



LUND UNIVERSITY

Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen

Sammanfattning av ett forskningsprojekt vid Lunds tekniska högskola

Ericsson, Karin; Björnsson, Lovisa; Börjesson, Pål; Lantz, Mikael

2021

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Ericsson, K., Björnsson, L., Börjesson, P., & Lantz, M. (2021). *Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen: Sammanfattning av ett forskningsprojekt vid Lunds tekniska högskola*. (EESS/IMES report series; Nr. Rapport 125). Miljö- och energisystem, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:

4

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

KARIN ERICSSON, LOVISA BJÖRNSSON, PÅL BÖRJESSON, MIKAEL LANTZ

SYSTEMPERSPEKTIV PÅ SVENSK PRODUKTION AV BIOJETBRÄNSLEN

SAMMANFATTNING AV ETT FORSKNINGSPROJEKT VID LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA



LUNDS
UNIVERSITET

Projektet "Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen" har genomförts 2019-2021 inom Energimyndighetens program "Hållbara biobränslen för flyg".

Här presenteras bakgrundsfakta, resultat och slutsatser som - om ingen annan källa anges - baseras på projektets vetenskapliga publikationer:

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 inskickat till Biomass conversion and biorefinery.*

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

Börjesson, P. (2021) Länsvis tillgång på skogsbiomassa för svensk biodrivmedels- och bioflygbränsleproduktion. Rapport Nr 122, Miljö- och energisystem, Lunds Universitet

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>

Lantz, M. Biojetfuel in the Swedish policy framework: an economic assessment (*Manuskript*)



Projektgruppen har bestått av Karin Ericsson (projektledare), Lovisa Björnsson, Mikael Lantz och Pål Börjesson från Miljö- och energisystem, Institutionen för teknik och samhälle, LTH Lunds universitet.

Projektet (projektnummer 48429-1) har finansierats av Energimyndigheten.



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

INSTITUTIONEN FÖR TEKNIK OCH SAMHÄLLE
MILJÖ- OCH ENERGISYSTEM
RAPPORT NR 125, NOVEMBER 2021

ISSN 1102-3651
ISRN LUTFD2/TFEM-- 21/3116--SE + (1-18)
ISBN 978-91-86961-51-0

© ERICSSON, BJÖRNSSON, BÖRJESSON & LANTZ 2021
FORMGIVNING OCH ILLUSTRATIONER JOHAN CEDERVALL

FOTO FRAMSIDA: ADOBE STOCK / FRANCESCO ROCCA/ EREEM
FOTO BAKSIDA: PIXABAY

SVENSK PRODUKTION AV BIOJETBRÄNSLEN

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 landet¹. Omkring hälften av flygets klimatpåverkan orsakas av växthusgasutsläpp från förbränning av bränsle och andra hälften av så kallade höghöjdseffekter som beror på förbränning på hög höjd, vilka är särskilt stora vid längre utrikesresor.

Flyget är i dag helt beroende av fossilt jetbränsle. Ett sätt att minska flygets klimatpåverkan är att ersätta fossilt jetbränsle med förnybara bränslen vilket leder till minskade utsläpp av växthusgaser. I detta projekt har vi fokuserat på biojetbränsle, förnybart jetbränsle producerat från biomassa. Biojetbränsle anses vara det mest aktuella förnybara alternativet på kort- och medellång sikt² och omställningen till biojetbränslen är möjlig inom ramen för den befintliga flygflottan. För att påskynda omställningen infördes en reduktionsplikt för jetbränslen i Sverige år 2021 vilket innebär att bränsleleverantörerna blir skyldiga att årligen öka inblandningen av biojetbränsle i det fossila jetbränslet. Liknande styrmedel diskuteras i flera andra länder och inom EU³.

Produktionen av biojetbränsle är i dag mycket begränsad och svarar för endast 0,04 % av den globala användningen av jetbränsle⁴. Dagens biojetbränsle domineras av HEFA⁵, vegetabiliska och animaliska oljor och fetter som omvandlas med kommersiell produktionsteknik. Dessa rest- och avfallsprodukter är dock begränsade och vissa 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 skogsindustriplanläggningar. Detta tillsammans skapar goda förutsättningar för att utveckla och expandera produktion av biojetbränsle i Sverige, vilket beskrivs i detta forskningsprojekt.

Projektets syfte har varit 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 industriplanläggningar i Sverige.

1 NATURVÅRDSVERKET. FLYGETS KLIMATPÅVERKAN. [HTTPS://WWW.NATURVARDSSVERKET.SE/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCHE-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN](https://www.naturvardsverket.se/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCHE-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN)

2 VAN DYK, S., SADDLER, J., 2021. PROGRESS IN COMMERCIALIZATION OF BIOJET/SUSTAINABLE AVIATION FUELS (SAF): TECHNOLOGIES, POTENTIAL AND CHALLENGES. IEA BIOENERGY TASK 39.

3 EUROPEAN COMMISSION, 2021. PROPOSAL FOR A REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL ON ENSURING A LEVEL PLAYING FIELD FOR SUSTAINABLE AIR TRANSPORT. BRUSSELS.

4 IRENA. REACHING ZERO WITH RENEWABLES: BIOJET FUELS. ABU DHABI: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. 2021.

5 HEFA STÅR FÖR HYDROPROCESSED ESTERS AND FATTY ACIDS.

BIOBRÄNSLEN INOM FLYGET OCH VÄGTRANSPORTER

SAMPRODUKTION AV DROP-IN BIOBRÄNSLEN

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 och målsättningar kopplat till dessa är därför också relevant att belysa i detta sammanhang.

ANVÄNDNING AV BIOBRÄNSLEN I DAG

Mängden jetbränsle som tankades i Sverige 2019 uppgick till 12,3 TWh, varav 1,9 TWh användes för inrikestrafik. Användningen av biojetbränsle var försumbar. Inom vägtransportsektorn användes 20,1 TWh biodrivmedel 2019, varav 89 % baserades på importerad råvara⁶. Användningen av biodrivmedel dominerades av den förnybara dieseln HVO⁷, vilken produceras från vegetabiliska och animaliska oljor och fetter i väsentligen samma process som HEFA.

KLIMATMÅL OCH DEN SVENSKA REDUKTIONSPLIKTEN

Senast 2045 ska Sverige ha nettonollutsläpp av växthusgaser, vilket innebär att användningen av fossila bränslen och råvaror i princip ska ha fasats ut. För vägtransporter finns ett delmål om att utsläppen av växthusgaser ska ha minskat med 70 % fram till 2030 jämfört med 2010. För att bidra till uppfyllandet av detta mål infördes 2018 en reduktionsplikt för bensin och diesel. För diesel ska utsläppen successivt minska med 66 % och för bensin med 28 % till 2030. I juli 2021 utvidgades reduktionsplikten till att även omfatta allt jetbränsle som tankas i Sverige för såväl inrikes som utrikes resor⁸. Utsläppen som regleras via reduktionsplikten motsvarar 1/3 av klimatpåverkan (inklusive höghöjdseffekter) för svenskarnas flygresor⁹.

Reduktionsplikten för jetbränsle innebär att utsläppen av växthusgaser från förbränningen ska minska successivt med upp till 27 % per energimängd jetbränsle till 2030⁸. 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)¹⁰. Utformningen av styrmedlet innebär att klimatprestandan hos biojetbränslet avgör hur stor volym som krävs för att uppfylla reduktionsplikten. Klimatprestandan påverkar därigenom också betalningsviljan.

⁶ ENERGI MYNDIGHETEN, 2021. ENERGI LÄGET I SIFFROR 2021.

⁷ HVO STÅR FÖR HYDROGENATED VEGETABLE OIL

⁸ SFS 2021:412, 2021. LAG OM REDUKTION AV VÄXTHUSGASUTSLÄPP FRÅN VISSA FOSSILA DRIVMEDEL

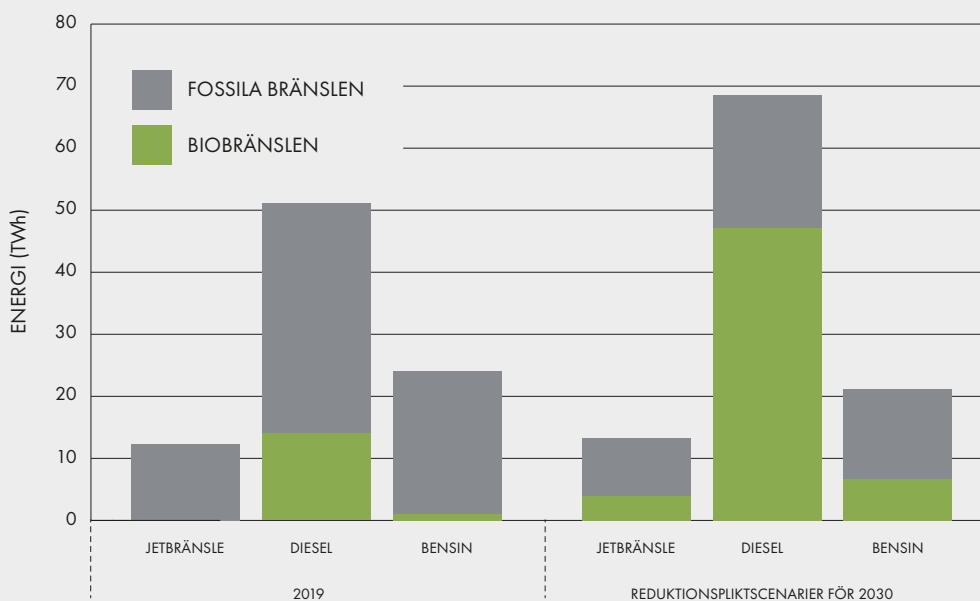
⁹ NATURVÅRDSVERKET. FLYGETS KLIMATPÅVERKAN. [HTTPS://WWW.NATURVARDSVERKET.SE/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCH-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN](https://www.naturvardsverket.se/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCH-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN)

¹⁰ EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 AV DEN 11 DECEMBER 2018 OM FRÄMJANDE AV ANVÄNDNINGEN AV ENERGI FRÅN FÖRNYBARA ENERGI KÄLLOR

SCENARIER FÖR 2030

Figur 1 visar scenarier för hur mycket biojetbränsle och biodrivmedel som skulle kunna krävas för att uppfylla reduktionsplikten för respektive bränsle år 2030, dvs utsläppsminskningar på 27 % för jetbränsle, 66 % för diesel och 28 % för bensin. Scenarierna utgår från antaganden om exempelvis framtida trafik- och resvolym, fordonsteknik och klimatprestanda hos bränslena. Scenariot för flyget visar på ett behov av cirka 4 TWh biojetbränsle 2030¹¹, vilket utgår från 30 % inblandning. 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). För vägtransporter antas en ganska blygsam spridning av elbilar fram till 2030, vilket förklarar den stora användningen av framför allt diesel i scenariot för 2030. På längre sikt förväntas elektrifieringen av fordon och förändrade resvanor minska användningen av bensin och diesel.

FIGUR 1. ANVÄNDNING AV BIO- OCH FOSSILBASERAT JETBRÄNSLE, DIESEL OCH BENSIN I SVERIGE 2019¹² OCH FÖR SCENARIER^{11,13} FÖR 2030 DÄR MÅLEN OM UTSLÄPPSMINSKNINGAR UPPFYLLS FÖR RESPEKTIVE BRÄNSLE



VAD KARAKTÄRISERAR JETBRÄNSLE?

Jetbränsle utgörs av olika slags kolväten, framför allt paraffiner och iso-paraffiner, men också en reglerad mängd aromater (8-25% efter inblandning). Kolvätena i jetbränsle ligger inom spannet 7-17 kolatomer, vilket överlappar med diesel (12-20 kolatomer) och bensin (4-12). Utbytet av jetbränsle påverkar således utbytet av bensin och diesel, och tvärtom, vid destillering av (bio)olja.

¹¹ SOU 2019:11, 2019. BIOJET FÖR FLYGET, STOCKHOLM.

¹² ENERGI MYNDIGHETEN, 2021. ENERGI LÄGET I SIFFROR 2021.

¹³ ENERGI MYNDIGHETEN, 2019. KOMPLETTERING TILL KONTROLLSTATION 2019 FÖR REDUKTIONSPLIKTEN.

REGIONAL TILLGÅNG PÅ SKOGSRÅVARA

De skogsråvaror som framför allt bedöms vara tillgängliga för biojetbränsleproduktion i framtiden utgörs av olika rest- och biprodukter. I detta projekt har uppdaterade regionala analyser genomförts 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 II¹⁴, 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 TWh¹⁵. Drygt 50 % av potentialen utgörs av grot från förnygringsavverkning medan biprodukter inom skogsindustrin utgör 25-30 % och 15-20 % utgörs av klen och skadad rundved.

EKOLOGISKA HÄNSYN

Uttaget av grot sker vid förnygringsavverkning på produktiv skogsmark i Sverige. Förutom att drygt en fjärdedel av grotten 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 om-allokeringar där dessa frigörs genom att de ersätts av t ex bark och grot för process- och fjärrvärmeproduktion.

14 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 AV DEN 11 DECEMBER 2018 OM FRÄMJANDE AV ANVÄNDNINGEN AV ENERGI FRÅN FÖRNYBARA ENERGIKÄLLOR

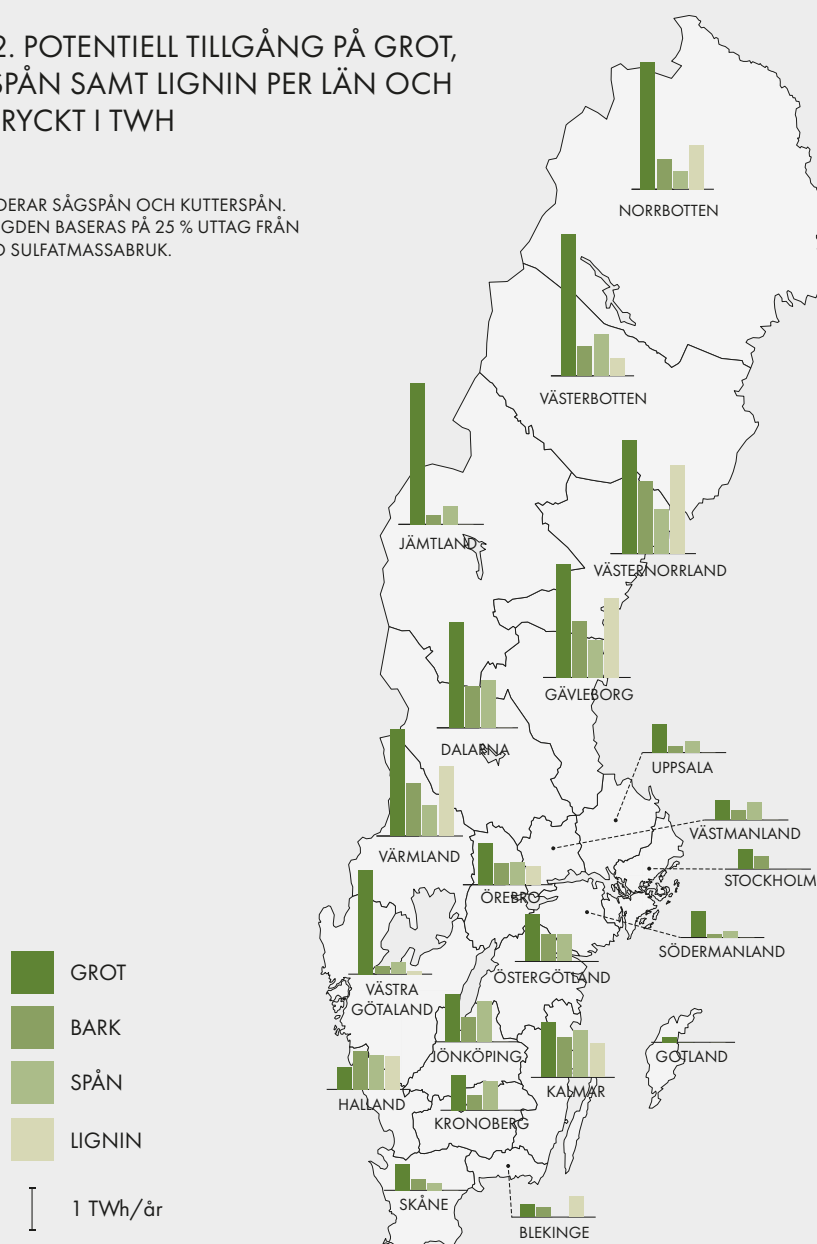
15 ENERGIMYNDIGHETEN, 2020. ENERGIÅRET 2020.

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 (se Figur 2) och där dessutom densiteten, d v s tillgång per yta, är hög vilket minimerar transportavstånd. Speciellt lämpliga områden för lokalisering av storskaliga och kostnadseffektiva produktionsanläggningar för biojetbränslen är t ex Västernorrland, Gävleborg, Värmland och östra Småland samt Norrbottens och Västerbottens kustområde.

FIGUR 2. 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.



PRODUKTIONSKEDJOR – OMVANDLING OCH UPPGRADERING

STUDERADE PRODUKTIONSKEDJOR

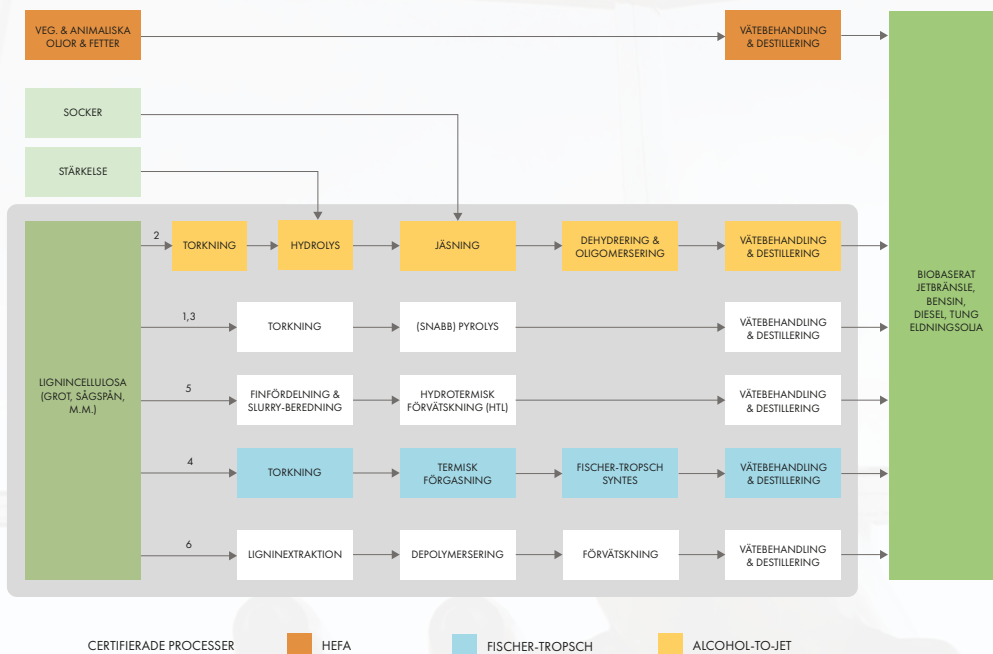
Biojetbränsle kan produceras via olika produktionskedjor. I Figur 3 ges en översiktlig bild över de studerade produktionskedjorna med skogsbiomassa som råvara, samt den för HEFA. Produktionskedjorna som baseras på skogsbiomassa involverar produktion av cellulosa-baserad etanol via den sk Alcohol-to-jet (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 biomassan omvandlas biomassan 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 cellulosa-baserad ATJ befinner sig på demonstrationsstadiet. Mognadsgraden bedöms vara lägst för depolymerisering och förvätskning av lignin som befinner sig på pilot-stadiet. 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 3. ÖVERSIKT ÖVER DE STUDERADE PRODUKTIONSKEDJORNA (GRÅ RUTA) FÖR BIOJETBRÄNSLE¹⁶



NUMRERINGEN AVSER DE SEX STUDERADE INTEGRERADE PRODUKTIONSKEDJORNA SOM BEHANDLAS PÅ S. 14-15.

¹⁶ BILDEN ÄR BEARBETAD FRÅN: DE JONG, S., 2018. GREEN HORIZONS – ON THE PRODUCTION COSTS CLIMATE IMPACTS AND FUTURE SUPPLY OF RENEWABLE JET FUELS, COPERNICUS INSTITUTE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT. UTRECHT UNIVERSITY, UTRECHT UNIVERSITY.

PRODUKTIONSKEDJOR – ENERGIINSATS OCH PRODUKTUTBYTE

ENERGIINSATS

Energiinsatser och produktutbyten för några av de studerade omvandlingsteknikerna visas i Figur 4. Figuren visar utbyten samt insatt processenergi, vätgas och transporter i relation till insats av 100 GWh sågspån eller grot.

Produktionen av intermediär som visas i Figur 4 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 8.

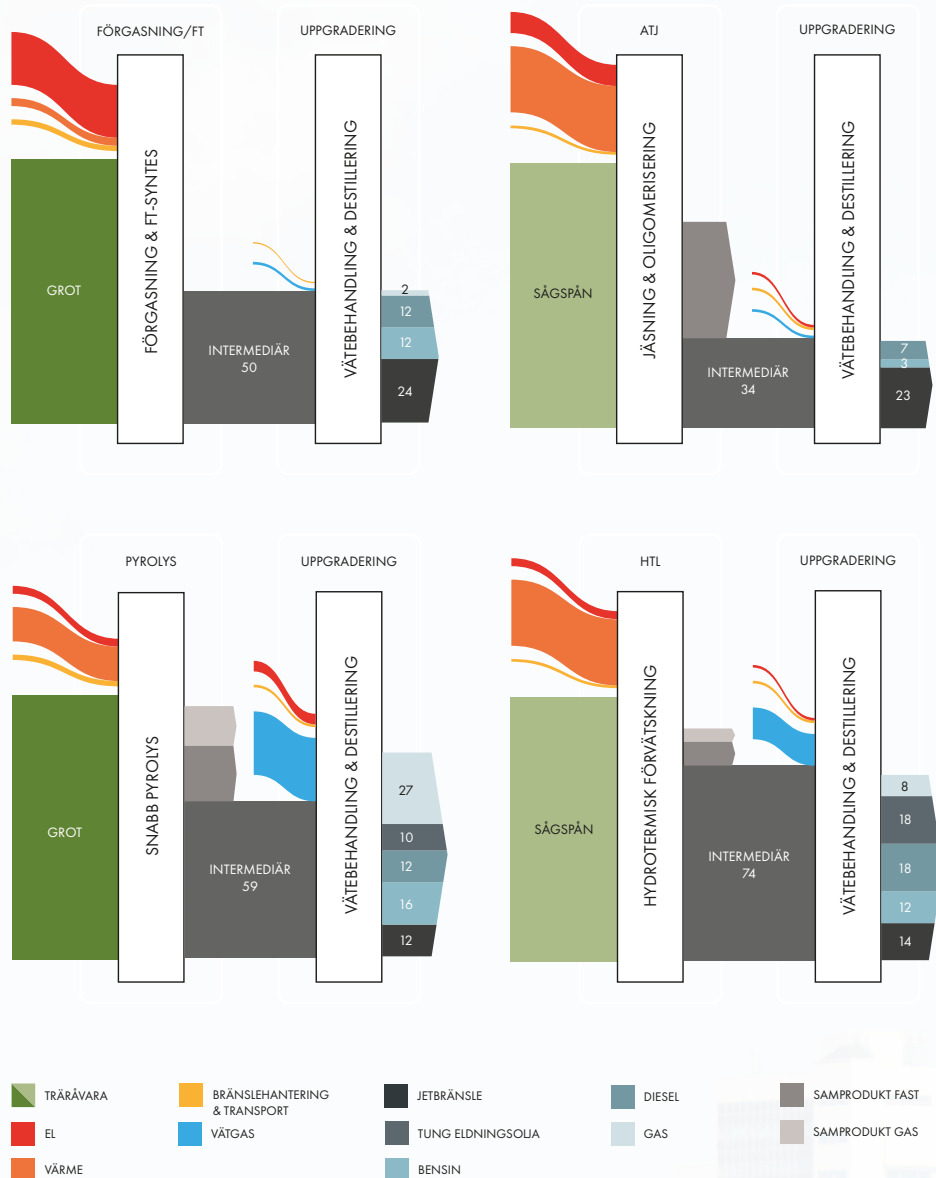
PRODUKTUTBYTE

Utbytena som anges i Figur 4 utgår från att produktionen av biojetbränsle är prioriterad på bekostnad framför allt diesel och används i växthusgasberäkningarna på s. 10-11 och i potentialuppskattningarna för integrerad produktion på s. 14-15.

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 4 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.

FIGUR 4. ENERGIBEHOV 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.

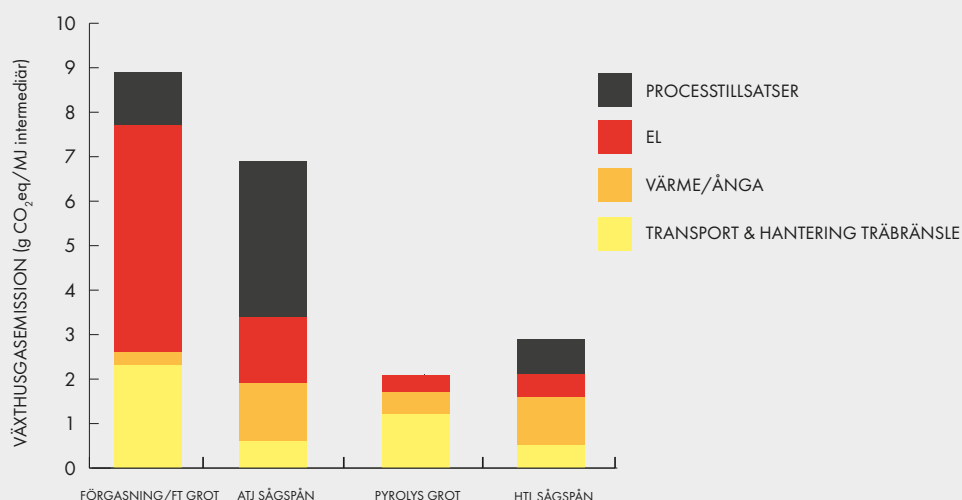
MATCHAR VÄXTHUSGAS-UTSLÄPPEN VISIONEN?

Att biojetbränslebehovet kan begränsas till 4 TWh 2030 (Figur 1) bygger på att växthusgasemissionen ligger under 10 g CO₂eq per MJ¹⁷. Den goda svenska tillgången på rest- och biprodukter från skogen (Figur 2) 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 II¹⁸. Tillförd energi medför emissioner, liksom processtillätsatser 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 energiflöden som visas i Figur 4, där restflöden förblir oanvända.

DECENTRALISERAD PRODUKTION AV INTERMEDIÄRER

I Figur 5 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 4). Vid pyrolys krävs inga tillsatser, 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 5. VÄXTHUSGASEMISSIONER PER MJ INTERMEDIÄR



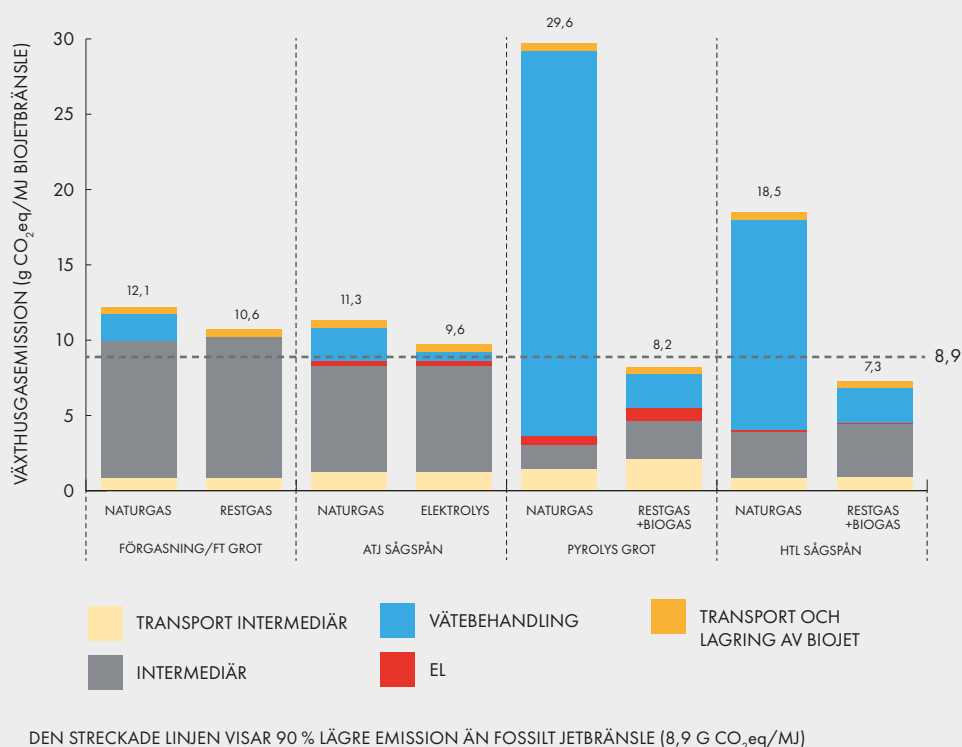
17 SOU 2019:11. BIOJET FÖR FLYGET, MILJÖ- OCH ENERGIDEPARTEMENTET STOCKHOLM.

18 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV (EU) 2018/2001 AV DEN 11 DECEMBER 2018 OM FRÄMJANDE AV ANVÄNDNINGEN AV ENERGI FRÅN FÖRNYBARA ENERGIKÄLLOR

UPPGRADERING TILL JETBRÄNSLEN OCH ANDRA DRIVMEDEL

Uppgraderingen antas ske centraliserat, och i Figur 6 visas den sammantagna emissionen per MJ biojetbränsle. För att illustrera vätgasbehovets inverkan på resultatet visas ett exempel där vätgasen produceras genom ångreforming 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 6. 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 4) 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 ångreforming kan ersättas, resten har i exemplet med fossilfri vätgasproduktion i Figur 6 antagits ersättas 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 pilot-skala¹⁹ 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.

¹⁹ VAN DYK, S. & SADDLER, J. 2021. PROGRESS IN COMMERCIALIZATION OF BIOJET/SUSTAINABLE AVIATION FUELS (SAF): TECHNOLOGIES, POTENTIAL AND CHALLENGES, IEA BIOENERGY TASK 39

ÄR BIOJETBRÄNSLEN KONKURRENSKRAFTIGA?

PRODUKTIONSKOSTNAD FÖR BIOJETBRÄNSLEN

Kostnaden för att producera biojetbränsle varierar kraftigt beroende på vilken råvara och produktionsteknik som används. I Figur 7 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.

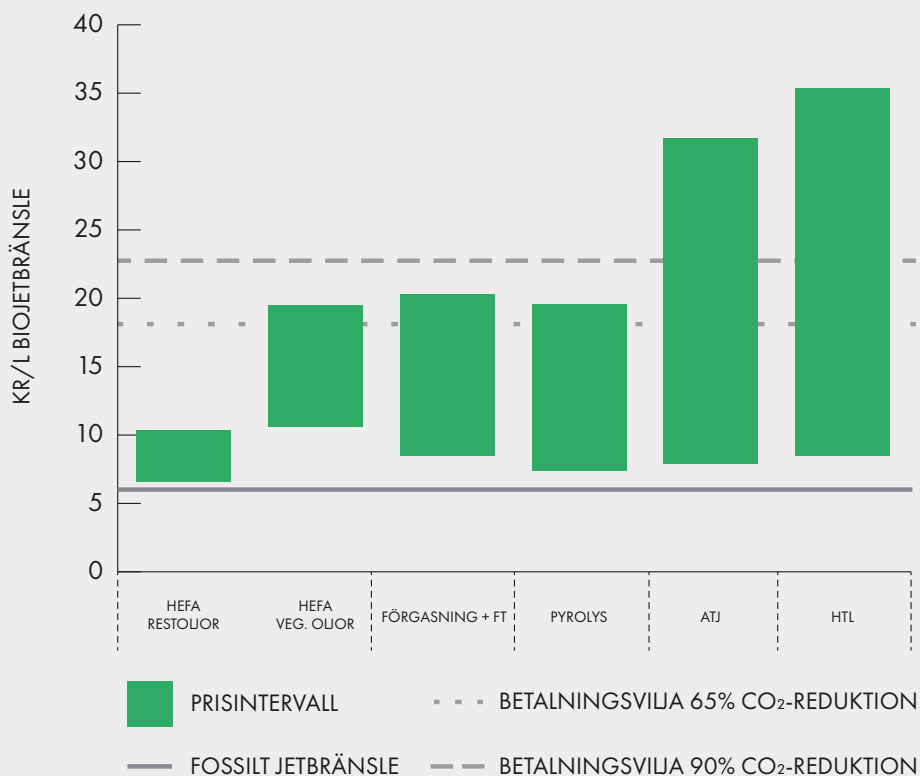
I Figur 7 visas också priset på fossilt jetbränsle som här satts till 6 kr/liter. Priset på fossilt jetbränsle har emellertid varierat avsevärt under de senaste tio åren eftersom det följer priset på råolja. Dagens marknadspris innebär dock att biojetbränslen är avsevärt dyrare än fossilt jetbränsle. 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 beskrivits 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 7). 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. I ett sådant system blir de svenska produktionskedjorna som undersökts i denna studie ännu mer attraktiva.

FIGUR 7. PRODUKTIONSKOSTNADER FÖR OLIKA BIOJETBRÄNSLEN OCH BETALNINGSVILJAN FÖR DESSA GIVET OLIKA KLIMATPRESTANDA SAMT MARKNADSPRISET FÖR FOSSILT JETBRÄNSLE



INTEGRERAD PRODUKTION AV BIOJETBRÄNSLE

UTFORMNING AV INTEGRERADE PRODUKTIONSKEDJOR

I projektet studerades sex integrerade produktionskedjor som visas med nummer 1-6 i Figur 3. Dessa inbegriper produktion av en intermediär vid en värdanläggning, 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 3) FÖR INTEGRERAD PRODUKTION AV BIOJETBRÄNSLE OCH KRITERIER FÖR VÄRDANLÄGGNINGARNA

NR	RÅVARA	PROCESS	VÄRDANLÄGGNING
1	SÅGSPÅN	PYROLYS	SÅGVERK > 200 000 M3 SÅGAT TRÄ/ÅR. NYTTJAR EGET SÅGSPÅN.
2	SÅGSPÅN	ATJ	SÅGVERK > 400 000 M3 SÅGAT TRÄ/ÅR OCH MED TILLGÅNG TILL 0,2 MILJONER TON SÅGSPÅN I NÄROMRÅDET
3	GROT	PYROLYS	KRAFTVÄRMEVERK > 280 GWH BIOMASSAINPUT/ÅR IDAG
4	GROT	FT-SYNTES	KRAFTVÄRMEVERK > 560 GWH BIOMASSAINPUT/ÅR IDAG
5	GROT	HTL	SULFATMASSABRUK > 200 000 TON TORR PAPPERSMASSA/ÅR
6	SVARTLUT	LIGNIN-FÖRVÄTSKNING	SULFATMASSABRUK > 200 000 TON TORR PAPPERSMASSA/ÅR

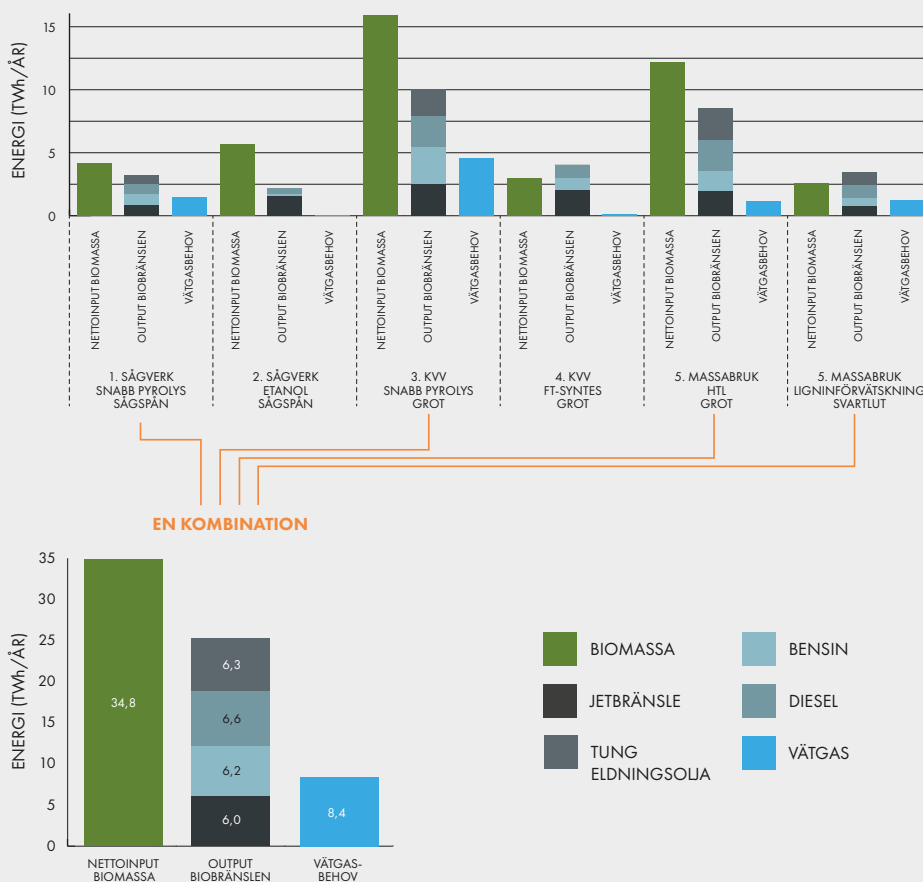
PRODUKTIONSPOTENTIAL OCH BEHOV AV BIOMASSA OCH VÄTGAS

Resultaten för de sex integrerade produktionskedjorna visas i Figur 8 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 värdeanläggningar eller biprodukt, medan andra är komplementära, för vilka resultaten kan adderas. Nedre halvan av Figur 8 visar resultaten för en möjlig kombination av produktionskedjor som inkluderar produktionskedjorna 1, 3, 5 och 6. Den sammantagna produktionspotentialen uppgår till upp mot 25 TWh drop-in biobränslen, varav 6 TWh biojetbränsle. 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. Netto behovet av biomassa uppgår till 35 TWh, vilket är i samma storleksordning som den ökade potentialen för skogsbaserade råvara om 27-37 TWh/år kring 2030 som beskrivits tidigare.

Behovet av vätgas skiljer sig kraftigt mellan de olika produktionskedjorna och uppgår till 8,4 TWh för kombinationen i Figur 8. Vätgasproduktionen från intern restgas kan bidra med delar av behovet (Figur 4), medan det resterande behovet måste produceras från externa energikällor.

FIGUR 8. PRODUKTIONSPOTENTIALEN, NETTOBEHOVET AV BIOMASSA OCH VÄTGASBEHOVET FÖR DE SEX STUDERADE PRODUKTIONSKEDJORNA (ÖVERST) SAMT FÖR EN MÖJLIG KOMBINATION (NEDERST)



SAMMANFATTNINGSVIS

Slutsatserna från detta projekt kan sammanfattas i följande 6 punkter:

- Tillförseln av hållbar skogsbaserad biomassa bedömdes kunna öka med cirka 27-37 TWh till 2030 och 34-45 TWh till 2050. Drygt 50 % av den ökade tillförselpotentialen utgörs av grot från föryngringsavverkning på produktiv skogsmark.
- För produktionskedjor där restvärme inte tas tillvara kan vi utvinna 30-60 % av energin i träråvaran som drop-in-biobränsle. Vid integrering med ett kraftvärmeverk eller ett massabruk kan energiutbytet teoretiskt överstiga 100 %, men medför samtidigt att elbalansen försämras något genom ökad elanvändning och/eller minskad elproduktion.
- 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.
- En litteratursammanställning 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. Om växthusgasreduktionen i stället uppgår till 65 % sjunker betalningsförmågan till 18 kr/liter.
- 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 uppskattades då till cirka 35 TWh vilket motsvarar den potentiellt ökade tillförseln hållbar skogsbaserad biomassa.

AVSLUTANDE 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. Den reduktionsplikt på jetbränsle som infördes 2021 har skapat förutsättningar att påbörja omställning mot biojetbränsle i Sverige. I projektet undersöktes ett antal produktionskedjor som utgår från rest- och biprodukter från skogen. Vår kartläggning visar att det finns potential för ökad tillförsel av grot och att mer av skogsindustriens biprodukter kan bli tillgängliga som följd av energieffektivisering. Dessutom visar våra beräkningar att de studerade produktionskedjorna kan ge biojetbränslen med mycket låga växthusgasutsläpp. Betalningsviljan för dessa bränslen förväntas vara hög för den volym som krävs för att uppfylla reduktionsplikten eftersom klimatprestandan hos biojetbränslet avgör hur stor volym som måste blandas in. Våra uppskattningar visar också på den stora potentialen för integrerad produktion i befintlig industri, såsom skogsindustrin och kraftvärmeverken, vilket möjliggör effektivt resursutnyttjande.

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 genomsnittet²⁰. 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.

20 NATURVÅRDSVERKET. FLYGETS KLIMATPÅVERKAN. [HTTPS://WWW.NATURVARDsverket.se/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCH-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN](https://www.naturvardsverket.se/AMNESOMRADEN/KLIMATOMSTALLNINGEN/OMRADEN/KLIMATET-OCH-KONSUMTIONEN/FLYGETS-KLIMATPAVERKAN)



LUNDS UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

INSTITUTIONEN FÖR TEKNIK
OCH SAMHÄLLE
MILJÖ- OCH ENERGISYSTEM
[HTTP://MILJO.LTH.SE/](http://miljo.lth.se/)

RAPPORT NR 125, NOVEMBER 2021
ISSN 1102-3651
ISRN LUTFD2/TFEM-- 21/3116--SE + (1-18)
ISBN 978-91-86961-51-0
© ERICSSON, BJÖRNSSON, BÖRJESSON
& LANTZ 2021

