

Energimyndighetens titel på projektet – svenska En hållbar omställning av energisystemet mot en ökad andel bioenergi	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska A sustainable transition of the energy system towards an increasing share of bioenergy	
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet	Avdelning/institution
Adress	
Namn på projektledare Robert Lundmark	
Namn på ev övriga projektdeltagare Elina Bryngemark, Patrik Söderholm (Nationalekonomi, LTU) Jonas Zetterholm, Elisabeth Wetterlund, Joakim Lundgren (Energiteknik, LTU) Johan Ahlström, Simon Harvey (Energiteknik, Chalmers) Karin Pettersson (RISE)	
Nyckelord: 5-7 st skogsråvara, bioraffinaderi, industriella biprodukter, processintegration, modellering, energisystem, styrmedel	

Förord

Projektet utgör en del av Forskarskola Energisystem, ett program finansierat av Energimyndigheten i syfte att stimulera tvärvetenskaplig forskning om energisystemet och bygga kompetens kring samspelet mellan teknik och samhälle. 2015 startade tio doktorander i programmet, uppdelade på fyra projekt. Det här avrapporterade projektet utgjorde ett av dessa projekt och genomfördes som tre doktorandarbeten placerade i olika forskarmiljöer, två på Luleå tekniska universitet på institutionerna för Teknikvetenskap och matematik respektive Ekonomi, teknik, konst och samhälle, och ett på Chalmers tekniska högskola på institutionen Rymd-, geo och miljövetenskap. Denna slutrapport sammanfattar bakgrund, tillvägagångssätt och resultat från projektet. För mer detaljerade resultat rekommenderar vi de vetenskapliga publikationerna från projektet.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Innehållsförteckning	2
Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning	5
Genomförande	6
Delprojekt 1 – Marknader och prisbildning (LTU Nationalekonomi)	6
Delprojekt 2 – Tekniker och värdekedjor (Chalmers Energiteknik)	7
Delprojekt 3 – Lokalisering och industriell omställning (LTU Energiteknik)	8
Gemensamt arbete – tvärvetenskapligt ramverk.....	8
Resultat	9
Delprojekt 1 – Marknader och prisbildning.....	9
Delprojekt 2 – Tekniker och värdekedjor	10
Delprojekt 3 – Lokalisering och industriell omställning	12
Tvärvetenskapligt ramverk	13
Diskussion.....	15
Publikationslista.....	15
Artiklar i vetenskapliga tidskrifter	15
Konferensbidrag.....	17
Vetenskapliga avhandlingar.....	17
Referenser, källor.....	18
Bilagor	21

Sammanfattning

Detta tvärvetenskapliga doktorandprojekt inom Forskarskola Energisystem har genom ett holistiskt angreppssätt studerat betydelsen av och möjligheterna för en hållbar omställning av energisystemet mot en ökad andel bioenergi, i utvecklingen mot en biobaserad ekonomi. Fokus har varit på bioraffinaderier baserade på skogsråvara, för produktion av olika energibärare med potential att bidra till en utfasning av fossila bränslen i energisystemet. I projektet har ett kunskaps- och modellramverk byggts upp som möjliggör såväl avancerad systemanalys relaterat till Sveriges bioråvaror från skogen och deras roll i ett hållbart energisystem, som analys av omställning av processindustrin mot framtidens bioraffinaderier. I projektet har vi belyst olika systemaspekter relaterat till utvecklingen av och investeringar i bioraffinaderier, hur detta kan gå till, vilka effekter storskalig implementering av bioraffinaderier eller annan avancerad användning av bioråvaror skulle få på råvarusystemen och industristrukturen i Sverige, samt vilka styrmedel som kan vara relevanta. Forskningsfrågorna har utgått från Sverige och svenska förhållanden, men med ett tydligt internationellt perspektiv på såväl resurser och tekniker, som policy- och marknadsaspekter.

Ur marknadssynpunkt illustrerar resultaten vikten av att ta explicit hänsyn till marknadsrespons i processen för utveckling och genomförande av energiomställningen. Skogsindustri sektorn och bioenergi sektorn är, som exempel, mycket nära sammanlänkade och kan antingen komma att hjälpa eller stjälpa varandra, beroende på policydesign. Resultaten visar också på att för en ökad efterfrågan på bioenergi kan man förvänta sig en industriell omvandling, liksom en ökad skogsavverkning. Samtidigt kan en politik som syftar till att öka användningen och produktionen av miljövänliga bränslen skapa oönskade inlåsnings effekter med teknik som är beroende av fortsatt användning av icke hållbara råvaror.

Ur teknik- och värdekedjesynpunkt visar resultaten att integrering med befintlig industri och befintliga försörjningskedjor för skogsbiomassa förvisso både kan öka energieffektiviteten och förbättra den ekonomiska prestandan, men att den energimässigt optimala integrationen inte alltid ger lägst produktionskostnader.

Genom att tillämpa ett mjuklänkat metodkombinerande modell- och analysramverk har vi också belyst och utvecklat komplexiteten i hur systemkostnader för storskalig implementering av skogsbaserade bioraffinaderier är sammansatta. Ramverket kan användas för att, exempelvis, identifiera inte bara det styrmedelsstöd som skulle behövas för att möjliggöra en första lönsam bioraffinaderianläggning, utan också det stöd som skulle krävas för att upprätthålla en storskalig produktion av t.ex. skogsbaserat biodrivmedel. Resultaten från tillämpningen av ramverket belyser också komplexiteten i relationen mellan perspektivet hos anläggningsägare å ena sidan, och policybeslutsfattare å andra sidan. De lösningar som har lägsta kostnad för en anläggningsägare är inte nödvändigtvis desamma som de som skulle föredras av en beslutsfattare på policynivå, på grund av förekomsten av dolda indirekta kostnader.

Summary

This interdisciplinary doctoral project within Forskarskola Energisystem (Graduate School in Energy Systems) has applied a holistic approach to study the importance of and the possibilities for a sustainable transition of the energy system towards an increased share of bioenergy, in the development towards a bio-based economy. The focus has been on biorefineries based on forest feedstocks, for the production of various energy carriers with the potential to contribute to the defossilisation of the energy system. Within the project, a knowledge and model framework has been constructed that enables both advanced systems analysis related to Sweden's forest-based raw materials and their role in a sustainable energy system, and analysis of the transition of the process industry to future biorefineries. In the project, we have highlighted various system aspects related to the development of and investments in biorefineries, how this can be accomplished, what effects large-scale implementation of biorefineries or other advanced uses of forest biomass would have on biomass markets and industrial structure in Sweden, and which policy instruments that can be relevant. The research questions have had their starting point in Sweden and Swedish conditions, but with a clear international perspective both on resources and technologies, and on policy and market aspects.

From a market point of view, the results illustrate the importance of considering market responses in the process of energy and environmental policy development and implementation. For instance, the forest industry sector and the bioenergy sector are closely interlinked and can either make or break one another, depending on the policy design. The results also show that for an increased demand of bioenergy, an industrial transformation is to be expected, as well as increased roundwood harvest. At the same time, policies aiming to increase the use and production of environmentally friendly fuels may create undesirable lock-in-effects with technologies that depend on the use of long term unsustainable feedstocks. From a technology and value chain point of view, the results show that integration with existing industry and existing supply chains for forest biomass can certainly both increase the energy efficiency and improve the economic performance, but that the energy-optimal integration does not always result in the lowest production costs.

By applying a soft-linking method-combining model and analysis framework, we have also highlighted and expanded on the complexity of how system costs for large-scale implementation of forest-based biorefineries are composed. The framework can be used to, for example, identify not only the policy support that would be needed to enable a first profitable biorefinery facility, but also the support that would be required to maintain a large production of, e.g., forest-based biofuels. The results from the application of the framework also shed light on the complexity of the relationship between the perspective of facility owners on the one hand, and policy makers on the other. The solutions that have the lowest cost to a plant owner are not necessarily the same as those that would be preferred by a decision maker at the policy level, due to the existence of hidden indirect costs.

Inledning

I Sverige har bioråvaror från skogen en betydande potential att tillgodose både behov från transport- och energisektorn och industriella materialbehov. Samtidigt är tillgången på dessa bioråvaror begränsad. Således, ju fler användningsområden som tillkommer eller expanderar, desto viktigare blir det att varje enhet biomassa används så effektivt som möjligt. Storskalig implementering av bioraffinaderier kommer att innebära förändrade råvaru- och energiflöden, och även kräva betydande kapitalinsatser. Integrering med befintlig industriinfrastruktur kan ge ekonomiska fördelar som lägre produktionskostnad och specifik investering, samtidigt som resurseffektiviteten ökar genom möjligheterna till processintegration. Val av teknik, insatsråvaror, och lokalisering för dessa nya anläggningar är viktigt inte bara på grund av de stora investeringarna utan även på grund av det stora råvarubehov som anläggningarna kommer att ha.

Tidigare forskning på området utgår till stor del från antingen råvarusidan eller omvandlingssidan. På råvarusidan har biomassa-försörjning ofta studerats från ett bottom-up-perspektiv ur ett antal infallsvinklar, och resultaten visar bland annat på svårigheten att uppskatta den framtida biomassapotentialet, se t.ex. (Börjesson et al., 2017; J. de Jong et al., 2017; Lundmark, 2007; Sathre & Gustavsson, 2011). Systemstudier av mer övergripande karaktär, där avancerad bioenergiteknik inkluderas, inkluderar bland annat studier med den nationella energisystemsmodellen TIMES-Sweden och MARKAL Sweden, se t.ex. (Börjesson Hagberg et al., 2016; Börjesson et al., 2014; Börjesson & Ahlgren, 2012; Krook Riekkola et al., 2011; Sandberg et al., 2019). En annan typ av energisystemmodeller är teknoekonomiska, geografiskt explicita modeller för anläggningslokalisering, som modellerna inom BeWhere-familjen, se t.ex. (Khatiwada et al., 2016; Natarajan et al., 2014; Wetterlund et al., 2013a). I den svenska modellen, BeWhere Sweden, har bottom-up-studier av integrerad biodrivmedelsproduktion introducerats i en top-down-modell och tagits till en högre systemnivå, med beaktande av detaljerade platsspecifika data för de potentiella lägena för integrerad biodrivmedelsproduktion (S. de Jong et al., 2017; Pettersson et al., 2015; Wetterlund et al., 2013b). Generellt saknar båda dessa typer av energisystemmodeller ett vidare ekonomiskt systemperspektiv där marknadsaspekter explicit beaktas i kostnadsestimeringarna, och där priset tillåts anpassas sig efter rådande och framtida marknadssituationer. Det finns därför ett behov av fortsatta studier inom området för att vidare analysera hur storskalig introduktion av olika typer av biobaserade värdekedjor kan realiseras och hur befintlig industriell infrastruktur kan användas, samtidigt som konkurrens om befintliga bioråvaror beaktas.

I detta projekt har en tvärvetenskaplig ansats tillämpats för att studera samverkan mellan teknik-värdekedja-marknad. På så sätt skapas ett mervärde som förbättrar förståelsen hur energisystemet bäst kan ställas om. Forskningen är tydligt behovsmotiverad utifrån den viktiga roll bioråvaror från skogen förväntas ha i omställningen till ett långsiktigt hållbart energisystem, och utifrån det glapp som för närvarande finns mellan förväntningarna på avancerad bioraffinaderteknik och den nuvarande kommersialiserings- och implementeringsgraden.

Det övergripande syftet med projektet har varit att bidra med ny kunskap och stärkt kompetens för att underlätta övergången till ett långsiktigt hållbart energisystem och den fortsatta utvecklingen mot en biobaserad ekonomi. Fokus har varit på att belysa olika systemaspekter relaterat till exempelvis utvecklingen av och investeringar i bioraffinaderier, hur detta kan gå till, vilka effekter storskalig implementering av bioraffinaderier eller annan avancerad användning av skogliga bioråvaror skulle få på råvarusystemen och industristrukturen i Sverige, samt vilka styrmedel som kan vara relevanta.

Genomförande

Projektet har genomförts inom ramen för Forskarskola Energisystem (FoES 15) och har bedrivits som tre parallella doktorandprojekt, med en doktorand vid respektive forskningsavdelning (LTU Nationalekonomi, LTU Energiteknik, Chalmers Energiteknik). Arbetet har bedrivits som en sammanhållen satsning, där doktorandprojekten har haft täta samarbeten och dragit nytta av varandras resultat.

Den gemensamma nämnaren som sammanbundit de enskilda doktorandprojekten är användningen av bioråvara från skogen och produktionen av olika former av biomassabaserade energibärare, material och intermediärer. Utöver detta har den gemensamma delen av projektet syftat till att bygga upp ett gemensamt kunskaps- och modellramverk. I detta ingår integration av modeller för såväl industri- anläggningar och deras lokala förutsättningar, som för systemet i stort, för att analysera möjligheter och restriktioner vid exempelvis en utbyggnad av större bioraffinaderiprojekt i Sverige. I samtliga delarbeten har modeller på lämplig systemnivå för respektive forskningsfråga utvecklats och tillämpats. För detaljer, se de underliggande publikationerna.

Delprojekt 1 – Marknader och prisbildning (LTU Nationalekonomi)

I detta delprojekt har doktoranden Elina Bryngemark jobbat med att vidareutveckla en nationalekonomisk marknadsmodell, som ligger till grund för en stor del av den ekonomiska delen av projektet. Modellen inkluderar ett brett spektrum av disaggregerade marknader för olika bioråvaror och användningsområden. I Elinas arbete har exempelvis metodutveckling för att kvantifiera utbudet av bioråvarorna under olika förutsättningar ingått, liksom att analysera förändrade politiska förutsättningar och efterfrågan av bioråvara. Tekniska, ekonomiska, politiska och miljömässiga förutsättningar har beaktats och effekter av olika styrmedel analyserats. Vidare har hon arbetat med två ekonometriska modeller i vilka hon har utvärderat olika styrmedel, samt dessas interaktion, för förnyelsebar energi i transportsektorn. Den första studien utvärderar styrmedel såsom inblandningskrav samt offentligt FoU-stöd för biodrivmedel bland OECD-länder, och den andra analyserar de faktorer som påverkar tjänstemännen i svenska kommuner att upphandla grönt i transportsektorn.

Sammanfattningsvis har följande forskningsfrågor besvarats:

1. Hur påverkas den svenska skogsindustrin av ekonomiska styrmedel som
 - a. ökar avsättning för skog,

- b. ökar efterfrågan på bioenergi,
 - c. skapar en ny efterfråga på input för att producera andra generationens biodrivmedel?
2. Har grön industripolitik lett till ökad inhemsk produktion av biodrivmedel?
 3. Vilka faktorer påverkar grön offentlig upphandling och hur interagerar dessa variabler?

Arbetet finns redovisat i ett antal vetenskapliga artiklar (se publikationslista), samt i licentiat- (Bryngemark, 2019a) och kommande doktorsavhandling (Bryngemark, 2021).

Delprojekt 2 – Tekniker och värdekedjor (Chalmers Energiteknik)

I det andra delprojektet arbetade doktoranden Johan Ahlström med att beskriva och förstå hur nya och ännu inte kommersialiserade bioraffinadertechniker kan användas tillsammans med befintlig infrastruktur, särskilt i processindustrin och i energisektorn. Fokus har varit på bioraffinadertechniker och -koncept baserade på termokemisk omvandling av biomassa genom förgasning. I arbetet har Johan undersökt hur olika former och nivåer av integration kan underlätta utbyggnaden av storskalig biomassa-förgasning för framtida produktion av biodrivmedel. Tre integrationsnivåer beaktades: *tekniknivå*, *processnivå* och *värdekedjenivå*. Olika integrationskoncept har sedan utvärderats utifrån dessa nivåer. På tekniknivå studerades konsekvenserna av att byta råvara. På processnivå undersöktes värmeintegration med befintliga sågverk samt integration av vattenelektrolys med biomassa-förgasning. Ur ett värdekedjeperspektiv beaktades dels integration med värdekedjan för att producera bränslen för användning i den svenska järn- och stålindustrin, dels integration med elsystemet.

Forskningsfrågor för delprojekt 2 var:

1. Hur kan de beaktade integrationsaspekterna bidra till att öka den ekonomiska genomförbarheten för olika koncept för biomassa-förgasning?
2. Vilka typer av integrationsalternativ bör prioriteras vid byggandet av nya anläggningar?
3. Hur påverkar implementering av storskalig biomassa-förgasning omgivande energisystem?
4. Hur kan metoder kombineras för att studera biomassa-förgasning i ett dynamiskt system som påverkas av dess introduktion, genom att t.ex. prisförhållanden kan förändras? Kan dessa typer av metoder ge användbara insikter?

Arbetet finns redovisat i ett antal vetenskapliga artiklar (se publikationslista), samt i licentiat- (Ahlström, 2018) och doktorsavhandling (Ahlström, 2020).

Delprojekt 3 – Lokalisering och industriell omställning (LTU Energiteknik)

I det tredje och sista delprojektet arbetade doktoranden Jonas Zetterholm med att analysera hur mål för en omställning till bioekonomi kan uppnås. Jonas har använt teknoekonomisk analys och geografiskt explicit systemanalys för att analysera hur befintlig industriell infrastruktur kan användas för effektiv produktion av nästa generations biodrivmedel och andra bioraffinaderiprodukter. Fokus har legat på att identifiera kombinationer av skogsindustrigrenar och bioraffinaderitekniker som både kan vara av intresse för tidiga investeringar och som ger goda ekonomiska förutsättningar för att nå en storskalig inhemsk produktion av bioraffinaderiprodukter. Resultaten kan vara av intresse såväl för aktörer inom teknikutveckling och finansiering av industriell uppskalning, som för aktörer inom policy- och styrmedelsutveckling.

Följande forskningsfrågor har besvarats i delprojektet:

1. Hur påverkas den ekonomiska prestandan för integrerade produktionsanläggningar för biodrivmedel av anläggningens storlek jämfört med värdindustrin?
2. Hur kan traditionell teknoekonomisk analys kompletteras med andra metodologiska angreppssätt för att få ytterligare insikter vad gäller prestanda för olika bioraffinaderikoncept?
3. Hur påverkar storskalig implementering av bioraffinaderier biomassamarknaden, och kan det ge förutsättningar för andra industrier att ställa om till biobränslen?
4. Vilken effekt har pris-, investeringskostnads-, och policyosäkerheter på ekonomisk prestanda, föredragna bioraffinaderikoncept, och när i tid investeringar är fördelaktiga?

Arbetet finns redovisat i ett antal vetenskapliga artiklar (se publikationslista), samt i licentiat- (Zetterholm, 2018) och kommande doktorsavhandling (Zetterholm, 2021).

Gemensamt arbete – tvärvetenskapligt ramverk

För att utvärdera bioraffinaderikoncept i ett tidigt skede krävs inte bara att teknisk prestanda och processkostnader beaktas. Hänsyn måste också tas både till den ekonomiska prestandan för hela försörjningskedjan, och till effekterna på råvaru- och produktmarknaderna. I det gemensamma arbetet utvecklade och demonstrerade de tre doktoranderna ett konceptuellt tvärvetenskapligt modell- och analysramverk som kan utgöra grunden för utvärderingar av olika bioraffinaderikoncept fullständiga prestanda ur försörjningskedjeperspektiv. Ramverket innehåller olika geografiska och tekniska begränsningar och gör det möjligt att ta hänsyn till konkurrensen om biomassa mellan sektorer, under olika efterfrågan på slutanvändarsidan.

Resultat

Delprojekt 1 – Marknader och prisbildning

I sin första forskningsfråga utforskade Elin två olika policyinriktningar, som båda implicerar en ökad efterfrågan på skogens ekosystemtjänster, och hur dessa kan påverka konkurrensen om skogsråvaror (Bryngemark, 2020). Inom ramen för arbetet uppdaterades en befintlig skogssektormodell för Sverige. Modellen tillämpades sedan för att analysera konsekvenserna av dels ökad bioenergi-användning i den stationära energisektorn (el och värme), dels ökat skydd av skogen, individuellt och i kombination. Resultaten visade hur olika skogsråvaru-användande sektorer påverkas vad gäller prisförändringar och resursallokering av skogsråvaror (produktion).

En särskilt intressant marknadseffekt som påvisades är att främjande av bioenergi och skogsbevarande tenderar att ha motsatta priseffekter för skogsindustriens biprodukter. Om de två strategierna kombineras blir prisökningen på biprodukterna därför mindre, jämfört med om endast en policy som stimulerar bioenergianvändning genomförs. Konsekvensen blir att priseffekten för el- och värmesektorn blir lägre om bioenergimål kombineras med ökat skogsbevarande. Denna effekt beror på att massavedspriserna höjs, vilket leder till minskad produktion av massa, papper och kartong, vilket i sin tur minskar konkurrensen om tillhörande biprodukter. Sammantaget illustrerar resultaten den stora komplexiteten på skogsråvarumarknaden och vikten av att beakta efterfråge- och utbudssvar både inom och mellan sektorer inom utformning av energi- och skogspolicy.

Den andra forskningsfrågan fokuserade på effekterna på den svenska skogsbrukssektorn av en nationell policy för inhemsk produktion av andra generationens biodrivmedel (2G) (Bryngemark, 2019b). Förändringar i råvarupriser och resursallokering utvärderades med hjälp av en nationell partiell jämviktsmodell för skogssektorn, som inom ramen för Elinas arbete utvecklades till att inkludera produktion och efterfrågan av 2G-biodrivmedel. Resultaten visade att priserna på biprodukter från skogsindustrin (t.ex. sågspån) skulle stiga vid introduktion av 2G-biodrivmedel, vilket indikerar att 2G-målen skulle leda till ökad råvarukonkurrens. De högre råvarupriserna ledde till minskad lönsamhet för att använda skogsbiomassa för el- och värmeproduktion, och en omställning i energisektorn från skogsindustriella biprodukter till skogliga avverkningsrester. Vidare skulle de ökade råvarupriserna också medföra att produktionen av fiber- och spånskivor riskerar att helt upphöra. Resultaten visade också på tydliga synergieffekter mellan sågverksindustrin och användningen av skogsråvaror inom den stationära energisektorn, där högre biproduktspriser stimulerar ökad sågverksproduktion, vilket i sin tur stimulerar skogsägare att öka avverkningen. Denna biprodukteffekt startar redan vid låg 2G-produktion.

Den tredje forskningsfrågan utforskade effekterna av de globalt mest antagna policyinriktningarna inom transportsektorn: inblandningskrav och offentlig finansiering av forskning och utveckling (FoU), med särskilt fokus på deras effekter på inhemsk produktion av biodrivmedel (etanol) (Bryngemark &

Söderholm, 2021). I arbetet utvärderades 24 OECD-länder under perioden 2000-2016 med hjälp av en ekonometrisk modell (Poisson pseudo-maximum-likelihood). Resultaten visade att om inblandningskrav finns på plats, eller om de ökas, korrelerar det med ökad inhemsk etanolproduktion (som en andel av den totala bränsleförbrukningen). Detta tyder på att inblandningskrav inte bara ökar den inhemska förbrukningen av etanol utan också stimulerar den inhemska produktionen. Eftersom inblandningskraven vanligtvis inte specificerar vilken typ av etanol som ska användas, kommer detta därför i första hand att gynna redan kommersialiserad (billigare) första generationens etanol. Utvecklingen av industrier som producerar avancerade biodrivmedel kommer däremot inte att få samma draghjälp av inblandningskraven. Resultaten visade också inblandningskrav i kombination med riktad FoU (typiskt investeringar i sektorn för avancerad biodrivmedelsproduktion) inte ökar etanolproduktionen. Tvärtom så observerades en negativ interaktionseffekt, vilket antyder att inblandningskrav och statlig FoU är policyinstrument som tenderar att knuffa utvecklingen i olika riktningar (dvs. stödjer olika teknikspår).

Den fjärde och sista forskningsfrågan undersökte faktorer som påverkar sannolikheten att svenska kommuner upphandlar miljövänliga bränslen i transportsektorn. Här användes en ekonometrisk modell (bivariate probit) för att analysera 140 svenska kommuners enkätsvar rörande offentlig upphandling, tjänstemännens attityd, och kommunstruktur (Bryngemark et al., 2021). Resultaten visade att kommuner som har styrdokument för grön upphandling har en signifikant högre sannolikhet att upphandla grönt. Resultaten visade också att beslutsprocessen att anta styrdokument och att upphandla grönt är en endogen process och därför bör modelleras så för att undvika ekonometrisk felspecifikation. När hänsyn togs till den endogena beslutsprocessen visades att kommunstorleken har en negativ effekt på sannolikheten att upphandla grönt (i arbetet kontrollerades också för andra variabler, så som utbildning och tjänstemäns erfarenhet att upphandla). En förklaring till detta skulle kunna vara att centralisering av upphandling i större kommuner kan skapa ett avstånd mellan upphandlare och beställare, vilket försvårar genomförandet av den gröna upphandlingen.

Delprojekt 2 – Tekniker och värdekedjor

I sin första forskningsfråga utforskade Johan hur de olika beaktade integrationsaspekterna (teknik, process, värdekedja) kan förbättra den ekonomiska genomförbarheten för förgasningsbaserad biometanproduktion. Resultaten visade att alla undersökta aspekter, åtminstone under specifika förhållanden, kan bidra till att öka den ekonomiska prestandan och genomförbarheten. På *teknikintegrationsnivå* visades att det är tekniskt möjligt att använda bark istället för pellets som råvara och att detta skulle sänka produktionskostnaden väsentligt (Ahlström et al., 2019). På *processintegrationsnivå* visades att stora sågverk är lovande som värindustri för integrerad produktion av flytande biometan (LBG), pga. möjligheter för effektiv värmeintegration och introduktion av ångcykel, och att storleken på LBG-anläggningen har större inverkan på produktionskostnaden än transportbehovet av råvara till anläggningen (Ahlström et al., 2020, 2017; Zetterholm et al., 2020a). *Värdekedjeperspektivet* gav ytterligare insikter i att även om maximalt effektiv

värmeintegration är att föredra ur anläggningsperspektiv, är anläggningsstorlek avgörande ur ett bredare systemperspektiv (Ahlström et al., 2020, 2017). Vidare utvärderades integrering av förgasningsbaserad biometan med elsystemet, genom implementering av antingen CCU (carbon capture and utilisation) i ett power-to-gas-koncept, eller CCS (carbon capture and storage). I båda fallen avskiljs biogen CO₂ från förgasningsprocessen, för antingen syntes till biometan eller lagring. Resultaten visar att CCU-koncept integrerade med förgasningsanläggningar har potential att bidra till ökad lönsamhet för förgasningsanläggningen. Det är också tydligt att integrering av biomassaförgasning har en positiv effekt för elsystemet eftersom det skapar värde för den elproduktion som annars överstiger behovet. På så sätt kan integrering av CCU med biomassaförgasning bidra till ökad utbyggnad av förnyelsebar elproduktion från vind- och solkraft (Ahlström et al., 2021, 2018).

Den andra forskningsfrågan fokuserade på vilken typ av integrering som bör prioriteras när storskalig produktion av biobränslen från förgasning av skogsbiomassa introduceras. Sammantaget visade resultaten att det mest uppenbara steget för att sänka produktionskostnaden är att använda en råvara som det för närvarande är relativt låg efterfrågan på, t.ex. bark. Detta arbete har bidragit till att verifiera att det är tekniskt möjligt och ger önskade ekonomiska effekter, och att det dessutom skulle kunna bidra till att skapa en bredare marknad för skogsindustriella restströmmar (Ahlström et al., 2019). Effektiv värmeintegration med befintliga industrieanläggningar, där även ångcykler kan inkluderas för att öka värdet på överskottsvärme, kan också förbättra den ekonomiska prestandan för värdekedjan. Ur anläggnings- och processintegrationsperspektiv utgör sågverk bra alternativ för industriintegration, medan ett bredare systemperspektiv visar på något högre kostnadseffektivitet för större anläggningar, vilket gör processintegrationen mindre betydelsefull (Ahlström et al., 2020, 2017; Zetterholm et al., 2020a). Slutligen kan integration med elsystemet erbjuda intressanta möjligheter, beroende på den totala utvecklingen av energisystemet (Ahlström et al., 2021, 2018).

Den tredje forskningsfrågan undersökte vilka feedbackeffekter på energisystemet som kan förväntas vid bred introduktion av storskaliga förgasningsanläggningar för biobränsleproduktion. Vad gäller integration med elsystemet finns, som nämns ovan, en positiv återkopplingseffekt som kan stimulera utbyggnaden av förnybar elproduktionskapacitet. Vad gäller råvarumarknader för skogsbiomassa visade resultaten att storskalig implementering av skogsbaserade bioraffinaderier skulle påverka priserna på alla biomassasegment, vilket i sin tur påverkar produktionskostnaderna (Zetterholm et al., 2020a). Genom integration på teknik- och processnivå, som studerats i detta arbete, kan högre resurseffektivitet uppnås vilket skulle sänka den totala efterfrågan på och biomassaråvara och därmed dämpa effekterna av en sådan prisökning. Detta understryker också det positiva i att kunna använda lågvärdig råvara, som bark. Även om storskalig användning av bark också skulle leda till ökade priser bör den totala effekten på andra delar av biomassasystemet vara lägre, eftersom marknaden för och efterfrågan på bark idag är mer begränsad.

Den fjärde och sista forskningsfrågan handlade även den om feedbackeffekter på energisystemet av introduktion av biomassaförgasning, med särskilt fokus på

vilka insikter som kan fås genom kombination av olika metoder. Tillämpning av en dynamisk elsystemmodell i kombination med en teknisk modell av biomassa-förgasning med CCU påvisade fördelarna med förgasningsprocessens flexibla beteende och den resulterande inverkan på elsystemet. Dessa nyttor och effekter hade varit svåra att identifiera utan denna kombination av metoder och modeller (Ahlström et al., 2021). På motsvarande sätt gav modellänkningen i (Zetterholm et al., 2020a) viktiga insikter om mekanismer för och effekter av pris-efterfråga-kopplingar på biomassamarknaden.

Delprojekt 3 – Lokalisering och industriell omställning

Den första forskningsfrågan i Jonas arbete utforskade hur den ekonomiska prestandan för integrerade produktionsanläggningar för biodrivmedel påverkas av anläggningens storlek jämfört med värmdindustrins. Även om det inte är någon överraskning att en större anläggningskapacitet leder till förbättrad ekonomisk prestanda på grund av skaleffekter (economy of scale), gav resultaten nya insikter om gynnsamma storlekskonfigurationer ur såväl anläggningsägarperspektiv som ur policybeslutsfattarperspektiv. Ur beslutsfattarperspektiv visade det sig generellt fördelaktigt med större anläggningar, oavsett integrationsaspekter och framtida ekonomiska förutsättningar (Ahlström et al., 2020; Zetterholm et al., 2020a). Färre, men större, bioraffinaderier begränsar antalet andra biomassa-användande industrier som påverkas av förändringar i försörjningskedjan, även om effekten för den enskilda påverkade industrin blir stor. Ur anläggningsägarperspektiv spelar däremot värmeintegrationsmöjligheterna betydande roll för hur känslig den ekonomiska prestandan är för produktionsskalan (Zetterholm et al., 2020a, 2018b). Resultaten visade också på effekter av och möjligheter för att ersätta existerande kapitalintensiv processutrustning (som sodapanna i massabruk) med bioraffinadertechnik (som svartlutsförgasning) och vilken inverkan detta har på den ekonomiska prestandan (Zetterholm et al., 2018a).

Den andra forskningsfrågan fokuserade på hur traditionell teknoekonomisk analys kan kompletteras med andra metodologiska angreppssätt för att få ytterligare insikter vad gäller prestanda för olika framtida bioraffinaderikoncept. Tre olika metodkomplement utforskades: (1) framtida energimarknadsscenarioer skapade med verktyget ENPAC (Ahlström et al., 2020); (2) mjuklänkning mellan anläggningsmodell, försörjningskedjemodell och marknadsmodell (Zetterholm et al., 2020b, 2020a); och (3) stokastisk behandling av framtida prisutveckling och effekter av möjligheten för en investerare att senarelägga ett investeringsbeslut, implementerat i ett ramverk för reala optioner (Zetterholm et al., 2021). Var och en av de tre metoderna gav ytterligare bitar till det pussel som ekonomisk prestanda för framväxande bioraffinadertechniker utgör. Resultaten visade på (1) insikter om robustheten hos nya tekniker under ett brett spann för framtida marknadsutveckling, (2) effekter av förändrade marknadsvillkor både för bioraffinaderierna själva och för andra biomassa-användande industrier, och (3) hur osäkerheter påverkar (ekonomisk rationell) investeringsvillighet.

Den tredje forskningsfrågan undersökte dels hur storskalig implementering av bioraffinaderier påverkar biomassamarknaden, dels om det kan ge draghjälp åt

andra industrier att ställa om till ökad andel biobränslen. Resultaten visade att storskalig användning av skogsbiomassa för bioraffinaderier kan leda till en avsevärd ökning av biomassapriserna, vilket i sin tur kan ge betydande ökning av produktionskostnaderna för bioraffinaderiprodukter. Om denna typ av marknadsförändringar inte beaktas i utvärdering av bioraffinaderier kan det ge felaktiga indikationer om vilka biomassasortiment som är lämpliga som bioraffinaderiråvara (Zetterholm et al., 2020b, 2020a). Resultaten visade också att för industri-sektorer med relativt begränsad total efterfrågan på biobränslen (t.ex. järn- och stålindustrins behov av flytande eller gasformiga biobränslen) är det nödvändigt med en parallell efterfrågan på samma bränslen i andra sektorer, för att få tillräckliga volymer för att bränsleproduktion ska bli lönsamt. Högre efterfrågan inom andra sektorer innebär dock inte billigare biobränsle, eftersom det också ger ökade kostnader för biomassa och transporter.

Den fjärde och sista forskningsfrågan fokuserade på hur osäkerheter vad gäller priser, investeringskostnader och policy påverkar ekonomisk prestanda, föredraget bioraffinaderikoncept och när i tiden investeringar görs (Zetterholm et al., 2021). Resultaten visade att kostnads- och prisosäkerheter har en betydande inverkan på utvecklingen av nya bioraffinaderikoncept. För de termokemiska bioraffinaderikoncepten som undersöktes har särskilt investeringskostnadsosäkerheten stor inverkan på om teknikerna kommer att vara realiserbara eller inte givet aktuella marknadstrender, eftersom kapitalkostnaden utgör en stor del av produktionskostnaden. Effekten av policyosäkerhet är en särskilt viktig fråga eftersom det ofta anses vara en vedertagen sanning att det är bristen på långsiktiga, förutsägbara styrmedel som är det största hindret mot investeringar i bioraffinaderier. Resultaten visade att detta påstående endast gäller för tekniker som kräver mycket höga stödnivåer för att alls vara lönsamma, såsom hydropyrolys, eller snabb pyrolys följt av uppgradering till bensin och diesel vid ett oljeraffinaderi. Investering i tekniker där det visade sig lönsamt att investera i redan vid lågt eller inget styrmedelsstöd, t.ex. ligninseparation följt av hydrodeoxygenering med vätgas från naturgas, var däremot inte känsligt för policyosäkerhet. Resultaten visade också att i avsaknad av policyosäkerhet sker investeringar inte tidigt, eftersom policystöd i dessa fall kommer vara garanterat över hela tidshorisonten. Detta gör det fördelaktigt för investeraren att invänta bättre marknadsförhållanden, givet nuvarande marknadstrender.

Tvärvetenskapligt ramverk

Det tvärvetenskapliga modell- och metodramverk som doktoranderna utvecklade gemensamt användes också i alla tre doktorandernas avhandlingar¹, vilket avspeglas i forskningsfrågorna inom respektive delprojekt. Syftet med detta mjuklänkande, iterativa ramverk var att bidra till att överbrygga klyftan mellan teknoekonomisk- och marknadsmodellering vid bedömningen av nya bioraffinaderikoncept.

¹ Johan Ahlström disputerade i december 2020, Elina Bryngemark och Jonas Zetterholm kommer disputeras under våren 2021 och arbetar för närvarande med färdigställandet av sina avhandlingar.

Arbetet med att utveckla och tillämpa ramverket gav tre generella insikter (Zetterholm et al., 2020b). För det första, när modeller avsedda att optimera försörjningskedjan för biomassa används tillsammans med exogena biomassapriser förbises hur tillgången på lämpliga råvaror förändras till följd av förändrade allokeringar på biomassamarknaderna. För det andra, om de biomassaprisförändringar som orsakas av implementeringen av bioraffinaderiet negligeras leder det till felaktiga relativa marknadspriser på biomassa. Detta kan leda till att specifika sortiment av biomassa identifieras som lämpliga att använda för bioraffinaderiet, vilket kanske inte är fallet med tanke på deras prisförändringar till följd av den ökade efterfrågan. För det tredje kan underskattning av effekten av högre råvarukostnader leda till överskattningar av skogsbaserade bioraffinaderiprodukters potential att penetrera marknaden.

Det ramverk som utvecklats kan användas för att underlätta identifieringen av bioraffinaderikoncept med hög ekonomisk prestanda som är robust mot råvaruprisförändringar orsakade av storskalig implementeringen av bioraffinaderiet. Ramverket kompletterar de skogssektormodeller som används för att analysera exogena förändringar på biomassamarknaderna, genom att det också möjliggör en högre detaljgrad och flexibilitet i modelleringen av bioraffinadertechniker och försörjningskedjor, med fokus på den slutliga bioraffinaderiprodukten. Till skillnad från ett statiskt förval av teknik som ska ingå i en marknadsmodell är fördelen med ett iterativt ramverk just iterationen av information mellan modellerna, vilket genererar en stabil lösning med hänsyn tagen till alla beslutsvariabler som ingår: Det kostnadsminimerande valet av teknik beror på råvarupriserna, vilka i sin tur är beroende av vilken teknik som ingår. Det framtagna ramverket säkerställer att de tekniker som ingår i marknadsmodellen väljs för att minimera den totala leveranskostnaden även när råvarupriset ändras. Ett bioraffinaderi har många beslutsvariabler, och att ignorera några av de viktigaste aspekterna kommer sannolikt att leda till missvisande slutsatser med risk för att skicka motstridiga politiska rekommendationer.

Sammantaget visade resultaten från tillämpning av ramverket att även om de faktiska priseffekterna av storskalig introduktion av skogsbaserade bioraffinaderier är svåra att förutsäga, eftersom prisförändringar påverkar både råvaruallokering och produktionsnivåer i berörda industrier och sektorer, kommer bioraffinaderiintroduktionen påverka både biomassapriser och produktion i andra biomassaanvändande industrier (Zetterholm et al., 2020a). Om dessa marknadseffekter ignoreras riskerar det leda till en betydande underskattning av den styrmedelsnivå som krävs för att upprätthålla en storskalig produktion av en given bioraffinaderiprodukt (t.ex. biodrivmedel), även om stödnivån skulle vara tillräcklig för att möjliggöra de första investeringarna. Traditionell scenario- eller känslighetsbaserad analys kan identifiera effekterna av marknadsprisförändringar på en tekniks ekonomiska prestanda, men försummar den endogena prispåverkan från storskalig introduktion av den specifika tekniken.

Diskussion

I detta tvärvetenskapliga doktorandprojekt inom Forskarskola Energisystem har ett kunskaps- och modellramverk byggts upp som möjliggör avancerad systemanalys relaterat till Sveriges bioråvaror från skogen, deras roll i ett hållbart energisystem, och omställning av processindustrin mot framtidens bioraffinaderier. I projektet har vi belyst olika systemaspekter relaterat till utvecklingen av och investeringar i bioraffinaderier, hur detta kan gå till, vilka effekter storskalig implementering av bioraffinaderier eller annan avancerad användning av bioråvaror skulle få på råvarusystemen och industristrukturen i Sverige, samt vilka styrmedel som kan vara relevanta.

Genom att tillämpa ett mjuklänkat metodkombinerande modell- och analysramverk har vi också belyst och utvecklat komplexiteten i hur systemkostnader för storskalig implementering av skogsbaserade bioraffinaderier är sammansatta. Ramverket kan användas för att, exempelvis, identifiera inte bara det styrmedelsstöd som skulle behövas för att möjliggöra en första lönsam bioraffinaderianläggning, utan också det stöd som skulle krävas för att upprätthålla en stor produktion av t.ex. skogsbaserat biodrivmedel. Resultaten från tillämpningen av ramverket belyser också komplexiteten i relationen mellan perspektivet hos anläggningsägare å ena sidan, och policybeslutsfattare å andra sidan. De lösningar som har lägsta kostnad för en anläggningsägare är inte nödvändigtvis desamma som de som skulle föredras av en beslutsfattare på policynivå, på grund av förekomsten av dolda indirekta kostnader.

Sammanfattningsvis konstateras att projektets huvudsakliga syfte och mål är väl uppfyllda. Projektet har bidragit med ny kunskap om möjligheter för och hinder mot storskalig implementering av skogsbaserade bioraffinaderier, ur tekniskt såväl som ekonomiskt perspektiv, och har resulterat i både inom- och tvärvetenskapliga publikationer. En av tre doktorander har disputerat inom projekttiden, med de återstående två disputationerna planerade under halvåret närmast efter projektavslut. Vi har därmed även uppfyllt målet om att bidra med stärkt kompetens för att underlätta övergången till ett långsiktigt hållbart energisystem och den fortsatta utvecklingen mot en biobaserad ekonomi.

Publikationslista

Artiklar i vetenskapliga tidskrifter

Ahlström JM, Alamia A, Larsson A, Breitholtz C, Harvey S, Thunman H. Bark as feedstock for dual fluidized bed gasifiers-Operability, efficiency, and economics. *International Journal of Energy Research* 2019;43:1171–90.

<https://doi.org/10.1002/er.4349>

Ahlström JM, Harvey S, Papadokonstantakis S. Forest residues gasification integrated with electrolysis for production of SNG – modelling and assessment. *Comput. Aided Chem. Eng.*, 2018, p. 109–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50013-6>

Ahlström JM, Pettersson K, Wetterlund E, Harvey S. Value chains for integrated production of liquefied bio-SNG at sawmill sites – Techno-economic and carbon footprint evaluation. *Applied Energy* 2017;206:1590–608.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.104>

Ahlström JM, Walter V, Göransson L, Papadokonstantakis S. The role of biomass gasification in the future flexible power system – BECCS or CCU? Inskickad för publicering i *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021.

Ahlström JM, Zetterholm J, Pettersson K, Harvey S, Wetterlund E. Economic potential for substitution of fossil fuels with liquefied biomethane in Swedish iron and steel industry – Synergy and competition with other sectors. *Energy Conversion and Management* 2020;209:112641.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112641>

Bryngemark E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2020;35:367–82.

<https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1808696>

Bryngemark E. Second generation biofuels and the competition for forest raw materials: A partial equilibrium analysis of Sweden. *Forest Policy and Economics* 2019b;109:102022. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102022>

Bryngemark E, Söderholm P. Do green industrial policies promote domestic production of biofuels? A panel data analysis of OECD countries. *Manuskript* 2021.

Bryngemark E, Söderholm P, Thörn M. Green Public Procurement in Swedish Municipalities - An Econometric Analysis based on Survey Data. *Manuskript* 2021.

Zetterholm J, Ahlström J, Bryngemark E. Large-scale introduction of forest-based biorefineries: Actor perspectives and the impacts of a dynamic biomass market. *Biomass and Bioenergy* 2020a;142:105782.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105782>

Zetterholm J, Bryngemark E, Ahlström J, Söderholm P, Harvey S, Wetterlund E. Economic Evaluation of Large-Scale Biorefinery Deployment: A Framework Integrating Dynamic Biomass Market and Techno-Economic Models.

Sustainability 2020b;12:7126. <https://doi.org/10.3390/su12177126>

Zetterholm J, Mossberg J, Jafri Y, Wetterlund E. “We need stable, long-term policy support!” – evaluating the economic rationale behind the prevalent investor lament. *Manuskript* 2021.

Zetterholm J, Pettersson K, Leduc S, Mesfun S, Lundgren J, Wetterlund E. Resource efficiency or economy of scale: Biorefinery supply chain configurations for co-gasification of black liquor and pyrolysis liquids. *Applied Energy* 2018a;230:912–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.018>

Zetterholm J, Wetterlund E, Pettersson K, Lundgren J. Evaluation of value chain

configurations for fast pyrolysis of lignocellulosic biomass - Integration, feedstock, and product choice. *Energy* 2018b;144:564–75.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.027>

Konferensbidrag

Ahlström JM, Petersson I, Svensson A, Harvey S, Papadokonstantakis S, Decentralized plastic waste recycling through pyrolysis – a techno-economic feasibility study. Presenterad vid 3rd international conference on Functional Materials and Chemical Engineering (ICFMCE 19) in Bangkok (december 2019).

Bryngemark E, Zetterholm J, Ahlström JM, A multidisciplinary framework for early phase evaluation of biorefinery concepts, presenterad vid Conference on Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems, SDEWES, Dubrovnik, Kroatien, 2017.

Zetterholm J, Mossberg J, Lundgren J, Wetterlund E. Evaluating investments in integrated biofuel production - factoring in uncertainty through real options analysis, presenterad vid International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), Wrocław, Polen, juni 2019.

Vetenskapliga avhandlingar

Ahlström JM. Shaping Future Opportunities for Biomass Gasification-The Role of Integration. Doktorsavhandling. Chalmers, Rymd-, geo- och miljövetenskap, Energiteknik, 2020. <https://research.chalmers.se/en/publication/520239>

Ahlström JM. Cost-Effective Pathways for Gasification-Based Production of Biofuels. Licentiatavhandling. Chalmers, Rymd-, geo- och miljövetenskap, Energiteknik, 2018. <https://research.chalmers.se/en/publication/503132>

Bryngemark E. The Economics of Biofuel Development: Policy Incentives and Market Impacts. Doktorsavhandling (kommande). Luleå tekniska universitet, Institutionen för ekonomi, teknik och samhälle, Samhällsvetenskap, våren 2021.

Bryngemark E. The Competition for Forest Raw Materials in the Presence of Increased Bioenergy Demand : Partial Equilibrium Analysis of the Swedish Case. Licentiatavhandling. Luleå tekniska universitet, Institutionen för ekonomi, teknik och samhälle, Samhällsvetenskap, 2019a.

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-72540>

Zetterholm J. Exploring the economic performance of emerging forest-industry integrated biorefinery technologies. Doktorsavhandling (kommande). Luleå tekniska universitet, Institutionen för teknikvetenskap och matematik, Energivetenskap, våren 2021.

Zetterholm J. Forest based biorefinery supply chains - Identification and evaluation of economic, CO₂, and resource efficiency. Licentiatavhandling. Luleå tekniska universitet, Institutionen för teknikvetenskap och matematik, Energivetenskap, 2018. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-67924>

Referenser, källor

Ahlström J. Shaping Future Opportunities for Biomass Gasification-The Role of Integration. Doktorsavhandling. Chalmers, Rymd-, geo- och miljövetenskap, Energiteknik. <https://research.chalmers.se/en/publication/520239>; 2020.

Ahlström J. Cost-Effective Pathways for Gasification-Based Production of Biofuels. Licentiatavhandling. Chalmers, Rymd-, geo- och miljövetenskap, Energiteknik. <https://research.chalmers.se/en/publication/503132>; 2018.

Ahlström JM, Alamia A, Larsson A, Breitholtz C, Harvey S, Thunman H. Bark as feedstock for dual fluidized bed gasifiers-Operability, efficiency, and economics. *International Journal of Energy Research* 2019;43:1171–90. <https://doi.org/10.1002/er.4349>.

Ahlström JM, Harvey S, Papadokonstantakis S. Forest residues gasification integrated with electrolysis for production of SNG – modelling and assessment. *Comput. Aided Chem. Eng.*, 2018, p. 109–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50013-6>.

Ahlström JM, Pettersson K, Wetterlund E, Harvey S. Value chains for integrated production of liquefied bio-SNG at sawmill sites – Techno-economic and carbon footprint evaluation. *Applied Energy* 2017;206:1590–608. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.104>.

Ahlström JM, Walter V, Göransson L, Papadokonstantakis S. The role of biomass gasification in the future flexible power system – BECCS or CCU? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;Inskickad.

Ahlström JM, Zetterholm J, Pettersson K, Harvey S, Wetterlund E. Economic potential for substitution of fossil fuels with liquefied biomethane in Swedish iron and steel industry – Synergy and competition with other sectors. *Energy Conversion and Management* 2020;209:112641. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112641>.

Börjesson Hagberg M, Pettersson K, Ahlgren EO. Bioenergy futures in Sweden – Modeling integration scenarios for biofuel production. *Energy* 2016;109:1026–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.044>.

Börjesson M, Ahlgren EO. Modelling transport fuel pathways: Achieving cost-effective oil use reduction in passenger cars in Sweden. *Technological Forecasting and Social Change* 2012;79:801–18. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.10.010>.

Börjesson M, Ahlgren EO, Lundmark R, Athanassiadis D. Biofuel futures in road transport – A modeling analysis for Sweden. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2014;32:239–52. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.002>.

Börjesson P, Hansson J, Berndes G. Future demand for forest-based biomass for energy purposes in Sweden. *Forest Ecology and Management* 2017;383:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.018>.

- Bryngemark E. The Economics of Biofuel Development: Policy Incentives and Market Impacts. Doktorsavhandling (kommande). Luleå tekniska universitet, Institutionen för ekonomi, teknik och samhälle, Samhällsvetenskap, 2021.
- Bryngemark E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2020;35:367–82.
<https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1808696>.
- Bryngemark E. The Competition for Forest Raw Materials in the Presence of Increased Bioenergy Demand : Partial Equilibrium Analysis of the Swedish Case. Licentiatavhandling. Luleå tekniska universitet, Institutionen för ekonomi, teknik och samhälle, Samhällsvetenskap.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-72540>, 2019a.
- Bryngemark E. Second generation biofuels and the competition for forest raw materials: A partial equilibrium analysis of Sweden. *Forest Policy and Economics* 2019b;109:102022. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102022>.
- Bryngemark E, Söderholm P. Do green industrial policies promote domestic production of biofuels? A panel data analysis of OECD countries. Manuskript 2021.
- Bryngemark E, Söderholm P, Thörn M. Green Public Procurement in Swedish Municipalities - An Econometric Analysis based on Survey Data. Manuskript 2021.
- de Jong J, Akselsson C, Egnell G, Löfgren S, Olsson BA. Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? *Forest Ecology and Management* 2017;383:3–16.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.028>.
- de Jong S, Hoefnagels R, Wetterlund E, Pettersson K, Faaij A, Junginger M. Cost optimization of biofuel production – The impact of scale, integration, transport and supply chain configurations. *Applied Energy* 2017;195:1055–70.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.109>.
- Khatiwada D, Leduc S, Silveira S, McCallum I. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy* 2016;85:371–86. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>.
- Krook Riekkola A, Ahlgren EO, Söderholm P. Ancillary benefits of climate policy in a small open economy: The case of Sweden. *Energy Policy* 2011;39:4985–98. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.015>.
- Lundmark R. Dependencies between forest products sectors: A partial equilibrium analysis. *Forest Products Journal* 2007;57:79–86.
- Natarajan K, Leduc S, Pelkonen P, Tomppo E, Dotzauer E. Optimal locations for second generation Fischer Tropsch biodiesel production in Finland. *Renewable Energy* 2014;62:319–30. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.013>.
- Pettersson K, Wetterlund E, Athanassiadis D, Lundmark R, Ehn C, Lundgren J, et

- al. Integration of next-generation biofuel production in the Swedish forest industry – A geographically explicit approach. *Applied Energy* 2015;154:317–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.041>.
- Sandberg E, Toffolo A, Krook-Riekkola A. A bottom-up study of biomass and electricity use in a fossil free Swedish industry. *Energy* 2019;167:1019–30. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.11.065>.
- Sathre R, Gustavsson L. Time-dependent climate benefits of using forest residues to substitute fossil fuels. *Biomass and Bioenergy* 2011;35:2506–16. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.027>.
- Wetterlund E, Leduc S, Dotzauer E, Kindermann G. Optimal use of forest residues in Europe under different policies—second generation biofuels versus combined heat and power. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2013a;3:3–16. <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0054-2>.
- Wetterlund E, Pettersson K, Mossberg J, Torén J, Hoffstedt C, von Schenck A, et al. Optimal localisation of next generation biofuel production in Sweden. Report No. 2013:8, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels; 2013b.
- Zetterholm J. Exploring the economic performance of emerging forest-industry integrated biorefinery technologies. Doktorsavhandling (kommande). Luleå tekniska universitet, Institutionen för teknikvetenskap och matematik, Energivetenskap, 2021.
- Zetterholm J. Forest based biorefinery supply chains - Identification and evaluation of economic, CO₂, and resource efficiency. Licentiatavhandling. Luleå tekniska universitet, Institutionen för teknikvetenskap och matematik, Energivetenskap. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-67924>, 2018.
- Zetterholm J, Ahlström J, Bryngemark E. Large-scale introduction of forest-based biorefineries: Actor perspectives and the impacts of a dynamic biomass market. *Biomass and Bioenergy* 2020a;142:105782. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105782>.
- Zetterholm J, Bryngemark E, Ahlström J, Söderholm P, Harvey S, Wetterlund E. Economic Evaluation of Large-Scale Biorefinery Deployment: A Framework Integrating Dynamic Biomass Market and Techno-Economic Models. *Sustainability* 2020b;12:7126. <https://doi.org/10.3390/su12177126>.
- Zetterholm J, Mossberg J, Jafri Y, Wetterlund E. “We need stable, long-term policy support!” – evaluating the economic rationale behind the prevalent investor lament. Manuskript 2021.
- Zetterholm J, Pettersson K, Leduc S, Mesfun S, Lundgren J, Wetterlund E. Resource efficiency or economy of scale: Biorefinery supply chain configurations for co-gasification of black liquor and pyrolysis liquids. *Applied Energy* 2018a;230:912–24. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.09.018>.
- Zetterholm J, Wetterlund E, Pettersson K, Lundgren J. Evaluation of value chain

configurations for fast pyrolysis of lignocellulosic biomass - Integration, feedstock, and product choice. *Energy* 2018b;144:564–75.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.12.027>.

Bilagor

Administrativ bilaga