

Executive summary

FRAMTIDSSÄKRADE BIODRIVMEDEL FÖR VÄGTRANSPORTER OCH FLYG GENOM ÖKAD NYTTA FRÅN BIOGENT KOL

- Kol-, klimat- och kostnadseffektivitet

Mars 2022

Elisabeth Wetterlund, Yawer Jafri – Bio4Energy / Luleå tekniska universitet

Johan M. Ahlström, Erik Furusjö, Karin Pettersson – RISE Research Institutes of Sweden

Simon Harvey – Chalmers tekniska högskola

Elin Svensson – CIT Industriell Energi AB

Ett projekt inom

FÖRNYBARA DRIVMEDEL OCH SYSTEM 2018-2021

Ett samverkansprogram mellan Energimyndigheten och
f3 Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel

FÖRORD

Denna executive summary har skrivits gemensamt för två projekt inom samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system, projektnummer 48363-1 och 50482-1. Projekten har finansierats av Energimyndigheten och f3 – Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel.

Energimyndigheten arbetar på regeringens uppdrag med energiomställningen till ett modernt, hållbart, fossilfritt välfärdssamhälle och stödjer forskning om förnybara energikällor, smarta elnät och framtidens fordon och bränslen.

f3 är en nätverksorganisation som fokuserar på utveckling av miljömässigt, ekonomiskt och socialt hållbara förnybara drivmedel. f3 finansieras gemensamt av centrets parter och Västra Götalandsregionen. Chalmers Industriteknik fungerar som värd för centret. Kansliet vid f3 utgör programkansli för samverkansprogrammet Förnybara drivmedel och system. (se www.f3centre.se)

Ytterligare medel har erhållits från Bio4Energy, ett strategiskt forskningsområde utsett av den svenska regeringen.

Projektet har genomförts med stöd från våra industripartners, som varit en aktiv del av projektet. Deras erfarenhet och kunskap har varit värdefullt för projektet. I bokstavsordning:

Peter Axegård, C-Green
Andreas Gundberg, Lantmännen Agroetanol
Harri Heiskanen, Neste
Christian Hulteberg, SunCarbon
Conny Johansson, Stora Enso
Monica Normark, SEKAB
Ragnar Stare, Arvos Schmidtsche-Schack GmbH

Denna publikation ska citeras enligt följande:

Wetterlund, E., *et. al.*, (2022) *Framtidssäkrade biodrivmedel för vägtransporter och flyg genom ökad nytta från biogent kol – Kol-, klimat- och kostnadseffektivitet (Executive summary)*. Publ. nr FDOS 33:2022. Tillgänglig på <https://f3centre.se/sv/samverkansprogram/>

Projektens totala resultat presenteras i följande publikationer:

Jafri, Y., *et. al.*, (2022) *Future-proof biofuels through improved utilization of biogenic carbon – Carbon, climate and cost efficiency (k3)*. Report No FDOS 32:2022.

Ahlström, J., *et. al.*, (2022) *Climate-positive and carbon efficient bio-jet fuels, are they possible? – a systematic evaluation of potential and costs*. Report No FDOS 38:2022.

FRAMTIDSSÄKRA BIODRIVMEDEL – MINSKA SLÖSERIET MED GRÖNA KOLATOMER

Trots de omfattande satsningarna på elektrifiering och vätgas i transportsektorn kommer det inom överskådlig framtid finnas ett stort behov av kolbaserade bränslen som kan användas i olika typer av motorer, i väg-, flyg- och sjötransporter. I dagsläget är de kolbaserade bränslen som används till största delen fossilbaserade, men det finns ett stort antal teknikalternativ för att framställa flytande och gasformiga förnybara bränslen, främst från olika typer av bioråvaror.

I ett svenskt perspektiv finns den största råvarupotentialen i restprodukter från skogsbruk och skogsindustri, t.ex. grenar och toppar (grot), svartlut/lignin och sågspån. Tillgången på dessa råvaror är dock begränsad i jämförelse med de stora behov som uppkommer i takt med att både energi- och materialomställningen accelererar. Konkurrensen om förnybara kolatomer förväntas öka när alla sektorer samtidigt vill ersätta sina fossila råvaror, för att nå klimatmålen. Samtidigt skärps kriterierna för användande av olika bioråvaror, för att undvika konflikter med andra hållbarhets- och miljömål.

Idag pågår en intensiv debatt om klimatpåverkan av bioenergi och biobaserade produkter. Oavsett åsikt i frågan är det tveklöst att en högre substitutionseffekt, dvs. att en given mängd skördad eller insamlad bioråvara ersätter mer fossila råvaror, ökar klimatnyttan. Detsamma gäller om en viss mängd av kolet i råvaran lagras permanent genom så kallad koldioxidinfångning och -lagring (bio-CCS), jämfört med om det skulle hamnat i atmosfären inom ett kortare tidsperspektiv.

Biodrivmedelssektorn behöver därför förbereda sig för två sannolika framtidsspaningar:

1. Ökad efterfrågan på hållbara bioråvaror kommer kräva noggrann balansering av kommersiella och samhällseliga prioriteringar
2. ”Slöseri” av biogent kol kommer inte att vara gångbart.

Tekniker för omvandling och nyttiggörande av bioråvaror kan därför förväntas behöva ha ett högt kolutbyte för att vara legitima och konkurrenskraftiga i framtiden. Det kan åstadkommas genom negativa koldioxidutsläpp eller genom att använda koldioxid till att flerdubbla produktionen.

DAGENS OCH FRAMTIDENS TEKNIKER MED POTENTIAL

Denna studie har fokuserat på ett antal tekniker för produktion av biodrivmedel för vägtransporter och flyg, i syfte att undersöka både hur väl de idag utnyttjar råvarans biogena kol, och hur detta utnyttjande kan ökas genom komplettering med ny teknik. Fokus har varit på synergier och avvägningar mellan kol-, klimat-, och kostnadseffektivitet.

Vi har studerat femton produktionstekniker, både kommersiella och de som är på väg att kommersialiseras. Tabell 1 sammanfattar teknikerna.

Tabell 1. Produkter och produktionstekniker som inkluderats i studien. För varje teknik anges dess teknikmognad för vägtransporter respektive flyg.

	Produkt och produktionsteknik	Vägtransporter ^A	Flyg ^A
Rötning och fermentering	Etanol från sågspån – samt biojet via etanol-till-jet	Utveckling	Utveckling, cert.
	Etanol från vete – samt biojet via etanol-till-jet	Kommersiell	Utveckling, cert.
	Biojet från grot, via fermentering till isobutanol		Utveckling, cert.
	Biogas från matavfall och gödsel	Kommersiell	
	Biogas från avloppsslam	Kommersiell	
Vätebehandling	Drop-in drivmedel från grot via hydrotermisk förvätskning	Utveckling	
	Drop-in drivmedel från lignin	Utveckling	
	Drop-in drivmedel från grot via pyrolys	Utveckling	
	Drop-in drivmedel från grot via hydropyrolys	Utveckling	Utveckling
	Drop-in drivmedel ^B från tallolja	Kommersiell	
	Drop-in drivmedel ^B från slaktrester/talg	Kommersiell	Kommersiell, cert.
Förgasning	Drop-in drivmedel från svartlut via förgasning och metanol	Utveckling	
	Drop-in drivmedel från svartlut via förgasning/Fischer-Tropsch	Utveckling	Utveckling, cert.
	Biometan från bark via förgasning och metanisering	Utveckling	
	Drop-in drivmedel från bark via förgasning/Fischer-Tropsch	Utveckling	Utveckling, cert.

^A Indikerar om spåren inkluderats för väg- respektive flygtransporter samt teknikmognad för dessa alternativ. För flygtransporter anges även om certifiering finns, vilket är en förutsättning för kommersiell användning.

^B Detta avser hydrogenenerade oljor/fetter (HVO)

De spår som är kommersiella i dagsläget är biogasproduktion, etanol från vete, och hydrogenenerade oljor/fetter (HVO). Ingen av dessa använder skogsbaserade råvaror. Däremot är samtliga av de studerade spår som är under utveckling inriktade på skogsbaserade råvaror, vilket reflekterar den större framtida potential som dessa råvaror har.

Spåren kan grovt delas in i tre kategorier. Biokemiska metoder (*rötning eller fermentering*) kan utgå från många olika råvaror men om skogsbaserade råvaror ska användas behövs en omfattande förbehandling. *Vätebehandling* inkluderar både HVO-produktion och spår som använder förvätskning av biomassa med efterföljande uppgradering av biooljan i raffinaderier. *Förgasning* följt av katalytisk syntes till drivmedelsprodukter kan använda olika råvaror men vi har bara beaktat restprodukter från skogen.

Utbyten, kostnader och effektivitet för dessa spår har uppskattats baserat på öppen litteratur och projektdeltagarnas kunskaper.



Bild: Michael Fousert, Unsplash.

VART TAR KOLET VÄGEN?

Många av de studerade teknikspåren ger inte bara ett bränsle som produkt, utan också användbara biprodukter av stort ekonomiskt värde. Det skiljer mycket i råvarornas sammansättning och i hur stort utbytet till slutlig bränsleprodukt blir – och i hur mycket av råvarans biogena kol som slutligen hamnar i bränslet. Det kan benämnas som kolutbyte.

För biogas genom *rötning* bildas koldioxid i rötningsprocessen. Denna koldioxid måste avskiljas innan biogasen kan användas som fordonsgas. En stor andel av det biogena kolet hamnar också i den så kallade rötresten, som i många fall har användning som gödselprodukt. Kolutbytet, dvs. andelen av råvarans kol i metan i biogasprodukten, är cirka 34% för matavfall och gödsel men mindre än 20% för slam.

Vid *fermentering* till etanol är kolutbytet 30-40%. Även här bildas koldioxid i processen, vilken måste avskiljas – en del i koncentrerad form från själva fermenteringen, och en del i utspädd form från förbränningen som försörjer processen med värme. En stor del av kolet hamnar också i biprodukter (pellets eller djurfoder).

För bränslen som bygger på *vätebehandling* av olika vätskeformiga råvaror skiljer sig kolutbytet beroende på vilken råvara som används. För slaktrester hamnar nästan allt kol i antingen bränsleprodukten eller i värdefulla gödselbiprodukter. För förvätskade skogsrester eller lignin hamnar 40-60% av kolet i drivmedelsprodukterna och en ganska stor andel av kolet i restgaser. En del av dessa gaser är koldioxid, medan en del utgörs av brännbara gaser som kan ersätta fossil naturgas i raffinaderiet där processen äger rum – och alltså också blir koldioxid i sista änden.

För bränslen som produceras via *förgasning* avskiljs koldioxid i koncentrerad form i processen, för att få rätt sammansättning på syntesgas för den katalytiska syntesen. Dessutom förbränns en del av

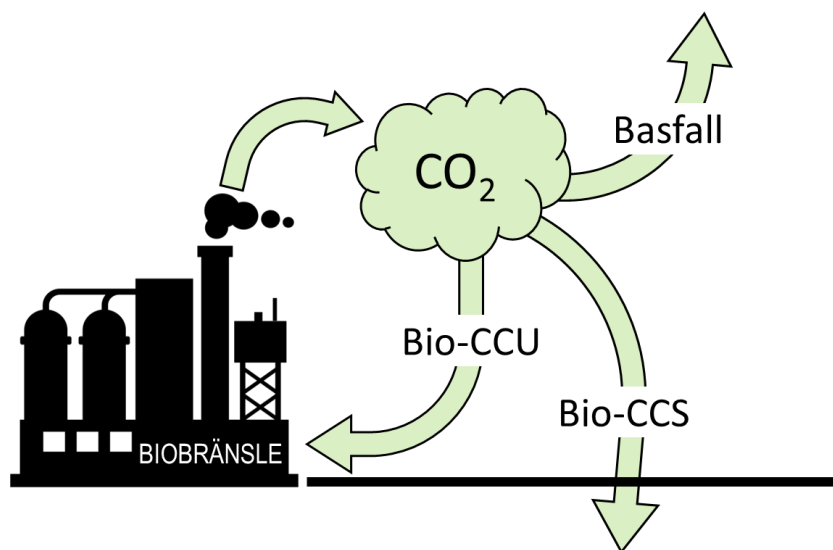
råvaran för att försörja processen med värme. Typiskt hamnar bara 30% av råvarans kolatomer i drivmedelsprodukterna.

För de flesta teknikspåren hamnar alltså en ganska låg andel av kolet i den huvudsakliga biodrivmedelsprodukten, typiskt cirka 30-50% för lignocellulosabaserade råvaror. Biprodukterna innehåller ofta en stor andel av kolet, men i nästan alla fall finns också betydande strömmar av koldioxid som oftast släpps ut till atmosfären – antingen i koncentrerad form (om den avskiljs i processen) eller i utspädd form (om den kommer från förbränning).

HUR KAN KOLUTBYTET ÖKA?

Genom att avskilja och fånga in koldioxiden som annars släpps ut kan ”slöseriet” med biogent kol minskas. Vi undersökte två olika teknikalternativ för detta som tillsammans med ett basfall utan infångning visas i figur 1:

1. kolinfångning och permanent lagring, vilket kan ge biodrivmedel med negativa utsläpp (*bio-CCS*, carbon capture and storage),
2. ökad produktion av biodrivmedel från infångad koldioxid med hjälp av elektricitet (*bio-CCU*, bioenergy carbon capture and utilisation).



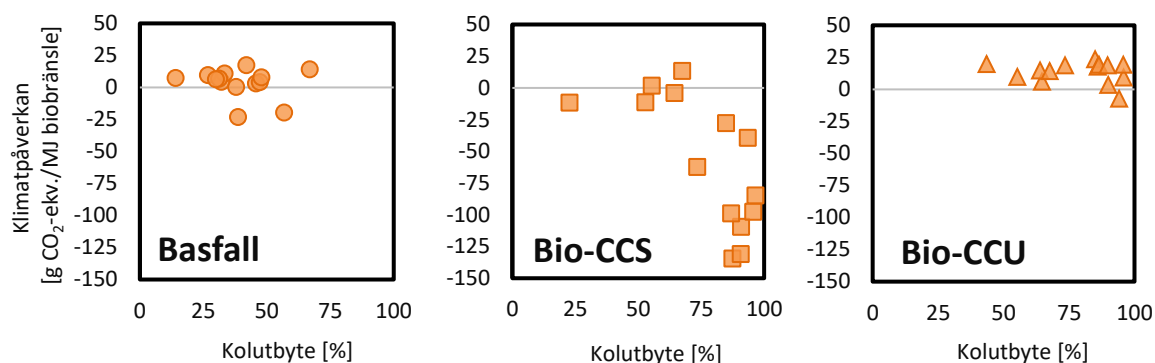
Figur 1. Schematisk illustration över hur kolutbytet vid produktion av biodrivmedel kan ökas från basfallet, där stor andel av det biogena kolet släpps ut till atmosfären.

För lagringsalternativet krävs att den infångade koldioxiden förvätskas och fraktas till en lämplig plats för permanent lagring. För små produktionsanläggningar, eller för tekniker med små koldioxidströmmar, blir detta mycket dyrt. Därför är det viktigt att hitta sätt att utnyttja synergier mellan närliggande anläggningar som kan samverka kring logistik och infrastruktur.

Både koncentrerade och utspädda koldioxidströmmar kan fångas in och lagras (*bio-CCS*) eller användas (*bio-CCU*), men till högre energikostnad för de utspädda flödena. Eftersom de flesta produktionsspåren däremot har koldioxid i både koncentrerad och utspädd form blir det i de flesta fall mest lönsamt att fånga in och lagra eller uppgradera båda dessa flöden, eftersom det ger en synergi-effekt.

EFFEKTIV DRIVMEDELSPRODUKTION MED NEGATIVA UTSLÄPP – ELLER FLER-DUBBLAD PRODUKTION

Genom att kombinera drivmedelsproduktion med antingen bio-CCS eller bio-CCU kan nästan alla studerade teknikspår höja kolutbytet, dvs. öka andelen av råvarans kol som hamnar i antingen drivmedelsprodukten eller i permanent lagring. Figur 2 illustrerar detta i fallet med *bränslen för vägtransporter*.



Figur 2. Biodrivmedlens klimatavtryck som funktion av kolutbytet för bränslen för vägtransporter, för basfallet utan infångning av koldioxid, respektive med bio-CCS och bio-CCU. I kolutbytet räknas här kol i biodrivmedelsprodukten och kol i permanent lagring (CCS) in, men inte kol i biprodukter.

Med bio-CCS (mittenpanelen i **Fel! Hittar inte referensälla.**) innebär det att det för nästan samliga teknikspår går att åstadkomma både högt eller mycket högt kolutbyte, och negativa nettoutsläpp för produktionen samtidigt. Störst potential för negativa utsläpp har de teknikspår som har lågt kolutbyte i basfallet och som inte ger några större mängder värdefulla biprodukter som binder in kol. För dessa tekniker återfinns det kol som inte hamnar i bränsleprodukten i koldioxid (koncentrerad eller utspädd), ofta i relativt stora flöden. Detta gäller de flesta termokemiska tekniker som använder lignocellulosabaserade råvaror, t.ex. baserade på förgasning eller pyrolys.

Med bio-CCU (högerpanelen) ökar kolutbytet genom att bränsleproduktionen från en given mängd råvara ökar, genom tillsats av vätgas från elektrolys. För flera av teknikspåren (samma spår som hade hög potential för negativa utsläpp med bio-CCS) kan produktionen dubblas eller till och med tredubblas. Detta kräver förstås en avsevärd insats av el – vilket kommer med kostnader både ekonomiskt och i form av växthusgasutsläpp. Som figuren visar är klimatpåverkan i den här studien ändå ungefär densamma som i basfallet – vilket förutsätter att det finns el producerad med lågt klimatavtryck tillgänglig¹.

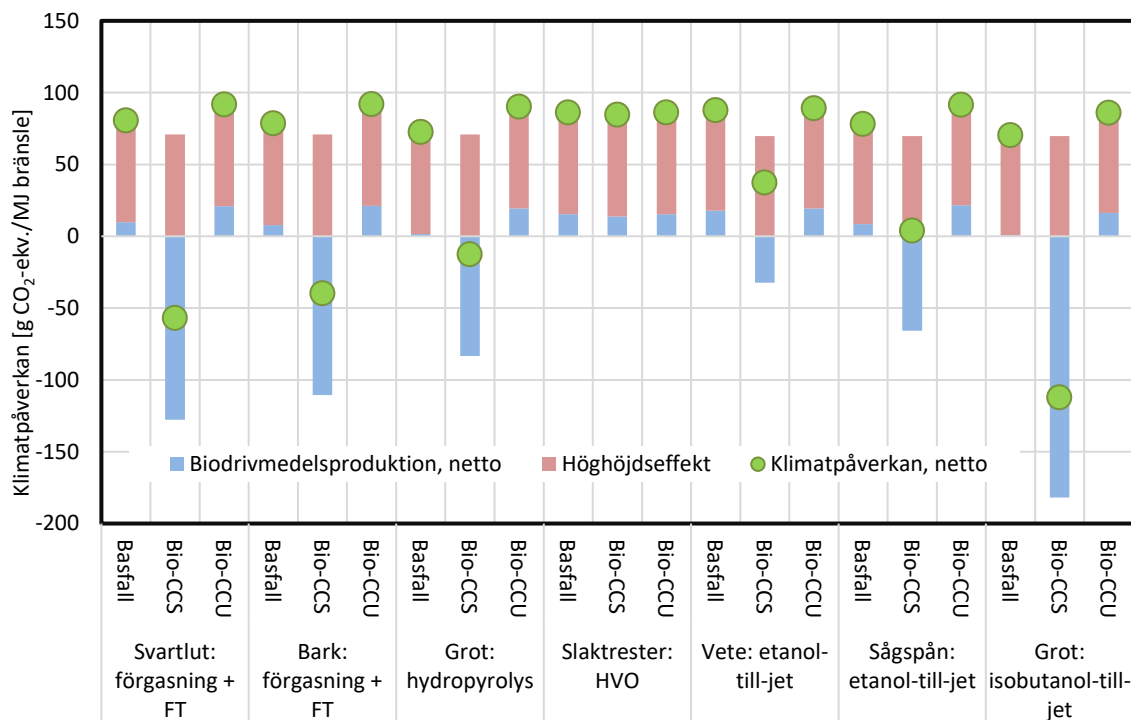
De produktionstekniker som redan i basfallet har både högt kolutbyte och högt utbyte till drivmedel från råvara, som HVO från slaktrester, finns nästan ingen koldioxid att utnyttja för bio-CCS eller -CCU. Denna typ av tekniker är därför inte aktuella för att uppnå negativa utsläpp.

¹I beräkningarna i den här studien har vi utgått från svensk elmix, vilken har lågt klimatavtryck.

NEGATIVA UTSLÄPP BETYDELSEFULLT FÖR FLYGET

För flygbränslespår gjordes en speciell analys om negativa utsläpp kan användas för att kompensera för de så kallade höghöjdseffekterna som uppkommer vid förbränning av bränslen i flygplan och som har högre klimatpåverkan än motsvarande användning för land- och sjötransporter. Höghöjdseffekterna uppkommer bland annat på grund av de effekter på molnbildning som partikelutsläpp från förbränning på hög höjd kan ha. De här klimateffekterna, som inte är relaterade till utsläpp av koldioxid, går inte direkt att minska med bioflygbränslen².

Det är därför av stort intresse för hållbart flyg att kombinera biodrivmedel med negativa utsläpp för att kompensera för höghöjdseffekterna. Figur 3 visar att för fem av de sju studerade flygbränslespårerna blir nettoeffekten på klimatet kylande eller bara mycket svagt värmande när biodrivmedelsproduktionen kombineras med bio-CCS. Detta gäller tekniker baserade på förgasning, hydrolysis samt fermentering av lignocellulosa till alkoholer som sen uppgraderas till flygbränsle. Inget av dessa spår är idag i kommersiell produktion men ett flertal av dem är certifierade och under stark kommersiell utveckling.



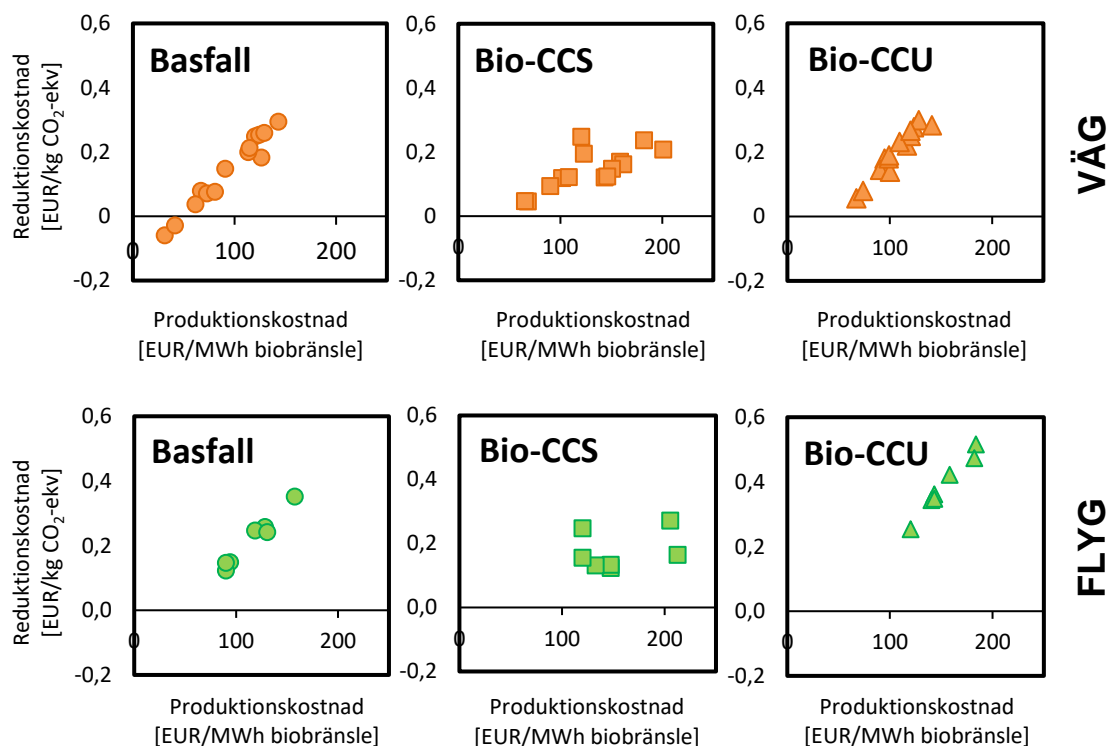
Figur 3. Klimatpåverkan från framställning och användning av bioflygbränsle för basfallet utan infångning av koldioxid, respektive med bio-CCS och bio-CCU. Röda staplar är höghöjdseffekt, blå staplar är nettoutsläpp från drivmedelsproduktion. De gröna cirklarna visar den sammantagna klimatpåverkan.

² Det finns ett flertal nya studier som indikerar att höghöjdseffekterna kan vara mindre för syntetiska bränslen, t.ex. biobränslen, jämfört med fossilt flygbränsle. Detta är lovande men resultaten är i dagsläget osäkra och behöver verifieras och kvantifieras noggrannare.

Även för flygbränslen är uppgradering av koldioxidströmmar från bränsleproduktionen till drivmedel med elektrolysvätgas en möjlighet för att öka kolutbyte. Dock har detta alternativ lägre effektivitet än för vägtransportbränslen och framstår som mindre konkurrenskraftigt än kombinationen med bio-CCS.

ÖKAT KOLUTBYTE GER KOSTNADSEFEKTIV KLIMATNYTTA

Genom att lägga ihop kostnader för produktion och för minskade växthusgasutsläpp framträder kostnadsbilden för alla studerade drivmedelstekniker för både väg- och flygtransporter. Figur 4 visar detta i förhållande till ett basfall utan varken bio-CCS eller -CCU.



Figur 4. Växthusgasreduktions- och bränsleproduktionskostnader för de olika studerade alternativen för biodrivmedel för vägtransporter (överst, orange) och flygtransporter (nederst, grön). Produktionskostnader för bio-CCS är utan någon ersättning för negativa utsläpp (lagring av biogent kol).

Om bränslena för flygtransport jämförs med vägtransport är både reduktions- och produktionskostnaderna generellt något högre för flygbränslen.

För vägtransporter uppvisar de flesta tekniker liknande produktionskostnad för basfallet som med bio-CCU. Eftersom klimatavtrycket också är jämförbart, som konstaterats ovan, blir även reduktionskostnaden likvärdig. Att använda bio-CCU för att producera mer biodrivmedel kan alltså vara ekonomiskt konkurrenskraftigt och kan därmed erbjuda en hållbar lösning för ett högre resursutnyttjande i en framtid med begränsade biomassatillgångar. Den ökade produktionskapaciteten för biodrivmedel kommer dock med ett motsvarande ökat elbehov, vilket i sin tur kräver uppskalning av hållbar elproduktion. För flygbränslen ses däremot en signifikant kostnadsökning i alternativet med bio-CCU, vilket gör detta alternativ mindre konkurrenskraftigt.

Om den avskilda koldioxiden i stället lagras genom bio-CCS får det producerade bränslet mycket god klimatprestanda (oftast negativa utsläpp) och minskad reduktionskostnad, men till högre bränslekostnad. Denna kostnad skulle kunna minskas avsevärt om marknader och/eller stödsystem för negativa utsläpp skulle skapas. Ekonomisk kompensation i storleksordningen 100 EUR per ton koldioxid skulle kunna göra de bästa biodrivmedelsspåren med bio-CCS kostnadsmässigt konkurrenskraftiga i förhållande till både basfallet och bio-CCU-alternativet. Som noterats kan bio-CCS för flygbränsleproduktion också ge möjlighet till klimatneutrala flygtransporter, även med hänsyn till höghöjdseffekter.



Bild: Zach Reiner, Unsplash.

STÖRST NYTTA MED BIO-CCS OCH BIO-CCU FÖR SKOGSRESTBASERADE TEKNIKSPÅR

Nyckeln till att uppnå störst nytta med biodrivmedelsproduktion med bio-CCS eller bio-CCU är de framväxande teknikspår som kan utnyttja den stora inhemska råvarupotentialen i restprodukter från skogen. Även om dessa inte alltid uppvisade lägst kostnader för växthusgasreduktion, uppvisade de både störst relativ ökning av kolutbytet (med både bio-CCS och -CCU) och störst minskning av växthusgaser (med bio-CCS). Ur ett kombinerat kol-, kostnads- och klimatperspektiv presterade teknikspår baserat på förgasning eller vätebehandling av skogsrester bäst.

För de idag kommersiella teknikspåren är bio-CCS och bio-CCU av mer begränsat värde. Biogas-spåren har höga transportkostnader för koldioxid på grund av små och relativt utspridda anläggningar, och kommersiella spår för vätebehandling har redan högt kolutbyte. För dessa spår, liksom för etanol från vete, hamnar dessutom betydande mängder biogent kol i kommersiellt viktiga bi-produkter, samtidigt som den svenska råvarupotentialen för ökad produktion är relativt begränsad.

ENGLISH SUMMARY

With competition for clean carbon intensifying as the energy transition accelerates, the biofuel industry must prepare for two likely future developments. Increasing demand for sustainable biomass assortments in multiple sectors will require careful balancing of commercial and societal priorities. Wastage of biogenic carbon will be undesirable. The conversion of biomass to various types of biofuels typically generates residual carbon flows, most importantly carbon dioxide. Capturing residual carbon streams and upgrading them to biofuels with the help of electricity is an example of a bio-energy carbon capture and utilization (BECCU) concept that can significantly improve utilization efficiencies and production potentials. Sequestering the same carbon in permanent storage (BECCS) can potentially deliver biofuels with large carbon negative footprints.

Using process-level carbon and energy balance models built with data obtained mainly from open literature, we prepared estimates of carbon efficiencies, GHG footprints, biofuel product costs and other performance indicators to examine the potential of BECCS and BECCU options in 15 different biofuel production pathways for road transport and aviation.

We find that BECCS and BECCU can make a significant improvement to the efficiency of carbon use in many – but not all – pathways examined. Biofuels cost more with BECCS than with BECCU in the absence of a financial support scheme or a market for negative emissions, but BECCU is often able to deliver GHG reductions at a lower cost per unit of CO₂. For aviation biofuels, the negative emissions when implementing BECCS can fully offset the high-altitude effect (additional warming effect from using fuels at high altitudes) for four out of seven studied pathways.

Integration of BECCS and BECCU with current commercial biofuel production pathways offers limited value. The commercial biofuel production pathways with the best economic performance are not well suited to combine with CCS or CCU due to a combination of limited feedstock potentials, a significant share of feedstock carbon tied up in tradable by-products, and for biogas plants, expensive CO₂ transport logistics. The full benefits of BECCS and BECCU are contingent on the timely deployment of biofuel pathways that utilize different residues from the forestry and forest industries. These emerging biofuel pathways do not offer the lowest GHG reduction costs but do offer the largest relative improvements in carbon efficiency and GHG reductions under the BECCS option. From a combined carbon, cost and climate perspective, the best performing pathways for gasification and hydrotreatment of forest residues are best able to improve carbon utilization and provide carbon-efficient GHG reductions on large-scales at reasonable costs.

With reservations for high uncertainty, the cost for carbon efficient biofuels with negative GHG footprints may be reduced significantly if markets and/or support schemes for negative emission credits were to emerge. Credits around 100 EUR per ton of CO₂ could make the best BECCS biofuel production pathways cost-competitive in relation to the base and the BECCU options. The lack of long-term policy support is a commonly heard investor-lament. Institutional barriers such as unstable policy conditions are often highlighted as key barriers to technical development.

The results and the knowledge base compiled in this project can aid future researchers, policy makers, and industrial business developers in their investigations into BECCS and BECCU concepts for the biofuel sector.



www.energimyndigheten.se



www.f3centre.se