



TSL  
2021-3811

# Vätgas och luftfart

Är vätgas svaret på flygets klimatpåverkan?

© Transportstyrelsen

Sjö- och luftfart  
Enheten för hållbar utveckling

Rapporten finns tillgänglig på Transportstyrelsens webbplats [www.transportstyrelsen.se](http://www.transportstyrelsen.se)

Dnr/Beteckning TSL 2021-3811

Författare Sandén Henrik, Christina Berlin, Jenny Blomberg  
Månad År Juni 2021

Eftertryck tillåts med angivande av källa.

## Förord

Flygbranschen är i stort behov av att hitta miljöanpassade metoder för framdrift som erbjuder lösningar på dagens fossilberoende flygtransporter. Vätgasframdrivning anses ha betydande potential för att minska transportsystemets klimatpåverkan och ansträngningarna för att utveckla kommersiella vätgasdrivna flygplan har därför intensifierats under senare år. Transportstyrelsen har därför sett ett behov av att ta fram ett kunskapsunderlag på området. Detta har gjorts inom ramen för myndighetens marknadsövervakning.

Norrköping juni 2021

Karin Fransson

Sektionschef

Henrik Sandén, Christina  
Berlin, Jenny Blomberg

Utredare

## Sammanfattning

Medan flygmarknaden försöker att ta sig ur den ekonomiska kris som har orsakats av pandemin finns samtidigt ett ökat tryck på att utveckla ett mer hållbart resande. Att minska koldioxidutsläppen som skapas vid förbränning av fossilt flygbränsle är den mest dominerande framtidsfrågan för luftfarten. Enligt den Internationella klimatpanelen (IPCC) står flyget globalt sett för omkring 2-3 procent av de totala utsläppen av koldioxid. Inom flygsektorn är det därför avgörande att investera i tekniker som minskar utsläpp av koldioxid och andra klimatpåverkande utsläpp.

I det sammanhanget har vätgas återigen blivit relevant efter att intresset varit relativt svalt under flera år. Att ersätta fossilt flygbränsle med vätgas skulle potentiellt kunna innebära stora fördelar för klimatet och miljön. Idag arbetar Airbus med att utveckla vätgasteknik och har nyligen presenterat tre koncept för vätgasdrivna flygplan: ett propellerdrivet regionalflygplan, ett flygplan för kort till medellång distans och ett flygplan med så kallat blended wing body design (BWB).

Användningen av luftfartyg med vätgasdrivna bränsleceller kan minska klimatpåverkan med 75-90 procent, medan luftfartyg som istället utrustas med vätgasdrivna förbränningsmotorer kan minska klimatpåverkan med 50-75 procent. Skillnaden beror främst på att vätgas inte innehåller något kol. Det har också visat sig att NO<sub>x</sub>-utsläppen minskar med 50 till 80 procent. Även om vätgasflyg inte ger några koldioxidutsläpp alls och medför väsentligt minskade NO<sub>x</sub>-utsläpp så bidrar vätgasflygplan med ca 150 procent mer vattenånga i atmosfären jämfört med ett fotogendrivet luftfartyg. Utsläppen av vattenånga bidrar till höghöjdseffekter och bildandet av cirrusmoln vilket ökar klimatpåverkan.

En betydande utmaning för att kunna flyga kommersiellt med vätgasdrivna flygplan är kopplad till infrastrukturen på marken. En omställning till vätgas fordrar helt ny infrastruktur för att producera och leverera vätgas till flygplatser. En annan utmaning med vätgastekniken är dålig systemverkningsgrad. Med transport, förvaring och distribution så blir effektiviteten endast omkring 60 procent.

Luftfartyg som drivs av vätgas kommer att ha andra kostnader för bränsle och infrastruktur i jämförelse med flygfotogen. Produktionskostnaden för vätgas är idag högre än produktionskostnaden för konventionellt flygbränsle. År 2050 förväntas dock priset för vätgas ha minskat och sannolikt närmare sig priset för dagens flygfotogen, främst genom förbättrade produktionsmetoder och ökad efterfrågan. Andra fördyrande kostnader är kopplade till sådant som kapital och underhåll.

Om vätgas ska bli ett framtida alternativt drivmedel för flyget har Transportstyrelsen ett arbete att göra. Den nya tekniken kommer att få direkt relevans för myndighetens normgivning, tillstånd, tillsyn och marknadsövervakning. Utmaningen här ligger i att säkerställa att regelverk och teknik utvecklas tillsammans och mognar samtidigt. Om vätgasdrift realiserar i större skala kommer omställningen till framdrift med vätgas att ta lång tid i anspråk.

Att utveckla ny teknik tar tid. Vägen fram till vätgasflygets stora genombrott är lång och fordrar ett omfattande och målmedvetet arbete på flera områden och nivåer. Men tyvärr kommer vätgasflyg inte ha någon större påverkan på luftfartens utsläpp förrän om trettio år. I omställningen till fossilfrihet bör vätgasflyg därför främst ses som en del i en framtida lösning där flera tekniker för utsläppsminskningar finns sida vid sida. Men med fortsatt forskning och utveckling, utformning och anpassning av infrastruktur och en fossilfri produktionsapparat kan vätgasflyg innebära ett stort och viktigt steg mot ett hållbart flyg.

## Innehåll

<b>FÖRORD</b> .....	<b>3</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>8</b>
1.1 Bakgrund.....	8
1.2 Transportstyrelsens uppdrag .....	9
1.3 Syfte och frågeställningar .....	9
1.4 Metod och avgränsningar .....	9
1.5 Disposition .....	10
<b>2 FLYGET OCH KLIMATET</b> .....	<b>11</b>
2.1 Luftfartens klimatpåverkan .....	11
2.2 Globala och nationella klimatmål .....	11
<b>3 VÄTGAS OCH VÄTGASFLYG</b> .....	<b>13</b>
3.1 Vätgasen som energibärare.....	13
3.2 Vätgasstrategier .....	14
3.3 Vätgasflyg .....	15
3.3.1 Koncept för vätgasflyg .....	17
3.3.2 Nationella och europeiska forskningsprogram .....	19
<b>4 MÖJLIGHETER OCH HINDER</b> .....	<b>21</b>
4.1 Vätgasflygets potential.....	21
4.2 Vätgasflygets utmaningar .....	23
<b>5 VÄTGASFLYGETS MARKNADSFÖRUTSÄTTNINGAR</b> .....	<b>26</b>
5.1.1 Energikostnader .....	26
5.1.2 Kapital- och underhållskostnader .....	26
5.1.3 Övriga kostnader .....	27
5.1.4 Totala driftskostnader .....	27
<b>6 TRANSPORTSTYRELSENS ROLL</b> .....	<b>28</b>
<b>7 ANALYS OCH DISKUSSION</b> .....	<b>30</b>
7.1 Vätgas kan vara svaret på flygets klimatpåverkan .....	30
7.2 Men det saknas inte invändningar.....	30
7.3 Transportstyrelsen ska vara en möjliggörare.....	31
7.4 Omställning tar tid .....	32
<b>REFERENSER</b> .....	<b>33</b>

# 1 Inledning

På senare år har trycket ökat för en samhällsgemensam omställning till hållbarhet och fossilfrihet, från såväl politiken som näringsliv och konsumenter. Offentliga och privata investeringsbeslut görs allt oftare med hållbarhet som utgångspunkt och på EU-nivå vidtas konkreta åtgärder för att säkerställa en långsiktig hållbar omställning av unionens ekonomi (EU:s gröna giv). I detta ligger bland annat ett ökat intresse för moderna hållbara bränsletekniker, såsom el och vätgas.

## 1.1 Bakgrund

I takt med att pandemin har drabbat både människor och ekonomier i världen, så har flygresandet minskat kraftigt och i vissa fall närmast utplånats. Det råder fortfarande stor osäkerhet kring hur trafikutvecklingen kommer att se ut framåt, men innan pandemin var den långsiktiga trenden en ökad efterfrågan på flygresor, främst utrikes. (Transportstyrelsen, 2020)

Samtidigt som flygmarknaden försöker att ta sig ur den ekonomiska kris som har orsakats av pandemin har råder ett ökat tryck på att utveckla ett mer hållbart resande. Det är uppenbart att flygets klimatpåverkande utsläpp behöver minska om Sverige och övriga världen ska klara åtagandet enligt Parisavtalets 1,5-gradersmål och det långsiktiga klimatmålet om att nettoutsläppen år 2045 ska vara noll. Inom flygsektorn är det därför avgörande att investera i tekniker som minskar utsläpp av koldioxid och andra klimatpåverkande utsläpp. I linje med detta pågår omfattande arbete med att utveckla ett kommersiellt elflyg. Ett exempel är tillverkaren Heart Aerospace som arbetar för att deras elflyg ska vara i drift år 2026, men kommer då vara tillämpligt enbart på kortare sträckor och med upp till 19 passagerare. (Dagens industri, 2020)

På längre sträckor kommer det till en början att fordras andra miljövänliga bränsletekniker. I det sammanhanget har vätgas återigen blivit relevant efter att intresset varit relativt svalt under flera år. Att ersätta fossilt flygbränsle med vätgas skulle potentiellt kunna innebära stora fördelar för klimatet och miljön eftersom vätgas inte innehåller kol och därmed inte ger några koldioxidutsläpp vid förbränning. Frågan är om framtidens flyg till väsentlig del kommer att drivas av vätgas.

För att kunna uppfylla sitt uppdrag behöver Transportstyrelsen hålla sig väl orienterad om utvecklingen på transportområdet i stort. Det innefattar bland annat att följa hur utvecklingen av framdrift av luftfartyg, fartyg och vägtrafikfordon ser ut. Då användningen av vätgas har blivit alltmer aktuell behöver Transportstyrelsen därför följa utvecklingen av vätgas som bränsle i luftfartyg för att tidigt identifiera behov av regelanpassningar, marknadsvillkor, infrastruktur och liknande som kan komma att bli aktuella.

Målsättningen är att myndigheten ska kunna agera proaktivt och bedöma vilka kompetenser och resurser som är nödvändiga för att möta upp eventuellt kommande behov.

## 1.2 Transportstyrelsens uppdrag

Transportstyrelsen ska verka för att de transportpolitiska målen uppnås. Verksamheten ska särskilt inriktas på att bidra till ett internationellt konkurrenskraftigt, miljöanpassat och säkert transportsystem (Förordning 2010:182). Transportstyrelsen ska enligt sin instruktion ansvara för frågor som rör krav på infrastruktur, fordon, fartyg och luftfartyg, kompetenskrav och behörigheter, krav på infrastrukturförvaltare, trafikorganisatörer och trafikföretag, trafikregler, nyttjande av infrastruktur, anläggningar och service, villkor för marknadstillträde och konkurrensvillkor, samt villkor för resenärer och de som köper godstransporttjänster.

Transportstyrelsen ska arbeta strategiskt för att identifiera behov av regelförändringar, eller andra åtgärder för att möjliggöra och underlätta teknikutvecklingen. Ett annat målområde och likaledes ett strategiskt område är att bidra till hållbara transporter.

Syntesen av uppdraget formuleras i myndighetens vision: *”vi möjliggör morgondagens resor och transporter”*.

## 1.3 Syfte och frågeställningar

Målet med föreliggande rapport är att den ska utgöra ett kunskapsunderlag om vätgasflyg. Syftet är att orientera och förbereda Transportstyrelsen för den utveckling som pågår inom området, det vill säga hur och varför vätgasflyg blivit alltmer uppmärksammat.

Följande frågeställningar ska besvaras:

- Hur ser utvecklingen ut på området vätgasflyg? Detta avser såväl branschutveckling som politiska åtgärder.
- Vilka möjligheter och hinder med avseende på hållbar utveckling kan vätgasflyg tänkas medföra?
- Vilka eventuella insatser, kunskaper och kompetenser behöver Transportstyrelsen företa eller ha för att omhänderta utvecklingen på vätgasflygområdet?

## 1.4 Metod och avgränsningar

Rapporten baseras i huvudsak på litteraturstudier av rapporter samt nyhets- och forskningsartiklar. Författare till dessa är såväl offentliga aktörer som bransch och media. För att fördjupa kunskapen om hur den nya tekniken



påverkar Transportstyrelsens kärnuppgifter har dialog förts med nyckelpersoner inom myndighetens kärnverksamhet. Fördjupande statistik har hämtats från Transportstyrelsens egna databaser, andra myndigheter och branschorganisationer.

Rapportens fokus ligger huvudsakligen på flyget och marknaden. Ambitionen har varit att ge en övergripande introduktion till ett teknikområde som på senare tid erhållit mycket uppmärksamhet, utan att framställningen tyngs av tekniska beskrivningar. Vidare ligger fokus på Transportstyrelsens ansvarsområde, det vill säga transportsystemet, och därför lämnas frågan om energisystem och -behov relativt obesvarad. Ansvar för frågor om tillförsel och användning av energi i samhället vilar på förvaltningsmyndigheten Energimyndigheten.

## **1.5 Disposition**

Rapporten är indelad i sex avsnitt. I kapitel 2 presenteras vilka klimatutmaningar flyget står inför. Kapitel 3 ger en introduktion till vätgas och de satsningar som finns rörande vätgasflyg. I kapitel 4 diskuteras den potential och de utmaningar som vätgasflyg innebär, medan kapitel 5 behandlar de kostnader som flygbolaget har att hantera. I kapitel 6 riktas fokus mot vad Transportstyrelsen som myndighet har att överväga vad gäller vätgasflyg. Avslutande kapitel 7 utgör en summering och analys av kapitel 2-6.

## 2 Flyget och klimatet

Utvecklingen av vätgasflyg är idag en högaktuell fråga eftersom luftfartsbranschen är i stort behov av att hitta vägar för att minska sin klimatpåverkan. Enligt den australiska forskningsmyndigheten Csiro så kommer den prognostiserade efterfrågeökningen av flygtransporter att leda till en tredubblad tillväxt av koldioxidutsläpp år 2050 jämfört med 2005 års nivåer vid ”business as usual”, det vill säga om inga ytterligare åtgärder än de som finns idag införs för att minska koldioxidutsläppen. För att nå IATA:s mål om en halvering av koldioxidutsläppen år 2050 (jämfört med 2005) krävs det bland annat en genomgripande omställning av framdriften av luftfartyg. Ett alternativ bland flera är därför att utveckla flygplan med vätgasdrift (Csiro, 2021).

### 2.1 Luftfartens klimatpåverkan

Att minska koldioxidutsläppen som skapas vid förbränning av fossilt flygbränsle är den mest dominerande framtidsfrågan för luftfarten. Enligt den Internationella klimatpanelen (IPCC) står flyget globalt sett för omkring 2-3 procent av de totala utsläppen av koldioxid.

Det är dock inte bara utsläpp av koldioxid som påverkar klimatet negativt. Luftfarten släpper även ut kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ), sot och vattenånga på hög höjd vilket också bidrar till jordens uppvärmning. Dessa utsläpp stannar emellertid inte kvar lika länge i atmosfären som koldioxid gör. Trots att  $\text{NO}_x$  endast stannar kvar i atmosfären under ett par veckor så bidrar utsläppen på hög höjd till bildandet av ozon, vilket är en kraftig klimatgas som stannar kvar i atmosfären betydligt längre. Utsläpp av vattenånga på hög höjd bidrar till en ökad molnbildning, vilket påverkar värmeutstrålningen från jorden negativt. (Europeiska kommissionen, 2021) Det är detta som benämns höghöjdseffekter. Om effekterna av flygets utsläpp av vattenånga och kväveoxider på hög höjd samt påverkan från bildandet av kondensstrimmor inkluderas kan flygets totala klimatpåverkan sannolikt fördubblas. Senaste forskningen nämner en uppräkningsfaktor på 1,9 som den bästa uppskattningen (Transportstyrelsen, u.å). Uppräkningen av flygets totala klimatpåverkan är dock fortfarande osäker och kräver fortsatt forskning.

### 2.2 Globala och nationella klimatmål

Klimatfrågan är ständigt aktuell, inte bara inom luftfartssektorn utan även i samhället i stort. För att nå Parisavtalet behöver världens fossilberoende kraftigt minska under de närmaste åren. Enligt avtalet, som är bindande för de stater som ratificerat det (189 av 197 länder) ska länderna utforma och lämna in nationellt beslutade klimatplaner med åtgärder och mål om utsläppsminskningar. EU lämnar in en samlad klimatplan som gäller för alla medlemsstater gemensamt. På nationell nivå har Sverige dock antagit

skarpare utsläppsmål (Regeringen, u.å). I det klimatpolitiska ramverk som riksdagen antog 2017 beslutades att Sverige senast år 2045 inte ska ha några nettoutsläpp<sup>1</sup> av växthusgaser till atmosfären. Målet innebär att utsläppen av växthusgaser från svenskt territorium måste vara minst 85 procent lägre år 2045 än utsläppen år 1990 (Naturvårdsverket, u.å). Det internationella flyget till och från Sverige är inte inkluderat i detta mål. För den svenska transportsektorn finns också mål om att det år 2030 ska ha skett en minskning av växthusgasutsläppen med minst 70 procent mellan år 2010 och 2030. Flyget ingår dock inte i målet eftersom den sektorn är med i EU:s utsläppshandelssystem (Energimyndigheten, 2017).

Den svenska flygbranschen har tagit fram en färdplan för ett fossilfritt inrikesflyg år 2030. Här finns också en ambition om att allt flyg som lyfter från svenska flygplatser år 2045 ska vara fossilfritt (Fossilfritt Sverige, u.å).

På internationell nivå arbetar FN:s civila luftfartsorganisation ICAO med att minska den internationella luftfartens klimatpåverkan. Ett exempel är det globala klimatstyrmedlet CORSIA vars mål är att ha en koldioxidneutral tillväxt efter 2020 genom inköp av utsläppskrediter så att flygbolagen ska kunna tillgodoräkna sig utsläppsökningar. När denna rapport skrivs så arbetar även ICAO:s miljökommitté CAEP med tekniska analyser för att utveckla möjligheter för ett långsiktigt klimatmål. Även inom industrin har man satt upp mål om att minska sin klimatpåverkan. Under 2020 släpptes två rapporter från betydande aktörer inom flygindustrin som förkunnade att industrin kan nå netto nollutsläpp till 2050. Den första är framtagen av den europeiska industrin genom Destination 2050 och den andra Waypoint 2050 är från den internationella luftfartsindustrin (Air Transport Action Group, u.å).

År 2009 antog International Air Transport Association (IATA) målet att öka bränsleeffektiviteten med 1,5 procent per år från år 2009 till 2020. Ett annat mål antogs om att halvera koldioxidutsläppen år 2050 i jämförelse med år 2005. Enligt Boeing har flygsektorn lyckats uppnå drygt tvåprocentiga årliga förbättringar av bränsleeffektiviteten (Boeing, 2020). Innan pandemin gjordes bedömningen att den snabbt stigande efterfrågan skulle medföra att luftfartens utsläpp som helhet ändå förväntades öka, men i dagsläget har efterfrågan dämpats och hur snabbt branschen återhämtar sig är osäkert. Under kommande två decennier förväntar sig IATA att den globala efterfrågan på flygresor kommer att öka med 3,2-5,3 procent (IATA, 2020).

---

<sup>1</sup> Det kommer att finnas möjlighet att med hjälp av klimatkompensering och andra koldioxidreducerande åtgärder räkna bort klimatpåverkande utsläpp som man inte lyckats bli av med. Flyget kan bli en av de sektorer där detta blir nödvändigt, främst på grund av höghöjdseffekterna.

### 3 Vätgas och vätgasflyg

I detta avsnitt avhandlas översiktligt vätgasens egenskaper, vad vätgasflyg innebär, hur utvecklingen på området ser ut och vad som pågår för att möjliggöra att nuvarande fossilberoende flygtrafik ersätts med vätgasflyg i framtiden.

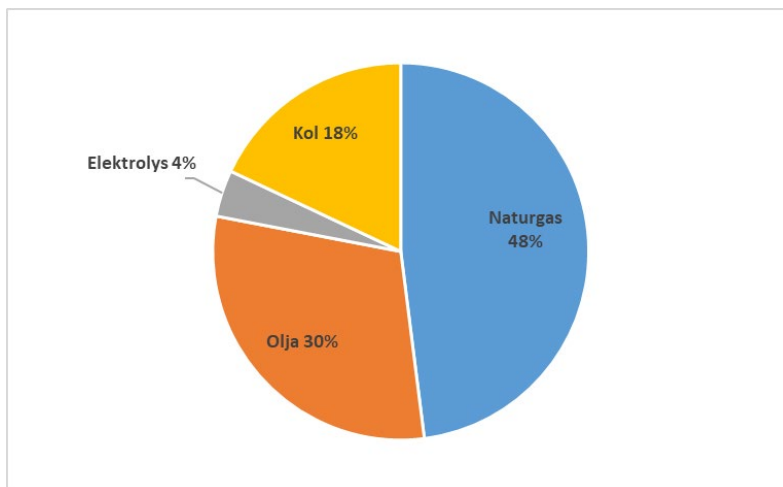
#### 3.1 Vätgasen som energibärare

Vätgas produceras genom att spjälka vattenmolekyler till väte och syre, vilket är mycket energikrävande. Vätgas är inte en primär energikälla utan kan användas för att lagra, transportera och tillhandahålla energi. Dess energidensitet är hög per massenhet men låg per volymenhet, vilket innebär att gasen upptar betydande volym under normala tryckförhållanden. Volymen kan därför behöva reduceras för att enklare kunna lagras och transporteras. Ett sätt att reducera volymen är att förvara vätgasen i högtryckstankar, ett annat att omvandla vätgasen till vätska i kryogentankar som håller temperaturer under  $-253^{\circ}\text{C}$  (Forskning, u.å).

Enligt Forskning och Framsteg (2020) kan den eventuella miljövinsten variera eftersom vätgas produceras ur olika energikällor. Miljövinsten bestäms av hur vätgasen produceras och transporteras samt hur effektivt den omvandlas. Man brukar skilja på grå, blå och grön vätgas:

- Grå vätgas: Tillverkas av fossil naturgas. I dag den vanligaste och billigaste metoden, men orsakar koldioxidutsläpp.
- Blå vätgas: Tillverkas av fossil naturgas men koldioxiden fångas in och antingen lagras eller används som råvara i andra processer.
- Grön vätgas: Tillverkas genom elektrolys av vatten med hjälp av förnybar energi.

Figur 1. Källor för produktion av vätgas



Källa: Bearbetad från Sürer M G, Hüseyin T A (2018) *State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation European Mechanical Science 2018, Vol. 2(1): 20-30*

Av figur 1 framgår att vätgas oftast produceras ur naturgas men även till väsentlig del används olja och kol. Fossilberoendet när vätgas framställs är med andra ord betydande än så länge (Sürer och Hüseyin, 2018).

### 3.2 Vätgasstrategier

Den 8 juli 2020 antog Europeiska kommissionen en vätgasstrategi för EU omfattande 430 miljarder euro (Europeiska Kommissionen, u.å). Strategin är ett led i omställningen av Europas energisystem för att uppnå klimatneutralitet till år 2050. Övergången till en vätgasekonomi, där samhällets energiförsörjning baseras på väte, ska enligt strategin ske i tre faser, där slutfasen innebär att teknologin för grön vätgas är mogen och kan användas i stor skala. Kommissionens ambition är att inom tre år nå en vätgasproduktion på en miljon ton och år 2030 ska produktionen uppgå till tio miljoner ton (SVT, 2020). Den nya vätgasekonomin beskrivs i strategin som en möjlig tillväxtmotor för att lyfta EU ur den ekonomiska kris som skapats till följd av pandemin (Europeiska Kommissionen, u.å).

I linje med EU:s vätgasstrategi har flera medlemsländer uttryckt betydande ambitioner inom vätgasområdet. I juni 2020 annonserade Tyskland att man satsar nio miljarder euro på förnybar vätgas inom ramen för en ny strategi. Sju miljarder euro avsätts för marknads lanseringar av vätgassatsningar i Tyskland medan två miljarder euro tilldelas utvecklingen av internationella samverkansprojekt. Tyskland avser även att importera grön vätgas från länder med goda förutsättningar för solenergi (Dagens Industri, 2020). Även Frankrike har presenterat ambitioner för vätgasproduktion och avser att producera 600 000 ton grön vätgas under de närmaste 10 åren. De båda

länderna har emellertid olika syn på huruvida kärnkraftsel kan användas vid produktion av grön vätgas (Trafikanalys, 2020). I Danmark finns planer på att med hjälp av hundratals nya vindkraftverk till havs framställa fossilfri el för vätgas (Sveriges Radio, 2020). Även Nederländerna, Norge och Finland har antagit nationella vätgasstrategier.

I början av 2021 överlämnade Fossilfritt Sverige sin vätgasstrategi till regeringen. Ett av strategins förslag är att regeringen senast 2022 bör sätta ett planeringsmål om att ha 3 gigawatt installerad elektrolyseffekt år 2030 och minst 8 gigawatt år 2045 för att möjliggöra en fossilfri utveckling inom flertalet sektorer (Fossilfritt Sverige, 2021).

I februari 2021 gav regeringen Energimyndigheten uppdraget att ta fram förslag till en övergripande strategi för vätgas. Målet med strategin och åtgärdsförslagen är att utveckla och tillvarata möjligheterna med vätgas och elektrobränslen och därmed underlätta för omställningen till fossilfrihet. I uppdraget till Energimyndigheten ingår att analysera och kvantifiera potentialen för ökad produktion, lagring, transport och användning av vätgas, elektrobränslen och ammoniak i olika sektorer i Sverige och översiktligt inventera möjligheterna till samarbete med andra länder och aktörer i Europa. Uppdraget ska redovisas senast den 25 november 2021. (Regeringen, 2021)

### **3.3 Vätgasflyg**

Inom luftfarten finns det ett flertal möjliga drivmedelråvaror. Drivmedel som kan blandas med konventionellt flygbränsle kan utvinnas från socker/stärkelse, biomassa, vegetabiliska oljor/animaliska fetter etc. medan vätgas eller elektricitet för bränsleceller och batterier härrör från t.ex. vatten, naturgas eller biomassa/kol. Efter omvandlingsprocess kan en ny energiform bildas, se figur 2.

Figur 2. Alternativa råvaror och framdrivningssystem

Råvara	Omvandlings- process	Energiform	Omvandlings- process	Energiform	Framdrivnings- system
socker, stärkelse	→	Drivmedel som går att blanda med konventionellt flygbränsle	→		Jetmotor
Biomassa	→				
Vegetabiliska oljor, animaliska fetter	→				
Vatten + CO <sub>2</sub>	→				
Vatten	→	Vätgas	Bränslecell	Elektricitet	Elektrisk motor
Naturgas	→				
Biomassa/Kol	→				
Elektricitet	→	Elektricitet	Batteri		
<b>Process utanför luftfartyget</b>			<b>Process ombord på luftfartyget</b>		

Källa: Bearbetad från Bauen A Bitossi N, German L, Harris A, Khangzhen L (2020) Sustainable Aviation Fuels, Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. Johnson Matthey Technol. Rev., 2020, 64, (3), 263–278

Vätgas kan användas som energi i bränsleceller som omvandlar vätgasens kemiska energi till elektricitet. En bränslecell är en energiomvandlare som kan användas för att göra om vätgasens kemiska energi till elektricitet och värme. Bränsleceller som driver elmotorer kan därmed ersätta förbränningsmotorer, såsom en traditionell jetmotor. I processen används syre från luften och restprodukten är rent vatten. Ett alternativ till att använda vätgas för elproduktion i bränsleceller är att förbränna väte direkt i jetmotorn. Detta fodrar dock att vätgasen omvandlas till flytande väte genom atmosfärstryck och nedkylning. Fördelen är att denna metod kräver färre designförändringar och därmed lägre omvandlingskostnader. En variant är att använda sig av en hybridversion där el och vätgas kombineras. Det är också möjligt att använda fossilfritt framtagen vätgas för att tillsammans med en ickefossil kolkälla producera fossilfria syntetiska jetbränslen, även kallat elektrobränslen eller PtL. Elektrobränslen är ett samlingsnamn för syntetiska bränslen som framställs från el och vatten genom elektrolys till vätgas och syrgas.

### 3.3.1 Koncept för vätgasflyg

Att driva flyg med vätgas är inte en ny tanke utan har diskuterats långt innan hållbarhet kom upp på agendan. Tekniken är avancerad men inte revolutionerande. Världens första vätgasflygning genomfördes 1988 i Sovjetunionen med en ombyggd Tupolev TU-155. På flygplanet drevs en av de tre turbofläktmotorerna av kryogen vätgas. Orsaken till experimentet med vätgas motiverades av att kärnkraft vid tiden bedömdes bli framtidens dominerande energislag. Vätgas skulle då framställas direkt i en reaktor eller genom elektrolys med el. (Ny teknik, 2020)

Med tiden har vätgas blivit intressant för att komma tillrätta med flygets klimatpåverkan. År 2000 beställde Europeiska kommissionen en studie av den europeiska flygplanstillverkaren Airbus med målet att utforska utformningen av ett flygplan utrustat med vätgasdrivna turbomotorer och kryogentankar för att lagra flytande vätgas. Projektet fick namnet Cryoplane och var ett tvåårigt samarbetsprojekt mellan 35 partners som representerade industri, forskningsinstitut och universitet. I studien som delvis finansierades genom Europeiska Kommissionens femte ramprogram ingick att studera alla aspekter för att bedöma teknisk och ekonomisk genomförbarhet, säkerhet, miljömässig kompatibilitet osv (Europeiska Kommissionen 2021). Sverige representerades av Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI. I studien drogs slutsatsen att vätgasdrivna motorer var lika energieffektiva som fotogenmotorer, att konventionella turbofläktmotorer kunde omvandlas till att drivas på vätgas och att implementeringen kunde ske inom 15 till 20 år. Airbus chef för hållbar utveckling menade att utmaningen låg i att producera vätgas i tillräckliga mängder och på ett miljövänligt sätt snarare än att lösa tekniska problem. Han bedömde att det skulle ta cirka tre decennier att lösa dessa problem (Europeiska Kommissionen, u.å).

Brittiska Zeroavia var i september 2020 först i världen med att flyga ett passagerarflygplan med hjälp av bränsleceller och vätgas. Flygplanet var ett sexsitsigt Piper Malibu och svenska Powercell levererade bränslecellssystemet. Zeroavias mål är att om tre år ha certifierat ett vätgasdrivet flygplan som kan flyga 10–20 passagerare. Inom tio år siktar man på att kunna flyga 50–100 passagerare (Ny teknik, 2020) I april 2021 rapporterades att British Airways beslutat att investera i Zeroavia som ett steg i flygbolagets mål att nå netto-nollutsläpp senast 2050.(Green Airways, 2021)

Den europeiska elflygstillverkaren Pipistrel har meddelat att man avser att låta deras flygplan Miniliner få ett vätgasbaserat framdrivningssystem. Målet är att vätgasflygplanet, som tar 19 passagerare, ska sättas i drift 2028–2030.(Innovair, 2021)



Cryoplane ovan var ett projekt som stannade vid ritbordet. Idag arbetar dock Airbus vidare med vätgasteknik och i september 2020 presenterade företaget tre koncept för vätgasdrivna flygplan: ett propellerdrivet regionalflygplan, ett flygplan för kort till medellång distans och ett flygplan med så kallat blended wing body design (BWB), se figur 3.

Figur 3. Airbus koncept för vätgasflyg



Källa: Airbus.

Det förstnämnda är utrustat med två turbopropmotorer som drivs av komprimerad vätgas och förväntas kunna flyga minst 1850 kilometer med 100 passagerare. Det andra är utrustat med turbofläktmotorer som drivs av flytande vätgas och ska kunna transportera 120–200 passagerare minst 3 700 kilometer. Den tredje, BWB-modellen, har formen av en flygande vinge och ska kunna ta 200 passagerare och flyga en sträcka på cirka 3 700 kilometer. Den ovanliga formen syftar till att skapa extra volym för vätgaslagring. Airbus har meddelat att de år 2025 kommer ha kommit så pass långt i arbetet att de kan besluta om vilket/vilka av de tre flygplanskoncepten som de ska gå vidare med. Marknadsintroduktion är planerad till 2035. (Ny teknik, 2020)

Andra företag har börjat utveckla innovativa vätgaslösningar som ska kunna användas på redan befintliga flygplan. Amerikanska Universal Hydrogen utvecklar konverteringsutrustning avpassat för flygplan med upp till 50 stolar. Med det nya framdrivningssystemet ska flygplanet kunna täcka 75-95 procent av de rutter som Dash-8-modellen trafikerar i dagsläget. Det ombyggda flygplanet kommer att ha 16 sittplatser färre än originalversionen och beräknas kunna tas i tjänst redan år 2024. (Ny teknik, 2020)

Medan Airbus har presenterat ambitiösa planer för vätgasflyg så har konkurrenten Boeing haft en mer avvaktande hållning. Boeing har hittills saknat det moraliska och ekonomiska stöd som Airbus erhållit från EU och det är fortfarande oklart om den nya president-administrationen i USA kommer att följa EU:s exempel (The Economist, 2020). Boeings syn på vätgasflyg utvecklas under avsnitt 4.2.

Vätgasens genombrott kommer med största sannolikhet inte ske först inom den traditionella tunga luftfarten utan bland mindre så kallade VTOL-farkoster. Dessa luftfartyg lyfter och landar vertikalt, drivs ofta av el men batteriernas vikt och energitäthet utgör en begränsande faktor. Därför kan vätgasdrivna bränsleceller vara ett alternativ för att utveckla ett relativt nytt område inom luftfarten. En VTOL som drivs av en bränslecell kan få omkring tio gånger längre flygtid än en traditionell batteridriven. (Ny teknik, 2017) Detta öppnar upp för godstransporter och på sikt även passagerartransporter med vätgasdrivna VTOL-farkoster. Utvecklingen fordrar dock en utbyggnad av landningsplatser (vertiports) och laddinfrastruktur, men också trafikledningssystem (UTM) för att övervaka all trafik.

Här kan nämnas det EU-stödda initiativet Urban Air Mobility (UAM). UAM är en del av det europeiska innovationspartnerskapet för smarta städer och samhällen (EIP-SCC). Initiativet UAM syftar till att skapa en marknad för transporter med drönare inom städer. (Europeiska Kommissionen, 2018) Vätgasdrivna bränsleceller erbjuder stora möjligheter på det här området, men en utmaning är kopplad till transport och förvaring av brandfarlig vätgas till hustak som kommer att utgöra start- och landningsplats för farkosterna. En lösning skulle kunna vara att tankning sker på andra platser som redan förvarar brandfarliga bränslen, såsom flygplatser. (Evtol, 2021)

### 3.3.2 Nationella och europeiska forskningsprogram

Vid sidan av det europeiska samarbetsprojektet Cryoplane som leddes av Airbus finns inom Europa och EU andra program och samarbeten som är värda att nämnas. Flera länder har inrättat nationella forskningsprogram som tar upp frågor om flygets klimatpåverkan och nämner vätgas som en möjlig framtida energibärare.

Tyskland har inrättat forskningsprogrammet LuFo VI-2 som syftar till att minska flygets utsläpp med målet att nå nollutsläpp. Programmet erhöll cirka 156 miljoner euro per år från 2018, men den federala regeringen planerar att öka budgeten med ytterligare 90 miljoner euro fram till 2022. Parallellt med detta har akademien och industrin nyligen publicerat en gemensam vitbok, Whitepaper Zero Emission Aviation, som stakar ut vägen mot en klimatneutral luftfart delvis baserad på vätgasteknik. (TU Delft, 2021)

Den franska flygindustrin bildade år 2008 Civil Aviation Research Council (CORAC). Frankrike har meddelat att landet kommer att investera 1,5 miljarder euro i forskning och innovation under tre år med målet att göra Frankrike till ett av de mest avancerade länderna inom ren flygteknik där väte ingår. Målet är också att till 2035 lansera en koldioxidneutral efterträdare till flygplanet A320 som flygs till 100 procent på hållbara bränslen eller väte. Likande forskningsprogram pågår även i Storbritannien.(TU Delft, 2021)

Svenska GKN Aerospace leder ett samarbetsprogram i Storbritannien, H2GEAR, för att utveckla GKN Aerospaces första väteframdrivningssystem för subregionala luftfartyg. Tekniken, som bygger på att flytande kväve omvandlas till el i ett bränslecellssystem, kommer i första hand att fokusera på mindre flygplan men ska i förlängningen kunna skalas upp för att appliceras på större flygplan och längre flygsträckor. Det första vätegasdrivna flygplanet kommer enligt GKN att kunna sättas i drift år 2026. Inom ramen för projektet kommer GKN Aerospace att samarbeta med Intelligent Energy, Aeristech, Newcastle University, University of Manchester och University of Birmingham. Finansiering har skett genom statliga medel och ATI-finansiering.(GKN Aerospace, 2021)

Inom EU finns flera program som syftar till att utveckla ett mer klimatanpassat flyg. Inom ramen för Horizon 2020- programmet och dess efterföljare Horizon Europe riktas stöd till FoU inom transport, däribland för forskning kring batterier och vätgas. Här kan särskilt nämnas forskningsprogrammet Clean Sky som är ett offentligt-privat partnerskap för miljövänligare flygtransporter. I Clean Sky deltar små och medelstora företag, universitet och forskningscentrum samt ledande flygteknikstillverkare. Under 2020 tog McKinsey & Company fram en studie (*Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*) inom ramen för Clean Sky i vilken de beskriver förutsättningarna för att utveckla vätegasflyg, kostnader och vinster för klimatet. Ett flertal företag har bidragit till studien, däribland Airbus, Ballard, Powercell och Hydrogenics. Europeiska Kommissionen, 2020)

Tillverkningsindustrin har emellertid drabbats av kraftigt finansiella problem som en följd av pandemin och många har därför tvingats dra ner på forskning och utveckling (Aerotime Hub, u.å).

## 4 Möjligheter och hinder

Vätgasteknik för flyget kan vara en viktig del i omställningen till gröna transporter. Syftet med att utveckla tekniken är därmed uppenbar: att reducera eller helst eliminera luftfartens miljö- och klimatskadliga utsläpp. Hur dessa möjligheter ser ut kan emellertid behöva utvecklas. På samma sätt är det relevant att diskutera de hinder och utmaningar som den nya tekniken kan föra med sig.

### 4.1 Vätgasflygets potential

Den forskning som hittills har gjorts för att kunna bedöma klimatpåverkan från vätgasdrivna luftfartyg visar att vätgas markant kan minska klimatpåverkan jämfört med användning av fossilt bränsle förutsatt att den är grön. Det är dock viktigt att lyfta fram att det krävs mer forskning för att exakt kunna visa hur stor klimatvinsten är. Enligt Clean Sky 2 Joint Undertaking and FCH 2 Joint Undertaking kan användningen av luftfartyg med vätgasdrivna bränsleceller minska klimatpåverkan med 75-90 procent medan luftfartyg som istället utrustas med vätgasdrivna förbränningsmotorer kan minska klimatpåverkan med 50-75 procent. Det beror främst på att vätgas inte innehåller något kol. Dock ökar utsläppen av vattenånga i jämförelse med förbränning av fossilt bränsle. Initiala försök med direktförbränning av vätgas visar att iskristallerna som bildas genom utsläpp av vattenånga på hög höjd i atmosfären blir tyngre och försvinner fortare än vid förbränning av fossilt bränsle. Detta gör att kondensstrimmorna blir optiskt tunnare (mer transparenta) och bidrar därmed i mindre utsträckning till uppvärmning av jorden jämfört med kondensstrimmor från konventionella flygplan. Potentiellt tros därför vätgasdrivna luftfartyg med direkt förbränning ha 30-50 procent mindre påverkan på bildningen av cirrusmoln jämfört med ett jetbränsle drivet luftfartyg. Det har dock inte genomförts några liknande studier för flygplan med bränsleceller drivna på vätgas. (Europeiska Kommissionen, 2020)

Jämförelse av klimatpåverkan från framdrift med vätgas och syntetiska bränslen (i relation till klimatpåverkan från fotogendrivna flygplan. Tidsaspekt till 2100)					
	Förändring i utsläpp under flygning samt utsläppsrelaterade effekter <sup>1</sup>				
	Direkt CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Vattenånga <sup>2</sup>	Contrails, cirrusmoln	Potential minskning av klimatpåverkan <sup>3</sup>
<b>Vätgas turbin</b>	-100 %	-50-80 %	+150 %	-30-50 %	-30-50 %
<b>Vätgas bränslecell</b>	-100 %	-100 %	+150 %	-60-80 %	-75-90 %

1. Med antagande om koldioxidneutral produktion och transport av bränsle 2050.

2. 10 gånger lägre klimatpåverkan än de från koldioxidutsläpp.

3. Mätt i koldioxidekvivalenter jämfört med fullständig klimatpåverkan från fotogendrivna luftfartyg.

*(Tabell omarbetad av Transportstyrelsen från rapport: Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Clean Sky 2 Joint Undertaking and FCH 2 Joint Undertaking, 2020)*

Översiktligt så kommer ca två tredjedelar av flygets koldioxidutsläpp från korta och medellånga flygningar som genomförs med flygplan som tar mindre än 165 passagerare respektive mindre än 250 passagerare. Flygplan av denna storlek utgör ca 70 procent av den globala flygplansflottan. Bara 10 procent av flottan utgörs av flygplan som tar över 250 passagerare och har möjlighet att genomföra långdistansflygningar. Sett till flygsträcka så kommer mer än 20 procent av utsläppen från flygningar som är 7000 km eller längre. Dessa flygningar utgör emellertid mindre än 5 procent av det totala antalet flygningar globalt idag. I jämförelse så utgör flygningar på högst 3000 km (oberoende av luftfartyg) över 90 procent av alla flygningar som genomförs och dessa flygningar står tillsammans för över 50 procent av luftfartens koldioxidutsläpp. Enligt Clean Sky 2 Joint Undertaking och FCH 2 Joint Undertaking bör därför det största arbetet för att minska flygets klimatpåverkan riktas mot korta och medellånga flygningar. Det är på dessa distanser som vätgasflyg kan komma att fungera. (Europeiska Kommissionen, 2020)

Vätgasflyg med bränsleceller anses vara den teknik som skulle kunna minska flygets klimatpåverkan mest effektivt. Tidiga studier av vätgasdrivna flygplan med turbinmotor visar att även kväveoxidutsläppen kan minska med 30-50 procent utan större reduktioner i motorns effekt. Det

krävs dock mer forskning för att kunna säkerställa reduktionen av kväveoxider i relation till motoreffekten. Vätgasflygplan med bränsleceller orsakar inga kväveoxidutsläpp överhuvudtaget. (Europeiska Kommissionen, 2020)

Luftfarten har, precis som övriga trafikslag, påverkan på den lokala luftkvaliteten. Detta beror på utsläpp av bland annat sot och partiklar vid förbränning av fossilt bränsle men också från exempelvis däckslitage mot väg- och rullbanor. Eftersom vätgasflyg inte släpper ut sot och partiklar i samma utsträckning som ett fossildrivet flygplan så uppskattar Clean Sky 2 Joint Undertaking and FCH 2 Joint Undertaking att påverkan på den lokala luftkvaliteten kan minska drastiskt genom användning av vätgasdrivna luftfartyg. (Europeiska Kommissionen, 2020)

## 4.2 Vätgasflygets utmaningar

Medan jetmotorer under 70 år har förbränt fotogen i olika miljöer, från Arktis till Sahara, är vätgastekniken ännu ny och oprövad. Vätgas brinner snabbare och varmare än fotogen. Det innebär att material som utsätts för dess förbränning upplever större påfrestningar. (The Economist, 2020) Vätgas för framdrivning fordrar också ny flygplansdesign i form av en skrymmande bränsletank som är hermetiskt slutet eftersom gasen är oerhört flyktig. Dessutom kan vätgas explodera och brinna i kontakt med syre - många erinrar sig hur det tyska luftskeppet Hindenburg brann 1937.

Även om vätgasflyg inte ger några koldioxidutsläpp alls och medför väsentligt minskade NO<sub>x</sub>-utsläpp så bidrar vätgasflygplan med ca 150 procent mer vattenånga i atmosfären jämfört med ett fotogendrivet luftfartyg. Utsläppen av vattenånga bidrar till höghöjdseffekter och bildandet av cirrusmoln vilket ökar klimatpåverkan. Sammantaget menar dock Clean Sky 2 och FCH 2 JU att vätgasdrivna flygplan kan minska klimatpåverkan med upp till 90 procent. (Europeiska Kommissionen, 2020)

En betydande utmaning för att kunna flyga kommersiellt med vätgasdrivna flygplan är kopplad till infrastrukturen på marken. Dagens flygplatser är anpassade efter tankning med traditionell flygfotogen och en omställning till vätgas fordrar helt ny infrastruktur för att producera och leverera vätgas till flygplatser. Nya tankar för förvaring behöver framställas, vilket kommer att vara kostnadsdrivande. För att minska kostnaderna för infrastrukturen på marken föreslår flygplanstillverkaren Airbus att tankanläggningar för vätgas endast bör byggas ut vid navflygplatser i nav-ekersystem (hub-spoke) Flygplanen skulle då kunna tankas med tillräckligt mycket bränsle för en tur-och returflygning mellan nav- och ekerflygplatsen. (Svenskt flyg, 2021)

Vissa bedömer att genombrottet i bästa fall ligger tre flygplansgenerationer bort, vilket skulle innebära runt år 2050. (Chalmers, u.å)

Flygplanstillverkaren Boeing har tidigare experimenterat med vätgasflyg men uttrycker idag en avvaktande hållning. De menar att såväl vätgas- som elteknik är illa lämpade för långväga flygningar, vilket är den marknad man riktar sig mot. Även om det skulle ske en betydande utveckling på området fram emot 2030-2035 så är Boeing skeptisk till att tekniken kan användas i ett flygplan av 737:s storlek, dvs 100-200 passagerare. (Mentour Pilot, 2021) Boeing avfärdar inte vätgasflygets möjligheter men ser samtidigt att dess genombrott troligen ligger längre in i framtiden. (AIN Online, 2020) Istället riktar Boeing sin uppmärksamhet mot hållbara bränslen (Sustainable Aviation Fuel, SAF), som man bedömer är en mer realistisk väg för att nå målet om att halvera koldioxidutsläppen till 2050. (Simple Flying, 2021)

En annan utmaning med vätgastekniken är dess dåliga systemverkningsgrad. Beräkningar visar att det går åt cirka 50-55 kWh för att producera ett kilo vätgas med elektrolys, som i sin tur ger 33 kWh elenergi. (Ny teknik, 2021) Med transport, förvaring och distribution så blir effektiviteten endast omkring 60 procent. (Transport Environment, 2018)

Men oaktat alla offentliga och privata kraftsamlingar så är den stora klimatvinsten bortspelad om inte tillverkningen av vätgas är fossilfri. Idag förbrukar den svenska luftfarten årligen omkring 1 miljon ton flygfotogen. Beräkningar visar att det skulle krävas ca 22 TWh/år att ersätta denna. (Energiforsk, 2020) Detta motsvarar ca 14 procent av Sveriges totala elproduktion under 2020 (Energimyndigheten, 2021)

Medan delar av industrin och forskarsamhället ser vätgasflyg som en realistisk och inte alltför avlägsen lösning på flygets växande klimatpåverkan, är således andra experter avvaktande eller rent avvisande till tekniken. I Flygets Miljökommitté avfärdas vätgasflyg som en illusion som det inte är lönt att lägga några forskningsresurser på:

”Förutom alla tekniska och ekonomiska problem med vätgasdrift är de miljömässiga fördelarna kraftigt överdrivna och i värsta fall uppvägda av de problem med kväveoxid och vattenånga som förespråkarna sällan tar upp. Allt tyder på att en jetmotor på hög höjd är en av de sämsta platserna att elda vätgas, kanske den allra sämsta.” (Svenskt flyg, 2007)

Kommitténs avfärdande kan tyckas kärvt men sätter också fingret på något viktigt. Kanske ligger den stora utmaningen inte enbart i att skapa vätgasteknik som klarar att hantera de speciella förhållanden som en flygning innebär, utan att tekniken ger ekonomiskt rimliga förutsättningar för flygbolagen. SAS har pekat på vikten av att priset för att investera och flyga med vätgasflyg inte får bli högre än utsläppskostnader för traditionella fossildrivna flygplan. (Svenskt flyg 2021) Detta leder oss över till nästa

kapitel som behandlar de marknadsmässiga förutsättningar som den nya tekniken innebär för användarna, det vill säga flygbolagen.



## 5 Vätgasflygets marknadsförutsättningar

Luftfartyg som drivs av vätgas kommer att ha andra kostnader för bränsle och infrastruktur i jämförelse med flygfotogen (Europeiska kommissionen 2020). För ett vätgasdrivet luftfartyg som opereras på kortare distanser år 2035 beräknas kostnaden öka med ca 25 procent i jämförelse med ett flygfotogendrivet luftfartyg med den tidens teknologi.

### 5.1.1 Energikostnader

Energikostnaderna är beroende av kostnaden för bränslet per enhet och den energi som behövs för att driva luftfartyget. Vätgasflygplan kommer sannolikt att vara större än dagens konventionella luftfartyg. Det beror främst på att vätgas tar upp större volym än dagens flygbränsle varför det behövs större tankar. Luftfartygen kräver på grund av sin storlek även mer energi för att kunna flyga dagens flygplan. Produktionskostnaden för vätgas är idag högre än produktionskostnaden för konventionellt flygbränsle. År 2050 förväntas dock priset för vätgas ha minskat och sannolikt närmat sig priset för dagens flygfotogen, främst genom förbättrade produktionsmetoder och ökad efterfrågan<sup>2</sup>.

Vätgas är mycket dyrare än flygfotogen per kWh. Inklusive lagringskostnader och genomsnittliga produktionskostnader uppskattas vätgas kosta 0,14 USD/kWh för grön vätgas och 0,05 USD/kWh för grå vätgas. Produktionskostnaden för grå vätgas är i paritet med kostnaden för flygfotogen. Det är inte självklart att denna kostnad kan föras vidare till flygpassagerarna. Produktionskostnaden behöver därmed minska för att vätgasen ska bli konkurrenskraftig. Ett problem är att vätgas medför flera steg vad gäller energiomvandling, där varje steg minskar effektiviteten och ökar kostnaden.

Vätgasens konkurrenskraft kan förbättras om kostnaden för fossila drivmedel ökar. Om fler styrmedel införs för att begränsa fossila luftfartsutsläpp (såsom EU ETS och CORSIA) kommer den operativa kostnaden för att använda fossilt drivmedel att öka. Flygbranschen behöver därför bevaka pristrender för både vätgas och flygfotogen eftersom en minskad skillnad mellan drivmedelsalternativen kommer att förbättra affärsmöjligheten för att investera i vätgas (Roland Berger, 2020).

### 5.1.2 Kapital- och underhållskostnader

Kapital- och underhållskostnaderna för ett vätgasflygplan förväntas bli högre än de kostnader som idag finns för ett konventionellt luftfartyg. Detta beror främst på kostnaderna för att underhålla tanken, som kommer att vara integrerad i flygplanskroppen. Ytterligare faktorer som kan komma att bidra

---

<sup>2</sup> Europeiska Kommissionen (2020)

till att underhållskostnaderna ökar är komplexiteten kring bränslehanteringen, högre kostnader för framdrift och att luftfartyget blir större. På längre sikt kan dock underhållskostnaderna komma att minska allteftersom tekniken mognar och utvecklingskostnaderna sjunker (Europeiska kommissionen, 2020).

### 5.1.3 Övriga kostnader

Troligtvis kommer bränslepåfyllningen av ett vätgasflygplan att ta längre tid än vad det idag tar att tanka ett flygplan. Sannolikt kommer även tidsåtgången för en så kallad turnaround<sup>3</sup> att öka och leda till omkring 5 -10 procent färre cykler. Detta innebär sammantaget att CAPEX och personalkostnaderna blir högre. Europeiska Kommissionen, (2020) bedömer att flygplatskostnader och kostnad för flygtrafiktjänsten blir troligtvis marginellt högre (såvida inte flygplanstypen får subventionerade avgifter och om MTOW<sup>4</sup> fortfarande utgör bas för beräkning).

### 5.1.4 Totala driftskostnader

Europeiska kommissionen (2020) menar att framdrift med hjälp av bränsleceller som drivs med vätgas är lämpligast för så kallad regional linjefart (korta eller medellånga distanser). I jämförelse med ett konventionellt luftfartyg på samma distanser bedöms de operativa kostnaderna öka med 5 -10 USD per passagerare, innan direkta infrastrukturkostnader och CAPEX<sup>5</sup> har inkluderats. För flygningar på kortare distanser menar Europeiska kommissionen att en hybridlösning, med vätgas kombinerat med en elektrisk motor, skulle kunna vara lämplig. För ett sådant alternativ bedöms dock att den totala kostnaden per passagerare kan komma att öka med ca 20-30 procent dels på grund av högre driftskostnader, dels för att luftfartyget beräknas kunna transportera färre passagerare. På medellånga distanser, kommer det att krävas en större flygplanskropp för lagring av tillräckligt mycket vätgas. Det skulle medföra en kostnadsökning på ca 30-40 procent per passagerare jämfört med dagens kostnader. Att använda vätgaslösningar för framdrift på längre sträckor är således tekniskt möjligt, men kanske mindre lämpligt ur ett ekonomiskt hänseende. Vätgastankar ökar storleken på flygplanskroppen och energibehovet, vilket skulle resultera i 40 till 50 procent högre kostnader per passagerare. Europeiska kommissionen (2020) bedömer att en ny design av luftfartyg som t.ex. blended-wing-body kan förändra kostnadsbilden, men användandet av sådana luftfartyg ligger minst 20 år framåt i tiden (som tidigare nämnts tror Airbus att det är möjligt inom 15 år).

<sup>3</sup> Turnaround - tiden för i- och urlastning, städning, tankning etc.

<sup>4</sup> MTOW -maximum take-off weight – den högsta vikt piloten får starta luftfartyget med, dvs inklusive drivmedel och last.

<sup>5</sup> CAPEX - Capital Expenditures - utgifter för nyutveckling eller nya investeringar till exempel inköp av nya maskiner, eller framtagandet av en ny tjänst.

## 6 Transportstyrelsens roll

Vätgasframdrivning inom flyget är en teknik som direkt kommer att beröra Transportstyrelsens ansvarsområde. I takt med att tekniken utvecklas blir det därför viktigt att kontinuerligt arbeta med omvärldsbevakning på området samt att analysera vilka krav utvecklingen kan ställa på myndighetens verksamhet. Här finns några aspekter att belysa.

### Luftfartyget

Certifiering av de flesta luftfartyg, inklusive tillhörande delar, administreras och beslutas av EASA. Certifieringsarbetet kommer därför främst ske inom detta forum. Transportstyrelsen bedömer att framtidens vätgasdrivna flygplan kommer att designas så att de ur pilotsynvinkel liknar samtida konventionella flygplan. Även om vissa nödprocedurer kommer att bli annorlunda i ett vätgasflyg bedömer myndigheten att detta är en mindre inspektörsfråga.

Dessa internationellt framtagna regler kommer att behöva implementera på nationell nivå och eventuellt kan Sverige också behöva ta fram visst eget regelverk för små vätgasflygplan.

### I luftrummet

Om de luftfartyg som kommer att drivas av vätgas har likvärdig prestanda som de luftfartyg som drivs av JET-A1 eller liknade kommer inte själva procedurkonstruktionen att påverkas. En del vid framtagandet av in- och utflygningsprocedurer är att konstruktören ska beakta procedurens miljöpåverkan och genomföra åtgärder för att minska denna. Det kan därmed finnas nya möjligheter att planera hur inflygningsprocedurerna kan läggas.

Om de vätgasdrivna bränslecellflygplanen alstrar en annan nivå av buller än dagens flygplan så skapas det även andra förutsättning gällande hur in- och utflygningsvägar till flygplatser kan etableras.

### Bränsle på flygplatsen

Vad gäller bränsleanläggningar och hantering av bränsle regleras inte de av europeiska eller nationella regler för flygplatser. Dessa är klassificerade som miljöfarlig verksamhet och regleras och övervakas av kommunen (Miljökontoret/miljöinspektörer).

Transportstyrelsen behöver vara uppdaterad om olika initiativ som diskuteras inom politiken, forskningen och på marknaden. För myndighetens del innebär detta att myndigheten noga behöver omvärldsbevaka området samt tillse att det finns kompetens och resurser att ombesörja utvecklingen. Normgivning kommer till stor del ske på

internationell och EU-nivå, både vad gäller tekniska aspekter som certifiering av luftfartyg men också när det kommer till miljömässiga regler gällande exempelvis buller. Omställningen till vätgasframdrivning inom transportsystemet kan även fordra samarbete med andra nationella myndigheter, såsom Energimyndigheten.

## 7 Analys och diskussion

Denna rapport utgör ett kunskapsunderlag om vätgasflyg. Anslaget har därför varit relativt brett och fokus har legat på utvecklingen, möjligheter respektive hinder samt hur Transportstyrelsen bör omhänderta den nya tekniken.

### 7.1 Vätgas kan vara svaret på flygets klimatpåverkan

Före pandemin var en av luftfartens största utmaningar att minska flygets klimat- och miljöpåverkan samtidigt som flygsektorn skulle ha möjlighet att växa och utvecklas. Till följd av pandemin har stora delar av luftfarten, så väl globalt som nationellt, stått stilla och det är först nu, efter 1½ år, som det går att skönja en återhämtning. Än så länge är trafikvolymerna emellertid långt ifrån 2019 års nivåer. Den långsiktiga trenden för global luftfart är troligen stigande trots följdverkningar av pandemin. Efterfrågan på flygresor drivs av ett ökat globalt välbefinnande. I dagsläget ligger den stora utmaningen i att utveckla nya tekniker för att skapa ett mer klimatvänligt flyg samtidigt som luftfarten kan återhämta sig.

EU, enskilda stater och ledande flygplanstillverkare ser optimistiskt på framtiden om ett klimatanpassat och ekologiskt hållbart flyg. De strategier och samarbeten som finns indikerar att det finns en tillförsikt att vätgas kommer att kunna ersätta traditionell flygfotogen i en relativt nära framtid. Vätgas har vissa uppenbara fördelar framför traditionellt fossilbaserad flygfotogen. Användningen av vätgas medför inga koldioxidutsläpp, sot eller partiklar, ger väsentligt lägre utsläpp av kväveoxider (NO<sub>x</sub>) och medför mer transparenta kondensstrimmor.

Vätgas för framdrivning av luftfartyg fordrar till viss del komplex teknik. Om den tekniska utvecklingen når framgång och blir ekonomiskt möjlig så har Airbus förmodligen ryckt åt sig ledartröjan på en viktig marknad för hållbart flygresande. Airbus själva ser goda möjligheter till att kunna presentera ett flygplanskoncept i trafik år 2035, medan Europeiska Kommissionen förutspår att det tar ytterligare några år.

### 7.2 Men det saknas inte invändningar

Det finns emellertid gott om kritik och invändningar mot att styra det kommersiella flyget mot vätgas. En viktig invändning är att vätgasdrivet flyg skulle bidra till ökade höghöjdseffekter när vattenånga släpps ut i atmosfären. Följden skulle bli ökad molnbildning.

Utmaningarna ligger inte bara i en ny flygplansdesign, det fordras även nya kostsamma lösningar för transport, förvaring och distribution av vätgas till och inom flygplatser för att nämna några. Om tankanläggningar för vätgas endast byggs vid navflygplatser, i enlighet med vad Airbus föreslår, så blir

investeringskostnaden givetvis lägre. Lösningen skulle då kunna fungera för nätverksflygbolag som har byggt sin verksamhet kring flygplatshubbar men för lågkostnadsbolag, vilka främst flyger från punkt till punkt, krävs andra lösningar. Här finns fortfarande stora frågetecken, inte minst eftersom dessa flygbolag normalt sett flyger på de interregionala avstånd där vätgasteknik skulle kunna vara särskilt lämplig.

En annan fråga är om vätgasframdrift inom luftfarten kan bli resurseffektivt och i den meningen ekonomiskt hållbart. Den verkliga miljö- och klimatvinsten uppstår först när vätgasen är grön och därmed fossilfritt framställd. En fråga som kan ställas är om det är samhällsekonomiskt effektivt att låta en så stor andel av den totala fossilfria energin gå till luftfarten. Den dåliga systemverkningsgraden - där 40 procent av elenergin försvinner i produktion, transport, förvaring och distribution - kan behöva förbättras om det ska innebära en verklig utväxling att ersätta flygfotogen med vätgas. För energisystemet kommer det att vara en utmaning att på sikt förse inte bara luftfarten utan även andra trafikslag med grön vätgas till ett rimligt pris. Den mängd fossilfria TWh/år som måste framställas är betydande. Om vätgas inte kan framställas fossilfritt och hanteras resurseffektivt försvinner miljövinsten.

Vidare är det viktigt att flygbolagens marknadsförutsättningar inte glöms bort. Flygmarknaden kännetecknas av hård konkurrens och små marginaler och en övergång till vätgas skulle få ett betydande genomslag på kostnadsbildningen för ett flygbolag. Idag är relativkostnaden för grön vätgas i jämförelse med fossil flygfotogen betydande och flygbolagen kan få svårt att föra över dessa kostnader på passagerare. Det är emellertid rimligt att anta att kostnaden för vätgas kommer att minska när fler näringar efterfrågar bränslet. Vätgasens konkurrenskraft kan också förbättras om t.ex. kostnaden för fossila drivmedel ökar.

Vätgasframdrift verkar även förlänga tiden för tankning, vilket för flygbolaget innebär färre cykler och därmed en försämrad effektivitet. Kapitalkostnaden för ett flygplan är betydande och det är centralt för varje flygbolag att dessa betalar av sig genom maximalt antal inkomstbringande rörelser. Vätgasdrift lär även fördyra kostnaden för underhåll.

Alla sådana aspekter är viktiga att beakta när ny teknik utvecklas och implementeras.

### **7.3 Transportstyrelsen ska vara en möjliggörare**

Transportstyrelsens vision är att möjliggöra morgondagens resor och transporter. Om vätgas ska bli ett framtida alternativt drivmedel för flyget har Transportstyrelsen ett arbete att göra. Den nya tekniken kommer att få direkt relevans för myndighetens normgivning, tillstånd, tillsyn och

marknadsövervakning. Övergången till vätgasdrift fordrar ett uppdaterat och väl utvecklat regelverk kring exempelvis standardisering och certifiering av luftfartyg, men även vad gäller förvaring och hantering av vätgasen på flygplatsen. Utmaningen här ligger i att säkerställa att regelverk och teknik utvecklas tillsammans och mognar samtidigt. Det är därför viktigt att myndigheten aktivt tar del av utvecklingen och för en nära dialog med branschen, tillverkningsindustrin och akademien. Om vätgasdrift realiserar i större skala kommer omställningen till framdrift med vätgas att ta lång tid i anspråk. Transportstyrelsen kommer inte att plötsligt ställas inför ett faktum där alla flygbolags flottor drivs med vätgas. Däremot behöver Transportstyrelsen vara aktiv och proaktiv för att under kommande år bygga upp erforderlig kompetens.

#### **7.4 Omställning tar tid**

Att utveckla ny teknik tar således tid. Vägen fram till vätgasflygets stora genombrott är lång och fordrar ett omfattande och målmedvetet arbete på flera områden och nivåer. Pandemin har inneburit en stor utmaning för flygindustrin, som har saktat ner utvecklingen mot ett vätgasdrivet flyg. Samtidigt ser flera transportbranscher över möjligheten till vätgasdrift, vilket bör förbättra förutsättningarna även för luftfarten. Bränslecellsteknik har blivit intressant även för markfordon på flygplatsen. Till en del kan omställningen för luftfartygen underlättas av att andra typer av fordon stegvis övergår till vätgasdrift. Om vätgas får ett brett genomslag inom flera branscher kan vätgasproduktionen skalas upp, vilket ger lägre kostnader. Först ut på marknaden blir kanske vätgasdrivna drönare som ersätter det traditionella batteriet med en bränslecell. Här är potentialen mycket god.

Men tyvärr kommer vätgasflyg inte ha någon större påverkan på luftfartens utsläpp förrän om trettio år. Tidsaspekten för att utveckla flygsäkra vätgasflygplan är en utmaning som kan innebära att ett hållbart flyg inte uppnås i tid för klimatmålen. I omställningen till fossilfrihet bör vätgasflyg därför främst ses som en möjlig del i en framtida lösning där flera tekniker för utsläppsminskningar finns sida vid sida. De olika typerna av luftfartyg kommer i framtiden sannolikt att användas parallellt där elflyg utnyttjas på kortare sträckor, vätgasflyg på interregionala sträckor och traditionella luftfartyg med en inblandning av SAF på längre och interkontinentala flygningar. Fram till att tekniken och förutsättningarna är klara för vätgasdriven luftfart kommer användningen av SAF sannolikt att vara den största möjliggöraren för flyget att minska sin klimatpåverkan, i kombination med inköp av utsläppskrediter. Men med fortsatt forskning och utveckling, utformning och anpassning av infrastruktur och en fossilfri produktionsapparat kan vätgasflyg innebära ett stort och viktigt steg mot ett hållbart flyg.

## Referenser

Aerotime Hub (u, å) <https://www.aerotime.aero/25955-will-there-be-a-boeing-airbus-hydrogen-power-race>

AIN Online (2020) <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2020-09-22/boeing-projects-sober-view-hydrogen-electric-power>

Chalmers (u,å)  
<https://www.chalmers.se/sv/institutioner/m2/nyheter/Sidor/Radikalt-annorlunda-teknik-%C3%A4r-ett-m%C3%A5ste.aspx>

The Economist (2020) <https://www.economist.com/science-and-technology/2020/12/08/is-the-time-now-ripe-for-planes-to-run-on-hydrogen>

Energiforsk (2020) Fossilfritt flyg med vätgas  
<https://energiforsk.se/media/28832/vatgasen-inom-flyget-al.pdf>

Energimyndigheten (2021) Ökning av förnybar elproduktion under 2020.  
<http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/okning-av-fornybar-elproduktion-under-2020/>

Europeiska kommissionen (2020) Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. H2020 Framework Programme

Europeiska Kommissionen (u.å) Liquid hydrogen fuelled aircraft - system analysis (CRYOPLANE). <https://cordis.europa.eu/project/id/G4RD-CT-2000-00192>

Evtol (2021) <https://evtol.com/news/hydrogen-poses-opportunities-infrastructure-challenges-urban-air-mobility/>

Fossilfritt Sverige (2021)  
<https://fossilfritt sverige.se/2021/01/21/vatgasstrategi-for-fossilfri-konkurrenskraft/>

GKN Aerospace (2021)  
<https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-development-of-ground-breaking-hydrogen-propulsion-system-for-aircraft2/>

Green Airways (2021) British Airways invests in ZeroAvia hydrogen-electric project and extends SAF option agreement with Velocys – GreenAir News. <https://www.greenairnews.com/?p=842>



[https://theicct.org/sites/default/files/publications/  
Alternative\\_jet\\_fuels\\_cost\\_EU\\_20190320.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative_jet_fuels_cost_EU_20190320.pdf)

Innovair (2021) <https://innovair.org/2021/02/11/pipistrel-valjer-vatgas/>

Mentour Pilote (2021) <https://mentourpilot.com/hydrogen-boeing-has-no-plans-to-use-it-any-more/>

Ny teknik (2020) [www.nyteknik.se](http://www.nyteknik.se) Lista: Fem vätgasplan – då och nu  
<https://www.nyteknik.se/fordon/lista-fem-vatgasplan-da-och-nu-7008313>;  
<https://www.nyteknik.se/fordon/blir-det-storsta-vatgasdrivna-passagerarflygplanet-i-trafik-7001956>

Ny teknik (2017) <https://www.nyteknik.se/fordon/tiltrotor-dronaren-drivs-av-vatgas-6853942>; <https://www.nyteknik.se/energi/15-fragor-och-svar-om-vatgas-stora-forvantningar-7008779>

Pavlenko, N., Searle, S., & Christensen, A. (2019). The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. ICCT.

Pohl HW (1995) IHCE'95 International Hydrogen and Clean Energy Symposium '95. HYDROGEN IN FUTURE COMMERCIAL AVIATION, pp 114- 122

Regeringen (2021) <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2021/02/regeringen-tar-framnationell-vatgasstrategi/>

RISE (u.å) [www.rise.se](http://www.rise.se) Elektrobränsle möjlighet för svensk industri

Roland Berger (2020) Hydrogen | A future fuel for aviation?

Simple Flying (2021) <https://simpleflying.com/boeing-no-hydrogen-aircraft/>

Svenskt flyg (2007) Slutsatser och rekommendationer från Flygets Miljökommitté 2007. <https://www.svensktflyg.se/wp-content/uploads/2011/05/slutsatser-och-rekommendationer-fran-flygets-miljokommitte.pdf>, s 45.

Svenskt flyg (2021) <https://www.svensktflyg.se/2021/01/ar-vatgas-framtiden-for-flyget/>

Transport Environment (2018) How to decarbonise European Transport by 2050,  
[https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_11\\_2050\\_synthesis\\_report\\_transport\\_decarbonisation.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_11_2050_synthesis_report_transport_decarbonisation.pdf)

TU Delft (2021) Towards a sustainable air transport system,  
[https://d2k0ddhflgrk1i.cloudfront.net/News/2021/02\\_Februari/LR/Whitepaper\\_NLR\\_TUdelft.pdf](https://d2k0ddhflgrk1i.cloudfront.net/News/2021/02_Februari/LR/Whitepaper_NLR_TUdelft.pdf)

Vätgas (u.å) <https://www.vatgas.se/>



**TRANSPORT  
STYRELSEN**

[transportstyrelsen.se](http://transportstyrelsen.se)  
telefon 0771-503 503