och dragbilar	12
2.2	Kännedom om utvecklingen inom bränslecellsområdet bland åkerier och transportföretag	14
3	Energieffektiva transportupplägg	15
3.1	Ingångsdata	15
3.2	Fallstudier	15
3.2.1	Slussen – berg- och schaktmassor	16
3.2.2	Regeringsgatan – betong	17
3.2.3	Klarastrandsleden – asfalt	19
3.3	beräkningar	21
3.3.1	Ansatser	21
3.3.2	Ökade fordonsvikter med alternativa drivsystem	21
3.3.3	Slussen – berg- och schaktmassor	26
3.3.4	Regeringsgatan – betong	28
3.3.5	Klarastrandsleden – asfalt	29
3.3.6	Trängsel- och kapacitetseffekter	30
3.4	Energiinfrastruktur	31
3.4.1	Vätgaspåfyllning	31
3.4.2	Laddning	32
3.4.3	Kostnader för energiinfrastruktur	32
4	Resultat och slutsatser	34
4.1	Resultat	34
4.1.1	Energi och miljö	34
4.1.2	Incitament	34
4.2	Slutsatser	35
4.3	Fortsatta studier	35
	Referenser	36

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

För att nå ambitionen att godstransporterna inom en snar framtid ska vara i huvudsak utsläppsfria krävs en fortsatt energieffektivisering samt en utveckling av elektrifierade fordon och drivsystem. En målbild är en fossiloberoende fordonsflotta år 2030 och en utsläppsfri fordonsflotta år 2050. Inom godstransportsektorn är det troligt att kortväga transporter inom städer och tätorter blir elektrifierade tidigare än de långväga transporterna till och från samt mellan städer respektive tätorter.

Över 50 % av den transporterade godsmängden i Stockholms län utgörs av massgods, till exempel jord, sten, sand och grus. Denna studie har omfattat transporter av massgods mellan olika slag av deponier eller materialterminaler och arbetsplatser i städer och tätorter. För transporter inom städer och tätorter har möjligheterna att använda bränslecellsdrivna fordon studerats och dessa har jämförts med fordon som utrustats med andra drivsystem, exempelvis laddningsbara batterielektriska fordon (plug-in), batterielektriska fordon till vilka möjlighet finns att tillföra energi under färd, genom elvägssystem, samt dieseldrivna fordon med biodiesel alternativt fossil diesel.

I den tidigare av Energiforsk finansierade studien *Bränsleceller i intermodala transportsystem* (Treiber, 2018) kartlades möjligheter och analyserades effekter av en övergång till vätgasdrivna fordon och maskiner inom intermodala transportsystem, exempelvis lastbilar och dragbilar, växellok och hanteringsmaskiner. Studien visade att det för att ekonomiskt bära en vätgaspåfyllningsstation krävs en stor efterfrågan av vätgas. Detta kan uppnås genom att vätgasdrivna fordon och/eller maskiner som har en hög utnyttjandegrad repetitivt, eller med jämna mellanrum, återvänder till en fast punkt till vilken även en vätgaspåfyllningsstation kan lokaliseras. En idé är därför att undersöka möjligheten till vätgasdrivna fordon som utför transporter av exempelvis schaktmassor, grus, asfalt och betong i städer och tätorter där fordonen repetitivt återvänder till tåktar, återvinningsanläggningar samt asfaltsverk och betongfabriker.

1.2 SYFTE

Det huvudsakliga syftet med studien har varit att ge en aktuell bild av forskningsläget inom bränslecellsområdet med inriktning på tillämpningar för massgodstransporter i städer och tätorter. Syftet med studien var därför att:

- Kartlägga hur forskningsläget inom området ser ut och vilka trender som finns.
- Undersöka om och hur bränsleceller och vätgas kan bidra till energieffektiva och hållbara transporter av massgods i städer och tätorter. Fordon med bränsleceller jämförs med andra alternativa drivlinor och drivmedel, till exempel batterielektriska plug-in fordon, batterielektriska fordon med

möjlighet att tillföra energi från elvägars kontaktledningar samt dieseldrivna fordon med biodiesel alternativt fossil diesel.

- Undersöka vilka ekonomiska incitament det finns för entreprenad- och transport-företag samt åkerier som transporterar massgods i städer och tätorter att anskaffa och använda bränslecellsutrustade transportfordon (lastbilar) med vätgasdrift.
- Undersöka hur vätgasförsörjningsinfrastrukturen kan utformas för att möjliggöra att vätgasdrivna fordon används för massgodstransporter i städer och tätorter.

Studien har syftat till att besvara följande frågeställningar:

- Vilka ekonomiska incitament finns det för entreprenad- och transportföretag samt åkerier att införskaffa och använda fordon som är utrustade med bränsleceller och vätgasdrift för att utföra massgodstransporter i städer och tätorter?
- Hur ser de ekonomiska incitamenten ut gällande bränsleceller och vätgas jämfört med andra alternativa drivmedel och drivlinor?
- Hur kan transportuppläggen anpassas och hur kan infrastrukturen för vätgasförsörjning av fordon och utrustning för massgodstransporter i städer och tätorter utformas för att skapa transportlösningar för massgods med en hög energieffektivitet och låga emissioner?

1.3 METOD

Studien har innefatta litteraturstudier över teknikutvecklingen samt teknikläget idag. Detta inkluderar faktainsamling samt kartläggningar och beräkningar av energi-förbrukning, kostnader (energikostnader, underhållskostnader samt kapital- och/eller anskaffningskostnader) samt miljöpåverkan. Intervjuer har utförts med företrädare för åkeribranschen i avsikt att fånga in vilket intresse för och vilka synpunkter åkerier och transportföretag har på bränslecellsdrift vid anläggningstransporter. Underlag för fallstudier har hämtats från tidigare av TFK genomförda studier avseende transporter av massgods i städer och tätorter (Treiber et al 2017, Treiber et al, 2016 och Krantz, et al 2014).

Förstudien har innefattat följande arbetsmoment:

1. Kartläggning av elektriska drivsystem samt användning av bränsleceller som drivs med vätgas i vägfordonstillämpningar.
2. Utifrån olika transportupplägg (tidigare genomförda fallstudier) för massgodstransporter i städer och tätorter har miljöeffekter och ekonomiska effekter av en övergång till vätgasdrift bedömts.
3. Utifrån fallstudierna har beskrivits hur en infrastruktur för vätgaspåfyllning kan utformas och vilka ekonomiska och tekniska förutsättningar som finns för detta.
4. Energiförbrukning, kostnader och utsläpp har jämförts mellan olika alternativa drivmedel och drivsystem vid transporter av massgods i städer och tätorter.
5. Kostnader och ekonomiska incitament för entreprenad- och transportföretag samt åkerier att införskaffa och använda fordon med bränsleceller och vätgasdrift har analyserats.
6. En rapport har sammanställts

2 Omvärldsbevakning

En teknikutveckling avseende bränslecellsdrivna lastbilar pågår. Kalifornien ligger i framkant avseende fordon med bränslecellsdrift samt utbyggnad av infrastruktur för vätgas och delstaten stöder ett flertal utvecklingsprojekt som har till syfte att minska energiförbrukningen och koldioxidutsläppen (Mikulín et al, 2016).

En viktig lärdom från demonstrationsprojekten i Kalifornien är att de fordon som testas måste ha samma eller bättre prestanda än dagens förbränningsmotordrivna fordon. Detta för att demonstrationerna skall medföra positiva helhetsomdömen från användarna. Plug Power betonar även vikten av att tillhandahålla kunden rätt utbildning (Shumaker et al, 2017).

2.1 UTVECKLING

Från 2013 och fram till slutet av 2017 hade 6 475 bränslecellsdrivna fordon sålts globalt. Över 50 % av dessa fordon var sålda i Kalifornien (Green Car Congress, 2018). I USA finns över 16 000 små lagertruckar (främst i form av gaffeltruckar), 25 bussar samt 3 800 personbilar med vätgasdrift. Vidare finns över 30 påfyllningsstationer för vätgas (Satyapal, 2018).

Förutom USA är Japan i framkant när det gäller vätgasdrift och bränsleceller. Japan har som mål att etablera 80 nya påfyllningsstationer för vätgas fram till år 2021. Den japanska staten har även ett mål om att det skall finnas 40 000 fordon utrustade med bränsleceller på vägarna år 2020. Detta från ett utgångsläge (2017) på ca 2 000 bränslecellsfordon (Ibusuki, 2018).

Beträffande bränsleceller i fordon krävs främst en utveckling avseende livslängden (HTAC, 2016). Vidare måste kostnaderna minska. U.S. Department of Energy uppskattade 2015 att kostnaden för PEM-bränslecellsystem för fordon uppgick till ungefär \$ 280/kW vid en årsproduktion av 20 000 system (DOE, 2015/I). Ett mål är, enligt U.S. Department of Energy, att bränsleceller skall uppnå en livslängd på 5 000 h till år 2020 och att kostnaden för bränslecellssystem samtidigt skall minska till \$ 40/kW, vid en årsproduktion av 500 000 system (DOE, 2017/II).

2.1.1 Insatser i Kalifornien

I Kalifornien har CaFCP (California Fuel Cell Partnership) tagit fram en handlingsplan för att påskynda utvecklingen och kommersialiseringen av bränslecellsdrivna lätta och tunga lastbilar.

I Kalifornien är en bedömning att bränslecellsdrivna tunga fordon som repetitivt återkommer till samma utgångspunkter samt utför kortväga anslutningstransporter, till och från terminaler och andra omlastningsanläggningar kommer att kräva en minimal utbyggnad av vätgasinfrastrukturen (CaFCP, 2016). Insatser för en ökad bränslecellsanvändning bör därför inledas med fordon i dessa tillämpningar. I denna handlingsplan konstateras att bränsleceller för lätta lastbilar har bedömts ha störst potential för att bidra till kostnadseffektiviseringar om de användas som räckviddsförlängare i laddbara elektriska lastbilar (plug-in).

För drag- och lastbilar som används till anslutningstransporter, till och från terminaler och andra omlastningspunkter bedöms ett krav på räckvidd uppgå till minst 160 km (CaFCP, 2016).

I handlingsplanen poängteras vikten att dra lärdomar från tidigare projekt som avsett användning av bränsleceller i bussar. Dock måste det beaktas att lastbilar har en annan körcykel än bussar i linjetrafik vilket påverkar kraven samt hur balansen mellan batterier och bränsleceller ska utformas (CaFCP, 2016).

2.1.2 Fordonsutveckling – lastbilar och dragbilar

Nedan presenteras olika bränslecellsdrivna lastbilar och dragbilar som olika fordonstillverkare antingen tagit fram i prototyputföranden, och/eller erbjuder marknaden i form av kommersiella fordon.

Nikola

Nikola Motor Company erbjuder dragbilar med elektriska drivlinor vilka antingen kan utformas som batterielektriska drivlinor, med energilagring i batterier, och/eller utrustas med bränsleceller (Nikola Motor, 2018).

Nikola har i sitt produktsortiment tre typer av dragbilar, som är utrustade med bränsleceller (se Tabell 1). NikolaOne är en 3-axlad dragbil som är försedd med sovhytt och som finns tillgänglig på de Nord- och Sydamerikanska marknaderna. NikolaTwo är en 3-axlad dragbil, vilken enbart utrustats med en daghytt, och som finns tillgänglig på de Nord- och Sydamerikanska marknaderna. Den tredje dragbilen, NikolaTre, är också utrustad med en daghytt, men endast 2-axlad och anpassad för marknaderna i Europa, Asien och Australien (Nikola Motor, 2018).

Nikola kommer att tillsammans med Nel ASA bygga upp ett nätverk med påfyllningsstationer för vätgas (Nikola Motor, 2018).

Tabell 1 Räckvidd, tid för vätgaspåfyllning samt motoreffekt för Nikola Motors tre modeller

	NikolaOne	NikolaTwo	NikolaTre
Räckvidd	800 – 1 600 km	800 – 1 600 km	500 – 1 200 km
Tid för vätgaspåfyllning	20 min	20 min	20 min
Motoreffekt	Upp till 750 kW	Upp till 750 kW	370 – 750 kW

Toyota

2017 lanserade Toyota dragbilsprototypen "Alpha", vilken hade en motoreffekt på 500 kW och var avsedd för fordonskombinationer med bruttovikter upp till 36 ton. Denna dragbil var vidare försedd med ett 12 kWh batteri samt bränslecellsstackar med en kapacitet motsvarande två Toyota Mirai (Toyotas bränslecellspersonbil), vilket gav en räckvidd på 320 km (O'Dell, 2018). Dragbilen testades i verklig drift i anslutning till hamnarna i Long Beach och Los Angeles i Kalifornien.

I juli 2018 presenterade Toyota planerna på nästa utvecklingssteg inom projektet Project Portal 2.0 där en eftergångare till "Alpha" ska tas fram, kallad "Beta". "Beta" kommer att utrustas med vätgastankar med en total kapacitet på 60 kg komprimerad vätgas vilket medför en räckvidd på 480 km (O'Dell, 2018).

Asko

2018 satte Norges största dagligvarugrossist, Asko, den första, av fyra från Scania beställda bränslecellsdrivna lastbilar i trafik. Lastbilarna har en bruttovikt på 27 ton och är de första i norra Europa med bränslecellsdrift (FuelCellWorks, 2016). För tankning av lastbilarna har Asko även öppnat en påfyllningsstation för vätgas i Trondheim vilken har kapacitet för 25 lastbilar (Tønseth, 2018).

Eso

Det schweiziska företaget Eso har tillsammans med Swiss hydrogen och Powercell tagit fram en vätgasdriven lastbil vilken demonstrerats och testas i Schweiz sedan november 2016 (Coop, 2016).

Lastbilen är byggd på ett 2-axligt chassi från MAN (H2 Energy, 2017). För en fordonskombination som består av en lastbil och en 2-axlig släpvagn tillåts en bruttovikt på 34 ton. Den elektriska drivmotorns effekt uppgår till 250 kW och kapaciteten för litium-jon-batteriet uppgår till 120 kWh. Bränslecellssystemets kontinuerliga uteffekt uppgår till 100 kW och systemverkningsgraden är 52 %.

Bakom lastbilens förarhytt finns 7 kolfibertankar med en kapacitet på 31 kg vätgas vid 350 bar (totalt 34,5 kg vätgas lagras, men 3,5 kg måste finnas kvar i tankarna för att ett grundtryck skall kunna upprätthållas). Bränsleförbrukningen uppskattas till 7,5 – 8 kg vätgas/100 km och lastbilens räckvidd uppgår till 375 – 400 km. Tidsåtgången för en vätgaspåfyllning är ca 10 min (H2 Energy, 2017).

Hyundai

Hyundai Motor planerar att lansera en bränslecellsdriven dragbil under 2019, vilken kommer att bli en 2-axlad bil med 18 tons egen bruttovikt samt 34 tons total bruttovikt med en påhängsvagn/trailer (Turpen, 2018). En plan är att tillsammans med H2 Energy, för den schweiziska marknaden, tillverka 1 000 bränslecellsdrivna dragbilar under 5 år. Bränslecellerna kommer att ha en kapacitet på 190 kW. Vätagas lagras i 8 tankar med en total kapacitet på 32,9 kg vätgas vid 350 bar vilket ger en räckvidd på 400 km. Vätagaspåfyllningen uppges ta ca 7 minuter.

Kenworth

Kenworth visade upp en bränslecellsdriven dragbil vid Consumer Electronics Show i Las Vegas i januari 2018. Dragbilen har testats i Seattle och nästa steg är att testa dragbilen i verklig drift vid hamnarna i Los Angeles och Long Beach i Kalifornien. Bränslecellen har en uteffekt på 85 kW vilket medför att fordonet endast kan komma upp i hastigheter på 50 – 80 km/h. Batteripaketet på dragbilen väger 2,3 ton (Park, 2018). Dragbilen har ett vätagaslager ombord på 30 kg vätagas vid 350 bar vilket ger en räckvidd på 240 km (Hydrogen Carshow, 2018).

US Hybrid och Navistar

Bränslecellstillverkaren US Hybrid har utvecklat ett eget bränslecellssystem med en bränslecellseffekt på 80 kW och ett litiumjonbatteripack på 30 kWh. En Navistar International ProStar dragbil har utrustats med detta bränslecellssystem. Dragbilen kan lagra 25 kg vätagas vilket ger 320 km räckvidd. Dragbilen har testats i drift vid hamnarna i Los Angeles och Long Beach i Kalifornien (O'Dell, 2017).

Sammanställning

En sammanställning av kommande och befintliga bränslecellsdrivna drag- och lastbilar har upprättats (se Tabell 2). Sammanställningen visar att fördelningen av bränslecellseffekt och batterikapacitet varierar kraftigt mellan de olika modellerna.

Ombordlagret av vätgas är däremot relativt lika mellan de olika modellerna, där de flesta har vätgastanksvolymer på 30 kg totalt. Samtliga modeller använder 350 bars vätgasstryck.

Tabell 2 Sammanställning över prototyp- och demonstrationslastbilar samt kommersiella lastbilar och dragbilar med bränslecellsdrift

Tillverkare/ modell	Fordons- typ	Bruttovikt (ton)	Räckvidd (km)	Vätgastank- volym (kg vätgas)	Effekt bränslecell (kW)	Batteri- kapacitet (kWh)
NikolaOne	Dragbil		800 – 1 600		300	320
NikolaTre	Dragbil		500 – 1 200			
Toyota "Beta"	Dragbil	36	480	60		12
Scania (för ASKO)	Lastbil	27	500	33	90	56
Esoro	Dragbil	34	370 – 400	31	100	120
Hyundai	Dragbil	34	400	32,9	190	
Kenworth T680 ZECT	Dragbil	36	240	30	85	100
US Hybrid & Navistar	Dragbil		320	25	80	30

2.2 KÄNNEDOM OM UTVECKLINGEN INOM BRÄNSLECELLSOMRÅDET BLAND ÅKERIER OCH TRANSPORTFÖRETAG

Intervjuer och samtal med företrädare för åkeribranschen samt transportföretag som är verksamma inom det område som innefattar massgodstransporter i tätorter har visat att kunskapen om bränslecellsteknik respektive elektrifierade drivsystem, i fordonsapplikationer, samt användning av vätgas för fordondrift är begränsad eller saknas helt (Wiberg, 2019). Ett fokus för de aktuella företagen har istället varit alternativa bränslen och/eller drivmedel för användning i de befintliga drivsystem som innefattar förbränningsmotorer och konventionella drivlinor (Heierson, 2019). Detta har även innefattat gasdrift, med till exempel biogas och/eller naturgas, i tunga fordon. I de fall vätgas nämnts i dessa sammanhang har detta främst avsett möjligheterna att använda vätgas för att driva förbränningsmotorer.

En fråga som är central, och måste belysas vid användning av bränsleceller och vätgasdrift i tunga fordon är, enligt företrädare för åkeriföretagen, hur den tillförda elenergin genereras (Johansson, 2019). Ifall vätgas genereras med elenergi med betydande fossilt energiinnehåll kommer de efterfrågade effekterna av en övergång från förbränningsmotordrift till vätgasdrift att utebli, eller begränsas.

Fråga om miljöeffekter av bränslecellsanvändning kopplat till hur vätgas framställs har även belysts i ett demonstrationsprojekt avseende bränslecellsdrift för tunga truckar och arbetsmaskiner inom processindustrin (Treiber et al, 2018).

3 Energieffektiva transportupplägg

För att undersöka om och hur bränsleceller och vätgas kan bidra till energieffektiva och hållbara transporter av massgods i städer och tätorter har data från en tidigare studie utgjort underlag för en fallstudie där tre transportupplägg undersökts. I fallstudien utfördes en ansats där vätgasdrivna fordonskoncept utrustade med bränsleceller jämfördes med dieselfordon drivna med biodiesel respektive fossil diesel och andra lösningar baserade på elektrifierade drivsystem. De senare utgjordes av batterielektriska plug-in fordon och batterielektriska fordon, utan och med, möjlighet att tillföra energi under färd. I det senare fallet från elvägssystem.

3.1 INGÅNGSDATA

Nedanstående ingångsdata har använts i samband med beräkningar och analyser av de aktuella transportuppläggen (se Tabell 3).

Tabell 3 Använda värden för verkningsgrader, koldioxidutsläpp samt energiparametrar

Verkningsgrader	
Verkningsgrad för dieseldrift	36 % (Treiber, 2016)
Verkningsgrad för elektrolysör	70 % (Jobson, 2017)
Verkningsgrad för bränsleceller (avser bränslecellssystem som innefattar stack)	52 % (H2 Energy, 2017)
Verkningsgrad vid batterielektrisk drift	80 % (Jobson, 2017)
Verkningsgrad för elvägssystem (elväg med kontaktledning)	77 % (Sandviken Pure Power, 2019)
Koldioxidutsläpp	
Fossil diesel MK 1 (g/l diesel)	2 810 (Energimyndigheten, 2017)
HVO (g/l diesel)	390 (Energimyndigheten, 2017)
Enligt Nordisk residualmix 2017 (g CO ₂ /kWh)	329 (Energiföretagen, 2018)
Svensk elmix (g CO ₂ /kWh)	64 (Electricity Map, 2018)
Energi och densitet	
Energiinnehåll fossil diesel (kWh/l)	9,80 (SPBI, 2019)
Energiinnehåll HVO (kWh/l)	9,44 (Energimyndigheten, 2017)
Energiinnehåll i 1 Nm ³ vätgas (kWh)	3,0 (HyWeb, 2019)
Densitet för vätgas (normalt tryck och temperatur) (g/m ³)	90 (Air Liquide, 2019)
Energiinnehåll i vätgas (kWh/kg)	33,33 (HyWeb, 2019)

3.2 FALLSTUDIER

Underlag för fallstudier har erhållits genom bearbetning av data som insamlats vid en tidigare kartläggning av massgodstransporter i Stockholm (Treiber et al, 2017). För de olika transportuppgifterna har bland annat insamlad data avseende bränsleförbrukning samt transporterad mängd massgods (nyttolast) bearbetats. Bland annat har energigång för framdrivning/förflyttning av fordonen framräknats utifrån uppgifter om bränsleförbrukning. Vidare har energibehov och förbrukning av vätgas, vid en framtida vätgasdrift, beräknats utifrån antagna ingångsdata.

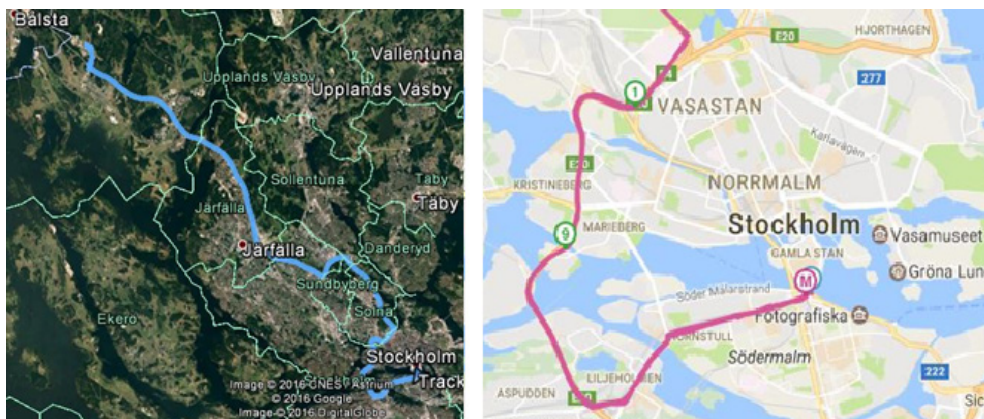
3.2.1 Slussen – berg- och schaktmassor

Data för transport av berg- och schaktmassor från Slussen, i centrala Stockholm, till en avfallsanläggning vid Högbytorp har sammanställts (se Tabell 4).

Tabell 4 Data för transport av berg- och schaktmassor från Slussen till Högbytorp

Material:	Förorenade massor; asfalt och kross
Mängd material (last):	10 ton
Totalvikt med last:	23 ton
Vikt utan last:	13 ton
Transportavstånd (enkel väg):	48 km
Fordon och lastbärare:	3-axlad boggibil med tippflak
Tidsåtgång transport (fram och åter):	110 min
Restriktioner:	BK2 och 12 m

Schaktmassor (förorenade samt rena) och krossmaterial transporterades från en byggarbetsplats vid Slussen till en avfallsanläggning Högbytorp i Bro, ett avstånd på ca 40 km (se Figur 1). Transporter utfördes, främst med 3-axlade boggibilar.



Figur 1 Transportrutt mellan Slussen, arbetsplats Södermalmstorg, och Högbytorp i Bro

Utifrån de antaganden som tidigare redovisats (se avsnitt 3.1) har beräkningar av energiförbrukningen genomförts (se Tabell 5).

Tabell 5 Beräkning av energiförbrukning för transporten mellan Slussen och Högbytorp

Energiförbrukning utan last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,26
Energiinnehåll i förbrukat bränsle (kWh/km)	2,56
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	0,92
Energiförbrukning med last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,31
Energiinnehåll i förbrukat bränsle (kWh/km)	3,03
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	1,09
Energiförbrukning fram och åter (kWh)	96,5
Beräknad vätgasförbrukning (fram och åter)	
Energibehov vid vätgasdrift (kWh)	185,6
Förbrukning av vätgas (kg)	5,6

3.2.2 Regeringsgatan – betong

Data för betongtransport från Skanskas betongfabrik i Farsta till Regeringsgatan i centrala Stockholm har sammanställts (se Tabell 6).

Tabell 6 Data för betongtransport från Skanskas betongfabrik i Farsta till Regeringsgatan

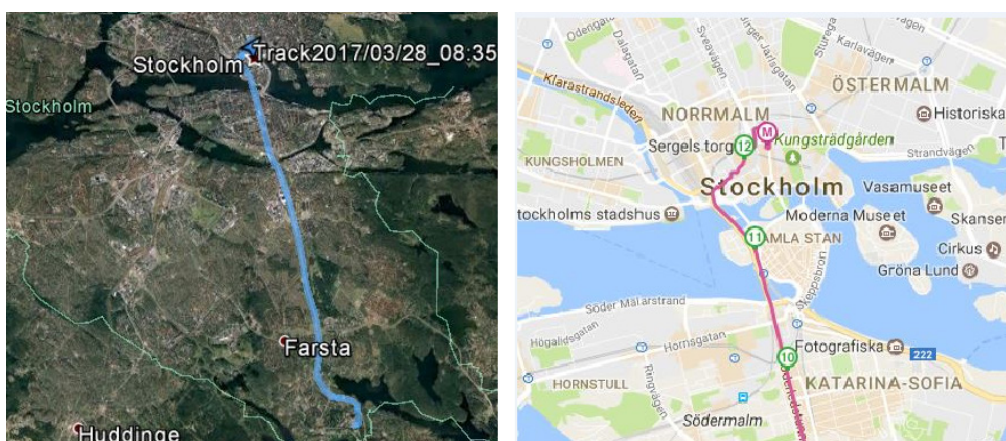
Material:	Betong (SK11)
Mängd material (last):	12 ton
Totalvikt med last:	23 ton
Vikt utan last:	11 ton
Transportavstånd (enkel väg):	12,5 km
Fordon och lastbärare:	3-axlad roterbil
Tidsåtgång transport (fram och åter):	66 min
Restriktioner:	BK2 och 12 m

Skanska har flera betongfabriker i Stockholmsområdet och beslut om vilken fabrik som skall leverera betong till en byggarbetsplats fattas främst utifrån målet att minimera transportavstånden. Transporterna utförs av underentreprenörer med hjälp av 3- eller 4-axliga roterbilar (se Figur 2). Vid BK2 har en 3-axlad roterbil en lastkapacitet på ca 5 m³ betong. Vid BK1 har en 3-axlig bil en kapacitet på ca 6 m³ betong medan en 4-axlig bil har en kapacitet på ca 7,5 m³ betong.



Figur 2 3-axlad roterbil vid den aktuella arbetsplatsen vid Regeringsgatan i Stockholm (TFK)

I det aktuella fallet transporterades betong från Skanskas betongfabrik i Farsta till Regeringsgatan i centrala Stockholm, en resa på 25 km tur och retur (se Figur 3).



Figur 3 Transportrutt mellan arbetsplatsen vid Regeringsgatan och betongfabriken i Farsta

Utifrån de antaganden som redovisats i avsnitt 3.1 har energiförbrukningen för framdrift av fordonet beräknats (se Tabell 7).

Tabell 7 Beräkning av energiförbrukning för betongtransporten

Energiförbrukning utan last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,25
Energiinnehåll i förbrukat bränsle (kWh/km)	2,46
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	0,89
Energiförbrukning med last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,31
Energiförbrukning (KWh/km)	3,03
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	1,09
Energiförbrukning fram och åter (kWh)	24,7
Beräknad vätgasförbrukning (fram och åter)	
Energibehov vid vätgasdrift (kWh)	47,5
Förbrukning av vätgas (kg)	1,4

3.2.3 Klarastrandsleden – asfalt

Data för asfaltstransport från Arlanda till Klarastrandsleden i centrala Stockholm har sammanställts (se Tabell 8).

Tabell 8 Data för asfaltstransport från Arlanda till Klarastrandsleden

Material:	Asfalt
Mängd material (last):	37 ton
Totalvikt med last:	64 ton
Vikt utan last:	27 ton
Transportavstånd (fram och åter)	89 km
Fordon och lastbärare:	Citylink (3-axlad dragbil med två 2-axlade linkar)
Tidsåtgång transport (fram och åter):	80 min
Restriktioner:	Dispens för BK1

Parator Industri har utvecklat ett ekipage som har optimal lastförmåga utifrån rådande förutsättningar både vid BK1 och BK2 och 12 m fordonslängd (se Figur 4).

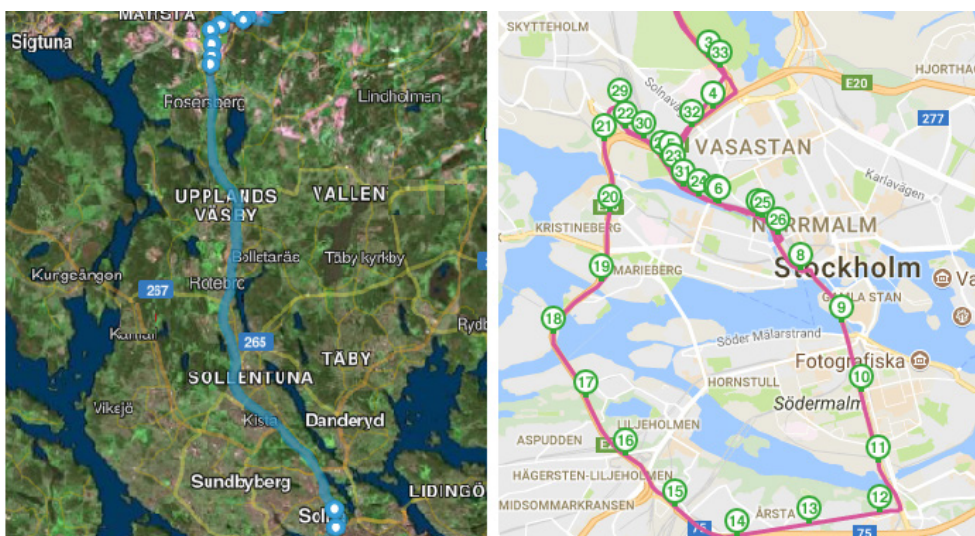


Figur 4 Asfaltsekipage med två linkar, benämns Citylink (TFK)

Ekipaget består av en kort 3-axlad dragbil och två identiska så kallade linkar med skjutbar boggi och benämns Citylink. Vid färd inom områden där det råder BK2 och maximalt 12 m fordonslängd kan den bakre linken kopplas av och boggin dras in för att klara längdbegränsningen och samtidigt tillåts ekipaget, bestående av en dragbil och en link ha en bruttovikt på 30 ton. Vid BK1 tillåts dragbilen och en link med helt utskjuten boggi ha en totalvikt på 45 ton (Olsson, 2016).

Avståndet mellan första och sista axeln för dragbilen och en link med boggin indragen är 10 m och det maximala avståndet mellan första och sista axeln för dragbil och en link (boggin helt utskjuten) är 13 m. Vikten för dragbil och en link utan lastbärare är ca 15 ton (Högberg, 2017).

Asfalt transporterades från ett asfaltsverk som är lokaliserat vid Arlanda till Klarastrandsleden i centrala Stockholm (se Figur 5).



Figur 5 Transportrutt mellan asfaltsverket vid Arlanda och Klarastrandsleden.

Utifrån de antaganden som redovisats i avsnitt 3.1 har energiförbrukningen för detta transportupplägg beräknats (se Tabell 9).

Tabell 9 Beräkning av energiförbrukning för asfalttransporten

Energiförbrukning utan last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,4
Energiinnehåll i förbrukat bränsle (kWh/km)	3,92
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	1,41
Energiförbrukning med last	
Bränsleförbrukning (l/km)	0,5
Energiinnehåll i förbrukat bränsle (kWh/km)	4,9
Energiåtgång för framdrivning/förflyttning av fordon (kWh/km)	1,76
Energiförbrukning fram och åter (kWh)	150,5
Beräknad vätgasförbrukning (fram och åter)	
Energibehov vid vätgasdrift (kWh)	289,4
Förbrukning av vätgas (kg)	8,8

Asfalttransporten utförs med dragbil med två parlinkar vilket innebär att detta inte är ett enskilt fordon. Detta medför att det inte är möjligt att kompensera för den extra vikt för teknisk utrustning som krävs för att de aktuella fordonen skall tillåtas ha en ökad bruttovikt, med 1 ton, enligt de regler som gäller för fordon som drivs med alternativa drivmedel.

3.3 BERÄKNINGAR

3.3.1 Ansatser

I denna studie jämförs befintliga dieseldrivna fordon som i ett utgångsläge drivs med fossil diesel med användning av fossilfri biodiesel, i samma fordon. Vidare utgörs huvudalternativet i studien av ett fordonskoncept som är utrustat med bränsleceller. Dessutom har som jämförelsealternativ ansatts lösningar för batterielektriska plug-in fordon, batterielektriska fordon med möjlighet att tillföra energi under färd, såsom från kontaktledningarna vid elvägar. Inför beräkningarna har energipriser som var aktuella vid årsslutet 2018 ansatts (se Tabell 10):

Tabell 10 Energipriser per 2018-12-31

Bränslepriser (OKQ8, 2019)	
Fossilt dieselbränsle	11,89 kr/l (exklusive moms)
Biodiesel HVO	12,61 kr/l (exklusive moms)
Elenergi (Eurostat, 2019)	
	75,39 öre/kWh (exklusive moms)

Kostnaderna för att etablera och driva anläggningar, som för påfyllning av vätgas i fordon med bränslecellsdrift, vilka även innefattar elektrolysörer, har en koppling till anläggningarnas storlek och kapacitet (Melania et al, 2013). I en tidigare studie har kostnader för 4 olika kapacitetsnivåer undersökts (Treiber, 2018). De nivåer som undersöktes var 160, 450, 600 och 1 500 kg vätgas per arbetsdag, eller dygn. Vid dessa kapaciteter var kostnaderna fallande med ökad anläggningsstorlek samt kapacitet och uppgick omräknat till 40,2, 19,5, 17,3 samt 13,7 kr per kg vätgas.

I denna studie antogs att en vätgaspåfyllningsanläggning med en kapacitet av 450 kg vätgas per arbetsdag kunde utgöra ett lämpligt referensobjekt vid beräkningar av kostnader för vätgas. Kostnaden för att anlägga en påfyllningsstation, med denna kapacitet uppgår till ca 25 miljoner kr, inklusive elektrolysör (Treiber, 2018). En fördelning av kostnaderna för etablering och drift av en påfyllningsanläggning med en kapacitet av 450 kg vätgas per arbetsdag, eller dygn, på den levererade energimängden vätgas innebär en kostnad på 60 öre per kWh vätgas.

3.3.2 Ökade fordonsvikter med alternativa drivsystem

Utifrån egenvikter för befintliga dieseldrivna fordon beräknades de tillkommande vikterna för fordon med elektrifierade drivlinor. Problemet är att detta ofta ökar fordonsvikten vilket kan minska lastvikten jämfört med motsvarande dieselfordon.

Efter en förändring i bruttoviktsreglerna får ett motordrivet fordon med två eller tre axlar, dock inte 2-axlad buss, som drivs helt eller delvis med ett alternativt bränsle ha en bruttovikt som överstiger de värden som gäller avseende bruttovikt för enskilt fordon med den extra vikt i tillägg som den tillkommande tekniken för det alternativa bränslet medför, dock högst 1 ton.

Batterielektrisk drivlina

I ett ansatt fordonskoncept har elmotor och tillkommande komponenter, främst i form av elektrisk utrustning, antagits medföra en viktökning på ca 300 kg jämfört med motsvarande diesellastbil, exklusive batterivikten (Treiber et al, 2018/II).

Utvecklingen av litium-jon-batterier, för fordonstillämpningar, har medfört att energitätheten, eller energidensiteten, ökat snabbt. Mellan 2011 och 2017, ökade denna från i medeltal 84 till 123 Wh/kg, eller med nästan 50 % (Ny Teknik, 2018). Under 2017 presenterade vidare fordonstillverkarna Renault och Tesla personbilar där batteriets densitet uppgick till 150 Wh/kg. U. S. Department of Energy har angivit att ett långsiktigt mål är en energidensitet på 275 Wh/kg (DOE, 2017/I). Uppgifter finns även om att energidensiteten i de batterier som monteras i fordon i början av 2019 ligger mellan 200 och 250 Wh/kg (Ny Teknik, 2019). Den kinesiska batteritillverkaren Contemporary Amperex Technology (Catl) uppges dessutom ha tagit fram ett litium-jon-batteri med en energidensitet på 300 Wh/kg.

Utifrån de aktuella utvecklingstrenderna och de uppsatta utvecklingsmålen ansätts i en beräkningsansats en energidensitet av 155 Wh för batterierna i de aktuella fordonskoncepten, per 2018/2019. Nedan redovisas vilka extra vikter de olika elektriska drivlinorna medför i jämförelse med dieseldrift. För batterielektriska plug-in fordon har tre alternativ, där 40 %, 60 % respektive 80 % av batteriets kapacitet utnyttjas i en drift- och laddningscykel utgjort underlag för beräkningar.

Utifrån de energibehov som framkommit vid bearbetningen av underlagen från de tidigare genomförda fallstudierna (se Tabell 5, 7 och 9) har de totala behoven av batterikapacitet för framdrivning av fordonen sammanställts för de tre aktuella transportuppläggen, vid olika utnyttjandegrad av batterikapaciteten (se Tabell 11).

Tabell 11 Batterivikt för de olika transportuppläggen beroende på hur stor del av batterikapaciteten som utnyttjas samt hur ofta fordonet antas laddas

Transportupplägg	Material (goods)	Utnyttjad batterikapacitet	Batterivikt (kg)		
			80 %	60 %	40 %
Slussen					
	<i>Berg- och schakt-massor</i>	Enkel väg på en laddning	527	703	1 055
		Fram och åter på en laddning	973	1 297	1 946
		Tre vändor på en laddning	2 919	3 892	5 838
Regeringsgatan					
	<i>Betong</i>	Enkel väg på en laddning	137	183	275
		Fram och åter på en laddning	249	332	498
		Tre vändor på en laddning	747	996	1 494
Klarastrandsleden					
	<i>Asfalt</i>	Enkel väg på en laddning	843	1124	1686
		Fram och åter på en laddning	1517	2023	3034
		Tre vändor på en laddning	4552	6069	9103

Vid transporter av betong krävs kringutrustning i form en betongrotor vilken kräver energi, som när fordonet är i rörelse påverkar dess bränsleförbrukning och när det är stillastående, och exempelvis väntar på lossning, kräver energi. I det

senare fallet kan detta kräva en ökad batterikapacitet, vars omfattning dock inte har analyserats i denna studie. Samtidigt innebär det ofta stora fördelar avseende bulleraspekter samt ur energi- samt utsläppssynpunkt under förutsättning att denna typ av utrustning kan drivas elektriskt när fordonen är stillastående.

Batterivikterna påverkar även fordonens lastförmåga vilket har beräknats och sammanställts (se Tabell 12).

Tabell 12 Lastförmåga för fordon för de olika transportuppläggen beroende på hur stor del av batterikapaciteten som utnyttjas samt hur ofta fordonet antas laddas

Transportupplägg	Material (goods)		Lastkapacitet (ton)			
			Dieseldrift	Eldrift (utnyttjad batterikapacitet)		
				80 %	60 %	40 %
Slussen						
	Berg- och schaktmassor	Enkel väg på en laddning	10,0	10,0*	10,0*	9,6*
		Fram och åter på en laddning	10,0	9,7*	9,4*	8,8*
		Tre vändor på en laddning	10,0	7,8*	6,8*	4,9*
Regeringsgatan						
	Betong	Enkel väg på en laddning	12,0	12,0*	12,0*	12,0*
		Fram och åter på en laddning	12,0	12,0*	12,0*	12,0*
		Tre vändor på en laddning	12,0	12,0*	11,7*	11,2*
Klarastrandsleden						
	Asfalt	Enkel väg på en laddning	37,0	35,9	35,6	35,0
		Fram och åter på en laddning	37,0	35,2	35,7	33,7
		Tre vändor på en laddning	37,0	32,1	30,6	27,6

* Upp till ett tons extra bruttovikt som medges för singelfordon som drivs med alternativa drivmedel har lagts till och därmed ökat lastförmågan i motsvarande grad

Sammanställningen visar att av de tre transportuppdrag som undersökts är det enbart betongtransporten som är möjlig att genomföra tur och retur på en laddning av fordonet under förutsättningen att batteriet inte erhåller en så stor kapacitet att batteriets vikt medför att den möjliga lastvikten begränsas. Efter ett transportuppdrag måste emellertid fordonet stå och ladda i minst en timme, med en laddeffekt av minst 44 kW.

Vid transporter av berg- och schaktmassor från Slussen, till Högbytorp, kan det aktuella fordonet endast köra enkel väg på en laddning om batterikapaciteten har dimensionerats så att batterivikten inte inkräktar på lastkapaciteten samt att minst 60 % av batteriets kapacitet utnyttjas. Om en batterikapacitet istället anpassas efter att fordonet skall klara av en hel dags transporter, det vill säga tre vändor samt att 80 % av batterikapaciteten utnyttjas, kommer fordonet endast att kunna lasta 78 % av den lastkapacitet en dieseldriven lastbil har vid den aktuella bärighetsklassen.

För asfaltstransporter, till Klarastrandsleden, som i det studerade fallet utförs med en dragbil med två direkt sammankopplade påhängsvagnar, så kallade linkar (se figur 4), krävs det i samtliga fall batterivikter som kommer att begränsa lastvikten.

För de olika fallstudierna har en batterikapacitet antagits som medger att fordonet klarar tre vändor, eller i princip ett förararbetspass, på en laddning samt att batterikapaciteten utnyttjas antingen till 40 %, 60 % eller 80 %.

Elektrisk drivlina med bränsleceller

Såsom för batterielektriska drivlinor antas elmotor och olika tillkommande komponenter, främst i form av elektrisk utrustning, medföra att fordonsvikten ökar.

Jämfört med motsvarande dieseldrivna lastbil uppgår viktökningen till ungefär 300 kg. Till detta kommer vikten för bränsleceller, vätgastankar och batterier.

En tidigare sammanställning över prototyp-, demonstrations- samt kommersiella drag- och lastbilar med bränsleceller visar att effekten för bränsleceller varierar mellan 80 och 300 kW och batterikapaciteten varierar mellan 12 och 320 kWh (se avsnitt 2.1.2). Powercells bränslecell MS 100 har en effekt på 100 kW väger 150 kg.

För att kunna framföra ett fordon med hög vikt, i efterfrågad hastighet, på motorväg väljs ofta bränsleceller med hög effekt, såsom 200 kW. En ansats utifrån detta effektbehov medför en ungefärlig vikt på 300 kg för ett bränslecellspaket.

För litium-jon-batterier har en densitet på 155 Wh/kg ansatts. I en tillämpning med bränsleceller är det aktuellt att ansätta en total batterieffekt på 50 kWh vilket medför en batterivikt på 320 kg.

Fallstudierna visade att det krävs en räckvidd på 25 – 96 km för att fordonen ska klara en vända (körning tur och retur) på en energipåfyllning. Energibehovet för de undersökta transportuppdragen uppgick till 25 – 150 kWh. I fallstudierna efterfrågades en vätgasmängd per vända på 1,4 – 8,8 kg, utifrån vilket fordonens gaslager dimensioneras. Gastankarnas kapacitet, eller lagringsdensitet, har tidigare legat i intervallet 2,8 – 4,4 viktsprocent (DOE, 2015/I). Med detta avses att lagring av 10 kg vätgas i ett fordon kräver en tank som väger mellan 220 och 360 kg. Den pågående utvecklingen innefattar ett mål att förbättra detta till 5,5 viktsprocent 2020, med ett långsiktigt mål (2030) på 7,5 viktsprocent (Green Car Congress, 2014; DOE, 2015/II). Toyota Mirai hade 2017 en lagringsdensitet på 5,7 viktsprocent (Toyota, 2017). Av intresse är att det bränslecellspaket som finns i Toyota Mirai även används i den tunga bränslecellsdrivna dragbilen Toyota Alpha (se avsnitt 2.1.2).

Utifrån den pågående utvecklingen ansätts för en fordonslösning med jämförelseår 2019/2020 en energidensitet för vätgastankarna på 5,5 viktsprocent (vid 350 bars tryck). För 10 kg vätgas kommer vätgastankarna således att väga 180 kg.

Vikten för elmotor, bränsleceller, batteri och vätgastankar och andra komponenter uppgår därmed till 1 100 kg, det vill säga 1,1 ton. För enskilda fordon är det tillåtet med en bruttovikt som överstiger de värden som gäller avseende bruttovikt för enskilt fordon med den extra vikt som tekniken för det alternativa bränslet kräver, dock högst 1 ton. Under dessa förutsättningar påverkas inte lastvikten för enskilda fordon med två eller tre axlar, av den tillkommande extra vikten.

Batterielektrisk drivlina med möjlighet att tillför energi under färd genom strömavtagare

Om fordonen kan strömförsörjas under färd kan batterikapaciteten och därmed batterivikten minskas. Ett jämförelsealternativ som bygger på ett batterielektriskt fordon där batteriernas kapacitet minskats genom att fordonet under färd istället till viss kan elförsörjas externt, genom ett elvägsystem, har tagits fram.

Eftersom denna teknik är i ett tidigt utvecklingsstadium har det varit svårt att inhämta relevanta underlag för analyser och jämförelser. Studier har dock visat att strömavtagare kan väga 100 – 400 kg beroende på utförande (Treiber et al, 2016). Om strömavtagaren antas väga 250 kg och elmotor samt komponenter väger ca 300 kg mer än motsvarande dieseldrivna lastbil uppgår den extra vikten exklusive batterier till 550 kg. Merkostnaden för att kunna elförsörja ett fordon med en kontaktledning vid en elväg har angivits till 500 000 – 800 000 kr (Andersson et al, 2018).

I sammanhanget är det oklart om denna merkostnad refererar till en konventionell dieseldriven lastbil med motsvarande kapacitet, eller avser merkostnader för att komplettera ett parallellhybridfordon av den typ som används vid den pågående testdriften i Sandviken. Denna typ av fordon är i grundutförandet betydligt dyrare än ett konventionellt dieseldrivet fordon. Kostnaden för en aktiv, eller intelligent strömavtagare av den typ som används vid elvägsystem har tidigare beräknats till 120 000 – 240 000 kr (Johansson et al, 2012). Med enklare strömavtagare för bussar, så kallade trolleystänger, kan kostnaden begränsas till 30 000 kr.

Ett förenklat antagande är att fordonen erhåller elenergi till samma pris oavsett om det sker vid laddning, genom ett allmänt elnät eller genom ett elvägnäts kontaktledningssystem. Detta stöds av en elprismjämförelse som visar att Trafikverkets elpris för järnvägsfordon uppgick till 48,97 öre/kWh i december 2018 (Trafikverket, 2018). Detta kan jämföras med det i denna studie ansatta elpriset på 75,39 öre/kWh.

Ett antagande är även att fordonen till ungefär lika stora delar av körsträckan drivs med el från batterier respektive elförsörjs externt från kontaktledning. Batterierna antas vidare kunna laddas under den del av tiden fordonen erhåller extern elförsörjning. Denna intermittenta laddning medför att det blir svårt att effektivt utnyttja batteriernas kapacitet. En ansats är därför att batteriernas kapacitet endast kan utnyttjas till 40 %. Batterierna dimensioneras mot denna bakgrund efter ett energibehov som motsvarar en körsträcka som uppgår till en halv enkel väg i respektive kartlagt fall. Följande batterivikter kommer med detta att vara aktuella:

- Slussen – schaktmassor 530 kg
- Regeringsgatan – betong 140 kg
- Klarastrandsleden – asfalt 840 kg

Detta medför att följande lastkapaciteter kommer med detta att vara aktuella för de fordon som används i respektive fall:

- Slussen – schaktmassor 9,9 ton¹
- Regeringsgatan – betong 12,0 kg²
- Klarastrandsleden – asfalt 35,6 ton

¹ Ett tons extra bruttovikt, vilket maximalt medges för singelfordon som drivs med alternativa drivmedel, har lagts till och därmed ökat lastförmågan i motsvarande grad

² 700 kg extra bruttovikt har lagts till och därmed ökat lastförmågan i motsvarande grad

Vägar som kan antas komma att elektrifieras i Stockholmsområdet är Europavägar, såsom E4, E18 och E20 samt väg 73 (Nynäsvägen). Kostnaden för att bygga upp ett elvägnät med matning av likström, via ett tvåpoligt kontaktledningssystem, har beräknats till 9 – 14 mkr per kilometer (Andersson et al, 2018).

3.3.3 Slussen – berg- och schaktmassor

Jämförelse över energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt drivmedelskostnader för transporter av berg- och schaktmassor från Slussen till Högbotorp samt returkörning av tomma fordon har sammanställts och känslighetsanalyserats (se Tabell 13). I de fall, där fordonen har egna energilager är dessa dimensionerade så att de medger minst tre transportvändor, och returkörningar, utan energipåfyllning, vilket har antagits vara vad en förare hinner med under normalt arbetspass.

I sammanställningen har den transport-/fordonslösning som ger det lägsta värdet på någon av parametrarna energiförbrukning, koldioxidutsläpp respektive energikostnaden, per transporterat ton markerats med kursiv fet text. Vidare redovisas känslighetsanalyser där antingen diesel- eller elpriserna höjts med 10 %.

Tabell 13 Jämförelse av energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt energikostnad per ton för transporter mellan Slussen och Högbytorp

	Lastvikt (ton)	Energiförbrukning per enhet last (kWh/ton)	Koldioxidutsläpp per enhet last (kg/ton)	Energikostnad per enhet last (kr/ton)	Ut-gångs-läge	Känslighetsanalys Diesel-pris ökas med 10 %	Elpris ökas 10 %
Fordon drivna med fossil diesel	10,0	26,8	8,0	33,77		37,15	33,77
Fordon drivna med biodiesel (HVO)	10,0	26,8	1,1	34,50		37,95	34,50
Bränslecellsdrivna fordon	9,9	18,8 ¹	2,4 ²	36,27 ³		36,27 ³	38,34 ³
Batterielektriska plug-in fordon (andel av batterikapaciteten som nyttjas)	80 %	7,8	15,5	1,0	11,66	11,66	12,83
	60 %	6,8	17,7	1,1	13,38	13,38	14,71
	40 %	4,9	24,6	1,6	18,56	18,56	20,42
Batterielektriska fordon som kan elförsörjas externt genom kontakt- ledning (från elvägssystem)	9,9	12,4	0,8	9,36⁴		9,36⁴	10,30⁴

¹ Avser förbrukning av vätgas vid fordon (den elenergi som tillförs vid vätgaspåfyllningsanläggning med elektrolysör uppgår till motsvarande 26,8 kWh per ton last)

² Utsläpp vid generering av elenergi, enligt Svensk elmix, för påfyllningsanläggning med elektrolysör

³ Kostnad för den elenergi som tillförs en påfyllningsanläggning med elektrolysör

⁴ Elnätskostnaden antas vara densamma för elväg som för eldistributionsnätet vilket innebär samma energipris för el levererat till fordon som el levererad till laddare

Av sammanställningen framgår de lägsta värdena avseende energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt energikostnader vilka erhöles för batterielektriska fordon som kan elförsörjas externt. Detta gäller även sedan känslighetsanalyser utförts. En förutsättning var i dessa fall att elpriset var detsamma oavsett om elen erhöles från kontaktledning i ett elvägssystem, eller från det allmänna elnätet via laddare.

Den näst lägsta energiförbrukningen och energikostnaden erhöles för batterielektriska plug-in fordon för vilka 60 % respektive 80 % av batterikapaciteten antas kunna utnyttjas. Om istället endast 40 % av batterikapaciteten kan utnyttjas i ett fordon av detta slag krävs en större total batterikapacitet vilket ökar batterivikten. Av detta följer att lastvikten reduceras till knappt halva lastvikten för motsvarande dieselfordon, trots att hänsyn har tagits till att ett fordon som drivs med alternativa drivmedel tillåts ha upp till 1 ton högre bruttovikt. Jämfört med batterielektriska fordon som kan tillföras energi externt fördubblas energikostnaden.

Användning av fordon med bränslecellsdrift medför en energibesparing på 30 % jämfört med fordon som drivs med biodiesel eller fossil diesel, mätt i den energi som tillförs fordonet. Om jämförelsen, med bränslecellsdrift, istället avser elenergi som tillförs en påfyllningsanläggning, med elektrolysör, medan energin vid dieseldrift avser det bränsle som tillförs fordonet, blir energiförbrukningen lika för båda fallen. Detta är dock inte rättvisande eftersom energiförluster vid framställning och transport av dieselbränsle i så fall bör inkluderas (Treiber et al, 2018/I).

Energiförbrukningen för att utvinna, raffinera och transportera dieselbränsle kan ofta utgöra 10 % av energimängden (Ryttman, 2012). En jämförelse som innefattar

energiframställning skulle således innebära 10 % energibesparing vid bränsle-cellsdrift. Trots att energiförbrukningen per ton last, vid fordonet, blir högre för ett batterielektriskt fordon vid 40 % utnyttjande av batterikapaciteten blir energikostnaden per ton last knappt hälften så hög som för ett bränslecellsdrivet fordon.

Bio-diesel-bränsle ger lika låga koldioxidutsläpp som vid batterielektrisk drift, vid 60 % utnyttjande av batterikapaciteten samtidigt som fossil diesel ger 5 – 8 gånger högre koldioxidutsläpp än batterielektrisk drift beroende på batteriutnyttjandet.

3.3.4 Regeringsgatan – betong

En jämförelse över energiförbrukning, koldioxidutsläpp och drivmedelskostnader för transporter av betong från Farsta till en byggarbetsplats vid Regeringsgatan i centrala Stockholm samt returkörning av tomma fordon har sammanställts och känslighetsanalyserats (se Tabell 14). I fordon med egna energilager dimensionerades dessa för att medge minst tre transportvändor, och returkörningar, utan energipåfyllning, vilket antogs vara vad en förare hinner med under ett arbetspass. I sammanställningen har den transport-/fordonslösning som ger det lägsta värdet på någon av parametrarna energiförbrukning, koldioxidutsläpp respektive energikostnaden, per transporterat ton markerats med kursiv fet text. I samtliga fall redovisades de lägsta värdena för batterielektriska fordon som kan elförsörjas externt.

Tabell 14 Jämförelse av energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt energikostnad per ton för transporter mellan Farsta och Regeringsgatan

	Lastvikt (ton)	Energiförbrukning per enhet last (kWh/ton)	Koldioxidutsläpp per enhet last (kg/ton)	Energi kostnad per enhet last (kr/ton)			
				Ut-gångs-läge	Känslighetsanalys Dieselpris ökas med 10 %	Elpris ökas med 10 %	
Fordon drivna med fossil diesel	12,0	5,7	1,7	7,20	7,92	7,20	
Fordon drivna med biodiesel (HVO)	12,0	5,7	0,2	7,36	8,09	7,36	
Bränslecellsdrivna fordon	9,9	4,8 ¹	0,4 ²	6,49 ³	6,49 ³	6,87 ³	
Batterielektriska plug-in fordon (<i>andel av batterikapaciteten som nyttjas</i>)	80 % 60 % 40 %	12,0 11,7 11,2	2,6 2,6 2,8	0,2 0,2 0,2	1,94 1,99 2,08	1,94 1,99 2,08	2,13 2,19 2,29
Batterielektriska fordon som kan elförsörjas externt genom kontakt- ledning (från elvägssystem)	12,0	2,6	0,2	1,98 ⁴	1,98 ⁴	2,17 ⁴	

¹ Avser förbrukning av vätgas vid fordon (den elenergi som tillförs vid vätgaspåfyllningsanläggning med elektrolysör uppgår till motsvarande 6,8 kWh per ton last)

² Utsläpp vid generering av elenergi, enligt Svensk elmix, för påfyllningsanläggning med elektrolysör

³ Kostnad för elenergi som tillförs en påfyllningsanläggning med elektrolysör

⁴ Elnätskostnaden antas vara densamma för elväg som för eldistributionsnätet vilket innebär samma energipris för el levererat till fordon som el levererad till laddare

Av sammanställningen framgår att energiförbrukningen per transporterat ton gods är av likartad omfattning för de batterielektriska alternativen, både med och utan elförsörjning från kontaktledning genom ett elvägssystem.

För bränslecellsdrift är energiförbrukningen 16 % lägre än vid dieseldrift, vid en jämförelse av till fordonet tillförd energi, men nästan 20 % högre om den tillförda elenergin jämförs med dieselförbrukning. Om även energiåtgång vid framställning och transport av dieselbränsle beaktas minskar denna skillnad till 8 %.

För detta transportupplägg som utförs på en kort sträcka och med en relativt låg bruttovikt medför inte batterivikten någon stor inverkan på de batterielektriska fordonens möjliga lastvikt. Batterielektrisk drift erbjuder även de lägsta koldioxidutsläppen och de lägsta energikostnaderna.

Värt att notera är att en betongtransport kan bli stående vid en leveransplats i flera timmar, i väntan på lossning, och att det då krävs att betongroteraren är igång hela tiden. Detta fordrar energi vilket innebär att det för batterielektriska fordon kan medföra att fler batterier krävs alternativt att fordonet utrustas så att det kan laddas under den tid det står stilla. Utifrån denna aspekt kan det därför vara av större intresse att använda vätgasdrivna fordon som kan medföra en större energimängd utan att detta nämnvärt påverkar lastkapaciteten.

3.3.5 Klarastrandsleden – asfalt

Jämförelser över energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt drivmedelskostnader för transporter av asfalt från Arlanda till en arbetsplats vid Klarastrandsleden i centrala Stockholm samt returkörning av tomma fordon har sammanställts och känslighetsanalyserats (se Tabell 15). I de fall, där fordonen har egna energilager har dessa dimensionerats så att de medger minst tre transportvändor och returkörningar, utan energipåfyllning, vilket har antagits vara vad en förare hinner med under ett normalt arbetspass.

Tabell 15 Jämförelse av energiförbrukning, koldioxidutsläpp samt energikostnad per ton för transporter mellan Arlanda och Klarastrandsleden

	Lastvikt (ton)	Energiförbrukning per enhet last (kWh/ton)	Koldioxidutsläpp per enhet last (kg/ton)	Energikostnad per enhet last (kr/ton)	Ut-gångs-läge	Känslighetsanalys Diesel-pris ökas med 10 %	Elpris ökas med 10 %
Fordon drivna med fossil diesel	37,0	11,3	3,4	14,23		15,65	14,23
Fordon drivna med biodiesel (HVO)	37,0	11,3	0,5	14,54		15,99	14,54
Bränslecellsdrivna fordon	35,9	8,1 ¹	0,5 ²	10,92 ³		10,92 ³	11,54 ³
Batterielektriska plug-in fordon (<i>andel av batterikapaciteten som nyttjas</i>)	80 % 60 % 40 %	32,1 30,6 27,6	5,9 6,2 6,8	0,4 0,4 0,4	4,42 4,64 5,14	4,42 4,64 5,14	4,86 5,10 5,65
Batterielektriska fordon som kan elförsörjas externt genom kontakt- ledning (från elvägssystem)	35,6	5,4	0,3	4,06⁴		4,06⁴	4,47⁴

¹ Avser förbrukning av vätgas vid fordon (den elenergi som tillförs vid vätgaspåfyllningsanläggning med elektrolysör uppgår till motsvarande 11,5 kWh per ton last)

² Utsläpp vid generering av elenergi, enligt Svensk elmix, för påfyllningsanläggning med elektrolysör

³ Kostnad för elenergi som tillförs en påfyllningsanläggning med elektrolysör

⁴ Elnätskostnaden antas vara densamma för elväg som för eldistributionsnätet vilket innebär samma energipris för el levererat till fordon som el levererad till laddare

I detta transportupplägg är bruttovikten väsentligt högre och transportavståndet betydligt längre än för de två andra undersökta uppläggen. I och med detta blir energibehovet högre vilket medför att de elektriska fordonen behöver en högre batterikapacitet samt högre bränslecellseffekt. Detta innebär att lastkapaciteten för de elektriska fordonen reduceras jämfört med de dieseldrivna fordonen.

Användning av dieseldrivna fordon medför 40 % högre energiförbrukning, mätt vid fordonet, jämfört med bränslecellsdrift. Om även generering av vätgas beaktas blir däremot energiåtgången av samma storleksordning för dieseldrift respektive bränslecellsdrift. Om däremot energiåtgången för framställning och transport av dieselbränsle beaktas blir energikostnaden för bränslecellsalternativet ungefär 10 % lägre än för dieselalternativet.

När energikostnaden för bränslecellsdrift jämfördes med kostnaden för diseldrift framkom att denna blir nästan 25 % lägre än bränslekostnaden vid diseldrift.

3.3.6 Trängsel- och kapacitetseffekter

Den begränsade lastkapaciteten för de batterielektriska fordonen medför att fler fordonsrörelser krävs. Exempelvis reduceras lastkapaciteten med 25 % för de batterielektriska fordon där endast 40 % av batterikapaciteten utnyttjas. I stads- och tätortsmiljö medför detta en ökad trängsel samt eventuellt en ökad olycksrisk på grund av fler fordonsrörelser i trafikmiljön.

För de tre studerade transportuppläggen varierade körsträckan enkel väg mellan 12,5 km och 47,4 km. Lastvikten varierade samtidigt mellan 10 ton och 37 ton.

Detta medförde att det beräknade behovet av vätgas per vända, eller körning fram och åter, varierade mellan 1,4 och 9,0 kg. Detta innebär att de fordon som hade en lastvikt på runt 10 ton kunde klara flera vändor, eller körningar fram och åter, med de bränslecellsdrivna fordonskoncept som hittills har presenterats av olika fordonstillverkare (se Tabell 2).

För asfaltstransporter som innebär en hög last- och bruttovikt (37 tons last- och 64 tons bruttovikt) finns hittills inga fordonslösningar presenterade eller framtagna. Dock bedöms det vara möjligt att skala upp vissa koncept och fordonslösningar för att klara de efterfrågade last- och bruttovikterna.

3.4 ENERGIINFRASTRUKTUR

Antalet transporter, transportsträckorna samt lastvikterna inverkar på efterfrågan av energi för transportsystemet och påverkar därmed behovet av infrastruktur för energiförsörjning. Flertalet inrikes godstransporter utförs med lastbil inom samma kommun eller inom samma län. 2014 uppgick godsmängden per transport, med svenskregistrerade tunga lastbilar, till i genomsnitt 13 ton (Trafikanalys, 2016). Samtidigt var körsträckan per uppdrag för svenskregistrerade lastbilar i inrikes trafik med last i genomsnitt 84 km. Vid transporter inom samma kommun uppgick den genomsnittliga körsträckan till 46 km.

I Stockholm svarar transporter av massgods för över 50 % av den transporterade lastvikten (Trafikanalys, 2012) och utgör 18 % av antalet transporter. Totalt genomfördes 19 000 transportuppdrag avseende massgods per vecka i Stockholm.

3.4.1 Vätgaspåfyllning

För de bränslecellsfordon som finns på marknaden samt de prototyper som tagits fram ligger lagringskapaciteten mellan 30 kg och 60 kg vätgas. Detta innebär att i samtliga tre fall som undersökts bör fordonen klara sig på en vätgaspåfyllning per arbetsdag, eller skift (8 timmars drift).

Vid en genomsnittlig transport med en svenskregistrerad tung lastbil uppgår lastvikten till 13 ton och transportsträckan till 46 km (Trafikanalys, 2016). I de två första fallen i fallstudierna användes 3-axliga lastbilar med lastvikter upp till 12 ton, vid bärighetsklass 2 (BK2). Vid den bärighetklass som förekommer på en huvuddel av det statliga svenska vägnätet, bärighetklass 1 (BK1) medges för dessa fordonstyper en lastvikt på åtminstone 14 ton (Krantz et al, 2014). Utifrån insamlad data avseende bränsleförbrukning för de aktuella 3-axliga fordonen utfördes beräkningar som visade att den genomsnittliga transporten enligt ovan har ett energibehov som motsvarar 116 kWh elenergi vilket kan omräknas till 5,4 kg vätgas. Detta med ansatsen att fordonet lastas med 13 ton i den ena riktningen och återvänder tomt för att hämta en ny last, där körsträckan enkel väg är 46 km.

Med 19 000 transportuppdrag avseende massgods per vecka i Stockholm skulle detta innebära ett vätgasbehov som uppgår till ca 100 ton per vecka, under förutsättning att samtliga dessa transporter drivs med vätgas.

Ju fler fordon som utnyttjar en vätgaspåfyllningsstation desto lägre pris kan tas ut för vätgasen eftersom vätgasstationens och elektrolysörens investeringskostnader

därmed kan fördelas på en större mängd framställd vätgas. Vid fallstudierna ansattes ett vätgaspris, som baserades på ett utnyttjande av en anläggning för framställning och påfyllning av 450 kg vätgas per arbetsdag, eller dygn. I de studerade uppläggen förbrukades mellan 1,4 kg och 9,0 kg vätgas per transportuppdrag, eller vända (se avsnitt 3.3.6). Beroende på hur många vändor fordonen hinner utföra antogs de utifrån detta förbruka 4,2 – 27 kg vätgas per dag/arbetspass. Detta innebär att det teoretiskt behövs en beläggning på mellan 17 och 107 fordon per arbetsdag, eller dygn, för att utnyttja anläggningens kapacitet.

För vätgasdrivna fordon som utgår från samma plats vid varje transport, såsom betong- och asfaltstransportfordon, kan det vara lämpligt att anlägga stationer för vätgaspåfyllning vid de aktuella betong- eller asfaltsfabrikerna. Det krävs dock att efterfrågan av vätgas är tillräckligt stor vid dessa anläggningar för att de ska kunna bära den investeringskostnad som en vätgaspåfyllningsstation medför. Eftersom de aktuella fordonen vanligen endast behöver fylla på vätgas en gång per dygn kan det i vissa fall vara en bättre lösning att fordonen fyller på vätgas vid en lämpligt lokaliserad publik påfyllningsstation. På detta sätt kan kostnaden bäras av flera användare och/eller fordon samtidigt som att detta bidrar till att underlag skapas för en utbyggnad av en publik infrastruktur för vätgaspåfyllning. Dock förmodas dessa stationer behöva anpassas för att kunna fylla på vätgas av både 700 bars tryck (vanligt för personbilar) och 350 bars tryck (vanligt för tunga fordon såsom lastbilar), vilket medför en ökad kostnad för vätgaspåfyllningsstationen.

För att kunna betjäna fordon för transporter av massgods såsom grus, sten och kontaminerat material kan vätgaspåfyllningsstationer etableras vid eller i närheten av täkter och avfallsanläggningar alternativt längs de större vägar som trafikeras.

3.4.2 Laddning

Investeringskostnaderna för småskaliga laddstationer för batterielektriska fordon är låga i jämförelse med kostnaderna för vätgaspåfyllningsstationer. Samtidigt kräver batterielektrisk drift ofta att transportuppläggen måste anpassas för att möjliggöra laddning under arbetspassen. Alternativt måste fordonen utrustas med större energilager av vilket följer att fordonens lastkapacitet minskas vilket medför att antalet fordonsrörelser ökar.

Eftersom laddning tar tid, där det ofta fall kan ta flera timmar att ladda ett eldrivet fordon, behöver både laddningen och den tid denna tar i anspråk ofta planeras i förväg. Samtidigt utgör ofta antalet fordon som kan utnyttja respektive laddstation en begränsning. Om laddning ska ske över natten krävs en laddstation per fordon. Detta kan jämföras med bränslecellsfordon där ett stort antal fordon kan utnyttja en vätgaspåfyllningsanläggning eftersom en påfyllning bara tar några minuter.

3.4.3 Kostnader för energiinfrastruktur

Vätgaspåfyllningsanläggning

En anläggning för vätgaspåfyllning med en kapacitet på 450 kg per dag, eller dygn, har möjlighet att förse fordon, för genomsnittslasten med vätgas för 83 genomsnittliga transportuppdrag fram och åter. Anskaffningskostnaden för en vätgaspåfyll-

ningsstation, med elektrolysör och en kapacitet av 450 kg vätgas per arbetsdag, eller dygn, uppgår till ca 25 miljoner kr, inklusive elektrolysör (Melaina et al, 2013).

Anskaffningskostnaden för en laddbox avsedd för *normalladdning*, vilket innebär en effekt i intervallet 3 – 11 kW, uppgår till mellan 7 000 och 20 000 kr (Emobility, 2018). Kostnaden för en semisnabbladdare, med en laddeffekt i intervallet 11 – 22 kW uppgår till mellan 20 000 kr och 50 000 kr medan kostnaden för en snabbbladdningsstation inklusive nätanslutning, driftövervakning, väderskydd, skyltar, belysning med mera däremot ligger i ett intervall mellan 200 000 kr och 550 000 kr.

Laddutrustning

För ett batterielektriskt fordon med energibehov på 116 kWh kommer tiden för en *normalladdning* att uppgå till mellan 10,6 och 38 timmar vilket i dessa fall innebär att detta laddningsförfarande, på grund av tidsåtgången, är mindre lämpligt. Vid *semisnabbladdning* (effekt: 11 – 22 kW) är tidsåtgången mellan 5,3 och 10,6 timmar och vid *snabbladdning* (effekt: 50 kW) är tidsåtgången 2,3 timmar vilket i båda fallen är laddningstider som kan accepteras för fordon som utför massgodstransporter.

Kostnaden för semisnabbladdare som har kapacitet för att elförsörja 83 genomsnittliga transportuppdrag, fram och åter per dag eller dygn, uppgår till 1,7 – 4,2 miljoner kr. Detta om det för varje transportuppdrag krävs en laddstation. Om det för 83 standardtransporter istället krävs hälften så många snabbbladdstationer kommer kostnaden istället att ligga i intervallet 8,4 – 23,1 miljoner kr.

Jämförelse

Med antagandena ovan blir anskaffningskostnaden lägre för 83 semisnabbladd- eller 42 snabbbladdstationer, än vad den blir för en vätgaspåfyllningsanläggning.

4 Resultat och slutsatser

I studien undersöktes vilka ekonomiska incitament som finns för entreprenad- och transportföretag samt åkerier att införskaffa och använda fordon som är utrustade med bränsleceller och vätgasdrift för att utföra massgodstransporter i städer och tätorter. Vidare har vätgasdrift med bränsleceller i elektrifierade drivlinor jämförts med andra alternativa drivmedel och drivlinor. Detta utifrån ekonomiska incitament samt energi-förbrukning och miljöpåverkan. Slutligen har i studien undersökts hur infrastruktur för att vätgasförsörja fordon för massgodstransporter i städer och tätorter kan utformas.

4.1 RESULTAT

4.1.1 Energi och miljö

I de transportupplägg som studerats medför en övergång till vätgasdrift 30 % lägre energiförbrukning mätt vid fordonet. Vid en utvidgad systembetraktelse, där den elenergi som tillförs till en elektrolys- och vätgaspåfyllningsanläggning jämförs med dieselbränsle, där hänsyn tagits till energiåtgång för transport och framställning av bränslet, begränsas minskningen av energiförbrukningen vid övergång till bränslecellsdrift till i storleksordningen 10 %. Dock medför övergången till bränslecellsdrift stora miljö fördelar där koldioxidutsläppen kan minskas med 70 % – 80 % och energikostnaden med 10 % – 20 % jämfört med fortsatt drift med fossil diesel.

För de fall där det däremot är möjligt med batterielektrisk drift kan ytterligare energi-, kostnads- och miljöbesparingar uppnås beroende på hur energibehovet ser ut vilket påverkas av transportsträckor och lastvikter. Om energibehovet är stort medför detta att en stor batterikapacitet måste finnas i fordonet vilket ökar dess egenvikt och förmodas reducera lastvikten. En begränsad lastvikt innebär att fler vändor krävs för en viss godsmängd vilket både ökar antalet fordonsrörelser samt medför en ökad energiförbrukning och miljöpåverkan per transporterat ton gods.

4.1.2 Incitament

Utifrån studiens resultat kan ett flertal incitament listas som kan utgöra motiv för entreprenad- och transportföretag samt åkerier att införskaffa och använda bränslecellsdrivna fordon för transporter av massgods. Dessa incitament är:

- Möjlighet att driva fordonen med ett fossilfritt bränsle (om vätgasen framställs med fossilfri el).
- Snabb vätgaspåfyllning och lång räckvidd vilket innebär att transportuppläggen inte måste anpassas särskilt till att exempelvis anknyta till platser för energipåfyllning och att fordonens lastvikt begränsas.
- Tyst drift jämfört med dieseldrift.
- Lägre underhållskostnader jämfört med dieseldrift.
- Lägre drivmedelskostnader jämfört med fossil diesel och biodiesel.

- Jämfört med batterielektriska fordon kan de vätgasdrivna fordonen utföra tunga och långa transportuppdrag vilket kan medföra lägre kostnader per transporterat ton gods samt per genomfört transportarbete (tonkm).

Kostnaden för fordonens framdrift samt kostnaden för energipåfyllningsstationer är emellertid lägre för batterielektriska fordon i kombination med laddstationer jämfört med bränslecellsdrivna fordon i kombination med anläggningar för vätgaspåfyllning. I de fall det är möjligt att skapa transportupplägg som baseras på batterielektrisk drift är detta system därför att föredra. Dock innebär batterier i fordon för massgodstransporter vanligen att den möjliga lastvikten minskar.

4.2 SLUTSATSER

Vid massgodstransporter är lastvikten av stor betydelse. Vid massgodstransporter i städer finns ett generellt behov av att kunna använda fordon som är tyngre än de bränslecellsdrivna fordonskoncept som hittills presenterats. Däremot är behovet av räckvidd betydligt kortare än vad de presenterade fordonskoncepten har idag.

För transporter över korta sträckor och med begränsade bruttovikter, främst när singellastbilar är aktuella, är det i flertalet fall teoretiskt möjligt att använda batterielektrisk drift där fordonet kan laddas vid raster och under natten.

För transporter över längre sträckor och/eller med högre bruttovikter samt för transporter där det även krävs energi till andra system än framdrift, exempelvis för betongroterare, är vätgasdrift däremot av intresse. En fördel med vätgasdrift är att den medför en snabb energipåfyllning och inte begränsar lastkapaciteten i samma omfattning som en batterielektrisk drift gör.

4.3 FORTSATTAS STUDIER

Denna studie har teoretiskt undersökt möjligheterna att driva fordon som utför massgodstransporter med bränsleceller och vätgas. Studien har visat att det i ett flertal fall kan vara fördelaktigt att välja bränslecellsdrift framför traditionell dieseldrift respektive batterielektrisk drift. För att gå vidare med detta bör en demonstration genomföras där ett eller flera fordons- och fordonskombinationer med bränslecellsdrift tas fram och testas under verkliga driftförhållanden.

Det är vidare av intresse att undersöka hur en infrastruktur för vätgasförsörjning av bland annat fordon för massgodstransporter bör utformas. Detta för att så många olika aktörer och typer av fordon som möjligt ska kunna utnyttja dem och på så vis öka lönsamheten för vätgaspåfyllningsstationerna. I samband med detta bör det undersökas vilka typer av fordon och inom vilka användningsområden som det ur energi-, kostnads- och miljösynpunkt kan vara motiverat att utrusta dessa med bränsleceller och vätgas.

Referenser

Andersson L, Skallefäll P, Skjutar K, Arfwidsson V, *Business Models and financing for the development of electric roads in Sweden*, Final report, EY (2018).

Air Liquide, *Gas Encyclopedia*, hämtad 2019-06-14, <https://encyclopedia.airliquide.com/hydrogen>, (2019)

CaFCP, *Medium- & Heavy-duty fuel cell electric truck Action Plan for California*, California Fuel Cell Partnership (2016)

Coop, *Coop öppnar första offentliga vätgasstationer i Schweiz*, Coop Schweiz <http://www.coop.ch/pb/site/medien/node/84684539/Lde/index.html> (2016)

DOE (U.S. Department of Energy), *Electrochemical Energy Storage Technical Team Roadmap September 2017* (2017/I)

DOE (U.S. Department of Energy), *Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan* (2017/II)

DOE (U.S. Department of Energy), *Fuel Cell System Cost – 2015*, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 15015 (2015/I)

DOE (U.S. Department of Energy), *Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan – Hydrogen Storage, 2015*, hämtad 2019-06-14, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/fcto_myRDD_storage.pdf (2015/II)

Electricitymap, *Sweden*, hämtad 2018-12-05, <https://www.electricitymap.org/?page=country&solar=false&remote=true&wind=false&countryCode=SE> (2018)

Emobility, *Vad kostar laddstationer*, hämtad 2018-12-14, <http://emobility.se/startside/laddstationsguiden/upphandling/vad-kostar-laddstationer/> (2018)

Energiföretagen, *Miljövärdering 2018*, Energiföretagen – Swedenenergy, (2018)

Energimyndigheten, *Värmevärdet från Energimyndighetens datalager (DW) 2017*, hämtad 2019-06-17, <http://www.energimyndigheten.se/statistik/branslen/varmevardet-och-emissionsfaktorer1/> (2017)

Eurostat, *Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards)*, [nrg_pc_204], senast uppdaterad: 18-06-2019, hämtad 2019-06-20, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/sv (2019)

FuelCellWorks, *Norwegian Foods Distribution ASKO Launches Hydrogen Truck Demo*, hämtad 2016-04-28, <https://fuelcellworks.com/news/norwegian-foods-distributor-asko-launches-hydrogen-truck-demo> (2016)

Green Car Congress, *Information Trends: ~6,500 hydrogen fuel cell vehicles have been sold globally; more than 50 % in California*, Green Car Congress, hämtad 2018-02-08 <https://www.greencarcongress.com/2018/02/20180208-it.html> (2018)

- Green Car Congress, DOE reports progress on development of hydrogen storage technologies, hämtad 2019-06-14, <https://www.greencarcongress.com/2014/11/20141117-doe-h2-storage.html> (2014)
- Heierson T, Sveriges Åkeriföretag, muntlig kommunikation, 2019
- HTAC, *2015 HTAC Annual Report of The Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee – Hydrogen and Fuel Cells*, United States Department of Energy (DOE), August 2016 (2016).
- Hydrogen Carshow, *Kenworth T680 Fuel Cell Heavy Truck*, hämtad 2018-12-12 <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/kenworth-t680-fuel-cell-heavy-truck/> (2018)
- HyWeb, *Wasserstoff daten – Hydrogen data*, hämtad 2019-06-14, <http://www.h2data.de> (2019)
- Högberg U, Parator Industri AB, muntlig kommunikation, 2017.
- H2 Energy, *The world's first fuel cell heavy goods vehicle able to fulfil Coop's logistics requirements*, Brochure 2017/6 (2017)
- Ibusuki S, *Fuel cell cars in for a lift as Japan looks to expand infrastructure*, Nikkei Asian Review, 2018-03-06, <https://asia.nikkei.com/Business/Business-Trends/Fuel-cell-cars-in-for-a-lift-as-Japan-looks-to-expand-infrastructure> (2018)
- Jobson E, *Summering av diskussion om bränsleceller i fordon*, Omvärldsanalys av energieffektiva vägfordon Nyhetbrev OmEV 2017-10-24 (2017)
- Johansson M, Josefsson P, Ljung J, *Design av Pick-up för Slide In – laddning av tunga fordon*, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University, 2012.
- Johansson M, Sveriges Åkeriföretag, muntlig kommunikation, 2019
- Krantz G, Bark P, *Energieffektiva kortväga massgodstransporter på väg*, TFK-rapport 2014:3 (2014)
- Melania, Penev M, *Hydrogen Station Cost Estimates*, NREL (2013)
- Mikulin J, Baronas J, Bekken M, Bekemohammadi R, Choe B, Chow Y, Del Core R, Devine B, Devlin P, Dunwoody C, Grant J, Guevara R, Hall J, Hanlin J, Impullitti J, Ippoliti M, Levin J, Littaua R, McKinney J, Mirisola L, Miyasato M, Moreland G, Natesan N, Neward M, Pickles J, Premkumar Y, Reed J, Rillera L, Silver F, Williams S, Wnuk L, Zuck D, Lee J, *Medium- & heavy-duty fuel cell electric truck action plan for California*, California Fuel Cell Partnership (2016)
- Nikola Motor, *Electric semi-trucks*, hämtad 2018-12-05, <https://nikolamotor.com/motor> (2018)
- Ny Teknik, *Catl har tillverkat battericell med energitäthet över 300 Wh/kg*, Ny Teknik 2019-04-09 (2019)
- Ny Teknik, *Energidensitet i elbilsbatterier – så har den utvecklats*, Ny Teknik 2018-02-16 (2018)

- O'Dell, *US Hybrid Jumps into Hydrogen Fuel Cell Truck Arena*, trucks.com, hämtad 2017-05-04, <https://www.trucks.com/2017/05/04/us-hybrid-hydrogen-fuel-cell-truck/> (2017)
- O'Dell J, *Toyota Unveils More Advanced Heavy-Duty Fuel Cell Truck Prototype*, Trucks.com, hämtad 2018-07-30, <https://www.trucks.com/2018/07/30/toyota-advanced-fuel-cell-truck/> (2018)
- Olsson P, Parator Industri AB, muntlig kommunikation (2016)
- OKQ8, *Priser – Prishistorik företag_OKQ8*, hämtad 2019-06-17, <https://www.okq8.se/foretag/> (2019)
- Park J, *Zero Emissions, Positive Performance: Kenworth's ZECT*, Today's Trucking, hämtad 2018-02-23, <https://www.todaystrucking.com/zero-emissions-positive-performance-kenworths-zect/> (2018)
- Ryttman G, *Miljöaspekter*, Facit.com, hämtad 2012-12-01, <http://www.facit.com/se/miljoaspekter/> (2012)
- Sandviken Pure Power, *Världens första elväg*, hämtad 2019-06-14, <https://sandvikenpurepower.se/elvag.html> (2019)
- Satyapal S, *U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cell Technology Overview*, FC EXPO 2018, Tokyo, Japan, hämtad 2018-03-01, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/03/f49/fcto_doe_h2_fc_overview_satyapal_fc_expo_2018_0.pdf (2018)
- Shumaker C, Serfass J, *Hydrogen and fuel cell on-road freight workshop report*, California Hydrogen Business Council (2017)
- SPBI – Svenska Petroleum & Biodrivmedel Institutet, *Energiinnehåll, densitet & koldioxidutsläpp*, hämtad 2019-06-14, <https://spbi.se/uppslagsverk/fakta/berakningsfaktorer/energiinnehall-densitet-och-koldioxidemission/> (2019)
- Toyota, *2017 Mirai Product Information*, hämtad 2019-06-14, <https://ssl.toyota.com/mirai/assets/core/Docs/Mirai%20Specs.pdf> (2017)
- Tønseth S, *The first hydrogen-powered truck in Northern Europe to create a new Norwegian industry*, FuelCellsWorks, hämtad 2018-03-12 (2018)
- Trafikanalys, *Godstransporter i Sverige – en nulägesanalys*, Trafikanalys Rapport 2016:7 (2016)
- Trafikanalys, *Godsflöden i Sverige – Analys av transportstatistik inom lastbilstrafik, bantrafik och sjötrafik*, Trafikanalys Rapport 2012:8 (2012)
- Trafikverket, *Trafikverkets elprisrapport – december 2018*, hämtad 2019-06-17, https://www.trafikverket.se/contentassets/c594c43ebafd424f8be007e44deed05f/2018_12_elprisrapport1.pdf (2018).
- Treiber A, Bark P, *Demonstration av bränslecellsdrift för tunga truckar och arbetsmaskiner inom processindustrin*, TFK-rapport 2018:5 (2018)
- Treiber A, Bark P, *Elektrifierad distribution av dagligvaror*, TFK-rapport 2018:4 (2018)

Treiber A, *Bränsleceller i intermodala transportsystem*, Energiforsk rapport 2018:478 (2018)

Treiber A, Bark P, *Infrastrukturlösningar för att öka massgodstransporternas effektivitet och produktivitet i städer*, TFK-rapport 2017:2 (2017)

Treiber A, *Bränslecellsdrift av tunga truckar*, Energiforsk rapport 2016:335 (2016)

Treiber A, Bark P, *Energieffektiva transporter av massgods i stora tätortsområden och storstäder*, TFK-rapport 2016:3 (2016)

Turpen A, *Fleet of Hyundai hydrogen fuel cell electric trucks to roll out from 2019*, New Atlas, hämtad 2018-09-20, <https://newatlas.com/hyundai-commercial-fuel-cell-truck-h2energy/56422/> (2018)

Wiberg J, Sveriges Åkeriföretag, intervju 2019-03-26 (2019)

FUEL CELL VEHICLES AND SYSTEMS FOR TRANSPORTS OF CONSTRUCTION MATERIALS IN CITIES

Om godstransporter inom en snar framtid ska vara i huvudsak utsläppsfria krävs en fortsatt energieffektivisering och en utveckling av elektrifierade fordon och drivsystem. Här har möjligheterna att använda vätgasdrivna fordon med bränsleceller för massgodstransporter i städer och tätorter undersökts.

Rapporten beskriver forskningsläget, identifierar trender kring användning av vätgas och bränsleceller och beskriver om och hur det bidrar till hållbara och energieffektiva godstransporter. Fordon med bränsleceller har här jämförts med fordon som drivs med andra drivlinor som batterielektrisk plug-in drift, batterielektrisk drift där energi tillförs från kontaktledning och fordon drivna med biodiesel eller fossil diesel.

En fördel med bränsleceller är att de kan drivas med vätgas som är framställd med fossilfri el. Vätgasdrift erbjuder en lång räckvidd och medger flexibla transporter som inte måste anknyta till platser för påfyllning av energi. Jämfört med batterielektriska fordon kan vätgasdrivna fordon utföra tunga och långa transportuppdrag vilket ger lägre kostnad per transporterat ton gods.

Vätgasdrift medger också en snabb påfyllning av energi och begränsar inte lastkapaciteten i samma omfattning som en batterielektrisk drift vanligen gör. Vätgasdrift och batterielektrisk drift är dessutom tystare i jämförelse med dieseldrift.

Energiforsk is the Swedish Energy Research Centre – an industrially owned body dedicated to meeting the common energy challenges faced by industries, authorities and society. Our vision is to be hub of Swedish energy research and our mission is to make the world of energy smarter!