

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Systems Perspectives on Swedish Production of Biojet Fuels	
Universitet/högskola/företag Lunds universitet	Avdelning/institution Miljö och energisystem/Inst. Teknik och samhälle
Adress Box 117, 221 00 Lund	
Namn på projektledare Karin Ericsson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Lovisa Björnsson, Pål Börjesson, Mikael Lantz	
Nyckelord: 5-7 st Biojetbränsle, skogsbiomassa, reduktionsplikt, växthusgasemissioner, betalningsvilja, integration	

Förord

Projektet har finansierats helt av Energimyndigheten under programmet ”Hållbara biobränslen för flyg”.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning/Bakgrund	5
Genomförande av projektet	6
Genomförande och resultat av delstudier	6
Kartläggning och analys av regional råvaruförsörjning	6
Hållbar potential	7
Ekologisk hänsyn	7
Energieffektivisering inom skogsindustrin	7
Regionala skillnader i skogsbränsletillgång	7
Kartläggning av produktionskedjor	8
Studerade produktionskedjor	8
Uppgradering	9
Energiinsats	10
Produktutbyte	11
Klimatberäkningar för biojetbränslen från svensk skogsbiomassa	11
Decentraliserad produktion av intermediärer	11
Uppgradering till jetbränslen och andra drivmedel	12
Analys av de ekonomiska förutsättningarna för biojetbränslen	13
Reduktionsplikten ökar betalningsviljan	14
Analys av potentialen för integrerad produktion av biojetbränslen i befintliga industriplanläggningar	15
Utformning av integrerade produktionskedjor	15
Produktionspotential och behov av biomassa och vätgas	15
Syntesrapport	17
Diskussion	17
Publikationslista	18
Referenser, källor	19
Bilagor	19

Sammanfattning

Flyget är i dag helt beroende av fossilt jetbränsle och en av de svåraste sektorerna att hantera i klimatomställningen. En viktig komponent i flygets klimatomställning är att ersätta fossilt jetbränsle med biojetbränsle, förnybart jetbränsle producerad från biomassa. För att påskynda en sådan omställning infördes en reduktionsplikt för jetbränslen i Sverige år 2021. Den innebär att bränsleleverantörerna blir skyldiga att årligen öka inblandningen av biojetbränsle i det fossila jetbränslet. Vi har i det här projektet undersökt förutsättningarna att producera biojetbränsle från rest- och biprodukter från skogen i Sverige med fokus på några olika produktionskedjor.

Resultaten från projekt visar att det i flera avseenden finns goda förutsättningar att producera biojetbränsle från skogsbiomassa i Sverige. Enligt vår kartläggning skulle tillförseln av hållbart producerad skogsbiomassa kunna öka med cirka 27-37 TWh till 2030 och 34-45 TWh till 2050. Dessutom visar våra växthusgasberäkningar att de studerade produktionskedjorna ger stor klimatnytta, motsvarande 88-92 % lägre emissioner än fossilt jetbränsle. För att uppnå så stor klimatnytta krävs emellertid att de produktionskedjor som kräver mycket vätebehandling vid uppgradering utnyttjar fossilfri vätgas. Betalningsviljan för biojetbränslen med hög klimatnytta förväntas vara hög inom ramen för reduktionsplikten eftersom klimatprestandan hos biojetbränslet avgör hur stor volym som måste blandas in. Betalningsviljan beräknades till drygt 22 kr/liter för biojetbränsle som minskar växthusgasutsläppen med 90% och givet ett marknadspris på 6 kr/liter för fossilt jetbränsle. Givet denna betalningsvilja kan flera produktionskedjor för biojetbränsle uppvisa konkurrenskraft. Om växthusgasreduktionen i stället uppgår till 65 % sjunker betalningsviljan till 18 kr/liter.

Projektet visar också på den stora potentialen för integrerad produktion i befintliga anläggningar inom skogsindustrin och kraftvärmeverken, vilket möjliggör effektivt resursutnyttjande. Potentialen för integrerad produktion av drop-in-biobränslen uppskattades till som mest 25 TWh/år, varav 6 TWh biojetbränsle, 6,6 TWh biodiesel och 6,2 TWh bio-bensin. Detta överstiger vad som förväntas krävas för att uppfylla reduktionsplikten för jetbränsle 2030 och innebär samtidigt ökad produktion av biobaserad diesel och bensin. Nettobehovet av biomassa för detta uppskattades till cirka 35 TWh vilket motsvarar den potentiellt ökade tillförseln av hållbar skogsbaserad biomassa.

Det svenska klimatmålet innebär att användningen av fossila bränslen ska i princip ha fasats ut till 2045. I det perspektivet är det tydligt att rest- och biprodukter från skogen utgör en begränsad resurs som vi behöver hushålla med. Det är därför angeläget att begränsa bränsleanvändningen inom både flyg- och vägtransporter genom effektivisering, elektrifiering där det är möjligt, och genom förändrade transport- och resmönster. Den stora mängden utrikesresor och flygets internationella karaktär gör också att målsättningar och styrmedel för flyget i andra länder och inom internationella organ har stor betydelse för flygets utveckling och på klimatpåverkan för svenskars flygresor. I detta sammanhang är det därför positivt att det nu även internationellt, t ex inom EU, diskuteras införandet av styrmedel för en ökad produktion och användning av förnybara jetbränslen.

Summary

Aviation is completely dependent on fossil jet fuel and one of the most difficult sectors to handle in the climate transition. One important component in the climate transition of aviation is to replace fossil jet fuel with biojet fuel, i.e. renewable jet fuel produced from biomass. To accelerate such a transition, a reduction obligation of greenhouse gas (GHG) emissions was introduced on jet fuels in Sweden in 2021. The reduction obligation forces fuel suppliers to annually increase the blend in of biojet fuel in the fossil jet fuel. In this project we have investigated the conditions for producing biojet fuel from forest residues and forest industry by-products in Sweden, focusing on a number of production pathways.

The results of the project show that there are in many respects good conditions for producing biojet fuels from forest biomass in Sweden. According to our mapping and analysis, the supply of sustainably produced forest biomass could increase by 27-37 TWh/y by 2030 and by 34-45 TWh/y by 2050. In addition, our GHG calculations show that the studied production pathways provide large climate benefit, corresponding to 88-92% lower emissions than fossil jet fuel. However, to achieve this climate benefit necessitates the use of low carbon hydrogen for the production pathways that require large amounts of hydrogen for upgrading.

The project also shows great potential for integrated production at existing combined heat and power plants and in the forest industry, thus enabling efficient use of resources. The potential for integrated production of drop-in biofuels was estimated to up to 25 TWh/y, including for example 6 TWh/y biojet fuel, 6.6 TWh/y biodiesel and 6.2 TWh/y bio-petrol. This is more than what is expected to be required for meeting the reduction obligation for jet fuels for 2030, while increasing the production of bio-based petrol and diesel. The required net demand for biomass to achieve this was estimated to about 35 TWh/y, which is in line with the potential increase in the supply of sustainable forest biomass.

The Swedish climate target implies that the use of fossil fuels should essentially be phased out by 2045. In that perspective, it becomes clear that forest residues and by-products are a limited resource that requires economising. It is therefore important to reduce the fuel use in aviation as well as road transportation by energy efficiency improvements, electrification where possible and by changes in travel and transportation patterns. The large amount of travels abroad and the international character of aviation make targets and policy instruments in international bodies and other countries of great importance to aviation's development and to the climate impact of Swedish air travellers. A positive note in this regard is that the policy instruments for accelerating the production and use of renewable jet fuel are now also being discussed internationally, for example in the EU.

Inledning/Bakgrund

Flygets klimatpåverkan har vuxit i takt med att flygresandet har ökat bland svenskar och på global nivå. Klimatpåverkan från svenskarnas flygresor har uppskattats till 10 miljoner ton koldioxidekvivalenter (CO₂eq) för 2017, vilket är lika mycket som växthusgasutsläppen från personbilstrafiken i landet (Naturvårdsverket, 2021). Omkring hälften av flygets klimatpåverkan orsakas av växthusgasutsläpp från förbränning av fossilt jetbränsle och andra hälften av så kallade höghöjdseffekter som beror på förbränning på hög höjd, vilka är särskilt stora vid längre utrikesresor. Ett sätt att minska flygets klimatpåverkan är att ersätta fossilt jetbränsle med förnybara bränslen, såsom biojetbränsle, vilket leder till minskade utsläpp av växthusgaser.

Det övergripande syftet med det här projektet har varit att undersöka förutsättningarna för produktion av biojetbränsle från skogsbiomassa i Sverige. Detta har studerats genom att kartlägga den regionala tillgången skogsråvara, inventera möjliga produktionskedjor, beräkna växthusgasutsläpp och undersöka produktionskostnader och betalningsviljan för olika biojetbränslen, samt uppskatta potentialen för integrerad produktion av biojetbränsle i befintliga industrianläggningar i Sverige.

Biojetbränsle anses vara det mest aktuella förnybara alternativet på kort- och medellång sikt (van Dyk och Saddler, 2021) och omställningen till biojetbränslen är möjlig inom ramen för den befintliga flygflottan. Andra alternativ som kan bli aktuella på länge sikt är elektrobränslen och vätgas samt elflygplan med batterier för kortare flygsträckor. Produktionen av biojetbränsle är begränsad och svarar idag för endast 0,04 % av den globala användningen av jetbränsle (IRENA, 2021). Situationen är liknande i Sverige. Jetbränslen måste vara certifierade enligt en global standard som idag tillåter inblandning av upp till 50 % biojetbränsle. För att certifieras måste biojetbränslet vara ett sk drop-in-bränsle som har väsentligen samma kemiska sammansättning och egenskaper som det fossila jetbränslet. Standarden sätter således ramar för hur produktionsprocessen för biojetbränsle kan utformas. Det innebär också att biojetbränsle kommer att samproduceras med produkter såsom bensin och diesel på motsvarande sätt som vid fossiloljeraffinaderier. Samproduktionen av biodrivmedel för vägtransport är därför också relevant att belysa i detta sammanhang.

Dagens biojetbränsle domineras av HEFA, vegetabiliska och animaliska oljor och fetter som omvandlas med kommersiell produktionsteknik. Tekniken är väsentligen samma som används för att producera den förnybara dieseln HVO, vilket är det dominerande biodrivmedlet i Sverige. Rest- och avfallsprodukter som kan användas för produktion av HEFA eller HVO är dock begränsad och vissa oljegrödor präglas av hållbarhetsutmaningar. En ökad användning av biojetbränslen kräver därför nya produktionskedjor, t ex baserade på bi- och restprodukter från skogsindustri och skogsbruk som Sverige har stor tillgång på. I Sverige finns också kunskap och etablerad logistik kring tillförsel och omvandling av biomassa i exempelvis kraftvärmeverk och skogsindustrianläggningar.

För att påskynda omställningen till biojetbränsle infördes en reduktionsplikt för jetbränslen i Sverige år 2021. Denna bygger på samma princip som tillämpas på bensin och diesel sedan 2018. Reduktionsplikten för jetbränsle innebär att utsläppen av växthusgaser från förbränningen ska minska successivt med upp till 27 % per

energimängd jetbränsle till 2030 (SFS 2021:412). Minskningen ska uppnås genom inblandning av biojetbränslen med låga växthusgasutsläpp i fossilt jetbränsle. Utsläppen ska beräknas utifrån ett livscykelperspektiv i enlighet med EU:s Förnybartdirektiv (EU RED II). Utformningen av styrmedlet innebär att klimatprestandan hos biojetbränslet avgör hur stor volym som krävs för att uppfylla reduktionsplikten. Klimatprestandan påverkar därigenom också betalningsviljan. Enligt Biojetutredningens huvudscenario förväntas det krävas cirka 4 TWh biojetbränsle för att uppfylla reduktionsplikten 2030, vilket utgår från 30 % inblandning (SOU 2019:11). För att inblandningsnivån ska kunna hållas så låg krävs dock att växthusgasutsläppen för biojetbränslet är 90 % lägre än för fossilt jetbränsle (under 10 g CO₂eq/MJ).

Projektet påbörjades augusti 2019 och pågick fram till december 2021. Projektet har genomförts av en forskargrupp på avdelningen Miljö och energisystem vid institutionen Teknik och samhälle under ledning av Karin Ericsson som ersatte Sylvia Haus, som var projektledare initialt. Projektet har finansierats helt av Energimyndigheten under programmet ”Hållbara biobränslen för flyg”.

Genomförande av projektet

Projektet har genomförts inom ramen för sex delstudier:

1. Kartläggning och analys av regional råvaruförsörjning
2. Kartläggning av produktionskedjor
3. Klimatberäkningar för biojetbränslen från svensk skogsbiomassa
4. Analys av de ekonomiska förutsättningarna för biojetbränslen
5. Analys av potentialen för integrerad produktion av biojetbränslen i befintliga industrianläggningar
6. Syntesrapport

Delstudie 2-6 överensstämmer med det som föreslogs i ansökan, medan delstudie 1 har tillkommit då råvaruperspektivet bedömdes som viktig input till övriga delstudier och för projektet som helhet. Delstudie 2 utfördes integrerat med delstudierna 3 och 5.

Projektet har genomförts av Karin Ericsson, Lovisa Björnsson, Pål Börjesson och Mikael Lantz, som alla är verksamma forskare på avdelningen Miljö och energisystem vid LTH, Lunds universitet.

Genomförande och resultat av delstudier

Kartläggning och analys av regional råvaruförsörjning

De skogsråvaror som framför allt bedöms vara tillgängliga för biojetbränsleproduktion i framtiden utgörs av olika rest- och biprodukter. I denna delstudie genomfördes regionala och nationella analyser av tillgången på dessa (se två rapporter i Bilaga 1 och 2). Uppdaterade regionala analyser gjordes av tillgången på grenar och toppar (grot) från skogsavverkningar, sågspån (inklusive kutterspån) från sågverk, bark från sågverk och

massabruk samt lignin från sulfatmassabruk. Alla dessa råvaror uppfyller de miljömässiga hållbarhetskriterier som anges i EU RED II (EU, 2018), t ex påverkan på biologisk mångfald, markanvändning, skogsbruksmetoder, klimatprestanda mm. Idag används redan huvuddelen av biprodukterna från skogsindustrin för energiändamål medan enbart en begränsad andel grot från skogsbruket utnyttjas. Därför har också en nationell analys gjorts av den framtida ökade tillförselpotentialen av skogsråvara som också inkluderar skadad och klen rundved.

Hållbar potential

I Sverige bedöms den ökade miljömässigt hållbara tillförselpotentialen av skogsbiomassa uppgå till cirka 27-37 TWh till 2030, och till 34-45 TWh till 2050. Detta kan jämföras med dagens användning av skogsbaserade biobränslen inom skogsindustrin, fjärrvärmesektorn och för övrig uppvärmning som 2018 uppgick till cirka 105 TWh (Energimyndigheten, 2020). Drygt 50 % av potentialen utgörs av grot från föryngringsavverkning medan biprodukter inom skogsindustrin utgör 25-30 % och 15-20 % utgörs av klen och skadad rundved.

Ekologisk hänsyn

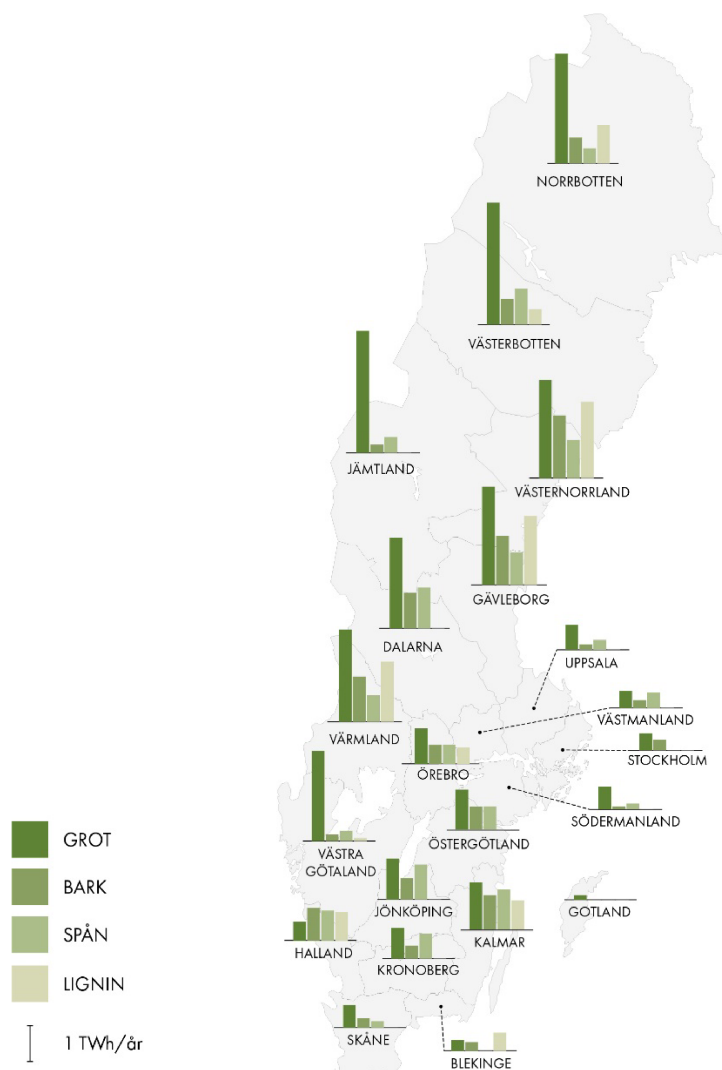
Uttaget av grot sker vid föryngringsavverkning på produktiv skogsmark i Sverige. Förutom att drygt en fjärdedel av groten lämnas kvar på de hyggen där uttag sker så antas grotuttag enbart ske på cirka 50 % av den produktiva skogsarealen för att säkerställa biologisk mångfald, markbördighet mm. En ökad andel vedaska bedöms återföras i framtiden för att säkerställa skogsmarkens långsiktiga produktionsförmåga.

Energieffektivisering inom skogsindustrin

Tillgången på biprodukter bestäms framför allt av energieffektiviseringstakten inom massabruk och sågverk i kombination med deras interna behov av energi. Energieffektiviseringstakten inom skogsindustrin bedöms ligga mellan 1-3 % per år. Det interna behovet av energi bedöms dock öka succesivt med en förändrad produktportfölj och förädlingsgrad, t ex övergång från tryckpapper till förpackningsmaterial, förädling av sågat virke till korslimmat trä osv. Vid ökad efterfrågan på en bioråvara som t ex sågspån eller lignin för biojetbränsleproduktion bedöms dynamiska effekter leda till omallokeringar där dessa frigörs genom att de ersätts av t ex bark och grot för process- och fjärrvärmeproduktion.

Regionala skillnader i skogsbränsletillgång

Den aktuella geografiska tillgången på rest- och biprodukter från skogsbruk och skogsindustri skiljer stort mellan olika län i Sverige. Ett antal geografiska platser och områden utkristalliserar sig där den sammantagna potentialen av skogsråvara är speciellt stor (Figur 1) och där dessutom densiteten, d v s tillgång per yta, är hög vilket minimerar transportavstånd. Speciellt lämpliga områden för lokalisering av storskaliga och kostnadseffektiva produktions-anläggningar för biojetbränslen är t ex Västernorrland, Gävleborg, Värmland och östra Småland samt Norrbottens och Västerbottens kustområde.



Figur 1. Potentiell tillgång på grot, bark, spån samt lignin per län och år, uttryckt i TWh. Spån inkluderar sågspån och kutterspån. ligninmängden baseras på 25 % uttag från svartlut vid sulfatmassabruk.

Kartläggning av produktionskedjor

Kartläggningen av produktionskedjor genomfördes som förberedelse för klimatberäkningarna och potentialuppskattningen för integrerade produktion av biojetbränsle.

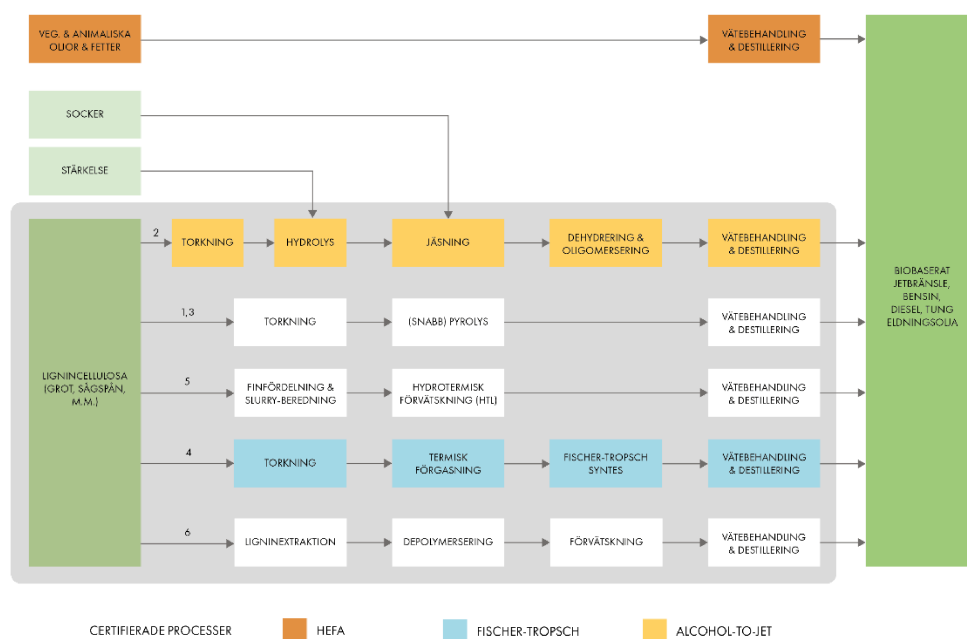
Studerade produktionskedjor

Biojetbränsle kan produceras via olika produktionskedjor. I Figur 2 ges en översiktlig bild över de studerade produktionskedjorna med skogsbiomassa som råvara, samt den för HEFA. Produktionskedjorna som baseras på skogsbiomassa involverar produktion av cellulosebaserad etanol via den sk Alcohol-to-jet (ATJ)-processen, snabb pyrolys, hydrotermisk förvätskning (HTL), förgasning följt av Fischer-Tropsch-syntes (FT) samt depolymerisering och förvätskning av lignin. Efter finfördelning eller torkning av biomassen omvandlas biomassen via olika tekniker, och i vissa fall med efterföljande kemisk syntes, till en flytande intermediär. Slutligen uppgraderas intermediären till biojetbränsle och andra drop-in-bränslen. Den tekniska mognadsgraden skiljer sig åt

mellan och inom de olika produktionskedjorna. HEFA är den enda fullt ut kommersialiserade produktionskedjan för biojetbränsle i dag. Mognadsgraden bland övriga bedöms som högst för FT-processen, som är en kommersialiserad produktionskedja för fossilt jetbränsle. Produktionskedjorna med snabb pyrolys, HTL, och cellulosabaserad ATJ befinner sig på demonstrationsstadiet. Mognadsgraden bedöms vara lägst för depolymerisering och förvätskning av lignin som befinner sig på pilotstadiet. Hittills är tre av produktionskedjorna i figuren certifierade: HEFA-processen; ATJ, där alkoholen kan utgöras av biobaserad etanol eller isobutanol; och FT-processen, där råvaran kan utgöras av såväl biomassa som fossil råvara.

Uppgradering

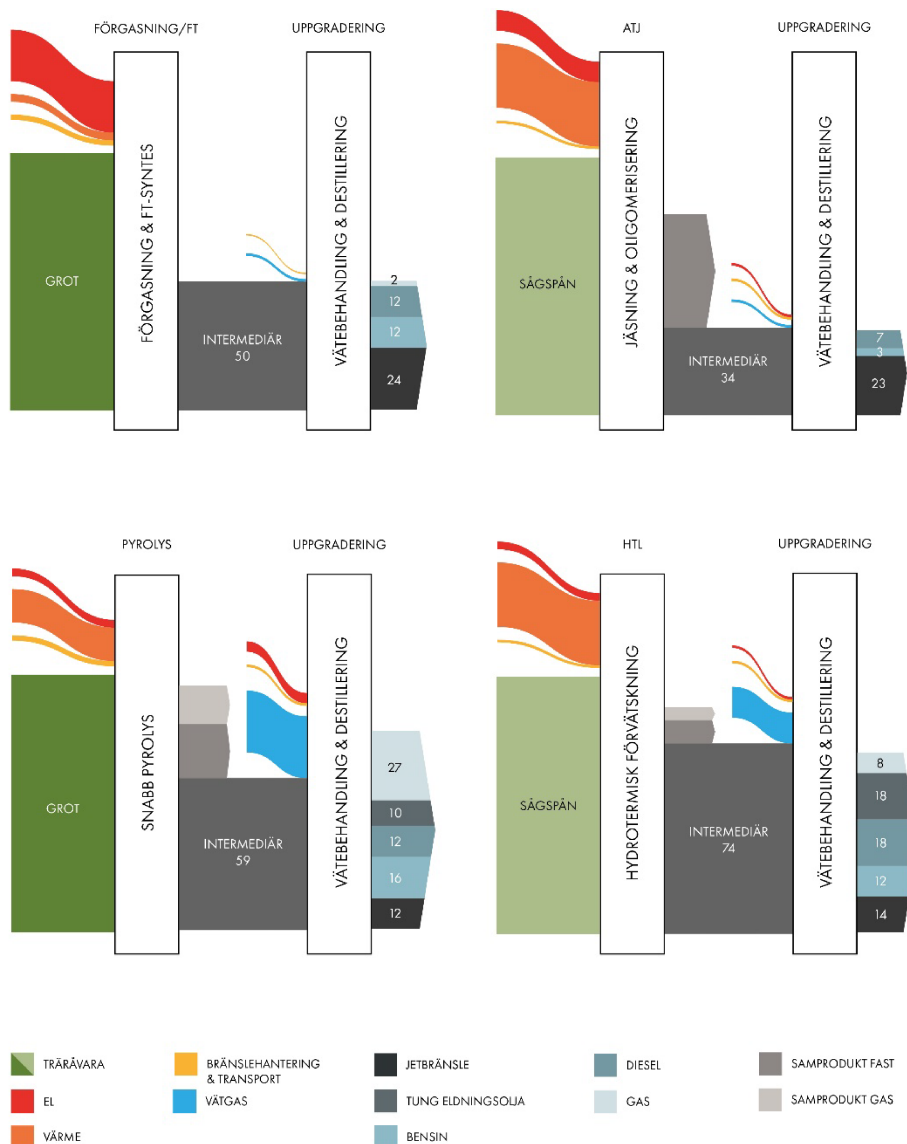
Behovet av uppgradering genom vätebehandling skiljer sig kraftigt mellan de olika intermediärerna, framför allt beroende på deras syrenehåll. Pyrolys, HTL och förvätskning av lignin ger komplexa blandningar av organiska föreningar med stor mängd aromater och hög halt syre (upp mot 40 % för pyrolys). Uppgraderingsbehovet är stort för intermediärer från pyrolys och förvätskning av lignin, måttligt för intermediären från HTL och förhållandevis litet för de från FT-syntes och de kolväten (alkener) som produceras genom dehydrering och oligomerisering av etanol. Viktiga komponenter i uppgraderingen är: i) syreborttagning genom vätebehandling, ii) krackning med eller utan vätebehandling av stora molekyler eller aromater, och iii) destillering där oljan delas upp utifrån kokpunkt i olika produktströmmar såsom jetbränsle, bensin, diesel och tung eldningsolja. Produktmixen skiljer sig mellan olika intermediärer och påverkas av hur uppgraderingen utformas.



Figur 2. Översikt över de studerade produktionskedjorna (grå ruta) för biojetbränsle. Bilden är bearbetad från de Jong (2018). Numreringen avser de sex studerade integrerade produktionskedjorna som behandlas i delstudien som analyserar potentialen för integrerad produktion av biojetbränsle.

Energiinsats

Energiinsatser och produktutbyten för några av de studerade omvandlingsteknikerna visas i Figur 3. Figuren visar utbyten samt insatt processenergi, vätgas och transporter i relation till insats av 100 GWh sågspån eller grot.



Figur 3. Energiförbrukning och produktutbyten för omvandling av sågspån eller grot till biojetbränsle och andra flytande biodrivmedel. Pilarna och siffrorna visar energiflöden i GWh och är proportionerliga till en tillförsel av 100 GWh träbränsle.

Produktionen av intermediär som visas i Figur 3 antas ske i en stand-alone anläggning där det är svårare att utnyttja energirika restflöden. Exempelvis genereras stora mängder restvärme vid hög temperatur vid förgasning/FT-syntes, och i HTL- och etanolprocesserna uppkommer en vattenfas med låg halt av organiskt material som hade kunnat användas för tex biogasproduktion. Om produktionen av intermediär integreras med befintliga anläggningar såsom kraftvärmeverk och skogsindustrier möjliggörs högre resurseffektivitet. Förklaringen ligger i möjligheten att utnyttja restprodukter och

värmeflöden från både den befintliga verksamheten och från produktionen av biodrivmedel mer effektivt. Resultat för integrerad produktion visas i Figur 7.

Produktutbyte

Utbytena som anges i Figur 3 utgår från att produktionen av biojetbränsle är prioriterad på bekostnad framför allt diesel och används i växthusgasberäkningarna och i potentialuppskattningarna för integrerad produktion.

Vid uppgraderingen sker en vätebehandling där vätgas konsumeras i proportion mot andelen syre i intermediären. Vid vätebehandlingen bildas en restgas som innehåller kolväten och som kan bidra till produktion av vätgas i olika grad för de olika produktionskedjorna. Det vätgasbehov som visas i Figur 3 bygger dock på att restgasen inte har använts processinternt, utan den utgör en gasformig produkt tillsammans med flytande biodrivmedel.

Faktaunderlaget kring vätgasbehovet och möjligheten till processintern användning av restgasen i storskalig produktion är emellertid osäkert då vätebehandling av syrerika intermediärer inte är kommersialiserad. Övrig vätgas måste produceras från externa energikällor såsom el, för elektrolys av vatten, och biogas eller naturgas för ångreformerings av metan.

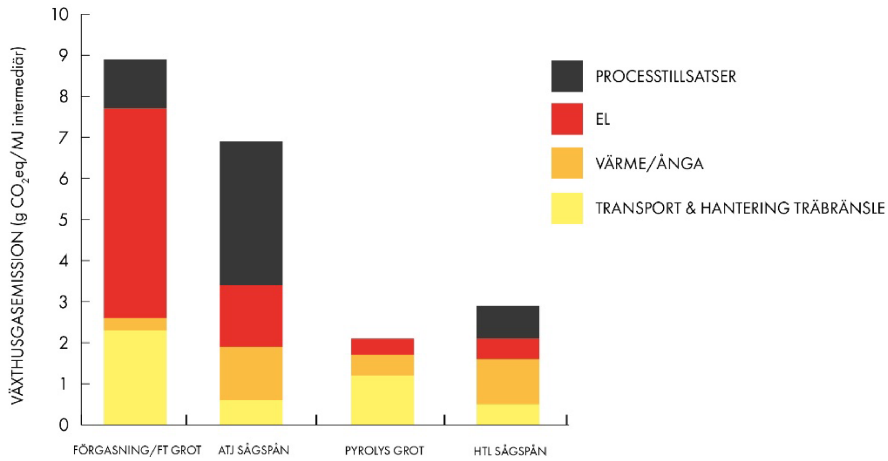
Klimatberäkningar för biojetbränslen från svensk skogsbiomassa

I denna delstudie beräknades växthusgasutsläppen från olika produktionskedjor för biojetbränsle i Sverige ur ett livscykelperspektiv (se manus i Bilaga 3).

Om biojetbränslebehovet för att uppfylla reduktionsplikten 2030 ska vara begränsat till 4 TWh krävs att växthusgasemissionen hos biojetbränslet ligger under 10 g CO₂eq per MJ (SOU 2019:11). Den goda svenska tillgången på rest- och biprodukter från skogen (Figur 1) i kombination med att vi ur EU-perspektiv har låga utsläpp från el, värme och vägtransporter gör att förutsättningarna att uppnå låga växthusgasemissioner är goda för biojetbränsleproduktion i Sverige. Emissionerna beräknas ur ett livscykelperspektiv enligt metoden i EU RED II (EU, 2018). Tillförd energi medför emissioner, liksom processtillätsor i form av t ex enzymer och katalysatorer. När flera produkter som i dessa fall samproduceras, fördelas (allokeras) utsläppen på alla produkter baserat på energiinnehåll. För att ta höjd för eventuella begränsade möjligheter att ta vara på restflöden (t ex att använda spillvärme i fjärrvärmesystem) är beräkningen baserad på de energi- och värmeflöden som visas i Figur 3, där restflöden förblir oanvända.

Decentraliserad produktion av intermediärer

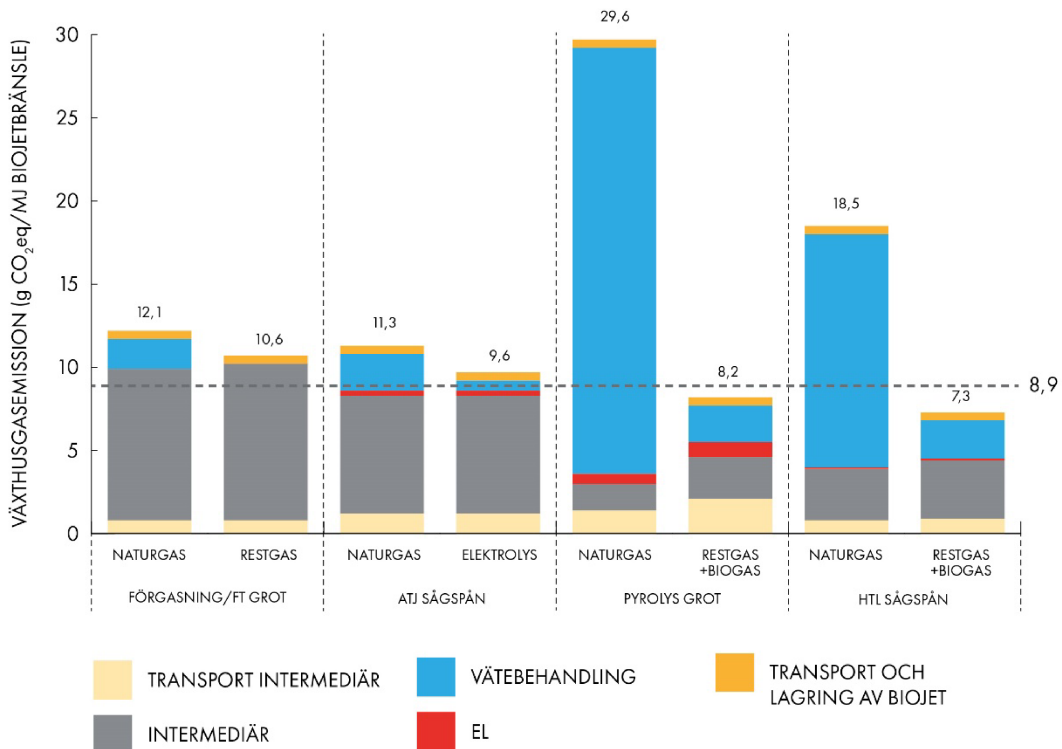
I Figur 4 visas utsläppen för några exempel på decentraliserad produktion av intermediärer från grot eller sågspån. Utsläppen från råvaruhantering- och transport är högre för grot än för sågspån, vilket främst beror på energiåtgång i grothantering i skogen. Förgasning följt av FT-syntes ger högst emissioner för intermediären, huvudsakligen på grund av det lägre produktutbytet (Figur 3). Vid pyrolys krävs inga tillsätsor, och detta i kombination med högt produktutbyte ger låg emission för intermediären. Detsamma gäller för HTL. Här är dock osäkerheten i befintliga indata högre.



Figur 4. Växthusgasemissioner per MJ intermediär.

Uppgradering till jetbränslen och andra drivmedel

Uppgraderingen antas ske centraliserat, och i Figur 5 visas den sammantagna emissionen per MJ biojetbränsle. För att illustrera vätgasbehovets inverkan på resultatet visas ett exempel där vätgasen produceras genom ångreformering av fossil naturgas, och ett där vätgasproduktionen är fossilfri. Alla produktionskedjor kan ge biojetbränsle där växthusgasemissionerna ligger nära visionen om 90 % lägre emissioner än fossila jetbränslen.



Figur 5. Växthusgasemissioner per MJ biojetbränsle.

För förgasning/FT och ATJ härrör huvuddelen av utsläppen från produktionen av intermediären, medan högt vätgasbehov vid uppgradering kan ge höga emissioner för pyrolys och HTL. Den restgas som bildas som en biprodukt i uppgraderingen (Figur 3) kan dock ersätta hela (förgasning/FT) eller delar av behovet av naturgas. För pyrolys och HTL blir en sådan processintern användning av restgasen en förutsättning för låga emissioner. Mellan 90 % (pyrolys) och 50 % (HTL) av naturgasen i ångreformeringsprocessen kan ersättas, resten har i exemplet med fossilfri vätgasproduktion i Figur 5 antagits ersatts med biogas. För ATJ visas ett exempel där vätgasen produceras genom elektrolys.

För pyrolys och HTL är data kring uppgraderingen baserade på nordamerikanska studier i pilotskala (van Dyk och Saddler, 2021) vilket innebär att de är behäftade med större osäkerhet. Den pågående forskningen kring och kommersialiseringen av dessa produktionskedjor är därför mycket viktiga för ökad kunskap.

Analys av de ekonomiska förutsättningarna för biojetbränslen

I denna delstudie genomfördes en litteraturstudie av produktionskostnader för biojetbränsle och betalningsviljan undersöktes för biojetbränsle inom ramen för reduktionsplikten (Se manus i Bilaga 4).

Kostnaden för att producera biojetbränsle varierar kraftigt beroende på vilken råvara och produktionsteknik som används. I Figur 6 sammanfattas resultatet av en litteraturstudie som genomförts inom ramen för det här projektet. För HEFA och biojetbränslen som produceras genom FT-syntes och pyrolys uppgår produktionskostnaden till omkring 10-20 kr/liter. För ATJ och HTL ligger kostnaderna på 10-35 kr/liter. De olika studierna baseras på en rad olika antaganden, bland annat kring val av råvara. Generellt befinner sig kostnaden i den nedre delen av intervallet om produktionen baseras på avfall samt etanol från sockerrör och majs, medan kostnaderna är något högre om produktionen baseras på restprodukter från jord- och skogsbruk så som halm och flis. Med undantag för HEFA, som bygger på tämligen väl etablerad teknik, kan intervallens storlek även förklaras av osäkerheter i data då produktionen av biojetbränsle ännu är mycket begränsad.

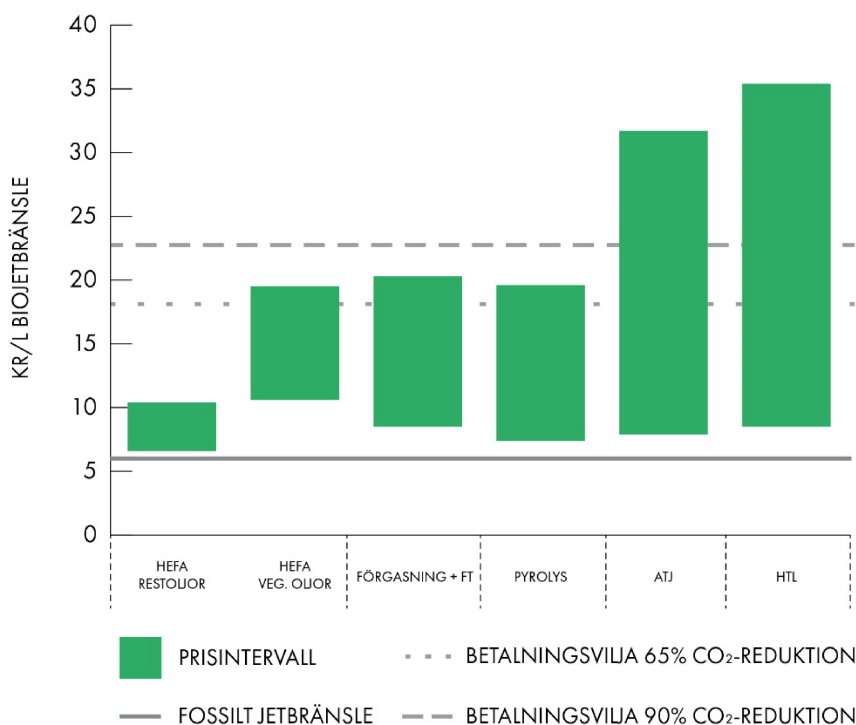
En jämförelse av kostnadsstrukturen för olika produktionskedjor visar att kostnaden för HEFA i stor utsträckning består av råvarukostnader och rörliga driftskostnader. För övriga produktionskedjor står kapitalkostnaderna för en betydligt större del av den totala produktionskostnaden. Här bedöms det också vara en större osäkerhet i redovisade litteratordata. Framöver, i takt med ökade produktionsvolymerna och ökat kunnande, bedöms produktionskostnaderna för framför allt de kapitalintensiva produktionskedjorna kunna minska. Det bör också noteras att produktionskostnaden inte nödvändigtvis avspeglas i marknadspriset som bland annat beror på tillgång och efterfrågan på biojetbränsle men också på konkurrens med till exempel vägtransportsektorn.

I Figur 6 visas också priset på fossilt jetbränsle som här satts till 6 kr/liter. Priset på fossilt jetbränsle har emellertid varierat avsevärt under de senaste tio åren eftersom det följer priset på råolja. Dagens marknadspris innebär dock att biojetbränslen är avsevärt dyrare än fossilt jetbränsle. Så länge som flygbolagen inte ser det som affärsmässigt att använda dessa dyrare bränslen krävs det därför styrmedel för att öka betalningsviljan och därmed också användningen. Ett sådant styrmedel är den svenska reduktionsplikten.

Reduktionsplikten ökar betalningsviljan

Som nämnts tidigare har Sverige sedan den 1 augusti 2021 implementerat en reduktionsplikt för jetbränsle som i korthet innebär att bränsleleverantörerna måste reducera emissionerna av växthusgaser som bränslet ger upphov till genom inblandning av biojetbränsle. Leverantörer som inte uppfyller reduktionsplikten åläggs en avgift på 6 kr per kg CO₂eq, vilket i praktiken skapar ett pristak för biojetbränsle.

Reduktionspliktens utformning gör att betalningsviljan för biojetbränsle blir högre ju större växthusgasreduktion det bidrar till. Med ett marknadspris på 6 kr/liter för fossilt jetbränsle beräknas betalningsviljan för biojetbränsle som reducerar växthusgasemissionerna med 90 % vara drygt 22 kr/liter. Om växthusgasreduktionen endast uppgår till 65 % sjunker betalningsviljan till 18 kr/liter (Figur 6). Givet dessa värden är flertalet av de produktionssystem som återfunnits i litteraturen konkurrenskraftiga inom den svenska reduktionsplikten om de har en reduktionsnivå på minst 65%. Som beskrivits tidigare kan de produktionskedjor som undersökts i denna studie ge reduktionsnivåer på upp till 90 % och de bör därför vara mycket konkurrenskraftiga. Det bör också nämnas att det finns förslag om att främja biojetbränsle även på EU-nivå som i dagsläget fokuserar på avancerade drivmedel, dvs sådana som produceras från rest- och biprodukter (EU, 2021). I ett sådant system blir de svenska produktionskedjorna som undersökts i denna studie ännu mer attraktiva.



Figur 6. Produktionskostnader för olika biojetbränslen och betalningsviljan för dessa givet olika klimatprestanda samt marknadspriset för fossilt jetbränsle.

Analys av potentialen för integrerad produktion av biojetbränslen i befintliga industrianläggningar

I denna delstudie undersöktes potentialen för integrerad produktion av biojetbränsle i befintliga industrianläggningar och dess systemeffekter (Se artikel i Bilaga 5).

Utformning av integrerade produktionskedjor

Sex integrerade produktionskedjor som visas med nummer 1-6 i Figur 2 studerades. Dessa inbegriper produktion av en intermediär vid en värданläggning, som är ett sågverk, kraftvärmeverk (KVV) eller sulfatmassabruk, följt av uppgradering vid ett raffinaderi. Valet av råvara till varje produktionskedja samt kriterierna för värdanläggningarna sammanfattas i Tabell 1. För varje produktionskedja uppskattades den svenska produktionspotentialen, nettobehovet av biomassa och behovet av vätgas. För varje produktionskedja utformades ett typfall som karaktäriseras av effektivt utnyttjande av biprodukter och restflöden och bibehållen produktion av fjärrvärme, sågat trä eller pappersmassa. Dessa typfall tillämpades sedan på summan av identifierade värdanläggningar (se kriterier i Tabell 1). De befintliga raffinaderiernas kapacitet beaktades inte i potentialuppskattningen eftersom uppgraderingen där kan handla om samlokalisering med delning av viss infrastruktur.

Tabell 1. De sex studerade produktionskedjorna (figur) för integrerad produktion av biojetbränsle och kriterier för värdanläggningarna.

Nr.	Råvara	Process	Värdanläggning
1	Sågspån	Pyrolys	Sågverk > 200 000 m ³ sågat trä/år. Nyttjar eget sågspån.
2	Sågspån	ATJ	Sågverk > 400 000 m ³ sågat trä/år och med tillgång till 0,2 miljoner ton sågspån i närområdet.
3	Grot	Pyrolys	Kraftvärmeverk > 280 GWh biomassa input/år i dag.
4	Grot	FT-syntes	Kraftvärmeverk > 560 GWh biomassa input/år i dag.
5	Grot	HTL	Sulfatmassabruk > 200 000 ton torr pappersmassa/år.
6	Svartlut	Lignin-förvätskning	Sulfatmassabruk > 200 000 ton torr pappersmassa/år.

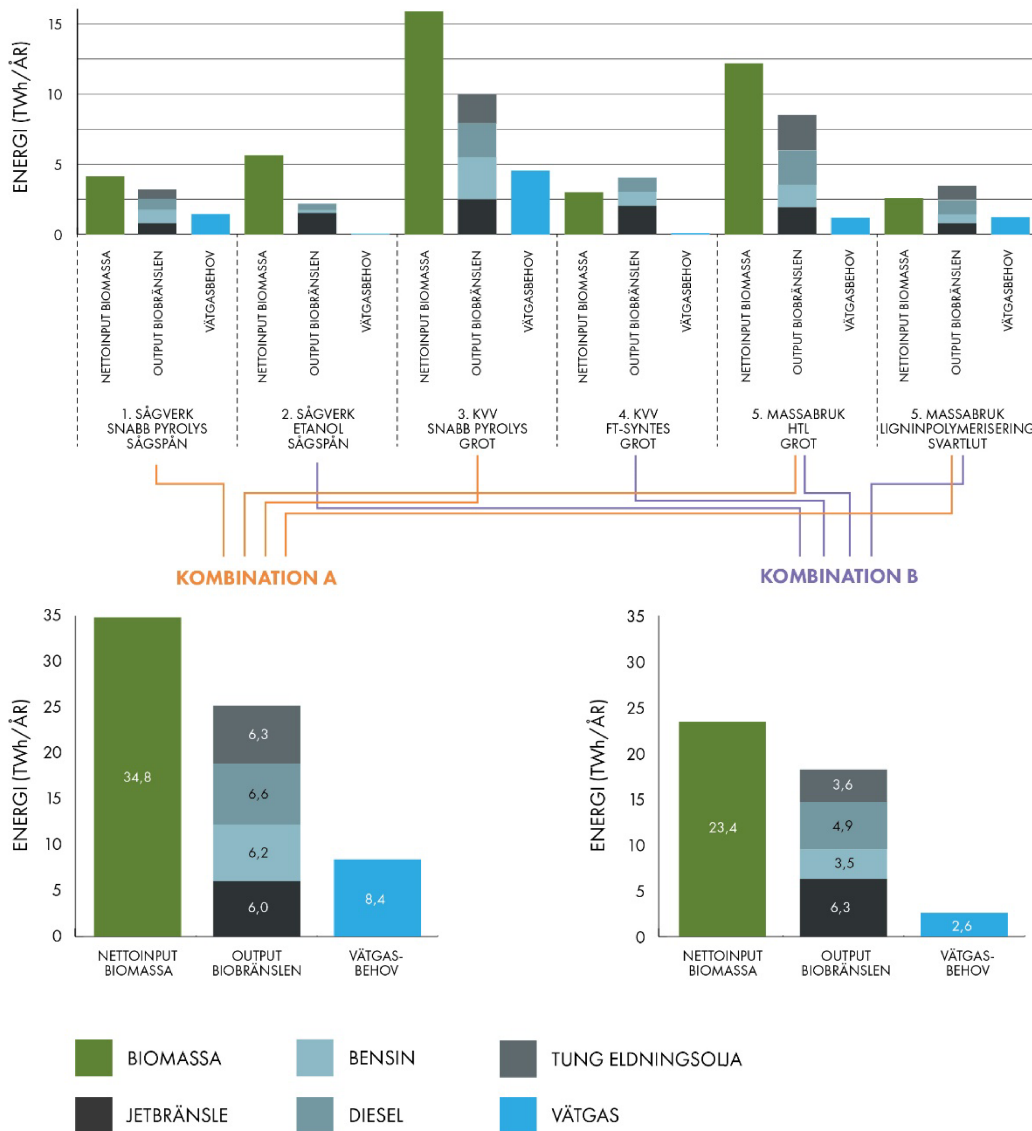
Produktionspotential och behov av biomassa och vätgas

Resultaten för de sex integrerade produktionskedjorna visas i Figur 7 där det framgår att det finns stora möjligheter för integrerad produktion av intermediär vid kraftvärmeverken och sulfatmassabruken. För vissa av dessa anläggningar överstiger produktionen av intermediär nettobehovet av biomassa, dvs den extra mängd biomassa som måste tillföras värdanläggningen efter att den har modifierats för samproduktion av intermediär. Samtidigt leder samproduktion av intermediär till ökad elanvändning och/ eller minskad elproduktion för värdanläggning (visas inte i figuren).

Vissa av produktionskedjorna är alternativa, d.v.s. de utnyttjar samma värdanläggningar eller biprodukt, medan andra är komplementära, för vilka resultaten kan adderas. Nedre halvan av Figur 7 visar resultaten för två alternativa kombinationer av produktionskedjor, där A inkluderar produktionskedjorna 1, 3, 5 och 6 och B inkluderar 2, 4, 5 och 6. De sammantagna resultaten visar på en årlig produktionspotential på upp mot 25 TWh drop-

in biobränslen (A), varav 6 TWh biojetbränslen. Detta överstiger vad som förväntas krävas för att uppfylla reduktionsplikten för biojetbränsle 2030, samtidigt som det sker betydande ökning av produktionen av biodrivmedel genom samproduktion av 6,6 TWh biodiesel och 6,2 TWh bio-bensin. (A). Nettobehovet av biomassa uppgår till 35 TWh (A), vilket är i samma storleksordning som den bedömda ökade potentialen för skogsbaserade råvara om 27-37 TWh/år kring 2030 (Figur 1).

Behovet av vätgas skiljer sig kraftigt mellan de olika produktionskedjorna och uppgår till som mest 8,4 TWh (A). Vätgasproduktionen från intern restgas kan dock bidra med delar av behovet (Figur 3), medan det resterande behovet måste produceras från externa energikällor såsom el eller naturgas/biogas.



Figur 7. Produktionspotentialen, nettobehovet av biomassa och vätgasbehovet för de sex studerade produktionskedjorna (överst) samt för två alternativa kombinationer (nederst).

Syntesrapport

I slutet av projektet gjordes en sammanfattande rapport av lite mer populärvetenskaplig karaktär (se Bilaga 6).

Diskussion

Flyget är en av de svåraste sektorerna att hantera i klimatomställningen och där omställningen hittills har varit begränsad. Detta beror dels på tekniska utmaningar och höga kostnader och dels på flygets internationella karaktär med internationella konventioner. Vi har i det här projektet fokuserat på omställningen från fossilt jetbränsle till biojetbränsle med syftet att undersöka förutsättningarna för svensk produktion av biojetbränsle baserat på rest- och biprodukter från skogen. Reduktionsplikten för jetbränsle som infördes 2021 har utgjort en viktig referensram i projektet.

Vår kartläggning visar att tillförseln av hållbar skogsbaserad biomassa skulle kunna öka med cirka 27-37 TWh till 2030 och 34-45 TWh till 2050 genom ökad tillförsel av grot och att mer av skogsindustrins biprodukter kan bli tillgängliga som följd av energieffektivisering. Växthusgasberäkningarna visar att de undersökta produktionskedjorna ger stor klimatnytta, motsvarande 88-92 % lägre emissioner än fossila jetbränslen. När intermediären produceras genom pyrolys eller HTL är det speciellt viktigt att uppgraderingen sker med fossilfri vätgas. Betalningsviljan för de undersökta biojetbränslena förväntas vara hög för den volym som krävs för att uppfylla reduktionsplikten eftersom klimatprestandan hos biojetbränslet avgör hur stor volym som måste blandas in. Vår litteraturstudie visar på produktionskostnader i intervallet 10-20 kr/liter biojetbränsle för HEFA och för biojetbränslen som produceras via FT-syntes och pyrolys samt 10-35 kr/liter för de som produceras via ATJ och HTL. Baserat på dagens reduktionsplikt beräknades betalningsviljan för ett biojetbränsle som reducerar växthusgasemissionerna med 90 % vara drygt 22 kr/liter, givet ett marknadspris på 6 kr/liter för fossilt jetbränsle. Betalningsviljan för de undersökta biojetbränslena baserat på skogsbiomassa förväntas således vara hög för den volym som krävs för att uppfylla reduktionsplikten. Om växthusgasreduktionen i stället uppgår till 65 % sjunker betalningsförmågan till 18 kr/liter.

Det finns en stor potential för integrerad produktion i befintlig industri, såsom skogsindustrin och kraftvärmeverken, vilket möjliggör effektivt resursutnyttjande. Potentialen för integrerad produktion av drop-in-biobränslen uppskattades till som mest 25 TWh/år, varav 6 TWh biojetbränsle, 6,6 TWh biodiesel och 6,2 TWh bio-bensin. Detta överstiger vad som förväntas krävas för att uppfylla reduktionsplikten för jetbränsle 2030 och innebär samtidigt ökad produktion av biobaserad diesel och bensin som i dag huvudsakligen baseras på importerad råvara. Nettobehovet av biomassa uppskattades då till cirka 35 TWh vilket motsvarar den potentiellt ökade tillförseln hållbar skogsbaserad biomassa. Behovet av vätgas skiljer sig kraftigt mellan de olika processvägarna och uppgår sammantaget till som mest 8,4 TWh. Det är osäkert hur mycket av denna vätgas som kan produceras från intern restgas och hur mycket som kräver produktion från el eller naturgas/biogas. För att tillgodose 30-100% av detta vätgasbehov med externa källor krävs 3,3-11 TWh biogas/naturgas eller 3,5-12 TWh el.

Trots att förutsättningarna för de studerade produktionskedjorna på många sätt är goda i Sverige så råder osäkerhet kring om och när det kommer att ske investeringar i svenska anläggningar. Ingen av de studerade produktionskedjorna är än så länge fullt kommersialiserade. Måluppfyllnaden inom reduktionsplikten förväntas därför inledningsvis ske genom ökad inblandning av HEFA, som är det enda fullt ut kommersialiserade biojetbränslet. Konkurrensen om HEFA och dess råvaror kan emellertid förväntas öka i takt med stigande krav på utsläppsminskningar för jetbränsle och diesel samt genom införanden av liknande styrmedel i andra länder. Detta talar till de studerade produktionskedjornas fördel.

Användningen av fossila bränslen ska i princip ha fasats ut till 2045. I det perspektivet är det tydligt att rest- och biprodukter från skogen utgör en begränsad resurs som vi behöver hushålla med. Det är därför angeläget att begränsa bränsleanvändningen inom både flyg- och vägtransporter genom effektivisering, elektrifiering där det är möjligt, och genom förändrade resmönster. För flygets del bör omställningen till biojetbränslen enbart utgöra en av komponenterna i klimatomställningen. En annan viktig komponent i omställningen är att minska resandet med flyg. En sådan strategi kan förordas i ett svenskt sammanhang med tanke på att svenskarna flyger mer än fem gånger så mycket som det globala genomsnittet (Naturvårdsverket, 2021). Den stora mängden utrikesresor och flygets internationella karaktär gör också att målsättningar och styrmedel för flyget i andra länder och inom internationella organ har stor betydelse på klimatpåverkan för svenskars flygresor. En positiv utveckling i det sammanhanget är att det nu även internationellt, t ex inom EU, diskuteras införandet av styrmedel för en ökad produktion och användning av förnybara jetbränslen.

Publikationslista

- 1 Börjesson, P. (2021) Potential för ökad tillförsel av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi - en uppdatering. Rapport Nr 121, Miljö-och energisystem, Lunds Universitet
- 2 Börjesson, P. (2021) Länsvis tillgång på skogsbiomassa för svensk biodrivmedels- och bioflygbränsleproduktion. Rapport Nr 122, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet.
- 3 Björnsson, L. & Ericsson, K. Emerging technologies for the production of biojetfuels from forestry residues - will greenhouse gas reduction meet European and Swedish policy requirements? *Manuskript, planeras skickas till Biomass conversion and biorefinery.*
- 4 Lantz, M. Biojetfuel in the Swedish policy framework: an economic assessment (*Manuskript*)
- 5 Ericsson, K. (2021) Potential for the Integrated Production of Biojet Fuel in Swedish Plant Infrastructures. *Energies*, 14, (20), 6531. <https://doi.org/10.3390/en14206531>
- 6 Ericsson K, Björnsson L, Börjesson P, Lantz M. (2021) Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen - sammanfattning av ett forskningsprojekt vid Lunds tekniska högskola. IMES/EESS rapport nr. 125, Miljö- och energisystem, Lunds universitet.

Referenser, källor

de Jong S., 2018. Green horizons – on the production costs climate impacts and future supply of renewable jet fuels [PhD thesis]. Utrecht University: Utrecht University.

Energimyndigheten, 2020. Energiläget 2020.

EU, 2021. Förslag om säkerställande av lika villkor för hållbar luftfart, COM/2021/561 final, Bryssel.

EU, 2018. Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2018/2001 av den 11 december 2018 om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor

IRENA, 2021. Reaching Zero with Renewables: Biojet Fuels. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

Naturvårdsverket, 2021. Flygets klimatpåverkan.

<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-konsumtionen/flygets-klimatpaverkan>. Besökt 2021-11-01.

SFS 2021:412, 2021. Lag om reduktion av växthusgasutsläpp från vissa fossila drivmedel.

SOU 2019:11, 2019. Biojet för flyget, Stockholm.

van Dyk, S., Saddler, J., 2021. Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. IEA Bioenergy Task 39.

Bilagor

1. Rapport: Potential för ökad tillförsel av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi - en uppdatering.
2. Rapport: Länsvis tillgång på skogsbiomassa för svensk biodrivmedels- och bioflygbränsleproduktion.
3. Artikelmanus: Emerging technologies for the production of biojetfuels from forestry residues - will greenhouse gas reduction meet European and Swedish policy requirements? "KÄNSLIG INFORMATION"
4. Artikelmanus: Biojetfuel in the Swedish policy framework: an economic assessment "KÄNSLIG INFORMATION"
5. Artikel: Potential for the Integrated Production of Biojet Fuel in Swedish Plant Infrastructures
6. Syntesrapport: Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen
7. Administrativ bilaga