

Framtidens transporter – Effektiv vätgaslogistik

Publik rapport



Författare: Patricia Ekenberg
Datum: 2026-03-11
Projekt inom Transport- och mobilitetstjänster



Fordonstrategisk
Forskning och
Innovation

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English	3
3 Bakgrund	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
4.1 Syfte	5
4.2 Forskningsfrågor	5
4.3 Metod	5
5 Mål	6
6 Resultat och måluppfyllelse	6
6.1 Uppnådda resultat och leveranser	6
6.2 Bidrag till FFIs mål	7
6.3 Hur målen har nåtts	7
7 Spridning och publicering.....	8
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	8
7.2 Publikationer	9
8 Slutsatser och fortsatt forskning	9
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	12

Kort om FFI

FFI, Fordonsstrategisk forskning och innovation, är ett samarbetsprogram mellan staten och fordonsindustrin som sedan 2009 finansierar forskning och innovation inom vägtransporter.

Läs mer på www.ffisweden.se

1 Sammanfattning

Projektet analyserar hur vägtransport av komprimerad vätgas fungerar i Sverige i dag samt vilka faktorer som styr kostnad, genomförbarhet och kommersiell bärkraft. I ansökan identifierades transportkostnader och en outvecklad distributionskedja som en central begränsning för vätgasens konkurrenskraft inom tung trafik. Studien bekräftar att logistiken är en avgörande faktor, men visar samtidigt att det finns tydliga och hanterbara utvecklingsvägar för att stärka systemets effektivitet.

Studien har genomförts av Scandinavian Horizon AB tillsammans med MaserFrakt AB och TRB Sverige AB. Arbetet bygger på intervjuer med aktörer i värdekedjan, teknisk analys, genomgång av gällande regelverk (bland annat ADR, TPED och LBE) samt illustrativa beräkningsexempel. Fokus har varit lastbilsburen distribution av komprimerad vätgas med MEGC, från fyllning vid produktionsanläggning till transport och lossning vid mottagande station.

Analysen visar att de mest betydande kostnadsdrivarna återfinns i tre huvudmoment: fyllning, transport och lossning. Fyllningstid, fyllningstryck och kompressorkapacitet påverkar hur många cykler per dygn som kan genomföras. I transportledet är körsträcka, förartid, fyllnadsgrad och investeringskostnad för dragbil och MEGC centrala parametrar. Lossningsmomentets tidsåtgång och tekniska gränssnitt påverkar i sin tur resursutnyttjande.

Genom scenariomodellering har studien kvantifierat hur fyllningstryck, transportkonfiguration och utnyttjandegrad påverkar kostnaden per levererat kilogram vätgas. Resultaten visar att högre transporterad mängd per cykel och hög utnyttjandegrad av kapitalintensiv utrustning är avgörande för att nå konkurrenskraftig kostnadsnivå. Samtidigt framgår att optimering måste ske på systemnivå med hänsyn till investering, teknisk komplexitet och mottagande anläggnings förutsättningar.

Studien belyser även hur affärsmodeller och ansvarsfördelning påverkar kostnadsbilden. Ägande av MEGC, ersättningsmodeller samt krav på leveranssäkerhet och redundans har direkt inverkan på kapitalbindning och riskfördelning i systemet. I en tidig marknad med osäker efterfrågan blir dessa faktorer särskilt betydelsefulla.

Regelverken utgör en viktig ram för logistiken och påverkar val av fordon, fordonskombinationer, fyllningstryck och hanteringsrutiner. Studien visar att det inom gällande regelverk finns visst utrymme för mer volymeffektiva fordonslösningar, men att tekniska, operativa och marknadsmässiga faktorer i dagsläget begränsar användningen av sådana upplägg.

En övergripande slutsats är att kostnadseffektiv distribution av komprimerad vätgas inte kan reduceras till enskilda tekniska parametrar. Logistiken måste analyseras och utvecklas som ett sammanhängande system där produktion, transport, mottagning, standardisering och affärsmodeller utformas i samverkan. Högre volymer, ökad standardisering av tekniska gränssnitt, förbättrad planering och ökad utnyttjandegrad av utrustning bedöms ha stor potential att stärka skalbarheten och den långsiktiga konkurrenskraften i svensk vätgasdistribution.

Studien utgör därmed ett praktiskt och systemorienterat kunskapsunderlag för aktörer inom transport- och energisektorn som planerar etablering eller utveckling av vätgasbaserade lösningar.

2 Executive summary in English

Sweden is positioning itself as a frontrunner in hydrogen infrastructure for heavy-duty transport. In the current market phase compressed hydrogen is primarily distributed by road using MEGC (Multiple Element Gas Container) systems. As pipeline infrastructure is not established, road-

based distribution constitutes the critical link between production sites and hydrogen refuelling stations. The commercial viability of hydrogen mobility therefore depends not only on production cost, but on the performance and efficiency of the logistics system.

This study provides a structured analysis of how road transport of compressed hydrogen currently operates in Sweden and which factors determine cost, feasibility and scalability. The work combines qualitative interviews with industry actors, technical analysis of filling and transport configurations, review of applicable regulatory frameworks (including ADR, TPED and national safety legislation), and illustrative scenario-based calculations.

The analysis identifies three main operational stages that drive cost: filling, transport and unloading. Filling pressure, compressor capacity and filling time determine how many delivery cycles can be completed. Transport distance, driver time, payload capacity and capital cost of MEGC units influence cost per trip. Unloading time and compatibility of technical interfaces affect total cycle time and asset utilisation.

Scenario modelling demonstrates that cost per delivered kilogram is highly sensitive to transported volume per cycle and utilisation rate of capital-intensive assets. Higher filling pressure and larger transport configurations can reduce cost per kilogram, but only when aligned with station design, production capacity and realistic cycle times. In early market stages, low utilisation leads to high unit costs. As volumes increase and coordination improves, significant cost reductions become achievable within the existing system framework.

The study further shows that regulatory requirements, while strict, do not fundamentally prevent more volume-efficient transport solutions. In practice, limitations are more closely linked to market maturity, lack of standardised technical interfaces and uncertainty in demand development. Standardisation of pressure levels, couplings and operational procedures is identified as an important enabler for improved interoperability and future scalability.

Beyond technical parameters, business models and risk allocation are central determinants of system efficiency. Ownership of MEGC units, pricing structures and delivery commitments directly influence capital binding and utilisation levels. In a low-volume market, uncertainty in demand increases financial risk and affects transport pricing. The study therefore concludes that hydrogen logistics must be developed as an integrated system in which production, transport configuration, station layout and commercial arrangements are designed in coordination.

For heavy-duty transport, distribution efficiency will directly affect total cost of ownership and long-term competitiveness of hydrogen-powered vehicles. Early infrastructure and logistics decisions will therefore have structural impact on scalability and market development.

Overall, the findings show that cost-efficient road-based hydrogen distribution is achievable. With increasing volumes, higher utilisation, improved planning and greater standardisation, there is strong potential to strengthen the commercial sustainability and scalability of hydrogen logistics in Sweden. The study provides a practical, system-oriented knowledge base to support investment decisions, infrastructure planning and continued development of hydrogen solutions for heavy transport.

3 Bakgrund

Sverige har höga ambitioner inom fossilfri tung transport och ser vätgas som en viktig energibärare i de segment där elektrifiering inte är tillräcklig eller praktiskt genomförbar. I den pågående uppbyggnaden av vätgasinfrastruktur är vägtransport av komprimerad vätgas en central och i dag dominerande distributionsform.

Samtidigt befinner sig marknaden i ett tidigt skede. Volymerna är begränsade, tekniska lösningar varierar och affärsmodellerna är ännu inte fullt etablerade. I detta skede får transportkostnaden

en avgörande betydelse för den totala konkurrenskraften och genomförbarheten i befintliga och nya projekt.

Kunskapen om hur logistiken faktiskt fungerar i praktiken och vilka faktorer som styr kostnadsbilden är samtidigt begränsad och fragmenterad. Tidigare analyser har ofta fokuserat på systemövergripande jämförelser mellan pipeline och vägtransport, medan konkreta operativa förutsättningar för vägdistribution i svensk kontext varit mindre belysta. Det har saknats en sammanhållen och praktiskt förankrad genomlysning av kostnadsstruktur, regelverk och affärsupplägg kopplat till faktisk drift.

Projektet har vuxit fram ur ett konkret behov hos de deltagande aktörerna. I arbetet med etablering av produktion, tankstationer och logistiklösningar har frågan om hur vägdistributionen kan optimeras, både tekniskt och kommersiellt, återkommande identifierats som en osäkerhetsfaktor. För aktörer som investerar i vätgasinfrastruktur är logistikens utformning direkt kopplad till risknivå och affärsmässig hållbarhet.

Mot denna bakgrund har projektet genomförts för att skapa ett gemensamt och praktiskt underlag kring hur vägtransport av komprimerad vätgas fungerar i dag, vilka kostnadsdrivare som är mest betydelsefulla samt hur tekniska, regulatoriska och affärsmässiga faktorer samverkar i logistikkedjan. Bakgrunden till projektet är således behovet av ökad systemförståelse för att möjliggöra en skalbar och kommersiellt hållbar vätgasdistribution inom svensk transportsektor.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

4.1 Syfte

Projektets syfte har varit att analysera kostnadsdrivare, identifiera logistikutmaningar och ta fram strategiska rekommendationer för en mer kostnadseffektiv och marknadsdriven vägdistribution av komprimerad vätgas. Utgångspunkten har varit att stärka den kommersiella genomförbarheten för vätgas inom tung transport genom att skapa ökad transparens kring hur logistiken fungerar i praktiken. Studien har haft ett tydligt systemperspektiv, där teknik, operativa förutsättningar, regelverk och affärsmodeller analyserats samlat snarare än isolerat.

4.2 Forskningsfrågor

Arbetet har strukturerats kring följande övergripande frågor:

- Vilka faktorer driver transportkostnader inom vätgasdistribution?
- Hur kan ekonomiska och logistikstrategiska principer skapa mer konkurrenskraftiga leveransmodeller?
- Hur kan samverkan i värdekedjan förbättra logistiken och effektivisera distributionen?

Frågorna har utformats för att ge ett praktiskt beslutsunderlag snarare än teoretiska modeller.

4.3 Metod

Projektet har genomförts i tre steg:

1. Kartläggning av transportkostnader och nyckeldrivare, där kostnadsstrukturen för fyllning, transport och lossning analyserats och systematiserats.
2. Analys av regulatoriska och operativa hinder, inklusive genomgång av relevanta regelverk samt praktiska förutsättningar som påverkar genomförbarhet och affärsupplägg.
3. Utveckling av strategier och rekommendationer, där identifierade kostnadsdrivare och systemberoenden sammanförts till vägledande slutsatser för hur vägdistributionen kan optimeras.

Metodmässigt har studien kombinerat intervjuer med branschaktörer, akademi och myndighet, teknisk genomlysning av transport- och fyllningslösningar samt illustrativa beräkningsexempel för att synliggöra samband och storleksordningar.

Beräkningarna är avsedda att vara pedagogiska och analytiska illustrationer snarare än exakta kalkyler. Studien gör inga anspråk på statistisk representativitet, utan syftar till att skapa förståelse för hur logistiken fungerar i ett tidigt marknadsskede och vilka mekanismer som driver kostnader i praktiken.

5 Mål

Målet med projektet var att ta fram ett gemensamt, praktiskt och tillämpbart kunskapsunderlag för vägtransport av komprimerad vätgas i Sverige. Projektet skulle tydliggöra hur logistiken fungerar i dagens system, identifiera de mest betydande kostnadsdrivarna i transportledet samt analysera hur teknik, regelverk och affärsmodeller samspelar och påverkar genomförbarhet och kostnadsnivå.

Syftet var vidare att genom intervjuer, teknisk analys och illustrativa beräkningsexempel skapa ökad transparens kring kostnadsstruktur och operativa förutsättningar. Ambitionen var att bidra till mer realistiska affärsbeslut och kostnadseffektiva logistiklösningar i ett tidigt marknadsskede, och därigenom stärka den kommersiella genomförbarheten för vätgas inom transportsektorn.

Projektet har varit tydligt branschdrivet och utgått från konkreta behov hos deltagande aktörer. Under projektets gång förändrades inte det övergripande målet. Däremot visade det sig att behovet av att klargöra regulatoriska förutsättningar och praktiska tolkningar av regelverk var större än initialt förväntat. Arbetet kom därför att omfatta en mer omfattande genomgång av ADR, TPED, LBE och relaterade ramar än vad som ursprungligen bedömdes nödvändigt. Denna fördjupning låg dock i linje med projektets syfte att skapa ett praktiskt och verklighetsnära underlag, och bidrog till att stärka kvaliteten och användbarheten i slutresultatet.

6 Resultat och måluppfyllelse

6.1 Uppnådda resultat och leveranser

Projektet har levererat det kunskapsunderlag som angavs i ansökan: en strukturerad och praktiskt förankrad analys av kostnadsdrivare, logistikutmaningar och affärsmässiga förutsättningar för vägtransport av komprimerad vätgas i Sverige. Resultaten bekräftar att transportledet är en central faktor för vätgasens kommersiella genomförbarhet inom tung trafik, men visar samtidigt att det finns tydliga och hanterbara möjligheter till effektivisering.

Studien har bland annat resulterat i:

- En strukturerad nulägesbild av marknad, logistik och operativa förutsättningar
- Identifiering och systematisering av centrala kostnadsdrivare i fyllning, transport och lossning
- Genomgång och tolkning av styrande regelverk (ADR, TPED, LBE m.fl.) i relation till praktisk drift
- Illustrativa beräkningsexempel som kvantifierar hur fyllningstryck, transportkonfiguration och utnyttjandegrad påverkar kostnad per levererat kilogram
- En systemanalys av hur affärsmodeller, ansvarsfördelning och standardisering påverkar kostnadsnivå och skalbarhet

Projektet har därmed konkretiserat hur logistiken fungerar i praktiken i ett tidigt marknadsskede och tydliggjort sambandet mellan tekniska val, kapitalutnyttjande och kommersiell bärkraft.

Resultatet utgör ett beslutsunderlag som kan användas i såväl planering av nya etableringar som vidareutveckling av befintliga transportupplägg.

6.2 Bidrag till FFIs mål

Projektet ligger i direkt linje med FFI:s programinriktning inom transport- och mobilitetstjänster samt Sveriges strategi för fossilfri transport. I ansökan identifierades kostnadseffektiv distribution som en av de kritiska faktorerna för vätgasens kommersiella genomförbarhet inom tung trafik. Genom att analysera transportekonomi, logistikoptimering och affärsmodeller har projektet konkret adresserat denna utmaning med fokus på effektivitet, transporteffektiva gods- och mobilitetstransportlösningar samt utveckling av tjänster och affärsmodeller.

Genom att identifiera centrala kostnadsdrivare och analysera hur resursutnyttjande, lastoptimering och planering påverkar ekonomin i distributionsledet har projektet bidragit till ökad förståelse för hur vätgaslogistik kan struktureras mer transporteffektivt. Analysen har även visat hur affärsmodeller och samverkan mellan aktörer i värdekedjan är avgörande för att minska kostnader och skapa stabila leveransupplägg. Därmed adresserar projektet inte enbart tekniska aspekter, utan även de tjänste- och affärsmässiga dimensioner som är centrala inom FFI:s delprogram.

Med en strukturerad kunskapsbas och konkreta rekommendationer för hur vätgaslogistik kan organiseras mer kostnadseffektivt skapar projektet bättre förutsättningar för investeringar, samverkan och uppskalning. Därmed bidrar resultaten till att stärka konkurrenskraften för fossilfria drivmedel inom transportsektorn och stödjer utvecklingen av effektiva, tillgängliga och långsiktigt hållbara mobilitetssystem.

6.3 Hur målen har nåtts

Projektmålen har nåtts genom en strukturerad och stegvis arbetsprocess i enlighet med ansökan.

I det första steget genomfördes en omfattande kartläggning av kostnadsstrukturen för vägtransport av komprimerad vätgas. Initialt gjordes en genomlysning av relevanta befintliga studier inom området där mer än 20 studier och rapporter genomgicks. Därefter inleddes arbetet med en teknisk genomlysning av etablerade MEGC-lösningar, fyllningssystem, mottagande anläggningar samt identifiering och nedbrytning av kostnadsposter i transportledet. Kartläggningen resulterade i en detaljerad kostnadsmodell där över 50 identifierade kostnads- och påverkansposter strukturerades och analyserades, från direkta transportkostnader och kapitalbindning till tidsrelaterade och operativa faktorer som påverkar slutpriset per levererat kilogram. Detta möjliggjorde en systematisk analys av hur enskilda parametrar och deras inbördes samband påverkar den totala kostnadsbilden.

Parallellt genomfördes mer semistrukturerade intervjuer med aktörer inom transport och tankstationsdrift, med fokus på faktiska driftförhållanden, återkommande utmaningar och kostnadspåverkande moment i fyllning, transport och lossning samt framtida utvecklingsmöjligheter. Dialogen med akademi och myndigheter bidrog till att sätta de operativa erfarenheterna i ett bredare system- och regelverksperspektiv samt att klargöra praktiska tolkningar av gällande regelverk.

I det andra steget analyserades regulatoriska och operativa ramar mer fördjupat. Projektgruppen gick systematiskt igenom tillämpliga regelverk, inklusive ADR, TPED och nationella bestämmelser, och förde dialog med berörda myndigheter för att klargöra praktiska tolkningar. Detta kombinerades med återkoppling från branschaktörer kring hur regelverken påverkar faktiska transportupplägg. Arbetet bidrog till att särskilja formella begränsningar från marknadsmässiga och organisatoriska hinder.

I det tredje steget utvecklades illustrativa beräkningsexempel och scenariomodeller. En parametriserad analys användes för att isolera effekten av fyllningstryck, transportkonfiguration, avstånd och utnyttjandegrad på kostnad per levererat kilogram. Resultaten diskuterades löpande

inom projektgruppen och validerades genom dialog med branschaktörer för att säkerställa att antagandena låg nära praktiska förhållanden. Därefter sammanfördes resultaten i en systemanalys där tekniska val, kapitalutnyttjande och affärsmodeller analyserades samlat.

En viktig del i målpuppfyllelsen har varit den omfattande dialogen med branschen. Genom intervjuer och dialog med aktörer i hela värdekedjan har projektet kunnat bygga en verklighetsnära nulägesbild. Denna dialog har inte enbart verifierat identifierade kostnadsdrivare och hinder, utan också synliggjort konkreta utvecklingspotentialer och samverkansmöjligheter.

Det genomgående systemperspektivet, från produktion till mottagande station och vidare till slutanvändning inom transportsektorn, har varit avgörande för att säkerställa att resultaten är praktiskt förankrade och kommersiellt relevanta. Kombinationen av analys och branschförankring har därmed varit central för att uppnå projektets mål.

Det övergripande målet har uppnåtts och projektet har genomförts i enlighet med ansökan. Några negativa avvikelser har inte förekommit.

En positiv utveckling under projektets gång var att analysen av regulatoriska och praktiska förutsättningar visade sig ha större betydelse än initialt bedömt. Detta innebär att arbetet med att klargöra regelverkens påverkan på transportupplägg och affärsmodeller fördjupades. Fördjupningen stärkte kvaliteten i de strategiska rekommendationerna och bidrog till ett mer heltäckande underlag, i linje med projektets systemperspektiv.

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	Resultaten förs vidare till andra utvecklings- och etableringsprojekt inom vätgasinfrastruktur där frågor om dimensionering, lokalisering och logistikupplägg är centrala. I ansökan beskrevs att projektet ska lägga grunden för framtida utveckling genom att identifiera kostnadsdrivare och optimera affärsmodeller. Denna funktion som referens- och beslutsunderlag innebär att studien bidrar till att påskynda implementering i kommande projekt, även om den inte är kopplad till produktutveckling av enskilda tekniska komponenter. Vidare har projektparterna valt att göra studien publik, dels som en bilaga i denna slutrapport men även publicering på MaserFrakts hemsida. Samtliga projektparter har delat studien på sina respektive LinkedIn-sidor, samt delat den med branschkontakter inom såväl akademi, science parks, privata bolag och medlemsorganisationer. Vi har även kontaktat svensk och internationell media, där bl.a. Fuel Cells Works delat resultatet.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Projektet har tydliga kopplingar till andra interna och externa initiativ inom vätgasproduktion, distribution och tankinfrastruktur. Genom att projektet genomförts i nära dialog med branschen och med aktörer längs hela värdekedjan finns goda förutsättningar för att resultaten snabbt kan integreras i pågående och planerade satsningar,

		vilket stärker genomslaget och påskyndar introduktionen av mer kostnadseffektiva logistiklösningar.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt		Ej relevant.
Introduceras på marknaden		Projektet introduceras inte som en marknadsprodukt, men resultaten används i kommersiella dialoger mellan aktörer i värdekedjan. I ansökan angavs att resultaten ska vägleda affärsbeslut och utveckla konkurrenskraftiga vägtgastransporter. Detta innebär att studien får direkt betydelse i marknadsnära sammanhang, särskilt i tidiga investerings- och samverkansdiskussioner.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		Vidare kan resultaten användas som underlag i dialog med myndigheter och i utveckling av policyramverk, vilket också lyftes i nyttiggörandebeskrivningen. Genom att tydliggöra kostnadsstruktur och regulatoriska beroenden skapas bättre förutsättningar för faktabaserade beslut även utanför projektgruppen.

7.2 Publikationer

Projektparterna är privata bolag och har därmed inte någon akademisk publiceringsplattform eller ambition att publicera resultaten i vetenskapliga tidskrifter. Projektet har haft ett tillämpat och marknadsnära fokus, med målet att ta fram ett praktiskt beslutsunderlag för branschen snarare än en akademisk forskningspublikation.

Studien bifogas i sin helhet i rapporteringen och sprids aktivt till relevanta aktörer inom vätgas-, transport- och energisektorn. Spridningen sker genom branschdialoger, presentationer och direkt delning med berörda aktörer, i syfte att bidra till ökad kunskap och praktisk implementering i kommande projekt och affärsupplägg. I samband med publicering av studien på MaserFrakts hemsida har den internationella nyhets- och medieplattformen Fuel Cells Works delat resultatet både på sin hemsida och på LinkedIn med över 40 000 följare.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Studien publiceras och är öppet tillgänglig för allmänheten, för att möjliggöra spridning har vi valt att inkludera den som en bilaga i denna slutrapport. I detta avsnitt följer en sammanfattning av nyckelinsikter och resultat från studien.

Studien visar att kostnadseffektiv distribution av komprimerad vätgas inte kan reduceras till en fråga om enskilda tekniska val eller transportkostnader. Logistiken måste förstås som ett sammanhängande system där teknik, marknadsmognad, standardisering, regelverk och affärsmodeller samverkar över tid.

- **Marknadsmognad och standardisering**

Dagens kostnadsnivåer är i stor utsträckning en konsekvens av att marknaden befinner sig i en etableringsfas med låga volymer och aktörsspecifika lösningar. Logistiken fungerar ännu inte som ett industrialiserat system. En central slutsats är att takten i kostnadsreduktionen i hög grad styrs av hur snabbt och konsekvent standardisering kan etableras. Standardisering av tekniska gränssnitt, trycknivåer, kopplingar och hanteringsrutiner är avgörande för att minska tidsförluster och specialanpassningar.

Samtidigt måste standardisering ske kedjevis, där produktion, transport och mottagning måste utvecklas i samverkan. Isolerade lösningar skapar ingen systemeffekt. Det är också viktigt att

nya standarder utformas med framtida volymer och flexibilitet i åtanke, snarare än att historiska lösningar cementeras.

- **Trycknivåer och teknisk optimering**

Ett tydligt resultat är att fyllningstryck och transporterad mängd per cykel är starkt kostnadsdrivande. Högre tryck kan sänka kostnaden per kilogram genom ökad transportvolym, men sambandet är inte linjärt. Ökade trycknivåer innebär högre investeringskostnader, teknisk komplexitet och i vissa fall reducerad nyttolast.

Den mest kostnadseffektiva lösningen uppstår därför inte vid maximalt tekniskt möjligt tryck, utan i ett optimerat intervall där investeringskostnader, teknisk tillgänglighet och mottagarens förutsättningar vägs samman. Tekniska beslut behöver tas med hela systemets kapacitet i beaktande.

- **Utnyttjandegrad och flödesperspektiv**

Utnyttjandegraden av kapitalintensiv utrustning, särskilt MEGC, framstår som en av de mest avgörande faktorerna för kostnad per levererat kilogram. Långa cykeltider, väntetider och tomkörning innebär att investerat kapital genererar begränsad levererad volym. Åtgärder som ökar antalet cykler per enhet; effektiv planering, förutsägbara flöden och minimering av stillestånd, är centrala för konkurrenskraften.

- **Pooling och systemkrav**

Ökat samutnyttjande eller pooling av MEGC framstår som en möjlig utvecklingsväg för att minska överkapacitet och kapitalbindning. Samtidigt innebär detta ökade krav på standardisering, spårbarhet, gaskvalitetskontroll och digitala stödsystem. Pooling är därmed en systemförändring som kräver både teknisk harmonisering och organisatorisk samordning.

- **Regelverk och svenska förutsättningar**

Regelverken sätter ramarna för logistiken, men studien visar att det inom gällande regelverk finns ett större handlingsutrymme än vad som i dag utnyttjas. I svensk kontext finns exempelvis nationella förutsättningar och multilaterala avtal som möjliggör mer volymeffektiva fordonskombinationer än vad som är standard enligt europeiska utgångspunkter. Samtidigt påverkas teknikutveckling och standardisering av större europeiska marknader, vilket kan begränsa utvecklingen av lösningar anpassade till svenska förhållanden.

- **Avstånd, lokalisering och flexibilitet**

Transportavstånd påverkar inte enbart rörliga kostnader utan även cykeltider och därmed utnyttjandegrad. Lokalisering av produktion och användning är därför en strategisk fråga för kostnadseffektivitet. Mot bakgrund av osäker efterfrågeutveckling framstår flexibilitet som en övergripande designprincip. Etableringar bör utformas så att de kan anpassas till förändrade flöden och marknadsförutsättningar över tid.

De största möjligheterna till kostnadsreduktion uppstår när tekniska lösningar, standardisering, affärsmodeller och samverkan utvecklas som ett sammanhängande system. Studien visar att det finns ett långsiktigt utvecklingsutrymme för att förbättra kostnadseffektiviteten, inklusive mer volymeffektiva fordonslösningar inom ramen för gällande regelverk. För att realisera denna potential krävs dock samordnad utveckling av teknik, fordon, standarder och affärsmodeller.

Genom att adressera dessa samband skapas förutsättningar att successivt gå från en utvecklingsfas med höga enhetskostnader till en mer mogen, konkurrenskraftig och skalbar vätgaslogistik.

Studien har identifierat ett antal områden där ytterligare analys skulle kunna fördjupa förståelsen av systemets utvecklingspotential. Ett sådant område är praktiska demonstrationer av mer

samordnade transportupplägg, inklusive pooling och gemensam planering mellan aktörer, vilka skulle kunna ge ytterligare kunskap om hur nyttjandegrad och kapitalbindning kan optimeras i verklig drift.

Ytterligare fördjupning kan även vara relevant kring standardisering av tekniska gränssnitt samt digitala verktyg för planering, spårbarhet och kapacitetsstyrning, särskilt i takt med att marknaden mognar och volymerna ökar.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner



Scandinavian Horizon AB, www.scandinavianhorizon.com

Kontaktperson: Patricia Ekenberg, COO

patricia@scandinavianhorizon.com



MaserFrakt AB, www.maserfrakt.se

Kontaktperson: Per Bondemark, VD

per.bondemark@maserfrakt.se



TRB Sverige AB, www.trb.se

Kontaktperson: Fredrik Landegren, VD

fredrik.landegren@trb.se



VÄGTRANSPORT AV KOMPRIMERAD VÄTGAS

*Nuläge, kostnadsstruktur och
utvecklingsmöjligheter*

Scandinavian
HORIZON



MaserFrakt

Med finansiering från

VINNOVA
Sveriges innovationsmyndighet



Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

Förord

Utvecklingen av en fungerande marknad för grön vätgas är en central del av omställningen till ett fossilfritt energisystem. I takt med att vätgassatsningar går från planering till genomförande har en gemensam utmaning blivit allt tydligare: hur vätgasen faktiskt ska transporteras på ett fungerande och kostnadseffektivt sätt. För många aktörer är vägdistribution av komprimerad vätgas i dag den primära lösningen, samtidigt som kunskapen om dess praktiska och ekonomiska förutsättningar i Sverige ofta är fragmenterad.

Denna studie har vuxit fram ur ett konkret behov i branschen. I arbetet med faktiska projekt och etableringar har frågor om logistikens genomförbarhet, kostnadsbild och praktiska begränsningar återkommit tidigt, detta ofta innan det funnits samlade och jämförbara underlag att luta sig mot. Studien har därför tagits fram för att bidra med en mer verklighetsnära förståelse av hur vätgaslogistiken fungerar i praktiken och vilka faktorer som faktiskt driver kostnader i transportledet.

Mot denna bakgrund har Scandinavian Horizon AB, tillsammans med MaserFrakt AB och TRB Sverige AB, valt att gemensamt ta sig an frågan om vätgaslogistikens förutsättningar. Studien är framtagen av kommersiellt operativa aktörer med erfarenhet från transportverksamhet, system- och regelverksfrågor samt utveckling av logistik- och affärsupplägg. Ambitionen har varit att arbeta nära verkligheten och att genom konkreta exempel, jämförelser och alternativa upplägg tydliggöra vilka val som i praktiken avgör genomförbarhet och kostnadsbild.

Genom intervjuer, teknisk analys och illustrativa beräkningsexempel synliggör studien hur val av fyllningstryck, transportkonfiguration, utnyttjandegrad och affärsmodeller påverkar genomförbarhet och kostnadsbild. Ambitionen har inte varit att ta fram exakta kalkyler, utan att skapa ökad transparens och en gemensam grund för diskussion om kommersiell bärkraft i tidiga etableringsskeden.

Ett varmt tack riktas till de företag, myndigheter och organisationer som delat med sig av sina erfarenheter och perspektiv. Studien har genomförts med stöd från Vinnova och Fordonsstrategisk Forskning och Innovation (FFI).

Förhoppningen är att rapporten ska kunna fungera som ett praktiskt underlag för fortsatt dialog, samverkan och beslutsfattande mellan de aktörer som tillsammans formar den framväxande vätgaslogistiken i Sverige.

Christoffer Löfström
Patricia Ekenberg
Scandinavian Horizon

Sammanfattning

Denna studie analyserar hur vägdistribution av komprimerad vätgas fungerar i Sverige i dag och vilka faktorer som styr kostnad, genomförbarhet och kommersiell bärkraft. I takt med att vätgasprojekt går från planering till genomförande framträder logistiken som en central flaskhals, präglad av höga kostnader, varierande arbetssätt och begränsad standardisering.

Studien, framtagen av Scandinavian Horizon AB tillsammans med MaserFrakt AB och TRB Sverige AB, bygger på intervjuer, teknisk analys, regelverksgenomgång och illustrativa beräkningsexempel. Fokus ligger på lastbilsburen distribution med MEGC, från fyllning vid produktionsplats till leverans och mottagning.

Analysen visar att de främsta kostnadsdrivarna finns i fyllning, transport och lossning, där mängd transporterad gas per cykel och utrustningens utnyttjandegrad är avgörande. Fyllningstryck, transportkonfiguration och cykeltid påverkar direkt kostnad per kg, samtidigt som tekniska val måste optimeras utifrån hela systemets förutsättningar.

Leveransupplägg, affärsmodeller och ansvarsfördelning påverkar resursutnyttjande, kapitalbindning och risken för tomkörning och överkapacitet. Studien visar sammantaget att kostnadseffektiv vätgaslogistik kräver ett systemperspektiv där teknik, standardisering, planering och samverkan utvecklas parallellt. Med högre volymer, ökad standardisering och bättre kapacitetsutnyttjande finns tydlig potential att stärka skalbarheten och den kommersiella hållbarheten i svensk vätgasdistribution.

Innehållsförteckning

FÖRORD	1
SAMMANFATTNING	2
1. INTRODUKTION	4
1.1 BAKGRUND - VÄTGASENS ROLL OCH BEHOVET AV FUNGERANDE LOGISTIK	4
1.2 UTMANINGAR I DAGENS DISTRIBUTIONSSYSTEM	5
1.3 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	5
1.4 AVGRÄNSNINGAR	6
1.5 METOD OCH ANGREPPSSÄTT	6
2. NULÄGESBILD: LOGISTIK OCH MARKNADS-FÖRUTSÄTTNINGAR	7
2.1 LEVERANTÖRSMARKNAD OCH TILLGÅNG PÅ VÄTGAS	7
2.2 TRANSPORTLOGISTIK OCH OPERATIVA FÖRUTSÄTTNINGAR	8
2.3 TEKNISKA OCH OPERATIVA ASPEKTER I HANTERING OCH LEVERANS AV VÄTGAS	10
2.4 KVALITETSvariation OCH BEHOVET AV SPÅRBARHET I MEGC-HISTORIK	11
2.5 REGULATORISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	11
2.6 EKONOMISKA FÖRUTSÄTTNINGAR OCH KOSTNADSPÅVERKANDE FAKTORER	11
2.7 FRAMTIDA BEHOV OCH UTVECKLINGSMÖJLIGHETER	12
3. KOSTNADSANALYS AV LOGISTIK FÖR KOMPRIMERAD VÄTGAS	13
3.1 FLÖDESBESKRIVNING	13
3.2 KOSTNADSPOSTER PER STEG I LOGISTIKKEDJAN	14
3.2.1 Fyllning och förberedelse för transport	14
3.2.2 Transport och distribution	16
3.2.3 Lossning och mottagning	18
3.2.4 Affärsmodellens och samverkans kostnadspåverkan	19
3.3 TABELL: ÖVERSIKT ÖVER CENTRALA KOSTNADSDRIVARE	20
3.4 ILLUSTRATIVA BERÄKNINGSEXEMPEL	20
3.4.1 Antaganden och avgränsningar	21
3.4.2 Exempel 1: Fyllningstryck och transportkostnad per kilo vätgas	22
3.4.3 Exempel 2: Transportkonfiguration och nyttolast	23
3.4.4 Exempel 3: Utnyttjandegrad och kostnad för MEGC	25
3.4.5 Sammanvägda exempel – Ogynnsamt, medel och gynnsamt upplägg	26
3.5 STANDARDISERING OCH FLEXIBILITET I SYSTEMDESIGN	27
3.6 SAMMANFATTNING AV KOSTNADSDRIVARNA I HELA LOGISTIKKEDJAN	28
4. STYRANDE REGELVERK OCH JURIDISKA RAMAR	29
4.1 LAG OM TRANSPORT AV FARLIGT GODS	29
4.2 ADR - TRANSPORT AV FARLIGT GODS	29
4.2.1 Behållare och MEGC	29
4.2.2 Fordon och förare	30
4.2.3 Drift: fyllning, körning och lossning	31
4.2.4 Dokumentation, märkning och spårbarhet	31
4.2.5 Roller, utbildning och säkerhetsrådgivare	31
4.3 TPED	32
4.3.1 Roller & ansvar	32
4.4 LAG OM BRANDFARLIGA OCH EXPLOSIVA VAROR (LBE)	32
4.5 SEVESO	33
4.6 AVTAL OCH STANDARDVILLKOR FÖR VÄGTRANSPORTER	33
5. AVSLUTANDE SLUTSATSER OCH SYSTEMPERSPEKTIV	34
5.1 MARKNADSMOGNAD, STANDARDISERING OCH KOSTNADSUTVECKLING	35
5.2 TEKNISKA LÖSNINGAR, TRYCKNIVÅER OCH KOSTNADSOPTIMERING	35
5.3 UTNYTTJANDEGRAD SOM NYCKEL TILL KONKURRENSKRAFT	36
5.4 POOLING, SAMUTNYTTJANDE OCH SYSTEMKRAV	36
5.5 REGELVERK, GEOGRAFI OCH SVENSKA FÖRUTSÄTTNINGAR	36
5.6 AVSTÅND, LOKALISERING OCH FLEXIBILITET ÖVER TID	36
5.7 SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	37
6. REFERENSER	38

1. Introduktion

1.1 Bakgrund - vätgasens roll och behovet av fungerande logistik

Omställningen till ett fossilfritt energisystem kräver nya lösningar för både energiproduktion, lagring och distribution. Vätgas pekas ut som en central komponent i den europeiska klimatomställningen, särskilt för att minska utsläpp inom industri och transportsektorn.¹ Genom att producera vätgas med förnybar el kan fossila bränslen ersättas i sektorer där elektrifiering är tekniskt eller ekonomiskt svårt att genomföra. EU:s REPowerEU-plan anger målet om 20 miljoner ton förnybar vätgas per år till 2030, varav 10 ton ska produceras inom EU.² I Sverige pågår ett flertal initiativ för produktion och användning av grön vätgas, bland annat inom stålindustrin, processindustri, sjöfart och tunga vägtransporter.³

I takt med att dessa satsningar växer fram blir logistikens funktion och kostnadseffektivitet en avgörande förutsättning för att vätgasmarknaden ska kunna utvecklas i praktiken. Omställningen innebär att nya försörjningssystem behöver etableras för att vätgasen ska kunna distribueras effektivt, säkert och till rimlig kostnad. Transportledet utgör en central del av den totala värdekedjan och har stor betydelse för både ekonomi och klimatnytta. Kostnadseffektivitet i logistiken är därför en nyckelfråga för att möjliggöra en storskalig användning av vätgas, särskilt i de tidiga skedena då produktionsvolymerna ännu är begränsade och infrastrukturen under uppbyggnad.

För att förstå hur denna omställning praktiskt kan genomföras krävs därför en tydligare bild av hur vätgas faktiskt kan transporteras i dagens system och vilka faktorer som påverkar kostnadsnivån för vägburen transport av komprimerad vätgas.

Ett av de mest centrala stegen i utvecklingen av en fungerande vätgasmarknad är att förstå de praktiska och ekonomiska förutsättningarna för distribution. Flera studier har analyserat olika alternativ för vätgastransport, men fokus har ofta legat på jämförelser mellan pipelines och vägtransporter i ett mer teoretiskt eller systemövergripande perspektiv.⁴ Denna studie tar i stället sikte på de konkreta förutsättningarna för vägtransport av komprimerad vätgas.

Studien syftar till att identifiera och analysera de kostnadsposter som har störst påverkan på ekonomin i transportledet och att omsätta dessa resultat till praktiskt användbar kunskap. Genom att tydliggöra var i kedjan kostnader uppstår, vilka faktorer som driver dem och hur de kan hanteras eller reduceras, ska studien bidra till att skapa mer kostnadseffektiva och realistiska lösningar för distribution av grön vätgas i Sverige. På så sätt blir studien ett steg mot

¹ European Commission – A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe (2020)

² European Commission – REPowerEU Plan (2022)

³ Energimyndigheten – Vätgasens roll i transportsystemet, underlagsrapport från WSP (2023)

Luleå tekniska universitet – The Hydrogen Map,

https://ltu.instante.se/V%C3%A4tgas/Hydrogen_map_English_112024.html (2025)

⁴ Solomon, Heineken, Scheffler, Birth-Reichert – Cost Optimization of Compressed Hydrogen Gas Transport via Trucks and Pipelines (2024)

Department for Energy Security and Net Zero – Hydrogen Transport and Storage Cost Report (2023)

Griñan, G.G. & Gomez-Acebo, T. - Techno-Economic Analysis of Hydrogen Transport: Comparison between Tube Trailer and Pipeline. (2025)

att omsätta strategiska mål till faktiska, genomförbara logistiklösningar som stödjer en tidig marknadsintroduktion av vätgas.

1.2 Utmaningar i dagens distributionssystem

Utbyggnaden av en fungerande vätgasmarknad i Sverige bromsas i dag av flera utmaningar. Distributionen av komprimerad vätgas är fortfarande i ett tidigt skede, där intervjuer med aktörer visar att logistiken saknar etablerade arbetssätt, standarder och kostnadseffektiva flöden. Vätgasproduktionen är geografiskt koncentrerad, vilket leder till långa transportavstånd och hög kostnad per levererat kilo. Samtidigt är roller och ansvar i värdekedjan ottydligt definierade och aktörerna saknar gemensamma referensramar för hur logistik och samarbeten bör utformas. Dessa faktorer gör att transportledet riskerar att bli en flaskhals i den fortsatta utvecklingen av vätgasinфраstrukturen. Sammantaget innebär detta att marknaden ännu saknar stabila förutsättningar för att bygga upp en effektiv logistik, vilket i sin tur skapar behov av mer kunskap och tydligare vägledning.

Utvecklingen av en svensk vätgasmarknad har ökat behovet av ett tydligare kunskapsunderlag kring hur distributionen av komprimerad vätgas kan utformas på ett effektivt sätt.⁵ Många befintliga analyser fokuserar på systemnivå eller jämför pipelines med vägburen distribution, men ger begränsad vägledning om de konkreta operativa förutsättningarna för transporter i dagens svenska kontext. Det saknas särskilt tillämpbara underlag som beskriver hur fyllning, transport och lossning påverkar kostnad, kapacitet och resursbehov.

Ett annat tydligt behov är en ökad förståelse för hur regelverk påverkar möjligheterna att utforma effektiva logistiklösningar. Krav kopplade till exempelvis tillåtna fyllningstryck, fordonskombinationer, tillstånd och säkerhet påverkar både tekniska val och operativa arbetssätt, men dessa regelverks effekter har hittills varit svagt belysta i ett samlat svenskt perspektiv.

Vidare saknas helhetsbild över hur affärsmodeller, riskfördelning och ägarstrukturer påverkar logistikens utformning och kostnadsnivå. För aktörer som ska investera eller ingå samarbeten är det avgörande att förstå inte bara kostnaderna i varje steg, utan också hur ansvar och begränsningar i systemet påverkar varandra.

1.3 Syfte och frågeställningar

Syfte för studien är att ge aktörer i vätgasvärdekedjan ett gemensamt, praktiskt och lättillgängligt underlag som beskriver hur transport av komprimerad vätgas fungerar i dag och vilka faktorer som påverkar kostnad och effektivitet. Genom att skapa en tydlig helhetsbild av logistiken, från fyllning till lossning, och analysera hur teknik, organisation och affärsmodeller samspelar, är målet att stärka förutsättningarna för en kostnadseffektiv och skalbar distribution i Sverige. Studien ska bidra till att minska osäkerhet i tidiga investerings- och samarbetsbeslut och därmed stödja utvecklingen av en fungerande marknad för grön vätgas.

Frågeställningarna nedan konkretiserar vad studien avser besvara för att kunna ge denna vägledning.

⁵ Energiforsk – Vätgasens roll i energi- och klimatomställningen (2024)

- Vilka faktorer driver transportkostnader inom vätgasdistribution?
- Hur kan ekonomiska och logistikstrategiska principer skapa mer konkurrenskraftiga leveransmodeller?
- Hur kan samverkan i värdekedjan förbättra logistiken och effektivisera distributionen?

1.4 Avgränsningar

Studien avgränsas till att omfatta lastbilsburen transport av komprimerad vätgas inom Sverige på väg. Analysen fokuserar på logistikens flöden, struktur och kostnadsdrivare från produktionsplats till användningspunkt, med särskilt fokus på de förutsättningar som gäller i dagens transportsystem.

En central avgränsning är att studien primärt behandlar distribution till vätgastankstationer, eftersom dessa i dag har särskild operativ relevans i takt med att Sveriges vätgastankstationsnät för tung trafik byggs ut. Resultat och slutsatser är tillämpliga för andra typer av mottagare med liknande hanteringsförutsättningar, men studien omfattar inte en detaljerad genomgång av industriella användares interna system, processer eller buffertstrategier.

Transporterna utgår från användning av fossila drivmedel för lastbilar, vilket är det drivmedel som används för dessa transporter i nuläget. Studien omfattar inte scenarier med elektrifierade eller vätgasdrivna transportfordon och inkluderar inte heller jämförelser mellan olika transporttekniker.

I denna studie används begreppet MEGC (*"Multiple-Element Gas Container"*) som ett samlingsnamn för transportenheter bestående av flera sammanbyggda tryckkärl avsedda för vägtransport av komprimerad vätgas. Begreppet omfattar både containerbaserade lösningar och det som i dagligt tal ofta benämns som tubetrailer eller gascontainer. Om inget annat anges avses med MEGC den kompletta transportenheten inklusive tryckkärl och ram, avsedd för transport av komprimerad vätgas.

Denna studie analyserar kostnaderna i transportledet från det att vätgasen är producerad och tillgänglig för fyllning till MEGC, till dess att gasen är levererad till mottagande anläggning eller station. Tekniska moment som kompression, kylning och intern buffertlagring betraktas som anläggningsspecifika kopplat till produktionsplatsen och ingår därför inte som egna kostnadsposter i analysen. Deras kapacitet och prestanda beaktas dock indirekt genom hur de påverkar fyllnings- och lossningstider, möjliga fyllningstryck, genomströmning och därmed antalet leveranser per dag.

Studiens fokus ligger på transportledet; hur vätgasen distribueras med lastbil inom Sverige, vilka faktorer som påverkar effektivitet och kostnad, samt hur vägtransporterna kan planeras och optimeras utifrån befintliga förutsättningar i transportsystemet.

1.5 Metod och angreppssätt

Studien baseras på en kombination av kvalitativa intervjuer, teknisk analys, genomgång av regelverk samt förenklade beräkningsexempel. Intervjuer har genomförts med aktörer som i dag är verksamma inom drift av vätgastankstationer och distribution av komprimerad vätgas. Intervjupersonerna representerar olika roller i värdekedjan och har praktisk erfarenhet av leveranser, drift, teknik, regelverk och kostnadsfrågor. Intervjuerna har genomförts

semistrukturerat och fokuserat på återkommande mönster, operativa utmaningar och kostnadsdrivande faktorer snarare än på kvantitativa jämförelser mellan enskilda aktörer. Där uppfattningarna mellan intervjupersoner har skiljt sig åt har dessa hanterats genom jämförelse och sammanvägning, i kombination med teknisk analys och genomgång av gällande regelverk.

Intervjumaterialet används därmed som ett kvalitativt underlag för att belysa hur logistiklösningar fungerar i praktiken i ett tidigt marknadsskede, snarare än som ett statistiskt representativt underlag för hela marknaden.

Den tekniska analysen bygger på gällande europeiska och nationella regelverk för transport och hantering av komprimerad vätgas samt på etablerade tekniska lösningar för MEGC och vätgastankstationer. Regelverken används dels för att beskriva ramarna för hur logistik kan utformas i praktiken, dels för att förklara varför vissa tekniska och operativa begränsningar uppstår.

Kostnadsanalysen har genomförts genom att identifiera centrala kostnadsposter i logistikkedjan och analysera hur dessa påverkas av tekniska val, arbetssätt och affärsmodeller. Beräkningsexemplen i studien är avsedda att vara illustrativa snarare än exakta. De bygger på förenklade men realistiska antaganden och används för att visa storleksordningar, samband och relativa skillnader mellan olika upplägg.

Studien gör inga anspråk på att ge statistiskt representativa resultat för hela marknaden. I stället syftar analysen till att skapa förståelse för hur logistiken fungerar i ett tidigt marknadsskede, vilka mekanismer som driver kostnader och vilka åtgärder som har störst potential att förbättra effektiviteten i praktiken.

2. Nulägesbild: Logistik och marknadsförutsättningar

Nulägesbilden syftar till att beskriva hur distribution av komprimerad vätgas fungerar i praktiken i dagens svenska kontext. Avsnittet baseras i huvudsak på intervjuer med aktörer som driver vätgastankstationer och fokuserar på deras erfarenheter av leveranser, teknik, logistikupplägg, regelverk och kostnadspåverkande faktorer. Resultatet ska inte ses som en statistiskt representativ marknadsbild, utan som en sammanhållen beskrivning av återkommande mönster, variationer och utmaningar i dagens marknad.

2.1 Leverantörsmarknad och tillgång på vätgas

Leverantörsmarknaden för komprimerad vätgas i Sverige befinner sig i ett uppbyggnadsskede med ett begränsat antal producenter. Aktörerna beskriver att de i praktiken är beroende av en eller ett fåtal huvudleverantörer, vilket innebär att störningar hos enskilda producenter får tydlig påverkan på leveransläget. En återkommande iakttagelse är att leveranssäkerheten över tid påverkas av producenternas driftläge och prioritering mellan kunder. Vid kapacitetsbrist kan kunder utan långtidsavtal hamna lägre i prioriteringsordningen. Skillnader i rutiner mellan leverantörer, till exempel avseende provtagning, spolning och kvalitetssäkring, påverkar också hur snabbt en trailer kan fyllas och gör att fyllningstiderna kan variera från några timmar till över ett dygn.

Vissa stationer har i nuläget relativt låg förbrukning och kan klara sig i två–tre veckor mellan leveranser, medan andra är mer beroende av regelbunden tillförsel. I de senare fallen får förseningar i leveranserna direkt påverkan på stationens drift och tillgängligheten för tankande fordon.

Aktörerna beskriver att den nuvarande marknadsstrukturen påverkar kostnadsläget. De beskriver höga kostnader för gas, transport och containrar, där låg volym och begränsad konkurrens bidrar till att prisnivåerna är svåra att pressa ned. Flera lyfter att kostnadsbilden på sikt bedöms hänga samman med fler produktionsanläggningar, större volymer och ökad standardisering.

2.2 Transportlogistik och operativa förutsättningar

Transportlogistiken präglas i nuläget av att marknaden är relativt ung och volymerna begränsade. Beställningar av gasleveranser sker huvudsakligen via telefon eller e-post, ofta baserat på etablerade personkontakter och överenskomna tidsfönster. Det finns ännu inga gemensamma digitala lösningar som används för automatisk beställning eller delning av logistikdata mellan stationer, producenter och åkerier. Transportsträckornas längd varierar, men för flera stationer innebär hämtning och lämning av MEGCs att ekipagen körs långa sträckor, ofta med tom eller delvis tom trailer i ena riktningen. Detta beskrivs av flera aktörer som tidskrävande och kostnadsdrivande, samt som en faktor som binder MEGCs under längre perioder.

Tillgången på dragbilar som är dimensionerade för tunga MEGC och som uppfyller gällande regelverk lyfts som en praktisk fråga som behöver beaktas i planeringen. ADR-regler och tunnelrestriktioner påverkar dessutom val av rutter, vilket kan medföra att vissa körningar tar längre tid än den geografiska sträckan annars skulle kräva.

Som beskrivs närmare i avsnittet om styrande regelverk längre fram i rapporten finns det i dag ett regelverksmässigt utrymme för olika typer av fordonskombinationer vid transport av farligt gods. Trots att regelverket medger flera olika fordonskombinationer för transport av farligt gods, präglas dagens vätgaslogistik i praktiken av relativt konservativa fordonsupplägg. Transporterna genomförs i huvudsak med enkla ekipage med en MEGC-enhet per transport. Mer volymeffektiva upplägg, såsom fordonskombinationer med två 40-fots MEGC-enheter, förekommer i dagsläget i mycket begränsad omfattning eller inte alls i kommersiell drift.

De praktiska begränsningarna är i första hand tekniska och operativa snarare än regulatoriska. Valet av fordonskonfiguration påverkas av krav kopplade till FL-klassning, vikt- och axellastfördelning, bromssystem, manövrerbarhet vid lastning och lossning samt tillgång på typgodkända fordon och släp. Även marknadens tidiga mognadsgrad och begränsade erfarenhet av mer komplexa fordonsupplägg bidrar till att sådana lösningar ännu inte fått genomslag.

Utformningen av transportutrustning för vätgas sker i stor utsträckning inom ramen för europeiska vikt- och längdbegränsningar. Även om nationella regelverk i vissa länder, såsom Sverige, tillåter högre fordonsvikter, dimensioneras kommersiella MEGC-system generellt för att fungera inom bredare europeiska ramar. Detta innebär att möjligheten att fullt ut utnyttja nationella undantag i praktiken är begränsad, vilket påverkar hur mycket gas som kan transporteras per cykel.

Transportbranschen indikerar i intervjuerna att viljan att ta sig an vätgastransporter i hög grad avgörs av affärsmässig förutsägbarhet och risknivå. Tillgången på ADR/FL-klassade fordon anpassade för vätgas är begränsad, samtidigt som brist på förare med ADR-tankbehörighet utgör en praktisk flaskhals.

Investering i ADR/FL-klassade specialfordon, i kombination med begränsad tillgång på förare med ADR-tankbehörighet och osäker framtida efterfrågan, innebär att risken för låg utnyttjandegrad upplevs som hög.

Hanteringen av gasleveranserna på tankstationerna (inkoppling och urkoppling) ser olika ut mellan aktörerna. På vissa stationer sköts detta av stationstekniker, på andra utbildas chaufförer för uppgiften. Rutinerna bygger i hög grad på interna instruktioner samt leverantörernas anvisningar och skiljer sig åt mellan stationer och leverantörer.

I intervjuerna lyfts också potentiella fysiska begränsningar på stationerna vid utökning av ekipage (längre/högre), till exempel:

- begränsat utrymme för långa trailers,
- krav på specifika dragstångslängder,
- manövreringsytor som innebär att fordon måste kunna backas in i bestämda vinklar,
- skyddsbarriärer och betongväggar som påverkar val av MEGC-typ.

Flera aktörer nämner ett behov av bättre överblick över tillgängliga MEGCs och lagernivåer, till exempel genom digital uppföljning av position och tryck. I dag hanteras detta främst genom manuell uppföljning och mätning.

Intervjuer med transportbranschen visar att vätgaslogistiken i nuläget präglas av försiktig uppbyggnad av kapacitet snarare än av fullskalig kommersiell drift. Transport av farligt gods är en etablerad del av många åkeriers verksamhet och vätgas uppfattas i sig inte som principiellt mer komplex än andra gaser. Däremot beskrivs marknaden som tidigt utvecklad, med osäkra volymer, begränsad historik och låg förutsägbarhet i efterfrågan, vilket påverkar hur transportörer planerar sin verksamhet.

I praktiken innebär detta att många transportörer i nuläget främst engagerar sig i vätgastransporter genom pilot- och demonstrationsprojekt, medan investeringar i permanent kapacitet ofta avvaktar tydligare långsiktiga uppdrag och stabila volymåtaganden, särskilt då fordon och utrustning har begränsad alternativ användning utanför vätgaslogistiken.

Åkerier med tidigare erfarenhet av gastransporter eller annan avancerad farligt gods-logistik bedöms ha lägre trösklar för att engagera sig, men även dessa efterfrågar tydligare ansvarsfördelning och stabila affärsupplägg för att kunna skala upp verksamheten.

Även ansvarsfördelning mellan transport, lagring och lossning framkommer som en praktisk fråga i den dagliga driften. Otydlighet kring ansvar vid driftstörningar, incidenter eller kvalitetsavvikelser beskrivs påverka både prissättning och försäkringsvillkor. Aktörer med tidigare erfarenhet av gastransporter eller annan farligt gods-logistik bedöms ha lägre trösklar för att engagera sig, men även dessa efterfrågar tydligare strukturer för ansvar och samverkan för att kunna skala upp verksamheten.

2.3 Tekniska och operativa aspekter i hantering och leverans av vätgas

Intervjuerna visar att de tekniska förutsättningarna för hantering och leverans av komprimerad vätgas varierar mellan aktörerna, men att vissa gemensamma frågor återkommer.

Trycknivåerna vid fyllning av MEGC är centrala. I flera fall fylls MEGCs till 200–300 bar, även när de är dimensionerade för högre tryck. Detta kopplas bland annat till kompressorkapacitet hos producenten, certifieringskrav för specifika kopplingar och begränsningar i slang- och anslutningssystem. Aktörerna beskriver att den trycknivå som används vid fyllning påverkar hur mycket gas som levereras per transport och hur ofta leveranser behöver ske.

Val av fyllningstryck vid transport av komprimerad vätgas är i praktiken en fråga om systemoptimering snarare än att utnyttja maximalt tillåtet tryck. Även om MEGCs med trycknivåer upp till 640 bar är tillgängliga på marknaden och tillåtna inom gällande regelverk, påverkas den faktiska nyttolasten av behållarnas vikt, dimensionering och materialval. I många tillämpningar innebär detta att mellanliggande trycknivåer kan ge en mer balanserad relation mellan transporterad mängd, investeringskostnad och teknisk komplexitet.

Skillnader i kopplingar och anslutningar mellan leverantörer och stationer innebär att MEGCs och anläggningar inte alltid är direkt kompatibla. Det gäller exempelvis slangdimensioner, kopplingsstandarder och utformning av fyll- och lossningspaneler. I vissa fall nämns långa ledtider för komponenter, vilket påverkar möjligheten att snabbt ersätta eller komplettera utrustning.

Variationer i tekniska gränssnitt mellan olika anläggningar och transportlösningar är en återkommande utmaning. Även om övergripande standarder tillämpas, förekommer kund- och platsanpassade lösningar för anslutningar, säkerhetssystem och driftfilosofier, vilket begränsar möjligheten till fullt ut standardiserade logistikupplägg och ökar behovet av plats- och systemspecifik anpassning.

Det finns i dagsläget en rekommendation om kopplingstyp för MEGCs, men den har ännu inte fått någon bred spridning bland de enheter som hittills beställts och levererats på svenska marknaden. Samtidigt finns ett tydligt behov i marknaden av att standardisera kopplingar för MEGCs, liksom övriga anslutningar som krävs för inkoppling, styrning och mätning. Eftersom både producenter och mottagare av vätgas hanterar olika trycknivåer, är det sannolikt nödvändigt att etablera flera standardiserade kopplingsalternativ, anpassade för olika tryckintervall. En central säkerhetsaspekt är kravet på att det inte ska vara möjligt att ansluta en MEGC med högre tryck än vad mottagande anläggning är dimensionerad för. Detta innebär i praktiken att standardiseringen behöver omfatta flera separata kopplingstyper eller tydligt definierade tryckintervall, för att säkerställa både säker drift och kompatibilitet i hela värdekedjan.

Hantering vid lastning och lossning sker enligt etablerade procedurer som omfattar inkoppling, tryckutjämning, ventilationssteg och uppstart av fyllningssekvens. Procedurerna och ansvarsfördelning (tekniker vs. chaufför) varierar mellan tankstationsoperatörerna. Vidare skiljer stationernas tekniska kapacitet sig åt. Anläggningarna är utformade för att ta emot trailers inom ett visst tryckintervall och med vissa gränssnitt, vilket påverkar hur stor del av den levererade volymen som kan utnyttjas direkt respektive behöver hanteras via stationens mellanlager.

Säkerhetsrutiner kopplade till ADR samt interna krav återkommer i samtliga intervjuer. Det gäller exempelvis krav på utbildning av chaufförer, märkning av trailers och särskilda rutiner för tillträde till produktionsanläggningar eller stationer.

2.4 Kvalitetsvariation och behovet av spårbarhet i MEGC-historik

En operativ utmaning som flera aktörer lyfter är att vätgasens kvalitet kan påverkas av hur en MEGC har använts tidigare vid tidigare leveranser. När MEGCs cirkulerar mellan olika anläggningar och fyllningssystem kan de ”ärva” gas av lägre kvalitet eller föroreningar som uppstått vid tidigare cykler. Detta innebär att mottagande station eller kund riskerar att få vätgas med egenskaper som avviker från den specificerade kvalitetsnivån, trots att den senast genomförda fyllningen uppfyllt kraven vid produktionsplatsen.

I praktiken innebär detta att provtagning och kvalitetskontroll inte enbart behöver omfatta den aktuella fyllningen, utan även ta hänsyn till MEGC-enheternas historik, eventuella tidigare avvikelser, ställtider och hur tömda tryckkärlen varit vid tidigare leveranser.

Flera aktörer beskriver att detta kan leda till driftstörningar eller begränsningar i den egna verksamheten om gasen inte håller förväntad kvalitet. Detta beskrivs som en faktor som försvårar planering och ökar det operativa arbetet, eftersom varje MEGC potentiellt kan kräva olika hanteringsrutiner beroende på sin historik, vilket är något som ytterligare ökar det administrativa och operativa behovet i logistikkedjan.

2.5 Regulatoriska förutsättningar

De regulatoriska förutsättningarna består av en kombination av generella regelverk och leverantörsspecifika krav. ADR-regelverket styr bland annat vilka fordon som får användas, hur transporter får genomföras och vilka rutter som är tillåtna. Aktörerna beskriver att ADR-krav påverkar transportplaneringen, till exempel genom begränsningar vid tunnelpassager och krav på särskilda fordonskonfigurationer och kompetenser.

Vissa produktionsanläggningar ställer därutöver ytterligare egna interna krav på chaufförer, till exempel obligatoriska säkerhetsutbildningar för att få köra in på området. Dessa krav varierar mellan leverantörer och innebär att chaufförer kan behöva olika certifieringar beroende på hämtställe.

Frågor kopplade till tillstånd, axeltryck och fordonskombinationer förekommer också i intervjumaterialet. För vissa MEGCs ligger totalvikt och axeltryck nära gällande gränsvärden. Aktörer beskriver att frågor om vikt, lastfördelning och eventuella dispenser har diskuterats med myndigheter och att tolkningen av regelverket ibland upplevs variera.

2.6 Ekonomiska förutsättningar och kostnadspåverkande faktorer

Aktörerna beskriver att kostnadsstrukturen för vätgasdistribution påverkas av flera faktorer: transportsträckor, fyllnadstryck, utrustningens utformning och stationernas lagerkapacitet.

Hur mycket gas som kan transporteras per leverans beskrivs som centralt för kostnadseffektiviteten. Tryckbegränsningar vid fyllning påverkar den mängd som MEGC kan

lastas med och därmed hur många transporter som krävs. När trailers fylls till lägre tryck fördelas kostnader för chassi, dragbil och personal på en mindre gasvolym.

Transportsträckornas längd nämns som en annan viktig faktor. Långa avstånd mellan produktion och stationer innebär högre bränsle- och tidskostnader per leverans samt att MEGCs binds upp under längre perioder innan de kan nyttjas igen.

Utrustningen (MEGC, chassin och stationernas tekniska komponenter) är kapitalkrävande investeringar. Vissa aktörer beskriver att lättare eller mer högtrycksoptimerade lösningar finns, men till högre anskaffningskostnad. Reservdelar och specialkomponenter med långa leveranstider lyfts också som operativa hinder och kostnadsdrivande faktorer.

Kostnaden för vätgasen påverkas av leverantörsmarknadens struktur. Få producenter, varierande fyllnadskapacitet och krav på särskild vätgaskvalitet, exempelvis RFNBO (*“Renewable fuel of non-biological origin”*), anges som faktorer som påverkar prisnivån. Stationernas lagringskapacitet påverkar också kostnadsbilden. Mindre buffertlager ökar behovet av täta transporter, medan större lager kan möjliggöra längre leveranscykler men kräver högre investeringar.

Intervjuerna visar att kostnadsbilden i transportledet inte enbart drivs av tekniska parametrar såsom körsträcka och fyllnadstryck, utan även av marknadens mognadsgrad. Transportörer beskriver att osäkerhet kring framtida volymer, ansvarsfördelning och regelverkets praktiska tillämpning bidrar till försiktiga affärsupplägg, vilket i sin tur kan leda till högre kostnad per transport. I avsaknad av långsiktiga avtal och stabil efterfrågan behöver kostnader för risk, beredskap och outnyttjad kapacitet i högre grad bäras av varje enskild uppdragscykel.

2.7 Framtida behov och utvecklingsmöjligheter

Intervjuerna pekar ut flera områden där aktörerna ser behov av utveckling och förändring på sikt, kopplat till både logistik och teknik. Flera aktörer lyfter behov av fler eller geografiskt närmare produktionsanläggningar, vilket skulle kunna påverka både transportsträckor, ledtider och kostnadsnivåer. Produktion med högre fyllnadstryck nämns som en åtgärd som skulle kunna öka mängden gas per MEGC och därmed minska transportfrekvensen.

Standardisering av kopplingar, anslutningar och hanteringsrutiner lyfts som ett område med utvecklingspotential. Mindre variation mellan trailersystem och stationer skulle kunna minska behovet av anpassningar och förenkla utbildning av chaufförer och driftpersonal.

Digitalisering av flödes- och lagerinformation nämns i flera intervjuer, till exempel bättre överblick över trailerpositioner, trycknivåer, beställningsprocesser och stationernas lagernivåer. Sådana lösningar beskrivs som ett sätt att underlätta planering och koordinering mellan aktörer.

Slutligen knyts framtidsfrågorna till den bredare infrastrukturen. Ett ökat antal stationer och fler vätgasfordon bedöms förändra transportbehoven och ställa nya krav på både distribution och tekniska lösningar. Utbyggnadstakt, lokalisering av stationer och utveckling av nya logistikupplägg (till exempel andra transportslag eller samordnade flöden mellan stationer) lyfts som faktorer som kan påverka hur vätgaslogistiken utvecklas framöver.

Den nulägesbild som beskrivits ovan visar att distributionen av komprimerad vätgas i dag präglas av tekniska begränsningar, varierande arbetssätt och organisatoriska beroenden mellan aktörer. Dessa förutsättningar påverkar hur effektivt logistiksystemet kan utnyttjas och därmed hur stora kostnader som uppstår i transportledet.

I nästa avsnitt analyseras därför logistikkedjan ur ett kostnadsperspektiv, med fokus på att identifiera de moment och faktorer som har störst påverkan på kostnaden per levererat kilo vätgas.

3. Kostnadsanalys av logistik för komprimerad vätgas

I detta avsnitt presenteras en kartläggning och analys av kostnaderna i logistikkedjan för komprimerad vätgas. Analysen tar sin utgångspunkt i den nulägesbild som presenterats i föregående avsnitt och kombinerar intervjubaserade insikter med genomgång av regelverk, tekniska förutsättningar och logistiska principer.

Resultatet redovisas per delmoment (fyllning, transport, lossning och affärsmodell/samverkan) och avslutas med en samlad översikt av centrala kostnadsdrivare. För att förstå de ekonomiska förutsättningarna för distribution av vätgas har en detaljerad kartläggning och analys av kostnadsposter genomförts. Analysen omfattar hela logistikkedjan för vägtransport, från det att gasen är färdigproducerad, komprimerad och redo att fyllas i transportenheter, till dess att den levererats och lossats vid mottagande station eller anläggning.

3.1 Flödesbeskrivning

Flödet för vägtransport av komprimerad vätgas kan i förenklad form beskrivas som en kedja som sträcker sig från produktion till slutanvändning. Vätgasen produceras vid en produktionsanläggning genom elektrolys, där gasen därefter komprimeras till högt tryck för att kunna lagras och transporteras effektivt. När gasen uppnått önskat tryck leds den till fyllningspaneler, från den överförs gasen till MEGC som används för transport.

När trailern är fylld och säkerhetskontroller genomförts transporteras den med lastbil till mottagande anläggning eller förbrukningsplats. Hos användaren/mottagaren lossas vätgasen under kontrollerade former. Gasen kan då överföras direkt till stationens lagringssystem, till ett lokalt buffertkärl eller i vissa fall direkt till t.ex. fordon.

Vid leverans kan logistikupplägget se olika ut beroende på aktörernas behov och stationens utformning. Antingen lämnas den fyllda trailern på plats och dragbilen återvänder utan last, eller så lossas trailern på plats och samma ekipage kör tillbaka med den tomma enheten. Ett tredje alternativ är ett rotationsupplägg där en fylld MEGC lämnas samtidigt som en tom hämtas.

När trailern är tömd återförs den till produktionsanläggningen för ny fyllning och cykeln upprepas. Detta flöde utgör grunden för dagens distribution av komprimerad vätgas på väg och är en central utgångspunkt för analysen av kostnadsstrukturen i denna studie.

FLÖDESBILD

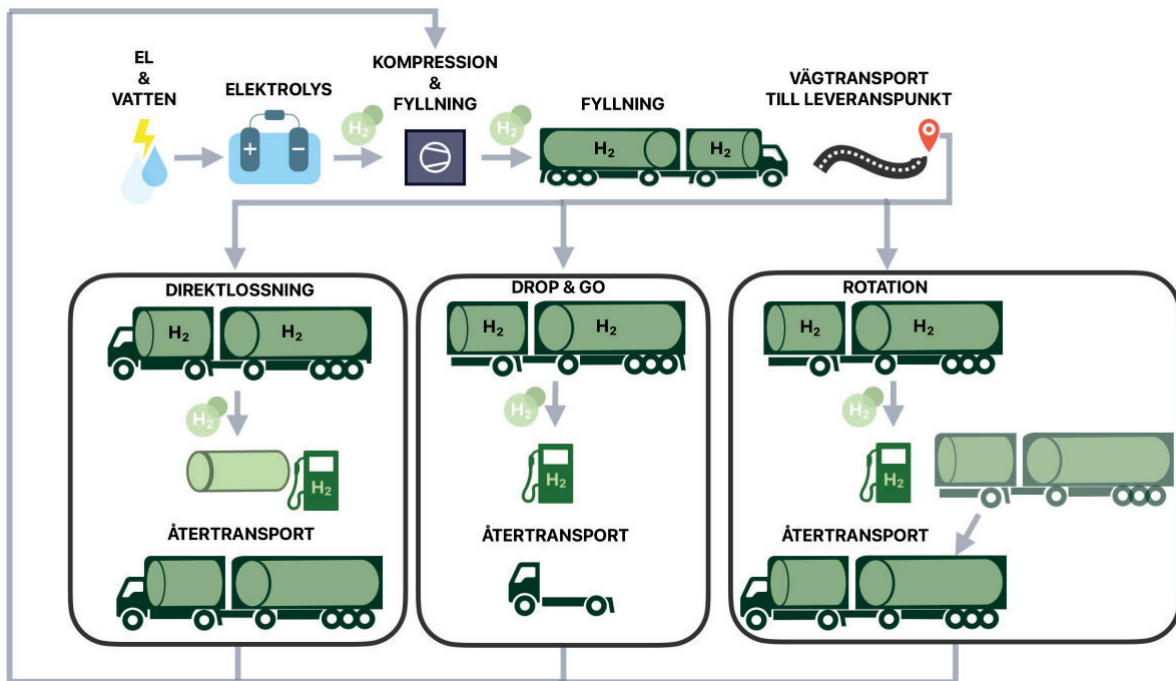


BILD 1: Visualisering av tre alternativa leveransupplägg, enligt nedan.

Direktlossning: Den fyllda MEGC-enheten ansluts till mottagande anläggning och gasen överförs genom tryckutjämning eller med hjälp av kompressor till stationens lagringssystem eller buffertkärl. När tömningen är avslutad återvänder samma ekipage med den tomma enheten till produktionsanläggningen.

Drop & Go (MEGC som temporär lagring): Den fyllda MEGC-enheten lämnas kvar vid leveranspunkten och fungerar som temporär lagringsenhet. Dragbilen återvänder utan MEGCs. Tömning sker successivt hos mottagaren.

Rotation (utbytesupplägg): Vid leverans lämnas en fylld MEGC samtidigt som en tom enhet tas med tillbaka till produktionsanläggningen. Systemet bygger på ett kontinuerligt utbyte mellan produktions- och användningspunkt/er.

3.2 Kostnadsposter per steg i logistikkedjan

Utifrån ovan beskrivna flöde analyseras kostnaderna i tre huvudsakliga moment – fyllning, transport och lossning – kompletterat med en genomgång av hur affärsmodell och samverkan påverkar kostnadsnivån.

3.2.1 Fyllning och förberedelse för transport

Fyllningsmomentet utgör startpunkten för transportkedjan och omfattar den tid, utrustning och bemanning som krävs för att överföra komprimerad vätgas från produktionsanläggningen till MEGCs. Processen sker normalt via en fyllningspanel där vätgasen leds från mellanlagring eller bufferttank till trailer under kontrollerade förhållanden.

Fyllningsmomentet är en central kostnadsdrivare eftersom det påverkar hur snabbt transportenheter kan cirkulera i systemet. Långa fylltider begränsar antalet leveranser per dygn och minskar utnyttjandegraden av både MEGC och dragbil, vilket i sin tur ökar kostnaden per levererat kilo vätgas.

Fyllningstiden påverkas av flera faktorer kopplade till produktionsanläggningens tekniska och operativa utformning, framför allt kompressorkapacitet, buffertlagring och kylsystem. Centrala faktorer är kompressorns prestanda vid höga tryck, flödesbalansen mellan buffert och fyllningspanel samt den valda styrstrategin för fyllningen. Kombinationen av dessa faktorer avgör hur snabbt fyllningen kan ske.

Utöver den installerade kompressorkapaciteten påverkar även fyllningstryck, önskad slutfyllningsgrad och systemets säkerhetsmarginaler den totala fyllnadstiden. Anläggningar som arbetar med sekventiell fyllning får ofta längre genomloppstider än de som använder parallell fyllning eller buffertlagring som avlastar kompressorn. Långa fylltider begränsar anläggningens genomströmning och kan skapa flaskhalsar vid hög transportfrekvens, vilket i förlängningen kan påverka bemanningsbehov och tidsplanering.

Även fyllningstrycket har en tydlig koppling till kostnadsnivån och påverkar flera led i kedjan; från produktionsanläggningens kompressor till transportfordonen och mottagningsstationens lagringssystem. Ett högre tryck gör det möjligt att lasta mer vätgas per MEGC och därmed minska antalet transporter. Ett lägre tryck innebär lägre energianvändning och mindre belastning på utrustningen, men kräver fler leveranser för att uppnå samma volym vid mottagarsidan, vilket ökar kostnaderna för bränsle, förare och fordonsslitage.

Utvecklingen av transportutrustning för vätgas har under senare år möjliggjort högre tillåtna arbetstryck inom ramen för gällande europeiska regelverk. Containerbaserade MEGC-lösningar är i dag kommersiellt tillgängliga för arbetstryck upp till omkring 640 bar.

Vid fyllningen krävs generellt fysisk närvaro, särskilt på anläggningar där processen inte är helt automatiserad. Antingen innebär det att vätgasproducentens personal och/eller chauffören närvarar. De ansvarar för att ansluta utrustningen, övervaka fyllningssekvensen och genomföra säkerhetskontroller före och efter drift. Automatiserade fyllningspaneler och fjärrövervakning kan minska behovet av manuell hantering, men kräver investeringar i styrsystem, sensorer och utbildning av driftpersonal.

Eftersom fyllningen sker under högt tryck och med brandfarlig gas ställs krav på kompetens och utbildning. Föraren behöver ADR-behörighet och ofta även särskild utbildning i fyllningsprocedurer hos producent och mottagare. Utbildning och löpande säkerhetsgenomgångar innebär både tids- och personalkostnader, men är en förutsättning för säker drift och bidrar till att minska risken för driftstopp och incidenter.

De faktorer som driver kostnaden i fyllningsfasen är framför allt:

- Fylltid per MEGC, som styr hur många leveranser som kan genomföras per dag. Långa fylltider innebär lägre utnyttjande av både trailer och dragbil och ökar förarens väntetid.
- Fyllningstryck, som direkt avgör hur mycket vätgas som kan lastas per transport. Lägre tryck innebär fler transporter per levererad mängd och därmed högre kostnad för kilo.
- Bemanningsbehov och manuell hantering, som skapar tidskostnader vid inkoppling, övervakning och säkerhetsrutiner.
- Krav på utbildning och säkerhetskompetens, som innebär både direkta utbildningskostnader och tidsförluster under introduktion och lokala säkerhetsgenomgångar.

- Teknisk kapacitet i anläggningen, som exempelvis kompressorstyrning, buffertstorlek och kylning. Begränsningar i dessa system ökar fylltiden och skapar indirekta kostnadsökningar i hela logistikkedjan.

3.2.2 Transport och distribution

Transportfasen omfattar själva förflyttningen vätgasen mellan produktionsanläggning och mottagande station. Denna del av kedjan står för en stor andel av de rörliga kostnaderna och påverkas både av fordonens tekniska egenskaper och av hur effektivt transportresurserna används.

Utrustningens kostnadspåverkan (MEGC och dragbil)

MEGC används för transport av komprimerad vätgas under högt tryck. De består av flera sammanlänkade tryckkärl monterade i en stål- eller kompositram med ventiler, rörsystem och säkerhetsutrustning anpassad för transport av brandfarlig gas. Utrustningen tillverkas enligt internationella standarder och regelverk så som ADR och ISO, vilka anger krav på material, tryckhållfasthet, testning och märkning. Konstruktionen är utformad för att tåla återkommande fyllningscykler vid trycknivåer upp till omkring 700 bar och utgör en av de mest kapitalintensiva komponenterna i transportkedjan. Kostnaden påverkas även av materialval (stål eller komposit) samt av trailerstorlek och kapacitet. För kompositbaserade lösningar utgör kolfiber en betydande del av investeringskostnaden, medan stålbaserade lösningar i regel har lägre initial kostnad men högre vikt. I ett tidigt marknadsskede med begränsade volymer blir dessa kostnadsskillnader särskilt tydliga, samtidigt som ökad standardisering och skalfördelar bedöms kunna bidra till lägre kostnadsnivåer över tid.

Lagringsenheterna har en lång teknisk livslängd men utsätts för mekanisk och termisk belastning vid varje fyllningscykel, vilket över tid påverkar materialens hållfasthet. För att säkerställa fortsatt driftsäkerhet och efterlevnad av gällande regler krävs återkommande kontroller, periodisk inspektion och återcertifiering. De återkommande kontrollerna utförs i Sverige av Swedacs godkända inspektionsorgan och är ett villkor för att enheten ska få fortsätta användas i transport. Dessa inspektioner medför både direkta kostnader för kontrollarbetet och indirekta kostnader i form av stillestånd, då trailern inte är tillgänglig för drift.

Dragbilen utgör den andra centrala komponenten i transportledet. Fordonet behöver uppfylla de specifika krav som gäller för transport av komprimerad vätgas, inklusive vikt, dragförmåga och anpassning till MEGC.

Underhåll och service utgör en återkommande kostnad som påverkas av körsträcka, fordonsålder och driftmiljö. För ADR-klassade fordon tillkommer särskilda krav på säkerhetsutrustning och märkning, vilket kan göra servicen något dyrare än för standardfordon.

Kostnader för försäkring omfattar både trafik- och fordonsförsäkring samt tillägg som täcker hantering av farligt gods. För fordon som används i ADR-transporter ställs högre krav på ansvarsförsäkring och skydd vid olycka eller läckage, vilket återspeglas i försäkringspremien.

Driftkostnader i den dagliga transporten

Drivmedelskostnaden är en av de rörliga posterna i transportledet och beräknas i kronor per kilometer. I denna studie utgår vi från dagens förhållanden där transporterna utförs med dieseldrivna fordon. Kostnaden påverkas främst av körsträcka och aktuellt bränslepris.

Förarens personalkostnad är en annan central faktor och omfattar lön, sociala avgifter och eventuella tillägg för specialtransporter. Vätgastransporter innebär ofta extra moment vid både lastning och lossning, exempelvis säkerhets- och tillträdesrutiner och manuell hantering vid koppling och urkoppling. Detta gör att förarens totala tidsåtgång per cykel kan vara högre än vid konventionella transporter.

ADR-regelverket påverkar också driftskostnaderna genom krav på återkommande utbildning, fordonsutrustning och dokumenthantering. Tunnelrestriktioner och särskilda ruttkrav kan förlänga körsträckor och bidra till ökade kostnader.

Transportsträckan mellan produktionsanläggning och mottagande station är i sig en stark kostnadsdrivare. Långa avstånd innebär högre bränslekonsumtion, längre förartid och större påverkan på fordons- och trailerutnyttjandet. Fyllnadsgrad och utnyttjande av trailerkapacitet är avgörande: lågt fyllningstryck eller partiellt tomma körningar leder till en högre kostnad per levererat kilo vätgas. I en tidig marknad kan möjligheten till samdistribution eller hämtning/lämning hos flera aktörer minska tomkörningen, men detta förutsätter avtalsstrukturer som tillåter sådana upplägg.

Kapacitetsutnyttjande och planeringssystem

Kapacitetsutnyttjandet i transportledet påverkas av både operativa och systemmässiga faktorer. Antalet leveranser per dag styrs av körtid, fyllnings- och lossningstid samt eventuella lokala tillträdesbegränsningar. Långa fyllningstider, lågt fyllningstryck eller ojämna beställningsmönster kan snabbt skapa behov av fler MEGC-enheter och fler dragbilar för att upprätthålla leveranskapaciteten.

Digitala system för bokning, trailerövervakning och lagerstatus kan minska väntetider, förbättra ruttplanering och minska risken för felallokering av resurser. I dagens marknad används dessa lösningar i begränsad omfattning, vilket gör att mycket planering sker manuellt och baseras på personkontakter.

De mest betydande kostnadsdrivarna i distributionsfasen är:

- Körsträcka, som påverkar både bränsleförbrukning, förartid och fordonsförslitning. Långa avstånd innebär att trailers binds upp under längre tid, vilket minskar det dagliga kapacitetsutnyttjandet.
- Förarens arbetstid, där varje minut av körning, väntan, lastning och lossning ger direkta kostnader.
- Fyllnadsgrad, där lågt fyllnadstryck eller delvis tomma körningar starkt ökar kostnad per kg. Maximalt utnyttjande av volumetrisk kapacitet är en förutsättning för konkurrenskraft i tidig marknad.
- MEGC-investering och avskrivning, där stora kapitalbundna värden kräver många cykler per år för att få ned kostnaden per transport.

- Bränslekostnad per kilometer, som utgör en del av den rörliga kostnaden i dagens dieselbaserade distribution.
- Tomkörning och returtransporter, som är svårundvikliga i ett system med separat hämtning och lämning. Varje kilometer utan last innebär att kostnaden måste fördelas på mindre levererad mängd.

Effektiv planering, höga fyllningstryck och optimerade transportcykler är därför centrala för att minska kostnadsnivån i detta steg av kedjan. När trailern anländer till mottagande station eller anläggning övergår kostnaderna till att i huvudsak styras av lossningsmomentets utformning, tidsåtgång och bemanning.

3.2.3 Lossning och mottagning

Lossningsmomentet utgör den avslutande fasen i logistikkedjan och omfattar den utrustning, tid och bemanning som krävs för att överföra vätgasen från trailern till mottagande system vid leveranspunkten. Tekniklösningarna varierar beroende på mottagarens utformning och trycknivåer, men består i regel av ventiler, slangar, kopplingar och säkerhetskomponenter som är klassade för det aktuella drifttrycket.

I vissa fall kan en lösning användas där trailern lossar direkt till fordon eller station utan mellanlagring. Det kräver noggrann tidsstyrning och samordning mellan leverans och tankning, eftersom fördröjningar snabbt leder till stillestånd eller ineffektivitet. För att öka flexibiliteten installeras ofta en stationär bufferttank, som möjliggör lagring vid mottagningsplatsen.

Hur trailern hanteras vid mottagande plats varierar i praktiken. I vissa fall töms trailern på plats och samma enhet körs tillbaka till produktionsanläggningen, medan andra upplägg bygger på att en fylld enhet lämnas på stationen och en tom tas med tillbaka. För stationer som har möjlighet att hantera flera enheter samtidigt kan en roterande lösning användas, där en full trailerenhet placeras ut och en tidigare tömd trailer hämtas vid samma tillfälle.

Lossningstiden per leverans varierar beroende på trycknivå, fyllningsstrategi och bemanning, vilket direkt påverkar förarens arbetstid. I många fall krävs manuell övervakning av lossningen, särskilt vid icke-automatiserade system. För att upprätthålla säker drift krävs även säkerhetssystem med gasdetektorer, nödstopp, larm och ventilationslösningar vid lossningsplatsen. Lokala tidsluckor och tillträdesrestriktioner, till exempel nattliga leveransförbud eller krav på särskild övervakning, kan påverka planering och kostnadseffektivitet genom längre väntetider eller omplanering av transporter.

Lossningen påverkar kostnaden genom den tid, utrustning och bemanning som krävs för att föra över vätgasen till mottagarens system. Centrala kostnadsdrivare i denna fas är:

- Lossningstid, som påverkar förarens totala arbetstid per leverans. Skillnader i trycknivå, fyllningsstrategi och utrustning kan ge betydande variationer.
- Manuell övervakning, som ofta krävs vid icke-automatiserade system. Detta innebär både tids- och kompetensrelaterade kostnader.
- Tekniska gränssnitt, där variation i kopplingar, slangar och ventilarrangemang skapar extra tidsåtgång och risk för felhantering.
- Tryckanpassning, där skillnader mellan leverans- och lagringstryck kan förlänga lossningsprocessen eller skapa behov av ytterligare utrustning.

- Lokala tillträdesrestriktioner, som exempelvis nattliga leveransförbud eller krav på särskild övervakning. Detta kan öka väntetid eller kräva omläggning av scheman.
- Säkerhetsutrustning och platsutformning, som påverkar hur snabbt lossningen kan genomföras och vilka moment som måste utföras manuellt.

Utöver dessa fysiska moment i logistikkedjan påverkas kostnadsnivån i hög grad av hur ansvar, risk och ersättningsmodeller utformas mellan aktörerna. Detta behandlas i avsnittet nedan om affärsmodell och samverkan.

3.2.4 Affärsmodellens och samverkans kostnadspåverkan

I en tidig vätgasmarknad präglas distributionen av osäker efterfrågan, varierande produktionsflöden och begränsad infrastruktur. Under sådana förutsättningar blir fördelningen av ansvar och risk mellan aktörer en central del av kostnadsbilden. Valet av affärsmodell avgör inte bara hur kostnader fördelas, utan också vem som bär risken för låg utnyttjandegrad, avbrott i flödena och behov av redundans i systemet.

En central aspekt är vem som äger MEGC-enheterna. Ägandet styr både var kapitalbindningen hamnar och vem som bär risken om nyttjandegraden blir låg, om enheter står stilla vid besiktning eller om systemet kräver reservkapacitet för att klara variationer i leveransbehov. Affärsmodellen påverkar även hur själva transporten planeras och genomförs. Om MEGC-enheter knyts exklusivt till en specifik aktör begränsas möjligheten att kombinera hämtning, lämnning och rotation av enheter över flera platser, vilket kan resultera i fler tomtransporter och lägre fyllnadsgrad. Om flera aktörer delar resurser eller är öppna för att tomma enheter hämtas vid andra anläggningar kan det i stället stärka kapacitetsutnyttjandet och minska kostnaden per cykel. Skillnaden mellan dessa upplägg påverkar hur många enheter som behöver finnas i omlopp och hur stor del av den totala körsträckan som sker utan last.

Intervju med transportbranschen indikerar att åkerier i nuläget i begränsad utsträckning är intresserade av att själva äga MEGC-enheter. Ägande och tekniskt ansvar för tryckkärl upplevs som förknippat med hög risk, både vad gäller certifiering, regeluppfyllnad och framtida restvärde. Transportörernas preferens bedöms troligen i stället att fokusera på körning och operativ säkerhet, medan ägande och tekniskt ansvar för MEGC ligger hos gasleverantör eller kund. Fördelningen av risk vid incidenter, driftstörningar eller kvalitetsavvikelser framstår som en central faktor för transportörernas vilja att engagera sig i vätgaslogistik. Otydlighet i gränslandet mellan transport, lagring och lossning kan skapa osäkerhet kring ansvar, vilket i sin tur påverkar både prissättning och försäkringsvillkor.

Även intäktsmodellen påverkar kostnadsstrukturen. Modeller som bygger på levererad mängd gas skapar incitament att optimera fyllnadsgrad och transportflöden, medan avståndsbaserade modeller i högre grad kopplar kostnaden till geografi och körsträcka. Kapacitets- eller abonnemangsbaserade upplägg kan ge stabilitet, men innebär att någon aktör måste bära risken för outnyttjad kapacitet, vilket i en tidig marknad kan få tydlig kostnadseffekt.

Utöver detta påverkas kostnaden av krav på leveranssäkerhet, omfattningen av redundans som krävs och hur risker för efterfrågevariationer hanteras. Högre krav innebär större behov av extra MEGC-enheter eller anpassad bemanning, vilket ökar de fasta kostnaderna. Samtidigt spelar samarbetet kring planering och data en viktig roll för att hålla nere kostnaderna. Utan gemensam insyn i lagernivåer, förbrukning och tillgänglig utrustning ökar sannolikheten för ineffektiva rutter, väntetider och ojämnt nyttjande av utrustningen.

Dessa faktorer verkar tillsammans med de mer tekniska och operativa kostnadsdrivarna och återspeglas samlat i den översikt som presenteras i tabellen nedan.

3.3 Tabell: Översikt över centrala kostnadsdrivare

Kategori	Kostnadsdrivare	Påverkan på kostnad per kg vätgas
Fyllning	Fylltid per MEGC	Lång fylltid → färre cykler per dag → högre kostnad
	Fyllningstryck	Lågt tryck → mindre mängd gas → fler transporter
	Manuell hantering & övervakning	Tidskostnad för förare/tekniker
	Utbildnings- och behörighetskrav	Ökar personalkostnad och införandetid
Transport	Körsträcka	Påverkar tid, bränsle, slitage
	Förarens arbetstid	Direkt kostnad; påverkas av väntetid och hantering
	Fyllnadsgrad	Låg fyllnadsgrad → högre kostnad/kg
	Drivmedelskostnad och bränsleförbrukning	Ökar linjärt med avstånd och tomkörning
	Investering & avskrivning för ekipage och MEGCs	Höga fasta kostnader som kräver högt utnyttjande
	MEGC-besiktning & stillestånd	Indirekt kostnad genom utebliven drift
	Underhåll och service	Slitageberoende – ökar med km och belastning
Lossning	Lossningstid	Ökar personalkostnad
	Variation i kopplingar/teknik	Extra hanteringstid och risk för avbrott
	Tryckanpassning	Längre tid eller extra utrustning krävs
	Lokala tillträdesregler	Fördröjer leveranser, skapar väntetid
Planering & system	Brist på digital planering	Ineffektivitet → mer tomkörning & väntetid
	Svag systemsamordning	Skapar flaskhalsar mellan aktörer
	Bristande överblick av trailerposition/tryck	Felallokering → fler transporter och sämre nyttjande
Affärsmodell	Intäktsmodell (kg, km, fastpris)	Påverkar incitament för optimering
	Fördelning av CAPEX/OPEX	Styr hur investeringar belastar kostnaden
	Krav på leveranssäkerhet	Hög redundans → höga fasta kostnader

3.4 Illustrativa beräkningsexempel

De beräkningsexempel som presenteras i detta avsnitt är avsedda att fungera som pedagogiska och analytiska illustrationer, inte som exakta kostnadskalkyler för enskilda aktörer eller

projekt. Syftet är att tydliggöra hur olika tekniska och logistiska val påverkar kostnaden per levererat kilo vätgas, genom att isolera och variera en parameter i taget medan övriga antaganden hålls konstanta.

Antagandena i exemplen bygger på sammanvägd branschkunskap, intervjuer med aktörer i värdekedjan samt kännedom om aktuella kostnadslägen inom transport, utrustning och drift. För att skydda kommersiellt känslig information redovisas dessa antaganden i aggregerad och förenklad form. Resultaten ska därför tolkas som realistiska storleksordningar och relativa skillnader, snarare än som absoluta kostnadsnivåer för specifika projekt.

Nedan presenteras ett antal beräkningsexempel som konkretiserar hur de identifierade kostnadsdrivarna påverkar kostnaden per levererat kilo vätgas i olika logistiska upplägg.

3.4.1 Antaganden och avgränsningar

I de beräkningsexempel som presenteras nedan används en gemensam uppsättning antaganden för att möjliggöra jämförelse mellan olika logistiska upplägg. Genom att hålla grundläggande transportförutsättningar konstanta kan effekten av enskilda kostnadsdrivare tydliggöras utan att resultaten påverkas av variationer som är specifika för enskilda platser eller aktörer.

I beräkningsexemplen används begreppet *direkt transportkostnad* för att beskriva de kostnader som uppstår i samband med själva genomförandet av transporten av komprimerad vätgas och som typiskt sett är direkt kopplade till transportörens verksamhet. Den direkta transportkostnaden består av två huvudkomponenter:

- en körsträcebaserad kostnad (*sträckberoende kostnad*), som omfattar kostnader för dragbil och förare per körd kilometer, inklusive tillhörande drift, samt
- en tidsbaserad kostnad (*tidskostnad*), som avser chaufförstid för lastning och lossning.

I begreppet ingår därmed kostnader för dragbil, chaufförsresurser inklusive utbildning och behörighet (ADR), körsträcka samt tid för lastning och lossning. Begreppet omfattar däremot inte investeringar eller driftkostnader för MEGC eller annan kringutrustning och ska inte förväxlas med total transport- eller logistikkostnad.

Gemensamt för samtliga exempel gäller följande antaganden:

- Lastning och lossning: 1 timme totalt
- MEGCs livstid: 15 år
- MEGCs typ: Kolfiber, typ IV
- Användningsbar vätgas bedöms vara 95 % av MEGCs totala volym
- En dragbil per transport
- Inga väntetider, köer eller driftstörningar beaktas

Antaganden om användbar gasmängd per MEGC och tillhörande arbetstryck ligger inom det intervall som i dag är kommersiellt tillgängligt för containerbaserade MEGC-lösningar på den europeiska marknaden.

För samtliga beräkningsexempel gäller att endast de kostnadsposter som är direkt kopplade till respektive exempel inkluderas. Kostnader för vätgasproduktion, el, interna anläggningsinvesteringar, stationär lagring, tillståndprocesser, mark, samt administrativa

overheadkostnader ingår inte, om inte annat uttryckligen anges. Eventuella investeringsstöd, driftsstöd eller andra former av offentliga bidrag har inte heller inkluderats i beräkningarna.

För att tydliggöra hur olika val påverkar kostnaden per levererat kilogram vätgas har beräkningsexemplen delats upp i tre separata delanalyser. Dessa tre exempel fokuserar på fyllningstryck, transportkonfiguration respektive utnyttjandegrad, vilka i studien identifierats som de mest betydande kostnadsdrivarna i transport- och hanteringsledet.

Genom att analysera dessa faktorer var för sig kan deras enskilda påverkan på kostnadsutfallet tydliggöras, utan att resultaten påverkas av samtidiga förändringar i andra delar av systemet. Detta skapar en tydlig förståelse för vilka mekanismer som driver kostnaden i respektive fall. De isolerade exemplen utgör därmed en grund för de sammanvägda beräkningar som presenteras längre fram, där flera parametrar kombineras för att illustrera hur de samverkar i mer realistiska logistiska upplägg.

3.4.2 Exempel 1: Fyllningstryck och transportkostnad per kilo vätgas

Detta exempel illustrerar hur fyllningstrycket i en 40 fots MEGC påverkar den direkta transportkostnaden per levererat kilo vätgas, givet att transportupplägget i övrigt är oförändrat (20 mil ToR). Syftet är att isolera effekten av fyllningstryck genom att hålla samtliga transportrelaterade antaganden konstanta och endast variera den mängd användbar vätgas som kan transporteras per cykel.

Den direkta transportkostnaden per transportcykel beräknas som summan av sträckberoende kostnad och tidskostnad för lastning och lossning. Denna kostnad är densamma oavsett fyllningstryck och fördelas därefter på den användbara mängd vätgas som transporteras vid respektive trycknivå.

Definitioner

d = effektiv körsträcka (tur och retur), km

c_{km} = fordonskostnad inklusive förare per km (dragbil)

t_{LL} = tid för lastning + lossning (h)

c_h = chaufförkostnad per timme (SEK/h)

$m_{H_2}(p)$ = användbar vätgasmängd per transport vid tryck p (kg)

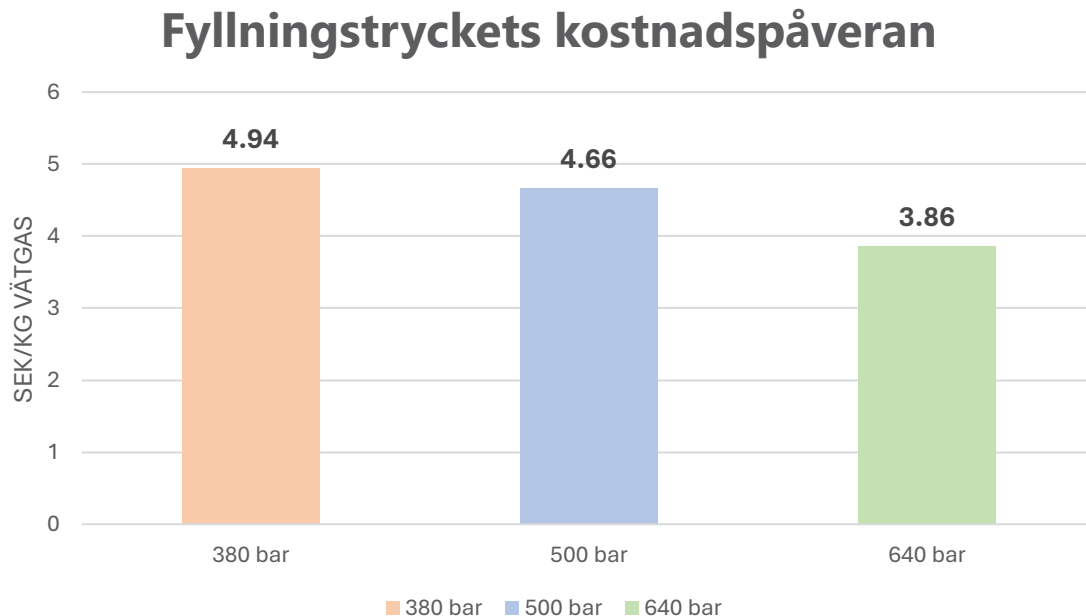
Total direkt transportkostnad per transportcykel

$$C_{\text{transport}} = d \cdot c_{km} + t_{LL} \cdot c_h$$

Direkt transportkostnad per kg

$$c_{\text{transport}}(p) = \frac{C_{\text{transport}}}{m_{H_2}(p)}$$

Detta exempel illustrerar hur fyllningstryck påverkar transportkostnaden per kilo vätgas vid oförändrade transportförutsättningar. Samma transportupplägg används i samtliga tre fall, men mängden användbar vätgas varierar med fyllningstrycket.



Tabellen visar den direkta transportkostnaden per kilogram vätgas vid olika fyllningstryck, givet identiska transportförutsättningar. Skillnaderna mellan alternativen beror uteslutande på variationer i användbar gasmängd per transportcykel. Investeringar och driftkostnader för MEGC eller annan kringutrustning ingår inte.

Resultatet visar att den direkta transportkostnaden per kilo minskar i takt med ökat fyllningstryck, trots identiska körsträckor och tidsåtgång. Skillnaden uppstår genom att samma transportresurser fördelas på olika stora gasvolymer.

3.4.3 Exempel 2: Transportkonfiguration och nyttolast

Detta exempel illustrerar hur val av transportkonfiguration, i form av antal och storlek på MEGC per transport, påverkar den direkta transportkostnaden per kilogram vätgas. Syftet är att isolera effekten av nyttolast genom att hålla fyllningstryck och transportupplägg i övrigt konstanta.

I exemplet hålls fyllningstrycket konstant (500 bar), liksom körsträcka (20 mil ToR), fordon, bemanning samt tidsåtgång för lastning och lossning. Därmed är den direkta transportkostnaden per transportcykel i kronor oförändrad mellan de olika alternativen. Den enda parameter som varierar är den totala mängd vätgas som kan transporteras per leverans, vilket styrs av antalet MEGC och deras storlek.

Definitioner

n = antal MEGC i transporten

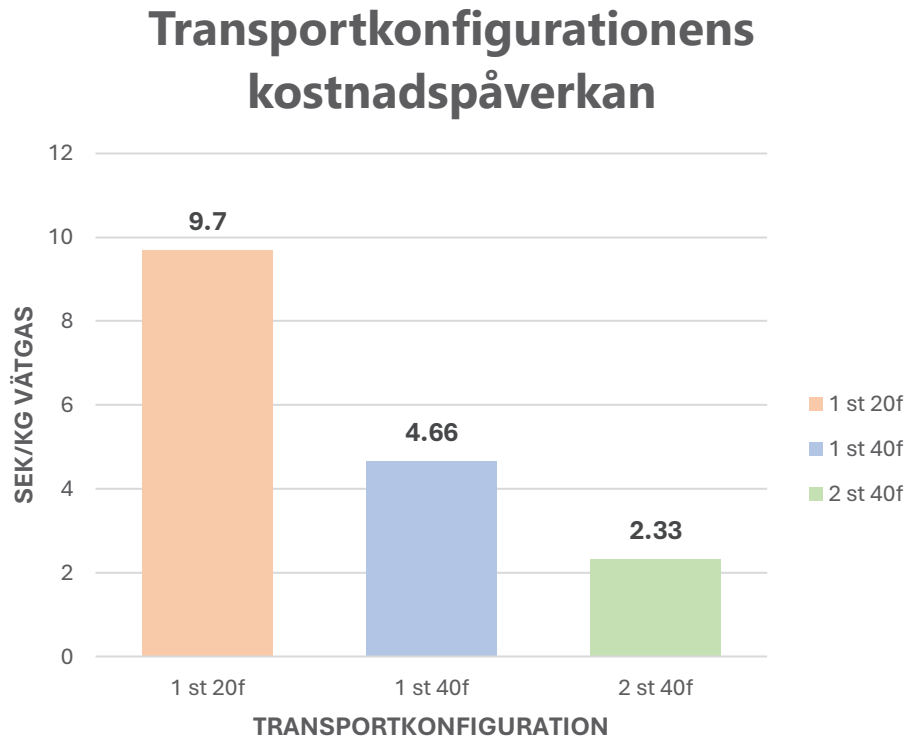
$m_{H_2, \text{unit}}(p, \text{storlek})$ = användbar vätgas per enhet (kg)

Transporterad mängd per cykel

$$m_{H2,total} = n \cdot m_{H2,unit}(p,storlek)$$

Direkt transportkostnad per kg för en given konfiguration

$$c_{transport}(konfig) = \frac{C_{transport}}{m_{H2,total}}$$



Tabellen visar den direkta transportkostnaden per kilogram vätgas för olika transportkonfigurationer, givet oförändrade transportförutsättningar. Investeringar och driftkostnader för MEGC (CAPEX/OPEX) ingår inte.

Exemplet visar att den direkta transportkostnaden per kilogram vätgas kan variera kraftigt beroende på hur mycket gas som transporteras per leverans, även när den direkta transportkostnaden per transportcykel i kronor är densamma. Skillnaden mellan alternativen uppstår genom att samma körsträcebaserade och tidsbaserade transportkostnader fördelas över olika stora mängder vätgas.

Mer volymeffektiva transportkonfigurationer innebär därmed att samma transportresurser kan utnyttjas för att leverera fler kilogram vätgas per cykel, vilket ger en lägre kostnad per kilogram i transportledet.

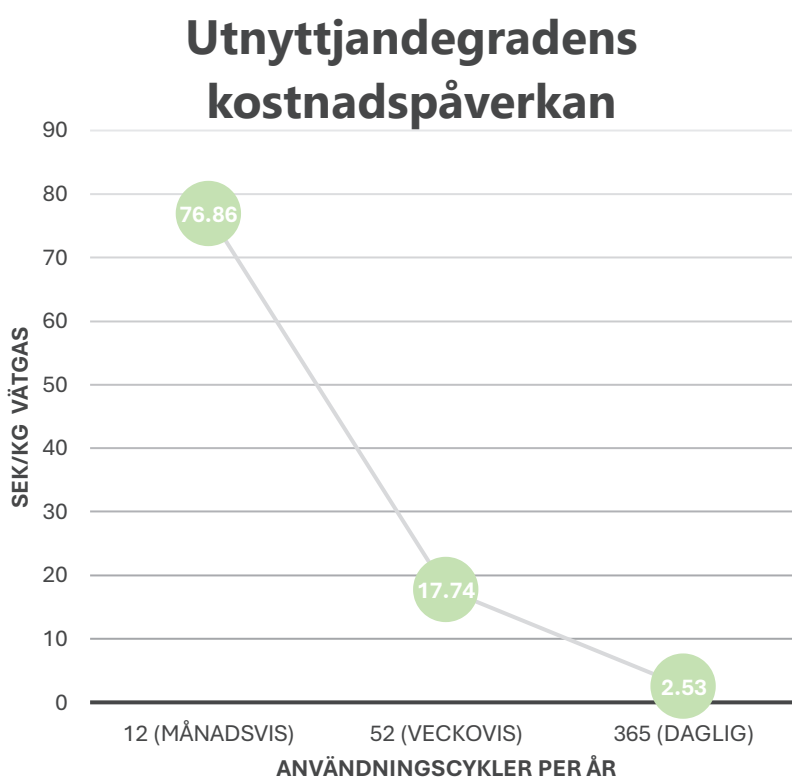
Resultatet ska tolkas som en illustration av sambandet mellan nyttolast och kostnad i transportledet. Tekniska, operativa och regelverksmässiga begränsningar kan i praktiken påverka vilka upplägg som är genomförbara.

3.4.4 Exempel 3: Utnyttjandegrad och kostnad för MEGC

Detta exempel belyser hur utnyttjandegraden av en 40 ft MEGC (500 bar), uttryckt som antal användningscykler per år, påverkar kostnaden per levererat kilogram vätgas. Syftet är att isolera betydelsen av kapitalutnyttjande genom att analysera hur investerings- och driftkostnader för MEGC fördelas över olika nyttjandenivåer.

I beräkningen inkluderas endast kostnader kopplade till MEGC, det vill säga investeringskostnad (CAPEX) samt löpande drift- och underhållskostnader (OPEX). Transportrelaterade kostnader ingår inte, och exemplet ska därför inte jämföras direkt med resultaten i Exempel 1 och 2, som avser direkt transportkostnad.

Utnyttjandegraden representeras i exemplet av ett förenklat antal cykler per år (12, 52 och 365), vilket illustrerar skillnaden mellan sporadisk/månadsvis användning, regelbunden veckovis användning och daglig användning av samma MEGC.



Diagrammet visar kostnad per kilogram vätgas för MEGC vid olika utnyttjandegrader, uttryckt som antal cykler per år. Endast investerings- och driftkostnader för MEGC (CAPEX och OPEX) ingår; transportkostnader ingår inte.

Resultatet visar att låg utnyttjandegrad leder till mycket höga kostnader per kilogram vätgas, eftersom investeringskostnaden för MEGC fördelas över ett begränsat antal levererade kilogram. När utnyttjandegraden ökar reduceras kostnaden snabbt, vilket illustrerar hur kapitalintensiv utrustning är starkt beroende av hög och stabil användningsfrekvens för att nå kostnadseffektivitet.

Exemplet tydliggör därmed att utnyttjandegrad är en av de mest avgörande faktorerna för kostnaden per kilogram i vätgaslogistiken, oberoende av transportupplägg. Resultatet ska tolkas som en illustration av sambandet mellan kapitalutnyttjande och kostnad, inte som ett antagande om faktisk användningsfrekvens i specifika projekt.

3.4.5 Sammanvägda exempel – Ogynnsamt, medel och gynnsamt upplägg

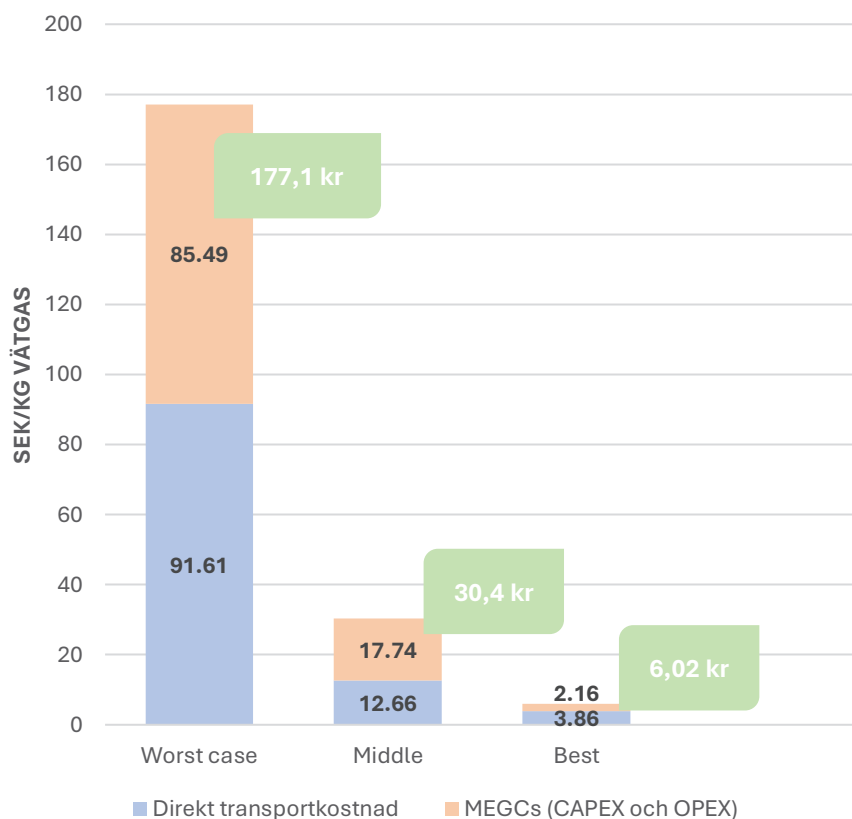
Avslutningsvis sammanvägs de parametrar som analyserats i de föregående exemplen i tre illustrativa scenarier. Dessa representerar ett ogynnsamt, ett mellanliggande respektive ett gynnsamt logistikupplägg och syftar till att visa hur kombinationen av flera kostnadsdrivare sammantaget påverkar kostnaden per levererat kilogram vätgas.

Scenarierna är inte avsedda att representera faktiska projekt eller rekommenderade lösningar, utan ska tolkas som förenklade ytterpunkter och mellannivåer som illustrerar storleksordningar och relativa skillnader i kostnadsutfall.

De tre scenarierna definieras enligt följande:

- **Ogynnsamt upplägg ("Worst case"):**
20 ft MEGC, fyllningstryck 380 bar, transportavstånd 100 mil (200 mil ToR)
- **Mellanliggande upplägg ("Middle case"):**
40 ft MEGC, fyllningstryck 500 bar, transportavstånd 30 mil (60 mil ToR)
- **Gynnsamt upplägg ("Best case"):**
40 ft MEGC, fyllningstryck 640 bar, transportavstånd 10 mil (20 mil ToR)

Sammanvägda beräkningsexempel



Tabellen visar ett sammanvägt kostnadsutfall per kilogram vätgas för tre illustrativa parameterkombinationer. Staplarna redovisar dels direkt transportkostnad, dels MEGC-relaterade kostnader (CAPEX och OPEX).

De sammanvägda beräkningsexemplen bekräftar och konkretiserar de kostnadsdrivare som identifierats i den föregående analysen. Fyllningstryck, transporterad mängd per cykel och utnyttjandegrad av kapitalintensiv utrustning framstår som särskilt betydelsefulla för kostnadsutfallet i vägdistribution av komprimerad vätgas. När dessa faktorer samverkar kan skillnaderna i kostnad per kilogram bli mycket stora, även vid i övrigt likartade förutsättningar.

3.5 Standardisering och flexibilitet i systemdesign

Distribution av komprimerad vätgas befinner sig i ett tidigt utvecklingsskede där både volymer, efterfrågemönster och tekniska lösningar fortfarande är under uppbyggnad. Samtidigt kräver etablering av produktionsanläggningar, MEGC och vätgastankstationer investeringar med lång teknisk och ekonomisk livslängd. Detta innebär att val som görs i dag, ofta utifrån begränsade initiala flöden, får konsekvenser för kostnadsnivå och flexibilitet långt in i framtiden. Studien visar därför att standardisering och flexibilitet bör ses som centrala designprinciper redan i tidiga etableringar, för att säkerställa att logistiken kan utvecklas i takt med marknaden och fortsätta vara kostnadseffektiv över tid.

I en tidig marknad är det naturligt att system dimensioneras för rådande behov. Samtidigt pekar analysen på vikten av att vid utformning av anläggningar och transportsystem ta höjd för

framtida scenarier, såsom ökade leveransvolym, högre fyllningstryck och förändrade logistikupplägg. Genom att redan från början beakta dessa utvecklingsriktningar kan aktörer minska risken för inlåsning i lösningar som på kort sikt fungerar väl, men som på längre sikt begränsar möjligheten att optimera kostnaden per levererat kilo vätgas.

För vätgastankstationer innebär detta att mottagningssystem, uppställningsytor och interna flöden utformas med tillräcklig flexibilitet för att kunna hantera olika leveransupplägg över tid. Även om den initiala driften bygger på begränsad förbrukning och relativt få leveranser, kan framtida öknings i efterfrågan innebära behov av tätare leveranser, hantering av flera MEGC-enheter eller övergång till andra rotationsupplägg.

Val av tekniska lösningar vid stationen har också stor betydelse för framtida kostnadseffektivitet. Dimensionering av rörsystem, ventiler, säkerhetskomponenter och kopplingar i förhållande till möjliga framtida trycknivåer påverkar hur ofta transporter behöver ske och vilka MEGCs som kan anslutas. Att bygga in möjlighet att ta emot högre tryck än vad som initialt används kan ge ökad flexibilitet och bättre anpassning till utvecklingen på både produktions- och transportsidan, utan att förutsätta omedelbara förändringar i drift.

Liknande överväganden gäller för MEGC-enheter, som utgör en betydande kapitalinvestering i logistikkedjan. Vid val av MEGC är det därför relevant att beakta både dagens volymbehov och hur användningen kan komma att förändras när marknaden växer. Flexibilitet i fråga om trycknivåer, volym och tekniska gränssnitt ökar möjligheten att använda samma enheter i olika flöden över tid och i samverkan med flera aktörer. Detta bidrar till högre utnyttjandegrad och lägre kostnad per cykel, utan att kräva parallella system för olika användningsfall.

Även produktionsanläggningarnas utformning spelar en viktig roll för logistikens effektivitet. Utöver produktionsprocessen behöver anläggningarna kunna hantera ett växande antal lastbilstransporter på ett förutsägbart och effektivt sätt. Utformning av lastbilsflöden, uppställningsytor och fyllningspaneler samt val av kompressorkapacitet påverkar fyllningstider och därmed hela transportkedjans kapacitet. En anläggning som är utformad för att successivt kunna hantera fler samtidiga leveranser eller högre fyllningstryck skapar bättre förutsättningar för att hålla nere kostnaderna när volymerna ökar.

3.6 Sammanfattning av kostnadsdrivarna i hela logistikkedjan

De viktigaste kostnadsdrivarna för vägtransport av komprimerad vätgas återfinns i tre huvuddelar av kedjan: fyllning, transport och lossning. Gemensamt för dem är att de påverkar hur mycket tid varje leveranscykel kräver och hur mycket vätgas som kan transporteras per resa. I en tidig marknad, där volymerna är låga och transportsträckorna ofta långa, får dessa faktorer en särskilt stor påverkan på kostnad per kilogram vätgas.

Transportmomentet står generellt för den största rörliga kostnaden, men ineffektiv fyllning och långa lossningsmoment kan snabbt skapa flaskhalsar som ökar både tidsåtgång och behovet av fler MEGC-enheter och dragbilar. Därför är samordning, hög fyllnadsgrad och korta cykeltider centrala för att uppnå en konkurrenskraftig logistik.

4. Styrande regelverk och juridiska ramar

Logistiken för komprimerad vätgas påverkas av flera parallella regelverk som tillsammans sätter ramarna för hur fyllning, transport, lossning och stationär lagring får utformas. För aktörer i värdekedjan innebär detta inte bara krav på efterlevnad, utan också praktiska begränsningar i val av bl.a. utrustning, fordonsupplägg och rutter. Nedan ges en översikt över de viktigaste regelverken och hur de påverkar de operativa förutsättningarna.

4.1 Lag om transport av farligt gods

Alla vägtransporter av farligt gods i Sverige av Lag (2006:263) om transport av farligt gods och tillhörande förordning (2006:311).

Lagen reglerar i huvudsak:

- myndighetsroller och tillsyn, (där MCF och Transportstyrelsen har centrala ansvarsområden),
- skyldigheter för avsändare, transportör, förare och mottagare,
- utbildningskrav och säkerhetsrådgivare,
- samt möjligheten att utfärda nationella föreskrifter, undantag eller kompletteringar till ADR.

I praktiken innebär detta att även om ADR-S är det tekniska regelverket, så definierar farligt gods-lagen vem som bär vilket ansvar i hela transportkedjan, hur avvikelser hanteras och vilka sanktioner som gäller vid brister. För logistik med komprimerad vätgas är detta relevant eftersom det påverkar:

- hur ansvar för klassning, dokumentation, utbildning och kontroll måste fördelas i organisationen,
- hur företaget ska arbeta med egenkontroll och rutiner,
- samt hur tillsynsmyndigheter följer upp verksamheten.

4.2 ADR - Transport av farligt gods

ADR (*“European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road”*) är det gemensamma europeiska regelverket som styr hur farligt gods klassificeras, märks, förpackas och transporteras på väg. I Sverige tillämpas reglerna genom ADR-S 2025, som utfärdas av Myndigheten för civilt försvar (*“MCF”, tidigare MSB*). Syftet med reglerna är att förebygga, hindra och begränsa att transporterorna orsakar skador samt underlätta transporter och främja internationell handel genom gemensamma standarder och krav.

4.2.1 Behållare och MEGC

Komprimerad vätgas transporteras som UN 1049 VÄTE, KOMPRIMERAD och klassas som brandfarlig gas (klass 2, kod 1F) enligt ADR. Klassningen styr krav på behållare, fordon, märkning och ruttplanering.

I vägdistribution av komprimerad vätgas förekommer två huvudtyper av bärande enheter: enskilda tryckkärl/flaskpaket och MEGC. Båda lyder under ADR:s klass 2-regelverk, men i större distributionsflöden är MEGC den dominerande lösningen eftersom flera tryckkärl sammanfogas till en enhet som kan hanteras, märkas och kontrolleras som ett system, och är därför fokus i detta studie.

ADR bygger in ett antal säkerhetsprinciper som gäller oavsett om vätgasen förvaras i enstaka tryckkärl/flaskpaket eller MEGC, bl.a. kopplat till materialval och konstruktionsstandarder, tryck (för komprimerade gaser får arbetstrycket inte överstiga $\frac{2}{3}$ av provtrycket och invändigt tryck vid 65 °C får aldrig överstiga provtrycket), märkning och krav på återkommande kontroller.

MEGC för komprimerad vätgas ska vara byggda i material och med komponenter som är godkända för vätgas, uppfylla fastställda tryckkrav (provtryck vs. arbetstryck) och ha ventiler/rör som säkerställer tät drift och säker avstängning. Enhetens ram och infästningar ska klara de mekaniska påfrestningar som uppstår vid vägtransport och möjliggöra säker hantering vid fyllning och lossning. I praktiken innebär det att MEGC måste vara typgodkänd enligt ADR, märkt enligt klass 2.1, genomgå återkommande kontroller och dess transportdokumentet ska ange UN 1049 VÄTE, KOMPRIMERAD samt övriga uppgifter som krävs (t.ex. tunnelkod).

MEGC omfattas av återkommande kontroller av både de tryckbärande elementen och driftsutrustningen (så som ventiler, rör och säkerhetsanordningar), med dokumentation som följer enheten över livscykeln. Tryckbärande element i MEGC ska inspekteras och genomgå kontroll enligt de intervall som anges i respektive typgodkännande, typiskt sett minst vart 5:e år för stålelement enligt TPED. För kompositmaterial gäller kortare inspektionsintervall än för stålelement, ofta mellan 3 och 5 år beroende på tillverkarens och godkännandets villkor.

4.2.2 Fordon och förare

Transport av komprimerad vätgas får bara ske med särskilt godkända fordon (FL-fordon) och behörig personal. FL-fordon är byggda och utrustade för att hantera brandfarliga gaser. Kraven omfattar bland annat brandskydd, elektriskt system, nödstopp, jordningspunkt för lastning/lossning och anordningar som minskar risken för antändning eller läckage. Fordonet ska ha orange skyltar (fram/bak) och lasten ska vara märk- och etiketterad enligt klass 2.1. Fordonet ska genomgå årlig ADR-besiktning och ha ett giltigt ADR-intyg som visar att det uppfyller kraven för FL-klassning.

Förare ska inneha giltigt ADR-intyg med tillägg för tank/cistern (krävs även för MEGC-transporter) samt genomgå återkommande fortbildning. Utöver den formella ADR-utbildningen behövs plats- och systemspecifik introduktion: rutiner för koppling/avkoppling, ventilhantering, läckagekontroll, nödstopp, kommunikation på lastplats och lokala säkerhetsregler.

Enligt ADR (avsnitt 8.1.1) får en transportenhet lastad med farligt gods som huvudregel inte bestå av mer än ett släp eller påhängsvagn. Sverige har dock tillsammans med flera andra länder undertecknat det multilaterala avtalet M342, vilket medger att farligt gods får transporteras i samma fordonskombinationer som icke-farligt gods, inom ramen för nationella regler om längd och vikt. Avtalet gäller för transporter i och mellan de länder som undertecknat avtalet och är i dagsläget giltigt till december 2026 och förväntas förlängas med ytterligare fem år därefter.

Detta innebär att längre fordonskombinationer som i dag används för annan tung godslogistik, exempelvis så kallade nordiska kombinationer eller längre lastbil och släp-kombinationer, är regulatoriskt tillåtna för transport av komprimerad vätgas i MEGC i Sverige, förutsatt att samtliga övriga krav i ADR-S uppfylls.

I praktiken kan detta exempelvis innebära fordonskombinationer där en lastbil med påbyggnad kombineras med en efterföljande semitrailer, vilket möjliggör transport av två MEGC-enheter i samma ekipage, till exempel en kombination av en 20-fots och en 40-fots MEGC. Mer volymeffektiva upplägg, såsom fordonskombinationer med två 40-fots MEGC-enheter, är ur ett regelverksperspektiv inte uteslutna genom M342, men förekommer i dagsläget i mycket begränsad omfattning eller inte alls i praktisk drift.

Orsaken är att valet av fordonskonfiguration i praktiken begränsas av tekniska och operativa faktorer såsom FL-klassning, vikt- och axellastfördelning, bromssystem, tillgång på typgodkända fordon samt marknadens tekniska mognadsgrad. Dessa praktiska begränsningar behandlas vidare i avsnittet om transportlogistik och operativa förutsättningar.

4.2.3 Drift: fyllning, körning och lossning

ADR innehåller driftregler för fyllning, transport och lossning av komprimerad vätgas, med syfte att förebygga läckage, antändning och mekaniska skador under hela transportkedjan. Reglerna innebär att hanteringen ska ske kontrollerat och enligt fastställda rutiner, med krav på korrekt märkning, säkring av last och uppföljning av tryck- och temperaturförhållanden. Vid vägtransport påverkas planeringen även av ruttkrav, såsom tunnelrestriktioner och lokala föreskrifter för farligt gods, vilket ställer krav på förhandsplanering och val av lämpliga transportvägar

4.2.4 Dokumentation, märkning och spårbarhet

Transport av komprimerad vätgas omfattas av krav på dokumentation, märkning och spårbarhet i syfte att säkerställa korrekt information till berörda aktörer och möjliggöra tillsyn och insats vid incidenter. Regelverket ställer krav på att transporten kan identifieras med avseende på innehåll, avsändare och mottagare samt att fordon och transportenheter är tydligt märkta som innehållande brandfarlig gas. Elektroniska dokument (EDI/EDP) är tillåtna om de är tillgängliga för kontroll under hela transporten.

4.2.5 Roller, utbildning och säkerhetsrådgivare

ADR definierar vem som ansvarar för vad längs hela flödet och kräver att alla inblandade har relevant utbildning för sina uppgifter.

- Avsändaren ansvarar bl.a. för korrekt klassificering, dokumentation och att rätt märkt och godkänd enhet används.
- Fyllare/lastare kontrollerar kär/MEGC (täthet, märkning, giltiga besiktningar), följer fyllningsregler och stänger ventiler korrekt.
- Transportören/föraren säkerställer att rätt fordon används (FL-fordon vid MEGC), utrustning och dokument finns, följer ruttbegränsningar (t.ex. tunnelkod).
- Lossaren/mottagaren hanterar lossning säkert, kvitterar mottagning och ser till att enheter lämnar platsen i föreskrivet skick.

Föraren ska ha ADR-intyg, medan övriga funktioner/roller omfattas av ADR 1.3-utbildning anpassad till uppgift (ex. fyllningsrutiner, märkning, dokument, nödförfarande). Utöver detta behövs plats- och systemspecifik genomgång hos producent och mottagare.

Varje verksamhet som regelbundet avsänder, fyller, lastar, transporterar eller lossar farligt gods ska utse en säkerhetsrådgivare ("DGSA"). Rådgivaren följer upp efterlevnad, granskar rutiner och utbildning, stödjer utredning av händelser/avvikelser.

4.3 TPED

TPED ("*Transportable Pressure Equipment Directive 2010/35/EU*") är EU-direktivet som styr marknadstillträde, återkommande besiktningar och märkning av transportabla tryckbärande anordningar ("*TPE*") som används för farligt gods. Syftet är att säkerställa att utrustningen är säker och kan användas fritt inom EU/EES. I Sverige införs TPED i lagstiftningen genom MSBFS 2011:3.

En TPE (t.ex. flaskpaket eller MEGC) för transport på väg ska uppfylla ADR-S och TPED och genomgå bedömning av överensstämmelse innan den släpps ut på marknaden. I drift ska den därefter genomgå återkommande, mellanliggande och revisionskontroller enligt ADR-S.

När överensstämmelsen är visad ska TPE pi-märkas (π). Pi-märket ska åtföljas av identifikationsnumret för det anmälda (ackrediterade) organ som deltagit i bedömningen respektive ansvarar för första återkommande kontrollen. Sömlösa gasflaskor av stål som är avsedda för nationella transporter i Sverige ska dessutom förse med märkningen "-40 °C" som en kvittens på att den möter temperaturkravet -40 °C.

4.3.1 Roller & ansvar

- Tillverkare: Säkerställer konstruktion och dokumentation enligt ADR och TPED, genomför/ordnar konformitetsbedömning och pi-märkning (π + organ-ID). Bevarar underlag, hanterar fel/återkallelser och informerar myndighet vid risk.
- Importör: Släpper bara ut pi-märkta och korrekt bedömda TPE på marknaden; kontrollerar intyg/dokumentation samt agerar och informerar vid risk.
- Distributör: Tillhandahåller endast pi-märkta TPE med rätt intyg; säkerställer att hantering, lagring och transport, stoppar/eskalerar vid avvikelse.
- Ägare/brukare: Använder endast godkända TPE; ser till att periodiska/mellanliggande kontroller utförs, att märkning är läsbar och att drift, lagring och transport upprätthåller kraven; tar ur bruk och informerar vid risk.

4.4 Lag om brandfarliga och explosiva varor (LBE)

Utöver de regler som styr själva transporten av vätgas (ADR-S och TPED) omfattas de stationära moment i logistikkedjan av Lag (2010:1011) om brandfarliga och explosiva varor ("*LBE*") och MCF:s föreskrifter om hantering av brandfarlig gas (MSBFS 2020:1). Regelverken gäller inte bara vid lagring, utan även vid själva påfyllningen och lossningen av MEGC, eftersom vätgas då hanteras och överförs utanför transport enligt ADR. Därför omfattas både fyllningsstationer, tankstationer och uppställningsplatser av LBE.

Transporter som omfattas av ADR är undantagna från LBE under färd, men LBE och MSBFS regler träder in så snart en MEGC/flaskpaket som innehåller vätgas:

- står uppställd i väntan på lastning eller lossning,
- kopplas upp för fyllning eller tömning,
- används som buffertlager, eller
- parkeras eller mellanlagras på en verksamhetsplats.

Krav på tillstånd, riskutredning och tekniska skyddsåtgärder innebär att platser där vätgas fylls, lossas eller lagras måste utformas med hänsyn till brand- och explosionsrisker. Detta påverkar i praktiken:

- hur många MEGC som får stå uppställda samtidigt,
- vilken buffertkapacitet som är möjlig på en plats,
- hur nära byggnader, vägar, trafikytor och andra tankstationer så som diesel, LBG/LNG och DC-laddare en station kan placeras,
- och hur fyllnings- och lossningsytor behöver utformas för att möjliggöra säker anslutning och manövrering.

LBE kräver dessutom att verksamheten gör en riskutredning som visar hur hanteringen av vätgas är säker och hur risker kontrolleras. För tankstationer finns en etablerad branschpraxis i form av Energigas Sveriges tankstationsanvisningar ("*H2-TSA*"). Det är inte bindande regelverk, men utgör den praktiska vägledning som kommuner och räddningstjänster använder för att bedöma om kraven i LBE och MSBFS är uppfyllda. H2-TSA konkretiserar bland annat skyddsavstånd, layout, trafikflöden, uppställningsytor och tekniska lösningar för säker drift.

4.5 Seveso

Seveso-lagstiftningen (Lag och förordning om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor 1999:381) och förordning (2015:236)) kan bli tillämplig när större mängder vätgas hanteras på en och samma plats. Regelverket riktar sig i första hand till anläggningar snarare än transporter, men får betydelse för produktionsanläggningar, större fyllningsstationer och depåer där många MEGC kan stå uppställda samtidigt. För vätgas som brandfarlig gas gäller följande riktvärden:

- Lägre kravnivå: 5 ton vätgas
- Högre kravnivå: 50 ton vätgas

4.6 Avtal och standardvillkor för vägtransporter

Transportavtal inom vägtrafik bygger i stor utsträckning på standardiserade villkor som används brett i branschen. Syftet är att skapa en tydlig och gemensam utgångspunkt för ansvarsfördelning, krav och ersättningsmodeller. Dessa standardvillkor kompletteras sedan med särskilda överenskommelser beroende på typ av gods, tekniska krav, risknivå och vilka tjänster transportören ska utföra.

I typiska transportavtal regleras bland annat:

- parternas ansvar och skyldigheter

- hantering av godset, lastning/lossning och leveransfönster
- ersättningsmodeller, tillägg, väntetider och avvikelser
- försäkringsfrågor
- skadereglering och reklamationer
- tillämpning av lagar, t.ex. trafiklagstiftning och ADR vid farligt gods

Standardavtalen fungerar som en juridisk grund, medan den operativa delen ofta anpassas efter det specifika uppdraget.

I Sverige används framför allt två standardavtal: Alltrans 2007 och NSAB 2015. Alltrans 2007 är det vanligaste ramverket för inrikes vägtransporter och reglerar hur transportörens ansvar ser ut från det att godset tas emot tills det lämnas över vid destinationen. Avtalet innehåller tydliga ramar för hur skador, förluster och förseningar ska hanteras samt vilka tidsfrister som gäller för reklamationer. Det beskriver också beställarens skyldigheter, såsom att lämna korrekt information om godset och att, om inte annat avtalats, svara för lastning och lossning. Alltrans innehåller även ett avsnitt om farligt gods och anger att transportören måste följa de regler som gäller för transport av sådana produkter, däribland krav på utbildning, märkning och hantering enligt ADR. Men generellt sett så är Alltrans ett allmänt transportvillkor utan specifik koppling till farligt gods eller specialiserad utrustning som gastankar eller MEGC-enheter.

NSAB 2015, som används av speditörer och logistikaktörer, är bredare i sin omfattning och inkluderar även regler för lagring, terminalhantering och andra logistiktjänster utöver själva transporten. NSAB är särskilt relevant i upplägg där flera aktörer eller transportslag samordnas eller när speditören tar ett större ansvar för planering och administration av transportkedjan. Jämfört med Alltrans innehåller NSAB mer detaljerade bestämmelser kring speditörens ansvar, möjligheten att agera som förmedlare eller transportör samt vilka begränsningar som gäller vid skadestånd och försäkringsfrågor. Inte heller NSAB är särskilt utformat för farligt gods, och precis som Alltrans saknar det detaljerade regler för exempelvis gastransporter, högriskprodukter eller trycksatta behållare.

Vid transport av farligt gods enligt ADR blir det därför nödvändigt att komplettera standardavtalen. ADR fungerar som ett tvingande regelverk som anger detaljkraven för utbildning, dokumentation, fordonsutrustning och teknisk säkerhet. Standardvillkoren täcker den juridiska ramen men saknar den detaljnivå som behövs för att säkerställa hantering och drift av specialiserade utrustningar. Det är därför etablerad praxis att standardavtalet kompletteras med särskilda avsnitt eller bilagor där ansvar för MEGC-enheternas tekniska status, krav på utbildning, rutiner för lastning och lossning och hantering av avvikelser specificeras mer i detalj.

För vätgaslogistik innebär detta att transportörer och beställare normalt behöver komplettera Alltrans/NSAB med särskilda villkor. Dessa reglerar bland annat ansvarsfördelning kring MEGC-enheter, krav på ADR-kompetens, rutiner för lastning/lossning och hantering av incidenter. I praktiken påverkar dessa avtalslösningar både prisnivån per transport och hur risker och kostnader fördelas mellan gasleverantör, transportör och stationsoperatör.

5. Avslutande slutsatser och systemperspektiv

Syftet med denna studie har varit att ge ett gemensamt, praktiskt och användbart underlag för att förstå hur vägdistribution av komprimerad vätgas fungerar i dag, vilka faktorer som driver

kostnader i transportledet och hur logistik, teknik och affärsmodeller samspelar. De tre övergripande frågeställningarna har rört kostnadsdrivare, möjligheten att skapa mer konkurrenskraftiga leveransmodeller samt hur samverkan i värdekedjan kan bidra till effektivare logistik. De slutsatser som kan dras visar att dessa frågor inte kan besvaras var för sig, utan måste förstås som delar av ett sammanhängande system där tekniska, organisatoriska och regulatoriska val påverkar varandra över tid.

5.1 Marknadsmognad, standardisering och kostnadsutveckling

Studien visar att dagens höga kostnadsnivåer till stor del är en konsekvens av att marknaden för vätgasdistribution befinner sig i en utvecklings- och etableringsfas. Låga volymer, begränsad tillgång på produktionskapacitet och en hög grad av plats- och aktörsspecifika lösningar innebär att logistiken ännu inte fungerar som ett industrialiserat system. I detta skede är kostnaderna höga, men inte nödvändigtvis representativa för den långsiktiga potentialen.

En central slutsats är att takten i kostnadsreduktionen i hög grad styrs av hur snabbt och konsekvent standardisering kan etableras. Standardisering fungerar här som en brygga mellan utvecklingsfas och industriell drift. Ju snabbare gemensamma tekniska och operativa standarder tas fram och implementeras i hela flödet, desto snabbare kan marknaden röra sig mot mer stabila, skalbara och kostnadseffektiva lösningar. Detta gäller inte minst standardisering av tekniska gränssnitt såsom kopplingar, trycknivåer och hanteringsrutiner, där variation i dag bidrar till ökade tidskostnader och behov av specialanpassningar.

Samtidigt visar analysen att standardisering inte kan drivas isolerat av enskilda aktörer. En standard som fungerar vid en tankstation skapar ingen systemnytta om den inte är kompatibel med MEGC-design och produktionsanläggningarnas fyllningssystem. Standardisering behöver därför förstås som ett kedjearbete där produktion, transport och mottagning utvecklas i samverkan. I detta arbete är det också viktigt att undvika att historiska lösningar, som vuxit fram i andra marknader eller under andra förutsättningar, cementeras som norm. Den framväxande vätgasmarknaden kräver standarder som är anpassade för framtida volymer, flexibilitet och kostnadseffektivitet, snarare än för hur system traditionellt har utformats.

5.2 Tekniska lösningar, trycknivåer och kostnadsoptimering

Ett av studiens tydligaste resultat är att fyllningstryck och transporterad mängd per cykel är starkt kostnadsdrivande faktorer. Högre tryck möjliggör större mängd vätgas per transport och därmed lägre kostnad per kilogram, men analysen visar också att sambandet inte är linjärt. Ökat tryck innebär ökade investeringskostnader i kompressorer och tryckkärl, högre tekniska krav på komponenter och i vissa fall tyngre behållare som reducerar nyttolasten.

Den mest kostnadseffektiva lösningen uppstår därför inte vid maximalt tekniskt möjligt tryck, utan i ett optimerat intervall där investeringskostnader, teknisk tillgänglighet och mottagarens förutsättningar beaktas. Detta innebär att tekniska val inte kan göras isolerat i ett led av kedjan, utan måste ses i relation till hela systemets begränsningar och möjligheter. Produktionens kompressorkapacitet, MEGC-enheternas design och mottagande stationers tryck- och lagringsförmåga behöver utvecklas samordnat för att realisera den potentiella kostnadsnyttan av högre tryck.

5.3 Utnyttjandegrad som nyckel till konkurrenskraft

Studien visar att utnyttjandegraden av kapitalintensiv utrustning, i synnerhet MEGC, är en av de mest avgörande faktorerna för kostnaden per levererat kilo vätgas. Långa cykeltider, väntan vid fyllning och lossning samt tomkörning innebär att stora investerade värden genererar få levererade kilogram, vilket snabbt driver upp kostnaden.

Mot denna bakgrund framstår åtgärder som ökar antalet cykler per enhet som centrala för konkurrenskraften i logistiken. Effektiv planering, korta och förutsägbara cykeltider samt minimering av stillestånd har minst lika stor betydelse som själva körsträckan. Detta belyser också vikten av att analysera logistiken som ett flöde över tid snarare än som enskilda transporter.

5.4 Pooling, samutnyttjande och systemkrav

En möjlig utvecklingsväg som framträder i studien är ökat samutnyttjande eller pooling av MEGC mellan aktörer. Ett sådant upplägg kan minska behovet av överkapacitet och reducera det totala investerade kapitalet som krävs för att upprätthålla rullande logistik. Samtidigt innebär pooling ökade krav på standardisering av tekniska gränssnitt, gemensamma rutiner för hantering och tydligare styrning av gaskvalitet och spårbarhet.

När MEGC cirkulerar mellan flera användare ökar risken för att historik och tidigare användning påverkar gaskvaliteten, vilket i sin tur ställer högre krav på provtagning, dokumentation och mätning. Pooling är därmed inte enbart en organisatorisk lösning, utan en systemförändring som kräver både teknisk harmonisering och utvecklade digitala stödsystem för att fungera effektivt.

5.5 Regelverk, geografi och svenska förutsättningar

Regelverken sätter de yttre ramarna för hur logistiken kan utformas och påverkar direkt vilka kostnadsreducerande åtgärder som är möjliga. Särskilt relevant är frågan om tillåtna fordonskonfigurationer, längd och vikt, som avgör hur mycket vätgas som kan transporteras per cykel.

Det är samtidigt viktigt att sätta resultaten i ett svenskt och nordiskt perspektiv. Många studier och tekniska lösningar utgår från europeiska genomsnittsförutsättningar där tillåtna fordonsdimensioner ofta är mer restriktiva än i Sverige. Detta innebär att Sverige i vissa fall har potential att transportera större volymer per fordon och därmed nå lägre kostnad per kilogram. Samtidigt styrs teknikutveckling och standardisering i stor utsträckning av europeiska marknader, vilket kan begränsa utvecklingen av lösningar som är specifikt anpassade för svenska förhållanden, även när dessa skulle vara tekniskt och regulatoriskt möjliga nationellt.

5.6 Avstånd, lokalisering och flexibilitet över tid

Analysen bekräftar också betydelsen av transportavstånd för kostnadsnivån. Kortare avstånd ger inte bara lägre rörliga kostnader, utan bidrar även till kortare cykeltider och högre

utnyttjandegrad av utrustning. Lokalisering av produktion, mellanlager och användning är därmed en strategisk fråga för att skapa konkurrenskraftig vätgaslogistik.

Mot bakgrund av osäker efterfrågeutveckling och föränderliga marknadsförutsättningar framstår flexibilitet som en övergripande designprincip. Etableringar som utformas med möjlighet att hantera förändrade flöden, trycknivåer och affärsmodeller minskar risken för framtida inlåsning och gör det möjligt att successivt anpassa logistiken till det mest kostnadseffektiva upplägget över tid. Flexibilitet och standardisering är i detta avseende inte motsatser, utan kompletterande förutsättningar för ett robust och skalbart system.

5.7 Sammanfattande slutsats

Sammantaget visar studien att kostnadseffektiv distribution av komprimerad vätgas inte kan reduceras till en fråga om enskilda tekniska val eller transportkostnader.

Mot denna bakgrund visar studien också att det finns ett långsiktigt utvecklingsutrymme för att ytterligare förbättra kostnadseffektiviteten i vägdistributionen av komprimerad vätgas genom mer volymeffektiva fordonslösningar. Även om dagens transporter i praktiken begränsas av tekniska, operativa och marknadsmässiga faktorer, finns det inom ramen för gällande regelverk, inklusive multilaterala avtal som M342, en potential att på sikt bättre utnyttja den regulatoriska ramen.

För att denna potential ska realiseras krävs dock en samordnad utveckling av teknik, fordon och affärsmodeller. Utveckling och typgodkännande av FL-klassade fordonslösningar, i kombination med ökad standardisering, stabilare volymunderlag och en mer mogen marknad, kan på sikt möjliggöra mer volymeffektiva fordonskombinationer även för transport av komprimerad vätgas. En sådan utveckling kan bidra till lägre kostnad per transporterad enhet och därmed stärka konkurrenskraften i den svenska och nordiska vätgaslogistiken över tid.

De största möjligheterna till kostnadsreduktion uppstår när tekniska lösningar, standardisering, affärsmodeller och samverkan utformas som ett sammanhängande system. Genom att förstå och adressera dessa samband skapas förutsättningar för att gå från dagens utvecklingsfas till en mogen, konkurrenskraftig och skalbar vätgaslogistik som stödjer marknadens långsiktiga etablering.

6. Referenser

Department for Energy Security and Net Zero (2023). *Hydrogen Transport and Storage Cost Report*.

Energiforsk (2024). *Vätgasens roll i energi- och klimatomställningen*.

Energimyndigheten (2023). *Vätgasens roll i transportsystemet – underlagsrapport från WSP*.

European Commission (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*.

European Commission (2022). *REPowerEU Plan*.

Griñan, G.G. & Gomez-Acebo, T. (2025). *Techno-Economic Analysis of Hydrogen Transport: Comparison between Tube Trailer and Pipeline*.

Luleå tekniska universitet (2025). *The Hydrogen Map*.
https://ltu.instante.se/V%C3%A4tgas/Hydrogen_map_English_112024.html

Solomon, A., Heineken, J., Scheffler, P. & Birth-Reichert, M. (2024). *Cost Optimization of Compressed Hydrogen Gas Transport via Trucks and Pipelines*.