

# Jetmotorer utan CO2-emissioner

Av Claes Ericsson

Man jobbar med att försöka minska eller eliminera CO2 utsläpp från passagerarplan. Emissionsfria motorer för dagens trafikflygplan som A320neo och 737MAX8 får inte meningsfull räckvidd med batteridrift. Det naturliga miljövänliga valet är flytande väte, som förbränns i en modifierad jetmotor. Då kan det krävas ny teknologi som en roterande exploderande vägförbränning. För långdistansflyg interkontinentalt verkar man därför fokusera på SAF "Sustainable aviation fuel" tillverkat av avfall eller skogsråvara. I Sverige finns stora ytor att odla träd på för att förse SAF fabriker med råvaror.

UAM "Urban Air Mobility" kommer framöver för de minsta med 1-7 passagerare som främst flyger i städer och 10-15 mil ut, dessa vertikallstartande eller "STOL Short take-off vertical landing" tysta och flexibla flygplan komma certifieras som City Airbus NG, Bell Nexus, Joby, EHang, Lilium.. Man kan se nuvarande helikoptrar som opererar i städer för polis, ambulans, VIP transport, brandsläckning som tidiga användare av dem för uppdrag med lägre startvikt. <https://youtu.be/WFR3iUnMs-4>



City Airbus NG

Initialt blir det dyrt för passagerartrafik då det initiala kravet på en certifierad pilot ombord för ett fåtal passagerare drivet upp kostanden. Detta innan digitala system med uppkoppling mot ATC "Air Traffic Control" och tillverkaren troligen via digital satellitkommunikation kommer ta över pilot-rollen. Större versioner kommer troligtvis ha bränsleceller av typen vi ser i Toyota Mirai och blir beroende av att tanka trycksatt vätgas.

Nästa steg är upp till 19-pax regionalflygplan, liknande Heart Aerospace ES-19 och Eviation Alice. De verkar kräva nästa generations batterier för att få meningsfull räckvidd eller kommer initialt behöva bränsleceller som medför extra kostnad och vikt samt kravet på att flygplatser kan leverera H2 eller LH2. Kostnad och vikt ökar då. (Ref LeehamNews och Björns analys av dessa elflygplans räckvidd i kommersiell drift).

<https://heartaerospace.com/wp-content/themes/heart/assets/videos/es-19.mp4>

Emissionsfria motorer för dagens trafikflygplan som A320neo



ES-19

och 737MAX8 får inte meningsfull räckvidd med batteridrift. I teorin kunde de drivas av flytande syre och flytande väte i tankar ombord. Avgaserna blir då ren vattenång. Använder man luft och bränner dess syre blir det en viss mängd NOX från kvävet i luften. Men kostnaden för tillförlitliga raketmotorer i denna dragkraftsklass på 27000 lbf motsv 12-13 ton-dragkraft blir för hög. Samtidigt dubblas kostnad och vikt för dubbla tankar, både bränsle och oxidator.



Zeroe Airbus

Ett alternativ är SAF "Sustainable aviation fuel" tillverkat av avfall som använd frityrolja eller biobaserat överskott som sorterade hushållsopor. Flera projekt i främst USA och England använder hushållsopor som i en syrefri atmosfär förångas och går vidare efter filtrering till en Fischer-Tropsch process som skapar JET-A. Fulcrum är en pionjär när det gäller att göra koldioxidsnäla, billiga transportbränslen från en av våra mest rikliga resurser - hushållsopor.

Neste i Finland är en också stor aktör av SAF och bygger anläggningar i Singapore, Europa och USA. Neste har för närvarande en årlig kapacitet på 100 000 ton SAF. Med raffinaderiutbyggnaden i Singapore på väg och en ytterligare investering i Rotterdam-raffinaderiet kommer man att ha kapacitet att producera cirka 1,5 miljoner ton SAF årligen i slutet av 2023. Neste MY Sustainable Aviation Fuel finns redan på marknaden. Man har till exempel samarbetat med Air BP för att leverera hållbart flygbränsle till kunder i Sverige och Frankrike. Dessutom använder Lufthansa och KLM denna hållbara produkt, blandad med fossilt jetbränsle, kontinuerligt på flyg som avgår från Frankfurt och Schiphol flygplats.

Vid förbränning av SAF så bildas CO2 och NOX som vanligt, men argumentet är att man använder råvara som ändå skulle skapa CO2 i sin förruttnelse eller förbränning så "netto" blir det inte ett tillskott som om man använder fossila bränslen.

Det naturliga miljövänliga valet är annars flytande väte, som förbränns i en modifierad jetmotor. Väte har en hög flamhastighet, är lättantändligt och väger lite. Nackdelar är volymen av LH2 tankarna, som är av vakuumtermos-typ och var de ska placeras.

## Jetmotorer utan CO2

Väte kan produceras genom elektrolys med smarta katalysatorer som minskar elbehovet och kan då installeras vid vindkraftsparker till havs. Vätet som produceras kan då anslutas till naturgasnäten och vätet filtreras ut där det behövs för att omvandlas till flytande LH2. Fördelen att producera lokalt till havs utom synhåll från kusten är att man kan låta vindkraftverket gå på maxeffekt utan hänsyn till det nationella elnätet som alltid måste kunna kompensera ett frånfall av ett eller flera verk samt alltid hålla 50Hz. Då möjligt uttagen effekt ökar exponentiellt med vindhastigheten så kan kraftigt byggda vindkraftverk kopplade till lokal väteproduktion med sina kompressorer fungera upp till stormstyrkor upp mot 30m/s och då utnyttja vindenergin maximalt.

En idé är LH2-tankar bakom passagerarkabinen efter bakre tryckskottet och en långt fram i främre lastrummet. Reglerna måste utvecklas för tankar, övertrycksventiler, rör och isolering samt dumpventiler och hur tankning/tömning på flygplatsen ska gå till. Man vill undvika att ha plan stående med flytande väte som sakta kokar bort (man kan inte låta tanktrycket växa över ett visst värde), så man kommer att tanka av LH2 på plan som ska stå. Alternativt är att tanka på med "superkylt väte" för att hålla den låga temperaturen som krävs för att vätet ska hållas flytande ett tag till.

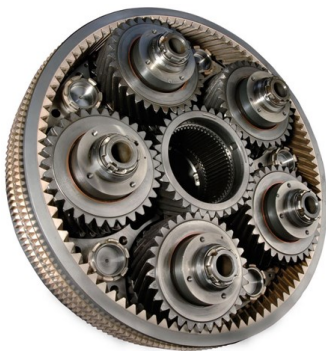
Dagens flygplatser förbrukar redan el som en mindre stad" och med LH2 produktion från inblandat väte i naturgaspipelines kommer elbehovet att öka dramatiskt beroende på såld volym LH2.



Jetmotorer är varma och trycksatta, denna kombination kräver exklusiva material som är dyra i inköp och dyra i tillverkning/inspektioner. Vanligtvis idag så är fläktmodulen tillverkad i kolfiber "Pre-preg", både fläktbladen och fläkthuset. P&W valt en aluminiumlegeringskärna i sina A320neo motorer då fläkten går med så pass lågt varvtal och krafterna blir begränsade, dock är bladprofilen i kolfiber som här på en RR Ultrafan.

### RR Ultrafan kolfiberblad med Ti framkant

Den efterföljande lågtrycks eller mellantryckskompressorn som går med lågtrycksturbinvarvtalet men i de senaste motorerna är fläktvarvtalet nedväxlat i en planetväxel för att få en större och sakta roterande fläkt samtidigt som lågtrycksturbinen/lågtryckskompressorn kan ha ett högt varvtal (istället för 3600rpm upp emot 10 000rpm). Lågtrycks/mellantrycks kompressorn är ofta gjord i titanlegeringar såsom Ti 6-4, Ti 6-2-4-2 eller Ti-17.



PW1100G fläktplanetväxel

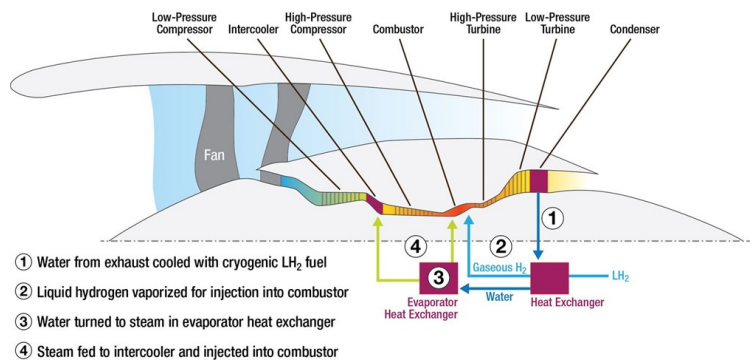
Efter denna så kommer högtryckskompressorn som är "hjärtat" i motorn. Den ska leverera högt tryck ut med liten värmeförlust genom hög verkningsgrad. Temperaturen stiger med trycket och konstruktionen kan börja med titanlegeringar, men då temperaturen överstiger titanlegeringens utmattningshållfasthet går man över till nickel-legeringar både i blad och rotor. Den vanligaste är Inconel718, men idag är pulvermetaller dominerande som Udimet 720 och nyare pulverlegeringar. Då trycket i kompressorn är det högsta i motorn finns ingen kylflutt att tillgå för att kyla de sista kompressorstegen.

Här kunde kylan från LH2 göra nytta genom att sänka lufttemperaturen i kompressorluften så att man kan använda titan hela vägen eller billigare stålsmidan. Kan man kyla luften minskar även kompressorarbetet då det går åt mindre energi att komprimera kall luft än het luft. Kyler man kompressorhuset och dess ledskenor så krymper de termiskt och man måste då också kyla kompressor-skivor och -spolar för att hålla bladtopps-spel och kniveggstättningsspel.

För billiga motorer med begränsad livslängd skulle hela kompressorn kunna tillverkas i stål med aktiv kylning. Svenska Jetmotorn Dovert hade kompressor i stål och var då mycket tålig, men med begränsad verkningsgrad, och man fortsatte med Glan som var tvåspolig liknande P&W JT3D. Då väte är mycket brännbart (knallgas) och i många höglegerade stål orsakar väteförspädning kan en heliumkrets användas som kyla av vätekretsen (Se artikel om SABRE "Supersonic AirBreathing Rocket Engine" motorn som är en kombinerad gasturbin/raketmotor som utnyttjar kombinationen av flytande väte och en heliumkrets som går mellan flytande till gasfas och samtidigt driver turbopumparna).

Man kan även utnyttja vattenångorna som bildas i förbränningen, fånga upp dem i utblåset, kyla dessa och injicera i kompressorn så att man sänker kompressorutlopps-temperaturen och ökar massflödet genom motorn. Vatteninsprutning används på olika sätt i stationära "wet gas turbines" samt i P&W studie av sin väteflygmotor med uppfångande av vattenånga med kylning och kondensering av denna.

Brännkammarmodulen kan vara mycket kort pga vätets höga flammhastighet. "Flamröret" tillverkas av koboltlegeringar och keramiska plattor eller CMC "Ceramic Metal composite" som tål temperaturerna men är en utmaning att reparera.

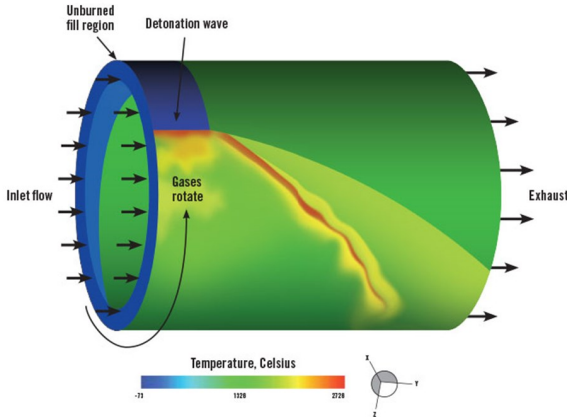


### P&W Hydrogen Steam-Injected, Inter-Cooled Turbine Engine (HySIITE)

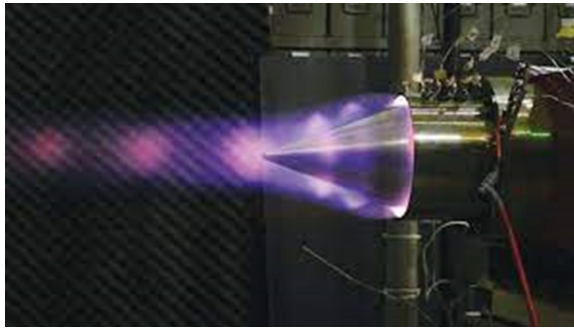
Då man fått önskad temperaturprofil mha. kompressorutlopps-luft som går utanför förbränningszonen och blandas in i förbränningsgaserna innan högtrycksturbinen så är det hett och trycket är strax under kompressorutloppstrycket. Man anpassar HPT Inlet guide vanes axiala öppna area så att trots expansionen som skett i förbränningen så är tvärsnittsytan anpassad för att ge en liten trycksänkning "Constant pressure combustion". Termodynamiskt skulle man vilja förbränna all luft från kompressorn i maximalt tryck, men med den "öppna" konstruktionen av brännkammaren går det inte. Då krävs ny teknologi som en roterande exploderande vägförbränning.

## Jetmotorer utan CO2

En roterande detonationsmotor arbetar via en kontinuerlig detonationsvåg som sprider sig runt insidan av en cylindrisk förbränning. Luft- och naturgasdrivmedel (blått) införs kontinuerligt genom inloppet och reagerar över detonationsvägen som rör sig vinkelrätt mot det inkommande drivmedlet. Högtemperaturprodukter med högt tryck bakom detonationsvägen expanderar och avgaser förs ut (överst) för att driva en turbin eller generera dragkraft. När processen börjar, upprätthåller den sig själv så länge inloppsdrivmedlet flyter.



Tekniskt sett bör en RDE minska den specifika bränsleförbrukningen med cirka 5% jämfört med en konventionell motor. En roterande detonationsmotor skulle minska den specifika bränsleförbrukningen ytterligare. Förbränningens konstruktion skulle då vara radikalt annorlunda - en som skulle frigöra energi i en snabb, kontinuerlig följd av detonationer som utlöses av chockvågor som roterade inuti en cylindrisk förbränning.



Aeromet Rocketdyne kommer att utveckla, validera och integrera en roterande detonationsförbränning för ett kraftverk. RDE-systemet ger en möjlighet till potentiell prestandaförbättring på grund av detonationsprocessens likhet med förbränning med konstant volym. Detta program kommer att börja med att utveckla och validera ett systemsimuleringsverktyg för integration i en kraftverkssystemmodell. Resultaten kommer att implementeras i kraftverkssystemmodellen för att definiera vägen till konfigurationer som överstiger 65 procent kombinerad cykeleffektivitet.

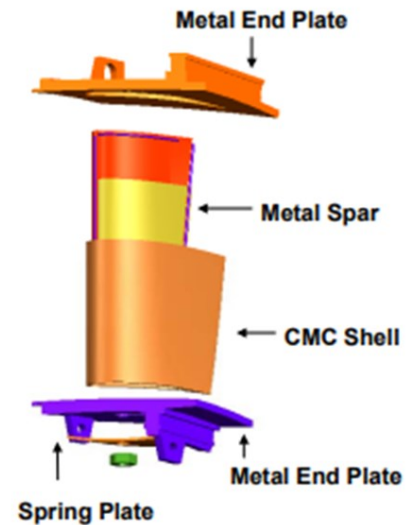
Rocket City-fabrikerna - ett smeknamn knutet till Huntsvilles roll i att lansera amerikaner till rymden - kommer att leverera råmaterial till den första amerikanska CMC-fabriken, som GE öppnade förra året i Asheville, NC. Företaget driver också redan två CMC "lean labs" i Newark, Del., och Cincinnati, Ohio, som letar efter nya applikationer för materialen och nya sätt att göra dem.

GE-forskare har arbetat med CMC i två decennier. Dessa "superkeramer" är lika tuffa som metaller, men de är också två tredjedelar lättare och kan arbeta vid 2 400 grader Fahrenheit -

3

500 grader högre än de mest avancerade legeringarna. Denna kombination gör det möjligt för ingenjörer att designa lättare komponenter för motorer som inte behöver så mycket kylflöde, generera mer kraft och bränna mindre bränsle.

Högtäcksturbinsbladen, tätningar, ledskenor, diskor och roterande tätningar är alla mycket dyra och högt påkända. Ledskenor och turbinbladstopptätningen tillverkas i CMC eller i koboltlegeringar som tål värme. Brännkammare och ledskenor som inte roterar tillverkas nu i CMC och tidigare i koboltlegeringar som går hetare än vad nickellegeringar tål. Här skulle kylning ha en stor påverkan på materialet eller låta förbränningstemperaturen öka mycket. De enklaste systemen att kyla är de heta "inlet guide vanes" som idag har många kylhål för kylflödet som kommer från kompressorutloppet och är ganska varm upp till 1150F (621C) men betydligt kallare än förbränningsluften som närmar sig 2000K (1727C). Även här kunde vatteninsprutning ge ökat massflöde i turbinen och sänka kostnaden genom att sänka turbininloppstemperaturen.



Noteras kan att om man ökar massflöde genom turbinen så ökar möjlig uttagen axeleffekt, dvs för samma effekttuttag kan temperaturen sänkas.

HPT bladen, som idag är gjorda av nickellegeringar i enkristallutförande, har laserborrade kylhål och olika termiska- och oxid-skyddslager. De roterar med ca 11000rpm. Idag luftkyls de. Kunde man sänka temperaturen på kylflödet vore det en stor fördel, enklast genom en heliumvärmväxlare. Man brukar inte leda ut turbinbladskylflödet utanför brännkammarhuset utan tar den i botten av brännkammarhuset via en deflektor som ska leda bort smuts. Via kanaler leds kylflödet in mellan en roterande tätning och turbinskivan (på P&W språk TOBI duct "Tangential On Board Injection") in i hål i turbinskivans topp och vidare in i turbinbladet där luften leds i en serpentin för att till slut injiceras "impingement cooling" mot turbinbladets framkants insida för att öka värmeöverföringen och ut via kylhålen i bladet. Dessa sätts lätt igen av smuts och bladets utsida+insida måste korrosionsskyddas. I gamla tider skyddades endast utsidan genom "pack aluminizing" men idag används "plasma vapour deposition" av yttriumstabiliserad aluminiumlegering" tex MCrAlY som då ger ett tunt täckande skikt på bladets utsida och insida.

Man brukar ha tjockare gods steg 1 bladframkant på civila motorer som då tillåter översyn via kemisk strippning som tar lite av basmaterialet innan oförstörande provning, svetslagning (tillåtet lokalt nära bladtoppen), nytt korrosionsskydd och plasma. Militära motorer med penningstarka ägare brukar få tunna steg 1 bladframkanter som då förbättrar den interna kyleffekten från "impingement cooling" och får längre livslängd men begränsat antal översyner (nära 0). Man kunde tänka sig fredstida militära T1 blad som kan överses och krigstida blad med längre tid på vinge för att spara pengar.

Notera att steg 2 i HPT (eller i fallet av enstegs RR turbin IPT-turbinbladet) har perfekt temperatur för att förångat salt från insugsluften till motorn ska falla ut svavel, som fäster på bladets insida och då snabbt orsakar korrosion. Så en saltrik miljö gör att turbinblad steg 2 snabbt råkar ut för bladbrott (PW4000, Trent1000B+C, LEAP-1A)

HPT Steg 2 är idag tillverkade i koboltlegering (ledskenor) och bladen i nickellegering. Ledskenorna luftkyls och kunde kylas med rent vatten som förångas och ökar massflödet genom steg 2 och efterföljande lågtrycksturbin. Man försöker även här tillverka dem i CMC utan kylning.

HPT huset är kylt då man också kyler baksidan på HPT shrouds "tätningssegment". De börjar nu tillverkas i CMC, dock är huset ofta tillverkat i nickellegeringar liksom LPT huset, bladen och diskarna. All kylluft medför en förlust i verkningsgrad för motorn och kunde man kyla luften eller använda LH2 som kylmedium innan den går in till förbränning medför det en vinst i verkningsgrad.

Lågtrycksturbinen är idag okyld men utsidan av LPT Case kyls via active clearance control system med kylluft, även denna luft som tappas av fläktkanalen kan minskas mha kylning från en liten luftkylare med LH2. Det kan nämnas att de bakre stegen tillverkas av aluminium-titan legeringar som är lätta, höghållfasta och värmetåliga men ofta spröda. Al-Ti är en intermetall och inte en metall. Denna legering har en svensk koppling då GEnX motorn till 787 fick en omkonstruerad LPT med viktproblem där Fiat Avio i kontakt med Arcam i Göteborg lyckades tillverka LPT blad/ledskenor i TiAl genom 3D printing och därmed kunde den möta det vikt mål med verkningsgrad som utlovats. Både Arcam och Fiat Avio blev sedan uppköpta av GE.

Ett bladbrott längst bak i LPT är inte ett katastrofalt scenario då mycket kan slinka ut genom en LPT som går i låga varvtal approx 3600 rpm och trycket sänks steg för steg då arbete tas ut. Det är mycket värre om delar träffar HPC's framsida och där kan orsaka bladskador speciellt i bladtopparnas fram- och bakkanter.

Här kan nämnas att andra delar av motorn behöver kylning som lagerhusen, oljekylare (Air Cooled Oil Cooler ACOC, Fuel Cooled Oil Cooler FCOC) samt fläktrduktionsväxels oljesystem. För man in 25000hp i växeln och har 99% verkningsgrad är det ändå 250hp som ska kylas bort då motorn går på max dragkraft.

Även vissa komponenter är bränsledrivna via bränslekontroller (Hydromechanical Control Unit), såsom VSV systemet (Variable Stator Vanes) och Bleed valve som är luftavtappning från "svanhalsen" mellan LPC och HPC samt stability bleeds i HPC som öppnas vid vissa driftsfall för att undvika överstegring "stall" av vissa av bladen i HPC. Man tappar även av "Service Bleed Air" för att få lagom tryck/temp på luften in till kabin lyftsystemet som går via en luftkylare "fan air cooler" och en "high stage valve" som styr vilket steg av kompressorluft som ska matas vidare in till de flygplansmonterade Air cycle machines som är en kombinerad kompressor, avfukare, kylturbin och blandningsventil som styr att man får rätt temp/tryck in i kabinen blandad med återcirkulerad och HEPA filtrerad kabinluft. Kylturbinen sänker temperaturen och dess axeleffekt driver dess kompressor.

Framöver kommer säkert dessa motorinstallerade ventiler att styras av el då man lättare får återkoppling till kontrollsystemet via små kulskruvs-aktuatorer.

Tittar man på de stora strukturella elementen "ryggraden i motorn" så är fläkthuset i kolfiber, mellanhus i titan, kompressorhus i titan i famkant och nickel/ställegeringar, brännkammerhus i nickel liksom HPT och LPT hus samt växellåda i aluminium som driver hydraulpumpar, oljepump, avluftnings-sling av returolja, bränslepump, bränslekontroll, starter-generator.

För långdistansflyg "intercontinental" verkar man fokusera på SAF. Det finns stora ytor på jorden att odla träd på för att förse SAF fabriker med råvaror och samtidigt rena luften då träden omvandlar CO2, vatten, värme och solljus till biomassa. I Sverige produceras ca 7-20 kubik torrsbstans per hektar/år. En misskött skog som hämmas av björksly och andra produktionshämmande faktorer (granbarkborre, torka, storm) minskar dock dess tillväxt drastiskt och därmed dess CO2 upptagande.

Satsade man på skog för timmer och optimerade var man planterar olika trädsorter utifrån markförhållanden (våta, jordmån, vindförhållanden, temperatur) och sköttes de optimalt kunde Sverige troligtvis fördubbla skogens CO2 upptag per år och mängden sågtimmer mer än fördubblas då massaveds efterfrågan sjunker pga. lägre pappersförbrukning. Detta skulle även ge SAF "Sustainable Aviation Fuel" fabriker ökad tillgång på råvaror.

I andra delar av världen med mera nederbörd och värme kan mycket högre virkesproduktion uppnås. Man kan uppnå andra fördelar med träd som binder jord och minskar jorderosion. På betesmark kan spridda träd ge skugga till boskap och suga upp dess gödsel, i havsbanden kan man utveckla mangroveskogen och därmed minska erosion samt öka på den biologiska mångfalden samtidigt man suger upp CO2.

Ett konsortium studerar även att ta CO2 från värmeverk (Uppsala) till en fabrik nära Forsmark. Enligt uppgift kan Forsmark producera mera el än vad de får mata in på nätet då denna stora effekt inte kan kompenseras vid ett nödstopp. Idén är att låta det producera max och använda denna "överskottsel" för att tillverka SAF som sedan körs till flygplatsen. En nackdel är att det saknas tågförbindelse till Forsmark vad jag känner till. Dock kunde CO2 gå med fartyg via hamn i Uppsala till Forsmark, som har en hamn och producerad SAF till ny hamn i Rosersberg och vidare till Arlanda med nuvarande transporter från dess tågjetbränsle station.