



CHALMERS



Barriärer, drivkrafter och förutsättningar för implementering av biogen koldioxidinfångning, transport, användning och lagring

Kandidatarbete under institutionen för Rymd-, geo- och miljövetenskap

JESPER AMANN

JOSEPHINE ARNELL

NILS BREDIN

THEA OLOFSON

CAJSA REUTERBERG

AXEL ZETTERGREN

AVDELNINGEN FÖR ENERGITEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025
www.chalmers.se

Barriärer, drivkrafter och förutsättningar för implementering av biogen koldioxidinfångning, transport, användning och lagring

KANDIDATARBETE 2025

JESPER AMANN

JOSEPHINE ARNELL

NILS BREDIN

THEA OLOFSON

CAJSA REUTERBERG

AXEL ZETTERGREN



CHALMERS

Institutionen för Rymd-, geo- och miljövetenskap
Avdeleningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Barriärer, drivkrafter och förutsättningar för implementering av biogen koldioxidin-
fångning, transport, användning och lagring

© JESPER AMANN, JOSEPHINE ARNELL, NILS BREDIN, THEA OLOFSON,
CAJSA REUTERBERG, AXEL ZETTERGREN 2025.

Handledare:

Anna Hörbe Emanuelsson, Energiteknik, Rymd-, geo- och miljövetenskap

Simon Öberg, Energiteknik, Rymd-, geo- och miljövetenskap

Examinator:

Filip Johnsson, Energiteknik, Rymd-, geo- och miljövetenskap

Kandidatarbete 2025

Institutionen för Rymd-, geo- och miljövetenskap

Avdelningen för energiteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

OMSLAG: BECCUS i Sverige, illustration genererad med ChatGPT (OpenAI DALL · E,
2025)

Skriven i L^AT_EX

Göteborg 2025

Challenges, Drivers and Preconditions for the Implementations of Biogenic Carbon Capture, Transport, Utilization and Storage

JESPER AMANN, JOSEPHINE ARNELL, NILS BREDIN, THEA OLOFSON, CAJSA REUTERBERG, AXEL ZETTERGREN.

Department of Space, Earth and Environment
Chalmers University of Technology

Abstract

The quick expansion of the energy and industry sector has, in recent years, led to a significant increase in stationary carbon emissions. This raises concern regarding possibilities of limiting global warming and reaching the Swedish climate goals set for 2045, in order to secure a sustainable and fossil free future. In the context of this development, biogenic carbon capture, utilization and storage (BECCUS) has been identified, both by Sweden and the EU, as an important tool to limit climate change. Based on interviews, this study aims to identify possibilities and barriers regarding the implementation of the technology. In order to gain a nuanced understanding of BECCUS, the study includes both representatives from various actors along the CCUS value chain (emitters of biogenic carbon dioxide and potential users of captured biogenic carbon dioxide) and several researchers on the topic and experts.

First and foremost, the results from the interview study show that it is the financial risk, rather than technical barriers, which prevents firms from investing in BECCUS. The technology is considered mature to a large extent; however, the substantial investments require long-term profitability. Since the market to a significant degree is politically driven, political instabilities are considered a definitive barrier; particularly when there is a need for economic stability for these investments over a longer timeframe. For BECCU specifically, there is a need for securing the supply of fossil free hydrogen at a price which can compete on a market with fossil-based products. For BECCS, on the other hand, one challenge lies in the absence of infrastructure and logistics. Regarding BECCUS as a whole, further policy instruments are needed to drive the development of the value chain forward. At the same time, some interviewees raise critique towards BECCUS, suggesting that there are more effective mitigation strategies.

Keywords: BECCS, BECCU, carbon capture, challenges, preconditions, biogenic carbon dioxide, policy instrument, interview study, Sweden

Sammanfattning

Den snabba expansionen av energi- och industrisektorn har på senare tid lett till en markant ökning av stationära koldioxidutsläpp, vilket väcker oro kring möjligheterna att begränsa den globala uppvärmningen och uppnå klimatmålen för 2045 inom ramen för en hållbar och fossilfri framtid. I detta sammanhang har biogen koldioxidinfångning, transport, användning och lagring (BECCUS) identifierats av både EU och Sverige som en viktig metod för att motverka klimatförändringarna. Denna studie syftar till att, genom intervjuer, identifiera möjligheter och hinder för implementeringen av tekniken. För att få en nyanserad förståelse av BECCUS har olika aktörer längs värdekedjan och även flera forskare inom området intervjuats.

Intervjustudien visar att det främst är den finansiella risken, snarare än tekniska barriärer, som hindrar företag från att fatta investeringsbeslut kring BECCUS. Tekniken upplevs i stor utsträckning som mogen, men de betydande investeringarna kräver långsiktig lönsamhet. Eftersom marknaden till stor del är politiskt styrd uppfattas den politiska osäkerheten som ett avgörande hinder, särskilt med tanke på att investeringarna behöver vara ekonomiskt hållbara över en längre tidshorisont. Specifikt för BECCU är höga produktionskostnader ett hinder för att konkurrera på en marknad med fossila produkter. För BECCS är en utmaning istället avsaknaden av logistik och infrastruktur. När det gäller BECCUS som helhet kommer det att krävas ytterligare styrmedel för att driva utvecklingen framåt. I rapporten lyfts även kritiska röster, från intervjustudien, som menar att det bland annat kan finnas effektivare alternativ för att reducera utsläpp.

Nyckelord: BECCS, BECCU, koldioxidinfångning, barriärer, drivkrafter, förutsättningar, biogen koldioxid, styrmedel, intervjustudie, Sverige

Förord

Först och främst skulle vi vilja tacka våra handledare Anna Hörbe Emanuelsson och Simon Öberg, som har hjälpt oss genom hela arbetet med värdefulla diskussioner och insikter. Tack för er tid och ert engagemang.

Vi vill vidare tacka alla som har ställt upp och deltagit i vår intervjustudie. Ni har med er expertis och tid lagt grunden för den studie som genomförts. Tack vare er har vi fått en bred och djup förståelse för implementeringen av BECCUS i Sverige.

Göteborg, Maj 2025

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	3
2	Bakgrund	4
2.1	Biogena kolflöden i Sverige	5
2.1.1	Kolflöden inom skogssektorn	5
2.1.2	Konkurrens om biomassa	6
2.1.3	Biogena utsläpp och kolupptag	7
2.2	BECCS och BECCU som klimatåtgärder	9
2.2.1	Negativa utsläpp och klimatnytta	9
2.2.2	Risker med implementering av BECCS och BECCU	9
2.3	Hur fungerar tekniken?	12
2.3.1	Infångning	12
2.3.2	Transport och lagring	14
2.3.3	Användning	15
2.4	Styrmedel för BECCUS i EU	17
2.4.1	EU:s utsläppshandelssystem och innovationsfond	17
2.4.2	Parisavtalet, Artikel 6	18
2.4.3	ReFuel EU Aviation	18
2.4.4	Fuel EU Maritime	18
2.4.5	Förnybara bränslen av icke-biogent ursprung	18
2.4.6	LULUCF-förordningen	19
2.4.7	Avsaknad av styrmedel på EU-nivå	19
2.5	Styrmedel för BECCUS i Sverige	20
2.5.1	Omvända auktioner	20
2.6	Marknad	21
3	Metod	22
3.1	Avgränsningar	24
4	Resultat	25
4.1	BECCUS roll i framtiden och värdet av den gröna kolatomen	26
4.1.1	BECCUS som klimatstrategi	26
4.1.2	Industriella tillämpningar och affärsmodeller	27

4.1.3	Värdet och användningen av biogent kol	28
4.1.4	Biomassatillgång	28
4.1.5	Effekter av storskalig implementering	29
4.2	Befintliga styrmedel	31
4.2.1	EU ETS	31
4.2.2	Omvända auktioner	31
4.2.3	RefuelEU och Fuel EU Maritime	33
4.2.4	Långsiktighet i styrmedel	33
4.3	Teknik	35
4.3.1	Tekniska förutsättningar	35
4.3.2	Infångningsteknikers mognadsgrad	35
4.3.3	Rökgasens påverkan	36
4.3.4	Energibehov	36
4.3.5	Tekniska utmaningar med slutlagring	37
4.4	Logistik och infrastruktur	38
4.4.1	Infångningsanläggning, miljötillstånd och bygglov	38
4.4.2	Logistik och infrastruktur till användning eller slutlagring	38
4.5	Ekonomi	41
4.5.1	Marknad	41
4.5.2	Konkurrens med icke BECCU-alternativ	42
4.5.3	Höga kostnader	42
4.5.4	Osäkerhet kring kostnader	43
4.5.5	Investeringsbeslut	44
4.6	Framtida utveckling av styrmedel	45
4.6.1	Räcker dagens styrmedel till?	45
4.6.2	Komplexitet i finansiering av BECCUS	46
4.6.3	Förslag på framtida styrmedel för BECCUS	47
5	Slutsats	49
6	Diskussion	51
6.1	Diskussion av resultat och slutsats	51
6.2	Diskussion av metod och framtida forskning	52
A	Intervjumall: Utsläppare av biogen koldioxid	I
B	Intervjumall: Potentiella användare av biogen koldioxid	II
C	Intervjumall: Forskare	III

Förkortningar

BECCS	<i>Biogenic Carbon Capture and Storage</i> , biogen koldioxidinfångning, transport och lagring.
BECCU	<i>Biogenic Carbon Capture and Utilization</i> , biogen koldioxidinfångning och användning.
BECCUS	<i>Biogenic Carbon Capture, Storage and Utilization</i> , biogen koldioxidinfångning, transport, användning och lagring.
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> , fossil eller biogen koldioxidinfångning, transport och lagring.
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i> , fossil eller biogen koldioxidinfångning och användning.
DACCS	<i>Direct Air Carbon Capture and Storage</i> , koldioxidinfångning från atmosfärisk koldioxid.
EU ETS	<i>EU Emission Trading System</i> , Europeiska Unionens Utsläppshandelssystem.
LULUCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i> , EU:s markanvändningssektor.
SAF	<i>Sustainable Aviation Fuel</i> , hållbara flygbränslen.
eSAF	<i>Electro Sustainable Aviation Fuel</i> , elektrobränslen för flygindustrin.
TRL	<i>Technological Readiness Level</i> , teknisk mognadsgrad
RFNBO	<i>Renewable Fuels of Non-Biological Origin</i> , Förnybara bränslen av icke-biogen ursprung.

1

Inledning

Världen står inför ett nödläge där försök att bromsa den planetära uppvärmningen och klimatförändringarna hittills inte gett tillräckligt stor effekt. Samhället genomgår en fundamental omställning av energitillförsel och energianvändning i syfte att fasa ut användningen av fossila bränslen [1]. Från ett globalt perspektiv har tekniska framsteg inom grön energiteknik inte ersatt fossil energianvändning, utan har i stället använts för att tillgodose ett ökat energibehov [2]. Dessutom finns det sektorer i samhället som är svåra att ställa om till fossilfri drift och som genererar betydande koldioxidutsläpp, exempelvis cement- och stålindustrin [3].

För att minska koldioxidutsläppen och bromsa klimatförändringarna i Europa har Europeiska unionen (EU) antagit en strategiplan med konkreta åtgärder för att skapa ett mer resurseffektivt och hållbart samhälle [4]. Planen syftar till att främja utveckling och implementering av innovativa teknologier, stimulera elektrifiering, öka energieffektiviteten och etablera cirkulära materialflöden. Inom ramen för denna strategi har Sverige utformat en nationell handlingsplan som anpassar EU:s övergripande mål till svenska förhållanden och prioriteringar. Den svenska strategin bygger på en kombination av skärpta utsläppskrav, ekonomiska incitament för hållbara investeringar och stöd för forskning och utveckling av teknologier som resulterar i minskade utsläpp [5]. I tillägg till detta har både EU och svenska staten identifierat koldioxidavskiljning och -lagring (CCS) som en komponent för att uppnå klimatmålen [6]. CCS-tekniken möjliggör avskiljning av koldioxid från utsläppsintensiva industrier, varefter koldioxiden transporteras och lagras permanent i geologiska formationer [3].

Sverige har speciellt identifierat CCS av biogena utsläpp (BECCS) som en kompletterande åtgärd i det klimatpolitiska ramverket med målet att kompensera för utsläpp som är svåra att undvika från sektorer som processindustrier, avfallsförbränning och delar av transportsektorn. I regeringens Klimatpolitiska vägvalsutredning är det föreslagna målet att kompletterande åtgärder ska uppgå till minst 10,7 miljoner ton koldioxid per år i Sverige år 2045 [7]. På sikt kan det bidra till att utsläppen blir nettonegativa och därmed minska koldioxidhalten i atmosfären [3]. I och med detta har både regeringen och EU inrättat olika stödprogram för denna typ av teknik för att påskynda utvecklingen.

Som alternativ till lagring av infångad koldioxid finns det även tekniker som möjliggör att koldioxiden används för att framställa produkter, som exempelvis bränslen och plast, som brukar benämnas CCU, eller BECCU för biogen koldioxid. Med dessa

produkter kan en substitutionseffekt uppnås genom att de ersätter produkter med fossilt ursprung [8]. Det samlingsnamn som kommer användas i rapporten för både användning och/eller lagring av infångad biogen koldioxid är därför BECCUS.

Med anledning av Sveriges förhållandevis stora tillgång till biomassa och biogena punktutsläpp från exempelvis pappersmassabruk och kraftvärmeverk finns här en betydande potential för BECCUS [3]. För företag som vill integrera BECCUS i sin verksamhet finns dock flera utmaningar, bland annat begränsade ekonomiska incitament, tekniska hinder, finansiella risker till följd av stora investeringsbelopp samt politisk osäkerhet kring långsiktigt stöd för tekniken [3]. I dagsläget finns ingen storskalig kommersiell användning av BECCUS i Sverige, men flera aktörer befinner sig i planerings- eller pilotfas med ambitionen att implementera tekniken inom en överskådlig framtid [9]. På grund av de många osäkerheterna finns ett behov av en akademisk studie som angriper ett brett fokusområde där barriärer, drivkrafter och förutsättningar för implementering av BECCUS i Sverige kartläggs. För att undersöka de möjligheter som finns, och skapa en förståelse för vad som krävs för att uppnå målet om nettonollutsläpp, behövs flera olika perspektiv. En intervjustudie riktad mot pappersmassabruk, kraftvärmeverk, bränsleproducenter, plasttillverkare samt forskare inom systemvetenskap, processindustrier och styrmedel kan således skapa en tydlig bild av vilka möjligheter implementering av BECCUS kan innebära, men också vad som i dagsläget hindrar dess utveckling.

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att öka förståelsen för potentialen och utmaningarna med att implementera BECCUS i Sverige. Genom intervjuer med aktörer längs hela värdekedjan, samt med forskare, syftar rapporten till att sammanföra vetenskapliga perspektiv med företagsinsikter. Målet är att identifiera vilka förutsättningar som krävs vad gäller marknad, finansiering, styrmedel, tillstånd, teknik, logistik och infrastruktur för att en fortsatt utveckling ska vara möjlig, samt vilka effekter en storskalig implementering kan få för samhället och klimatet.

2

Bakgrund

Bakgrunden inleds med en presentation av Sveriges biogena kolflöden samt storleken på de biogena utsläppen för att skapa förståelse för den potential som finns för att fånga in biogen koldioxid i Sverige. Här belyses även eventuell framtida konkurrens till följd av BECCUS. De största biogena punktutsläppen, som framförallt kommer från massa- och pappersbruk och kraftvärmeverk, redogörs för eftersom det här finns störst potential för infångning. Vidare förklaras BECCU och BECCS roll som klimatåtgärder med hjälp av begrepp som negativa utsläpp och klimatnytta. Dessutom framförs de största riskerna som uppkommer vid en implementering, som ”mitigation deterrence” och olika inlåsnings. För att förstå tekniken bakom BECCUS är nästa del uppdelad i tre kategorier; infångning, transport/lagring och användning, som tillsammans skapar värdekedjan för BECCUS. Slutligen presenteras de befintliga styrmedel på EU-nivå samt nationell nivå som stimulerar BECCUS fortsatta utveckling.

För att minska Sveriges klimatpåverkan finns olika åtgärder, där BECCUS är en av dem. Elektrifiering och energieffektivisering är två andra viktiga åtgärder för att minska Sveriges totala växthusgasutsläpp [9], men de kommer inte förklaras utförligare i rapporten. Förutom utsläppsminskningar finns även andra åtgärder för upptag av växthusgaser. Det främsta förslaget är biokol, en produkt för jordförbättring, som förväntas fungera som en kolsänka och bör kunna bidra till långvarig kolinlagring. Vid framställande av biokol reduceras nämligen utsläppen av koldioxiden. Detta är således en mer direkt åtgärd för utsläppsminskning som inte inkluderar infångning. Direktinfångning av atmosfärisk koldioxid (DACCS), är en annan teknik, som med stor sannolikhet kommer vara dyrare och mer energikrävande än BECCUS även i framtiden [6]. Dessa tekniker kommer, likt andra utsläppsminskningar, inte diskuteras mer ingående i rapporten även om de kan vara viktiga för Sveriges klimatstrategi.

2.1 Biogena kolflöden i Sverige

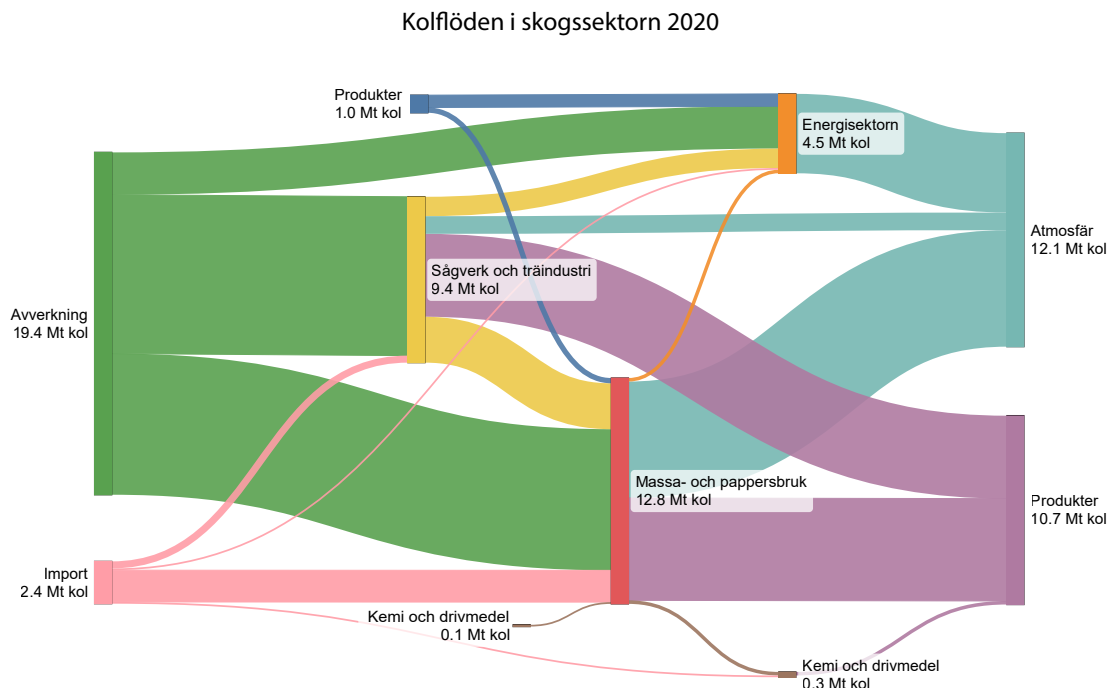
Sverige har en stor andel skogsmark, vilket dels innebär en stor kolsänka och dels att biomassatillgången inom skogssektorn är stor. Biomassauttaget fördelas idag främst över skogsindustrin och energisektorn. Dock kan olika åtgärder komma att ändra hur biomassan används i framtiden, vilket kan leda till en ökad konkurrens om biomassan. Den stora tillgången och användningen av biomassa innebär att Sverige har stora biogena utsläpp, där massa- och pappersbruk tillsammans med kraftvärme står för majoriteten av de biogena utsläppen. Sveriges stora biogena punktutsläpp innebär en betydande potential för koldioxidinfångning.

2.1.1 Kolflöden inom skogssektorn

För att förstå i vilka sektorer infångningspotentialen finns är det viktigt att förstå kolflödena. Av Sveriges biogena kolflöden kommer den största andelen från skogssektorn som bedöms vara minst fem gånger större än flödet från jordbrukssektorn [10]. Det stora flödet inom skogssektorn kan förklaras av Sveriges stora andel skogsmark. Av Sveriges totala landareal utgör skogsmark drygt två tredjedelar (27,9 miljoner hektar) och Sverige har således mest skogsmark av alla EU-länder och står för 18% av hela Europas skogsmark [11][12].

Sveriges biogena resurser fördelas över flera delar inom skogssektorn. Dessa kolflöden finns illustrerat i Figur 2.1. Under 2020 uppgick råvaruflödet i skogssektorn till 21 Mt kol, varav ca 10% kom från import. Majoriteten av råvarorna gick till skogsindustrier, bestående av sågverk och massa- och pappersbruk. Fördelning dem emellan är ungefär lika stor. Resterande råvaror går till energisektorn, vilket inkluderar värme och kraftvärme samt småskalig förbränning, där värme och kraftvärme står för 70% av förbränningen. Till både massa- och pappersbruk samt energisektorn tillkommer biproduktflöden från sågverk. Energisektorn förbränner även en betydande mängd skogsbaserade produkter [13].

Drygt hälften av allt kol i skogsråvarorna (12,1 Mt kol) släpps ut som koldioxid medan resterande kol hamnar i produkter. Tillsammans står massa- och pappersbruk och energisektorn för nästan alla koldioxidutsläpp inom skogssektorn. Kolutbytet (andelen av råvarans kol som hamnar i produkter) är lågt för massa- och pappersbruk, då drygt hälften av kolet släpps ut som koldioxid. Detta beror på att massa- och pappersbruk förbränner rest- och biprodukter för den egna energiförsörjningen. Nästan all massaved (88%) går till kemisk massatillverkning och resterande går till mekanisk massatillverkning där kolutbytet är högt (ca 90% av kolet går till massa) [13].



Figur 2.1: Kolflöden i svenska skogssektorn 2020 (baserat på data från [13])

2.1.2 Konkurrens om biomassa

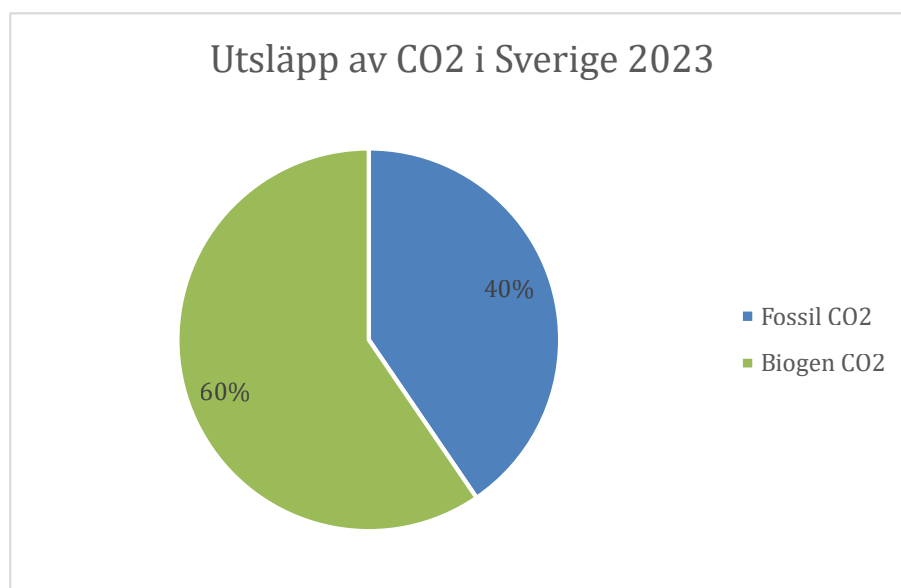
Hur biomassan används idag kan komma att förändras i framtiden. En konsekvens av förändrad användning kan bli att konkurrensen om den begränsade mängden biomassa ökar, vilket kan driva upp priset på biomassa. Till följd av detta kan användningen av biomassa komma att styras av olika sektorerers betalningsförmåga [14]. Utfasning av fossila bränslen inom industrisektorn är något som kan öka behovet av bibränslen på kort till medellång sikt vilket kan innebära en ökad konkurrens om biomassan fram tills att industrierna elektrifieras. Däremot skulle en elektrifiering av skogsindustrin kunna minska konkurrensen genom att frigöra biomassa, i form av bi- och restprodukter, som idag förbränns för egen energiförsörjning [14].

Även styrmedel kopplade till ökad cirkulär ekonomi och kaskadprincipen kan innebära att bi- och restprodukter frigörs. Dessa styrmedel skulle innebära att biomassan måste användas till långlivade produkter snarare än energiutvinning om det är möjligt. Till följd av detta uppstår en ny konkurrens om rest- och biprodukter. Dock kommer restprodukter som inte är lämpliga för annat än energiutvinning att finnas kvar [14]. Lagstiftningar kan även leda till en ökad konkurrens om bioråvaran. Andelen skyddad skogsmark och lägre skogsproduktion kan bli en konsekvens av nya EU-lagstiftningar kopplat till bland annat kolinlagring och biologisk mångfald. Detta skulle minska den tillgängliga biomassan [14].

Framtida utfasning av fossilt kol inom kemiindustrin kommer innebära ett ökat behov av samt konkurrens om biogent kol. Dock skulle ökad plaståtervinning kunna bidra till en reducerad ökning av konkurrensen. Den ökade konkurrensen om biogen råvara kan även reduceras av att infångad biogen koldioxid utnyttjas [14]. BECCU skulle kunna ersätta produkter baserade på primär bioråvara vilket leder till en minskad konkurrens om biomassan. Däremot innebär koldioxidinfångning ett ökat energibehov som möjligen tillgodoses av ett utökat uttag av biomassa, vilket ökar konkurrensen av biomassa [14].

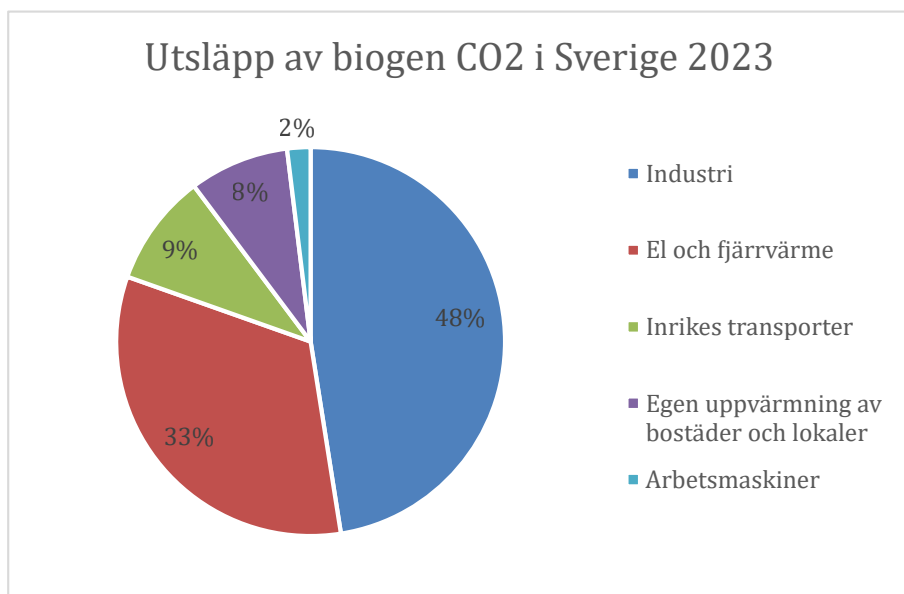
2.1.3 Biogena utsläpp och kolupptag

Sverige har till största del biogena utsläpp av koldioxid, se Figur 2.2. År 2023 bestod utsläppen av 52,3 Mt biogen koldioxid och 35,5 Mt fossil koldioxid [15]. De sammanlagda utsläppen från de största biogena punktkällorna, där koldioxidinfångning hade kunnat implementeras, det vill säga källor överstigande 100 kt koldioxid, motsvarar över 30 Mt koldioxid per år [6].



Figur 2.2: Utsläpp av koldioxid i Sverige 2023 (baserat på data från [15])

Av Sveriges biogena utsläpp står industrisektorn för 48% och el- och fjärrvärmesektorn för 33%, se Figur 2.3. Tillsammans utgör de drygt tre fjärdedelar av Sveriges totala biogena utsläpp [15]. Inom industrisektorn står massa- och pappersindustrin för 90% av de biogena utsläppen [16]. Eftersom dessa två sektorer står för de största punktsläppen i Sverige, har de också bäst förutsättningar för att implementera koldioxidinfångning, till skillnad från exempelvis utsläpp från fordon och egen uppvärmning som är mindre och därmed svåra att fånga in.



Figur 2.3: Utsläpp av biogen koldioxid per sektor i Sverige 2023 (baserat på data från [15])

De svenska skogarna bidrar till ett upptag av koldioxid och kan således sägas utgöra en naturlig kolsänka [17]. Det totala upptaget av koldioxid från skogen årligen följer dock en minskad trend där upptaget per år minskat från 61 Mt år 1991 till 32 Mt år 2023 [18]. Att kolsänkan har minskat beror sannolikt på att tillväxten av skogen har minskat de senaste åren, vilket skulle kunna bero på torka [19]. Det minskade upptaget kan även anses bero på ökad avverkning och insektsangrepp. Dock är det svårt att uppskatta exakta siffror på koldioxidupptag och utsläpp kopplat till skogsbruk [18].

2.2 BECCS och BECCU som klimatåtgärder

Målet med BECCS är att lagra biogen koldioxid permanent, medan målet med BECCU är att skapa nya produkter som bland annat kan ersätta dagens fossila produkter och därmed uppnå en substitutionseffekt [20]. Således kan BECCS och långlivade BECCU-produkter räknas som ett linjärt kolflöde, medan BECCU genom kortlivade produkter bidrar till ett mer cirkulärt kolflöde [20].

2.2.1 Negativa utsläpp och klimatnytta

Negativa utsläpp innebär att halten koldioxid i atmosfären reduceras. En metod för att uppnå detta är BECCS [21]. Tekniken bygger på att växter, genom fotosyntesen, binder koldioxid från atmosfären och bildar biomassa. Kolet i denna biomassa betraktas som biogent. När biomassan förbränns släpps den bundna koldioxiden ut igen, vilket sluter ett cirkulärt kretslopp för biogent kol. Om koldioxiden däremot fångas in vid förbränningen och lagras permanent, bryts detta kretslopp och atmosfärens koldioxidnivå minskar [22]. För att BECCS ska leda till verkliga negativa utsläpp krävs dock att biomassauttaget sker på ett hållbart sätt, det vill säga att den kolförlust som sker i skogen vid uttag inte överstiger mängden koldioxid som senare upptas av skogen. Ett hållbart skogsbruk är därför en avgörande förutsättning för negativa utsläpp [8].

För att förstå nyttan i en klimatåtgärd, som BECCS eller BECCU, är ett alternativ att undersöka och jämföra klimatnyttan. Klimatnyttan av BECCU beror på hur långlivad produkten är och vilka produkter som BECCU-produkten kan ersätta [6]. En högre substitutionseffekt innebär att klimatnyttan ökar, alltså att en given mängd biomassa ersätter fossila råvaror i större utsträckning. Däremot är klimatnyttan högre om kolet lagras permanent genom BECCS, jämfört med om det hamnar i atmosfären inom kort tid [23]. Klimatnyttan för negativa utsläpp kan jämföras med en reduktion av fossila utsläpp [6]. Det bör också nämnas att klimatnyttan inte nödvändigtvis är störst vid tillämpning av BECCS jämfört med alternativ användning av biomassan [3]. Dessutom finns det en risk att den klimatnyttan uppskattas vara högre än vad den egentligen är, om dubbla anspråk används. Dubbla anspråk innebär att både företag och en nation gör anspråk på en och samma utsläppsminskning. Om en viss utsläppsminskning används för att kompensera för ett företags utsläpp och samtidigt räknas in i Sveriges klimatmål, uppstår en risk för dubbelräkning. Klimatnyttan i sig är då fortfarande reell, men risken är att den överskattas, eftersom den rapporteras av flera aktörer samtidigt. För att undvika detta bör regleringar tydliggöra att permanenta negativa utsläpp med dubbla anspråk endast kommer användas för att kompensera för residuala utsläpp utan att förhindra fortsatta utsläppsminskningar [9].

2.2.2 Risker med implementering av BECCS och BECCU

En potentiell risk som uppkommer vid införandet av BECCUS är ”mitigation deterrence”. Det beskriver risken av minskade eller försenade åtgärder på grund av införandet av en annan klimatåtgärd [24]. ”Mitigation deterrence” kan uppstå på enskild

företagsnivå om företag till exempel senarelägger investeringar för utsläppsminskningar och istället förlitar sig på negativa utsläpp. Det kan också uppstå på en mer strukturell nivå om exempelvis beslutsfattare lägger fram mindre ambitiösa reduktionsmål i närtid i förtroende för framtida utsläppsåtgärder [25]. Detta innebär att införandet av BECCUS kan bidra till negativa konsekvenser om det utnyttjas som en ursäkt att fortsätta extrahera och förbränna fossila bränslen och således försenar utfasningen av dem. Negativa utsläpp genomförs istället för utsläppsminskningar, vilket leder till en lägre utfasningstakt [24]. I grunden är mitigation deterrence inte ett problem om BECCUS ger samma resultat som sagda utsläppsminskningar. Däremot blir det ett problem om BECCUS inte har den effekt på stor skala som beräknat. Det är en förhållandevis ny teknologi som inte ännu har skalats upp. Den potentiellt misslyckande substitueringen ses som en av de största riskerna. En annan risk som ofta nämns, handlar om att en senareläggning av närtida utsläppsminskningar fortfarande äventyrar brytpunkter för klimatet eftersom växthusgaskoncentrationerna temporärt höjs [25].

Det finns också potentiella risker gällande Sveriges tillgångar av biomassa som särskilt rör ett ökat biomassauttag. Eftersom implementeringen av BECCUS medför extra åtgång av el och värme riskerar biomassauttaget att öka, vilket kan få konsekvenser för biologisk mångfald och kolinlagringen i skogen [6]. Om energiåtgången framför allt ersätter egen elproduktion inom industrin, vilket ofta är fallet för BECCS tillämpat på pappersmassabruk och kraftvärmeverk, blir konsekvenserna för biologisk mångfald mindre. På längre sikt kan dock det ekonomiska värdet av negativa utsläpp och BECCS-anläggningar bli stort, vilket kan innebära att biomassauttaget ökar ytterligare. Situationen kan uppstå om det utvecklas en europeisk eller global marknad för negativa utsläpp som skapar en stor efterfrågan på svensk BECCS. Om efterfrågan är mycket stor kan konsekvenser för biologisk mångfald vara förödande [6]. Det bör dock nämnas att Sverige har en etablerad bioekonomi och lagstiftning för att säkerställa hållbar markanvändning. Detta gör att BECCS kan utvecklas inom ramen för existerande bioekonomi utan att bygga nya verksamheter. Det minskar risken, men den bör fortfarande ha i åtanke [6].

När det gäller att skapa ett betydande bidrag av negativa utsläpp globalt via BECCS, finns en problematik kring tillgången på biomassa [3]. Den globala hållbara potentialen av biomassa är därmed begränsad och för att undvika inlåsningsrisker i framtida negativa utsläpp som inte går att framställa, behöver utsläppsminskningar prioriteras. Detta gäller även för svenska utsläpp trots den existerande bioekonomin då utsläppsminskningar är mer resurseffektivt [3]. Utöver inlåsningsrisker i framtida negativa utsläpp finns fler inlåsningsrisker. Att utveckla infrastruktur för att möjliggöra samordning och transport av koldioxid är en förutsättning, men det är svårt att förutse framtidens behov. Därför finns det en risk att skapa inlåsningsrisker i infrastruktur som senare inte efterfrågas. Övrig implementering av BECCUS kan också skapa inlåsningsrisker om det premieras över andra utsläppsåtgärder som senare visar sig mer effektiva eller på annat sätt fördelaktiga [9]. En ytterligare inlåsningsrisk berör fortsatt användning av biomassa. Att implementera en BECCUS-anläggning förutsätter att biomassa fortsätter användas i exempelvis kraftvärmeverk, vilket skapar en inlåsnings-

ning i fortsatt användning av biobränslen och utsläpp av koldioxid som sedan fångas in [14].

2.3 Hur fungerar tekniken?

Den tekniska mognadsgraden (Technological Readiness Level, TRL) för BECCS, som helhet, inom industrin är på nivå 7 av 9, vilket innebär att teknologin ännu inte betraktas som kommersiellt tillgänglig [26]. När det gäller BECCU är bestämningen av den tekniska mognadsgraden fortfarande förenad med viss osäkerhet. Det beror på att CCU-tillämpningar omfattar en mångfald av teknologier, där de flesta har visat konceptuell genomförbarhet i pilotprojekt. Generellt kan därför antas att de flesta metoder för koldioxidanvändning befinner sig på TRL 6, vilket innebär att tekniken har demonstrerats i relevant miljö men ännu inte är fullt ut kommersiellt tillämpad [26].

2.3.1 Infångning

För att BECCUS-teknik ska kunna tillämpas krävs en punktkälla där koldioxid frigörs i tillräckligt koncentrerad form för att infångning ska vara tekniskt och ekonomiskt genomförbar. Som visades i avsnitt 2.1 om Sveriges biogena utsläpp, kommer de största biogena punktutsläppen från pappersmassabruk samt fjärrvärmeverk. I varje system för koldioxidinfångning, är det nödvändigt att välja en avskiljningsteknik som är lämplig för den process som avskiljningen tillämpas på. Valet av separationsteknik beror på de förhållanden under vilka processen ska genomföras, med hänsyn till det använda bränslet, koldioxidens partialtryck och sammansättningen av den rökgas som ska behandlas [26]. Beroende på dessa tre parametrar kan det skilja sig i vilken teknik som bör användas. Det är därför viktigt att poängtera att mognadsgraden för infångning av koldioxid varierar beroende på vilken typ av anläggning infångningen ska implementeras på [26].

Det finns två kategorier av infångningsmetoder som har nått kommersiell skala (TRL 9), nämligen före-förbränning (pre-combustion), där avskiljningen sker innan förbränning och efter-förbränning (post-combustion), där den sker efter förbränning [26].

Den vanligaste pre-combustion-metoden omvandlar biobränslen, exempelvis restprodukter från skogsbruk, till syntesgas som är ett gasformigt bränsle rikt på väte. Under förgasningsprocessen erhålls koldioxid som en biprodukt. Koncentration av koldioxid är på cirka 15–60 %, vilket är betydligt högre än i förbränningsgaser från konventionella kraftverk [26]. Den höga koncentrationen av koldioxid och det höga partialtrycket underlättar separationen av koldioxid från rökgaserna, vilket minskar energiåtgången för processen och gör koldioxid-infångningen mer kostnadseffektiv [26]. För anläggningar som i dagsläget inte använder sig av förgasning krävs en omläggning av processen. Att uppgradera befintliga anläggningar ökar kostnaden och komplexiteten för installationsprocessen, vilket hindrar den från att kommersialiseras [26].

Tekniken för att fånga in koldioxid efter förbränningsprocessen av bränslet anses vara en mogen teknik som innebär den direkta borttagningen av koldioxid från rökgaserna. För närvarande är kemisk absorptionsbaserad koldioxidinfångning med monoetanolamin (MEA) den mest utbredda och enda kommersiellt tillgängliga efterförbränningsinfångning med TRL 9 [26]. En problematik med att använda aminer är dess toxicitet. Aminer är hälsofarliga, cancerogena och påverkar ekosystemet om de släpps ut. Vid ökad efterfrågan på aminer, ökar även miljörisken för att de släpps ut. Detta är något som bör jämföras med klimatnyttan den bidrar till [27]. Avskiljning av koldioxid från rökgaserna är också en energikrävande process. Vid implementering av koldioxidavskiljning så sjunker verkningsgraden för anläggningen i och med att ångan eller elen som används för infångningsprocessen annars hade kunnat producera energi [21].

Hot Potassium Carbonate (HPC) är en annan väletablerad kemisk absorptionsteknik som traditionellt använts inom industrin, och som nu anpassas även för storskalig avskiljning av koldioxid från rökgaser. Jämfört med aminbaserade system erbjuder HPC lägre miljörisker, bättre möjligheter till värmeåtervinning och enklare integration i befintlig infrastruktur [26]. En begränsning är att absorptionen av koldioxid sker långsamt, vilket kan kräva högre tryck eller större anläggningar för att uppnå samma avskiljningsgrad [26].

Efter avskiljningen förvätskas koldioxiden för att lättare kunna hantera den genom att den komprimeras och kyls, vilket också är en energikrävande process [21]. För kraftvärmeverk kan däremot värmen från koldioxiden tas tillvara på för att leverera fjärrvärme. Ammoniak används ofta i system för kylning och kan vara aktuell vid förvätskning av koldioxid. Ammoniak är en giftig molekyl som vid höga koncentrationer är frätande. Gasen verkar kraftigt irriterande på slemhinnor och ögon kan vid inandning påverka andningen. För alla farliga och giftiga ämnen som kan komma att användas längs värdekedjan bör spridningsberäkningar av olycksutsläpp göras [28].

Det är även viktigt att understryka att de ovanstående metoderna för att separera koldioxid efter förbränning inte påverkar andra processer som sker på en anläggning men att operationella synergier kan hittas för reducera kostnaden [26].

Massa- och pappersbruk förbränner idag deras svartlut innehållande lignin för energiproduktion. Ligninet kan extraheras ut och användas som råvara för exempelvis biobränslen, bioplaster eller kolfiber. Genom ligninextraktion kan restavfall från skogsbruket utnyttjas effektivare, kolutbyte öka och mer biogent kol kan bindas i kort- och långlivade produkter istället för att återgå som koldioxid [29]. Denna åtgärd påverkar dock den interna energibalansen och minskar koldioxidkoncentrationen i rökgasen, men en kombination av ligninseparation och koldioxidinfångning är fortfarande intressant [30].

2.3.2 Transport och lagring

Det finns flera tillvägagångssätt för att transportera koldioxid och vilket alternativ som passar bäst beror av anläggningens geografiska läge samt hur stora volymer som ska transporteras [26]. När man överväger olika alternativ urskiljs framför allt fyra alternativ; båt, tåg, lastbil och rörledning (pipelines). Beroende på geografiskt läge och eventuellt samarbete med andra aktörer kan dessa kombineras, vilket kan reducera kostnader. Alla nämnda transportteknologier har nått TRL 9 då de i dagsläget används i kommersiell skala för andra industrier [26].

Koldioxid transporteras till en lagringsplats där den lagras permanent, vilket utgör en av de största utmaningarna inom BECCS-teknologin [26]. Det sista lagringssteget, slutlagringen, delas vanligtvis in i tre kategorier, geologisk lagring, oceanisk lagring och mineralisk lagring. Den teoretiska globala lagringskapaciteten uppskattas till cirka 13 000 Gt, vilket innebär att tillgången är tillräcklig för att möjliggöra målen i Parisavtalet (1,5°C-scenariot) [31].

De mest undersökta geologiska formationerna för lagring av koldioxid är salina formationer och outnyttjade oljereservoarer, där båda metoderna har uppnått TLR 9 [26]. Salina formationer består av djupa berglager fyllda med saltvatten, där koldioxiden kan lagras långsiktigt genom att lösas i vattnet eller bindas i porutrymmen i berget. Flera kommersiella koldioxid-lagringsprojekt har använt denna typ av formation [26]. Andra lagringsmetoder, såsom lagring i djupa kolbäddar eller utarmade naturgasreservoarer, kräver en mer omfattande utvärdering av lagringsplatsens egenskaper, en bättre förståelse för koldioxids beteende i reservoarerna samt utvecklade tekniker för att bedöma lagringskapacitet [26].

I Sveriges fall behöver koldioxidlagring, åtminstone under överskådlig framtid, främst ske utomlands eftersom landet har få platser med lämpliga geologiska förutsättningar – och dessa är dessutom otillräckligt kartlagda [3]. Londonprotokollet är en internationell överenskommelse från 1996, undertecknad inom ramen för Internationella sjöfartsorganisationen (IMO), som syftar till att förhindra marin förorening genom dumpning av avfall till havs. Protokollet förbjuder både lagring av koldioxid i havsbotten och gränsöverskridande export av avfall i detta syfte, vilket innebär att länder som omfattas – däribland Sverige – inte får exportera koldioxid för lagring utan särskilda avtal [32]. För att möjliggöra lagring av svensk infångad koldioxid utanför landets gränser krävs därför bilaterala överenskommelser med exempelvis Norge eller Danmark, där infrastrukturen för havsbaserad lagring redan utvecklas [33].

Det finns risker med koldioxidhanteringen i flera steg av värdekedjan. Växthusgasen koldioxid är inte klassad som toxisk, men kan ha förödande konsekvenser i höga halter och har en neurologisk påverkan på människor. Vid en eventuell läcka tränger koldioxiden undan luften och därmed syret, eftersom koldioxid är tyngre än luft. En läcka är möjlig vid samtliga delar i kedjan, men framförallt vid injektion och lagring [34].

2.3.3 Användning

Den globala konsumtionen av koldioxid och efterfrågan på det ökar stadigt [35]. I dagsläget används infångad koldioxid främst till produktion av urea för gödselmedel, men även i mindre skala inom dryckesindustrin och i framväxande tillämpningar som e-bränslen och kemikalier [35]. Det finns därmed ett stort behov av kol som råvara i industrin och allt eftersom fossilt kol fasas ut kommer det att finnas ett stort behov av biogent kol som ersättning. Detta innebär att en stor förändring måste ske för att nå internationella klimatmål. Under det senaste decenniet har den totala privata finansieringen av nystartade företag inom koldioxidanvändning globalt uppgått till nästan en miljard dollar [26].

Med hjälp av kemisk omvandling kan koldioxiden användas i kort- eller långlivade produkter [9]. Gemensamt för de kortlivade produkterna är att de bundna kolatomerna snabbt kommer släppas ut i atmosfären igen. Exempel på kortlivade produkter är flyg- eller fartygsbränslen där koldioxiden släpps ut när bränslet används. Även livsmedelsprodukter som kolsyrade drycker tillhör denna kategori [6]. Långlivade produkter ska istället fungera som en sorts koldioxidsänka, likt BECCS, eftersom kolet då kan lagras när det binds i en produkt. Kravet för att det ska klassas som en långlivad produkt är att kolet ska vara bundet till produkten i minst 35 år [36]. Långlivade produkter är främst aktuella för kemiindustrier eftersom man kan använda det biogena kolet för att tillverka bioplaster och kemikalier [6]. Tillverkningen av bioplaster är ännu inte storskalig i världen, men det finns stor potential. Under 2022 utgjorde bioplaster mindre än 1% av världens 390 miljoner ton fossila plastprodukter [37]. Om dessa plastprodukter förbränns släpps det biogena kolet ut i atmosfären igen. Detta kan ske kort efter att plasten har tillverkats vilket innebär att bioplaster också kan fungera som kortlivade produkter, beroende på om de används till förbränning eller inte.

Som presenterat tidigare har BECCU som samlingsbegrepp TRL 6 men det finns möjligheter att identifiera specifika koldioxid-baserade produkter som har nått högre TRL-nivåer [26]. Endast gruppen av koldioxid-baserade kemikalier, bränslen och hållbara mineraler har uppnått TRL 9, där exempelvis metanol, koldioxid-baserade polykarbonater och polyoler ingår [26].

Både kortlivade produkter som flyg- och fartygsbränsle och långlivade produkter som bioplaster kan användas för att substituera fossila kolatomer. Produktionen av dessa kan bidra till en minskad efterfrågan på fossila bränslen och kan vara mer lockande, än BECCS, ur ett kommersiellt syfte, eftersom den biogena koldioxiden används till att skapa nya produkter [8]. Det bidrar även till utvecklingen mot en cirkulär koldioxidekonomi [20].

För att producera e-bränslen eller kemikalier vill man åstadkomma en kemisk omvandling av koldioxiden, vilket är en energikrävande process eftersom det krävs extern energi för att övervinna bindingsenergin i den stabila koldioxidmolekylen [38]. Energin kommer från vätgas som agerar reduktionsmedel och reagerar med koldioxidatomen genom hydrogenering. Vätgasen kräver stora mängder energi för att

produceras, vilket sker genom elektrolys av vatten som står för en betydande del av energiåtgången. Vid framställning av e-metanol används cirka 89% av den totala elenergin till att producera vätgasen [20].

För att kunna tillgodose en BECCU-anläggning med tillräckliga mängder el kan elnätsförstärkningar behöva ske och en stabil tillgång till förnyelsebar el krävas. Sammantaget kräver BECCU-processer generellt sett ett betydligt större energibehov än BECCS på grund av detta. Vid framställning av e-bränslen genom BECCU lagras dock en del av energin i produkten och det är en energibärare jämfört med BECCS där kolet enbart ses som ett avfall [8].

2.4 Styrmedel för BECCUS i EU

En variation av policys och styrmedel styr direkt eller indirekt hur attraktivt BECCUS är på den europeiska marknaden, vilket i hög grad påverkar teknikens potential för implementering i Sverige. Samtidigt finns det andra alternativ för både negativa utsläpp och substitution mot fossila bränslen, vars potential och effektivitet undersöks parallellt. Detta försvårar en implementering av långsiktiga och teknikspecifika styrmedel mot BECCUS, då det riskerar att bli en inlåsning av en ineffektiv teknik.

Som övergripande ramverk för EU:s klimatstrategi finns den Europeiska klimatlagen, som lagför målet att bli klimatneutrala till 2050 [39]. Målet innefattar även att år 2030 minska nettoutsläppen med 55% jämfört med utsläppsnivåerna 1990. För att uppnå klimatneutralitet och senare negativa utsläpp nämns kolsänkor som en viktig lösning. Kolsänkorna är av både naturlig och teknisk karaktär, där CCS och CCU nämns som två tekniska lösningar för att minska utsläppen för industrin [36].

2.4.1 EU:s utsläppshandelssystem och innovationsfond

EU:s utsläppshandelssystem (EU ETS) bygger på att förorenare själva betalar för de fossila utsläpp de ger upphov till, genom att köpa utsläppsrätter på EU:s auktioner [40]. Varje år blir utsläppsrätterna färre, vilket gör att utsläppen kontinuerligt måste minska i linje med europeiska klimatlagen. Motivet är att skapa ekonomiska incitament för industrin att minska sina utsläpp [40] och utsläppshandeln är idag central för att driva utvecklingen av CCS framåt [3].

Intäkterna från auktionerna i EU ETS investeras i EU:s innovationsfond. Trots att BECCUS inte i nuläget är inkluderat i EU ETS, har intäkterna från fonden delvis investerats i projekt som berör både BECCS och BECCU [41]. Exempelvis har Stockholm Exergi, ett kraftvärmeverk, tilldelats en summa på 180 miljoner EUR för deras BECCS-projekt, och HiSkies 80 miljoner EUR för deras produktion av Sustainable Aviation Fuel (SAF), där en del av bränslets ursprung kommer från infångad biogen koldioxid [41].

Eftersom BECCS behandlar biogena utsläpp och inte fossila, är det inte en del av EU ETS [25] [3]. Flera forskare ser det däremot som en möjlighet att inkludera BECCS i systemet genom handel av negativa utsläppskrediter [25][3][42]. Planen för EU ETS är att inga fler utsläppsrätter kommer att säljas efter 2039, vilket innebär att nollutsläpp ska uppnås vid denna tidpunkt [3]. På grund av att framför allt några sektorer kommer att ha väldigt svårt att bli utsläppsneutrala, förväntas vissa fossila utsläpp kvarstå [3]. Detta leder till ett behov av negativa utsläpps-krediter i EU ETS [3]. Denna process anses dock vara administrativt och politiskt krävande vilket gör att styrmedel för implementering av BECCS inte skulle kunna ges före 2030 [20].

2.4.2 Parisavtalet, Artikel 6

Parisavtalet är ett avtal inom FN där världens länder har skrivit under avtal om att minska sina utsläpp av växthusgaser [43]. Artikel 6 innebär att länder frivilligt kan samarbeta för att nå utsläppsmål gällande utsläppsminskningar genom handel med negativa utsläpp inom EU, men även globalt [44]. Detta innebär att om projekt inom BECCS i Sverige finansieras av ett annat land, kan det finansierande landet räkna de negativa utsläppen till deras utsläpp istället för Sveriges och är viktigt för att de negativa utsläppen inte skall dubbelräknas [9].

2.4.3 ReFuel EU Aviation

Direktivet anger sustainable aviation fuels (SAF), som det mest effektiva sättet att minska utsläpp från flygtransporter [45]. Detta inkluderar ett program för hur stor andel av flygbränslet som ska bestå av SAF vid europeiska flygplatser, där andelen ökar över tid. Detta är en del av åtgärdsplanen i EU:s klimatlag för nettonollutsläpp vid 2050 [45]. SAF består till del av syntetiska bränslen, vilket innefattar antingen grön vätgas eller infångad koldioxid [45]. Enligt riktlinjerna ska 1,2% av flygbränslet bestå av syntetiska bränslen 2025, vilket ska öka till 35% vid 2050 [45]. ReFuelEU är ett incitament för implementering av CCU och incitamentet kommer förstärkas i takt med riktlinjerna ökar.

2.4.4 Fuel EU Maritime

På samma spår som ReFuel EU, har Fuel EU Maritime målet att successivt fasa ut användningen av energi med fossilt ursprung, fast inom sjöfartssektorn [46]. Växthusgasintensiteten i den energi som används för tunga skepp i sektorn ska först minska med 2% till 2025 och sedan med 80% till 2050 [46]. Direktivet är teknikneutralt med syfte att driva fram de tekniker som är konkurrenskraftiga och effektivt minskar växthusgasutsläppen [46]. Det kan därmed vara ett indirekt styrmedel för drivmedel från BECCU, om detta kan göras kostnadseffektivt och med låg klimatpåverkan.

2.4.5 Förnybara bränslen av icke-biogent ursprung

Under EU:s direktiv för förnybar energi definieras förnybara bränslen av icke-biogent ursprung (RFNBO), vilket innefattar flytande och gasformiga bränslen tillverkade från förnybar energi och förnybar vätgas, infångad koldioxid (biogen eller fossil) eller kvävgas [47]. För att kunna räknas som RFNBO måste bränslena, genom återanvändning av koldioxid, minska utsläppen av växthusgaser med 70% jämfört med bränslet de ersätter. Den förnybara energin som används måste även vara additiv, vilket förhindrar att processen använder el som annars hade använts för annat syfte [47]. Dessa bränslen anses kunna spela en stor roll för att avkarbonisera transport inom EU, framför allt inom sjöfart- och flygsektorn där en elektrifiering är svår, och förväntas kunna bidra till direktiven ReFuelEU och Fuel EU Maritime. RFNBO ska motsvara minst 1% av den förnybara energin som går till transportsektorn vid 2030 [47].

2.4.6 LULUCF-förordningen

Markanvändnings- och skogsbrukssektorn bidrar både i EU och Sverige till ett nettoupptag av koldioxid [48]. För att upprätthålla rapportering och regleringar finns LULUCF-förordningen (Land Use, Land Use Change and Forestry) på EU-nivå. Förordningen fastställer också regler för utsläppsminskningar och upptag av koldioxid i sagda sektor [48]. Ett nettoupptag av koldioxid innebär att mer koldioxid tas upp än vad som släpps ut, vilket kallas för en nettokoldioxidsänka. I mars 2023 antogs nya regler med höjda mål för nettoupptag, vilket förstärker naturliga kolsänkor. 2030 är målet ett nettoupptag på -310 Mton koldioxid i EU [48].

Energisektorn redovisar nollutsläpp vid användning av bioenergi eftersom de biogena koldioxidutsläppen här ingår i markanvändningssektorn för landet som har producerat biomassan [49]. Detta för att undvika att räkna utsläpp dubbelt och därmed få en felaktig statistik [49].

2.4.7 Avsaknad av styrmedel på EU-nivå

European Scientific Advisory Board on Climate Change publicerade nyligen en rapport som berör hur återtag av koldioxid, där BECCS är ett av alternativen, bör inkluderas i större utsträckning i regleringar och utformning av styrmedel [25]. Detta beror på att det är en förutsättning för att stabilisera klimatet och uppnå nettonegativa utsläpp. Förslag som tas upp är exempelvis att sätta upp specifika mål för hur stora volymer återtag som ska genomföras, både för temporär och permanent lagring, samt definiera tydliga krav för koldioxidens kvalitet och hur negativa utsläpp ska rapporteras [25]. Andra förslag handlar om att utöka stöd för innovation kring återtag, arbeta för att öka medvetenheten kring ämnet och bygga upp en robust infrastruktur för koldioxidtransport [25].

I ett meddelande från Europeiska kommissionen till parlamentet, skrivs även att ”efter 2040 bör industriell koldioxidhantering vara en integrerad del av EU:s ekonomiska system, och biogen eller atmosfärisk koldioxid bör vara den huvudsakliga källan för koldioxidbaserade industriprocesser eller transportbränslen” [50]. Detta skulle innebära starka ekonomiska incitament för att skapa negativa utsläpp [50].

2.5 Styrmedel för BECCUS i Sverige

Ett av Sveriges övergripande klimatmål, som är en del av det klimatpolitiska ramverket, är att Sveriges sammanlagda utsläpp ska vara nettonoll år 2045 och därefter ska negativa utsläpp uppnås. Målet är att utsläppsnivåerna 2045 ska vara minst 85 % lägre än 1990 [51]. De återstående 15 % beräknas försvinna med kompletterande åtgärder som innefattar BECCS, additionella koldioxidupptag av skog och mark samt utsläppsminskningar utanför Sveriges gränser [51]. År 1990 var Sveriges totala växthusgasutsläpp 71.2 Mt koldioxidekvivalenter, vilket innebär att de kompletterande åtgärderna år 2045 får motsvara totalt 10,68 Mt koldioxidekvivalenter årligen [52].

Historiskt sett har det saknats politiska styrmedel för BECCUS på nationell nivå, men från 2026 ska stöd börja delas ut till storskaliga BECCS-projekt i form av omvända auktioner [53].

2.5.1 Omvända auktioner

I syfte att göra implementeringen för BECCS ekonomiskt möjlig för svensk industri har omvända auktioner introducerats som statliga medel, där den svenska staten har investerat 36 miljarder kronor [54]. De förväntas ge stöd till de industrier som anses ha den bästa och mest kostnadseffektiva lösningen, där det sedan används för att finansiera infångning, transport och lagring. I dagsläget beräknas kostnaden per ton koldioxid ligga mellan 1000–2000 kronor [54]. Det har meddelats att det kommer hållas en till tre omvända auktioner och systemet har lett till ökat intresset för implementering av BECCS inom relevanta industrier [55]. Den maximala effekt som de omvända auktionerna förväntas ha är 1.8 Mt insamlad biogen koldioxid årligen från 2030 och således skapas “ekonomiska incitament för storskalig avskiljning, transport och geologisk lagring av koldioxid med biogent ursprung” [56].

Den första omvända auktionen resulterade i att Stockholm Exergi vann och fick ett mycket stort stöd för sin BECCS-anläggning. Stödet landade på 20 miljarder kronor och Stockholm Exergi planerar då att fånga in och lagra totalt 11 Mton koldioxid. Stödet kommer betalas ut löpande under 15 år [53].

2.6 Marknad

Marknaden för BECCS är i dagsläget liten och osäker eftersom den beror av efterfrågan och kostnaden att implementera tekniken. I och med att BECCS enbart skapar klimatnytta i form av negativa utsläpp är möjligheten att generera intäkter och driva ner implementeringskostnaden helt beroende av politiska styrmedel. Biogena utsläpp och negativa utsläppskrediter är i dagsläget inte involverade i EU:s utsläppshandelsystem (EU ETS) och har inte något officiellt handelssystem, vilket också innebär att man inte kan sänka sina kostnader eller generera intäkter genom att implementera BECCS. EU ETS utgör grunden för prissättning av koldioxidutsläpp inom EU vilket påverkar värdet för negativa utsläpp om det i framtiden skulle bli inkluderat i handelssystemet [57]. De omvända auktionerna i Sverige sänker därmed marknadspriset för varje ton insamlad biogen koldioxid. Det finns en mindre frivillig marknad där BECCS-operatörer kan erbjuda ett premiumsegment på marknaden eller sälja de negativa utsläppen till en aktör som frivilligt vill kompensera för sina utsläpp. Politiska incitament och styrmedel stabiliserar marknaden för BECCS. Utan en policybaserad marknadsdrivkraft är det därför, ur ett affärsperspektiv, inte lönsamt att rikta investeringar mot utvecklingen och implementeringen av BECCS [57].

BECCU-produkter har det svårt att konkurrera på marknaden med fossila produkter i och med en hög framställningskostnad, vilket till stor del är kopplad till produktionen av grön vätgas som är väldigt energikrävande [38]. Efterfrågan på flyg- och fartygsbränslen förväntas öka på sikt, i och med att ReFuelEU Aviation och FuelEU Maritime ställer krav på en successivt högre andel hållbara bränslen, inklusive elektrobränslen, inom dessa sektorer [58].

Den fortsatta utvecklingen av politiska styrmedel och marknadsstrukturer kommer att vara avgörande för huruvida tekniker som BECCS och BECCU kan bli kommersiellt gångbara. I dagsläget saknas både tydliga ekonomiska drivkrafter och en tydlig affärslogik, vilket gör det problematiskt att etablera dessa tekniker på marknaden. En växande frivillig marknad, flera pågående politiska initiativ och regulatoriska förändringar kan dock komma att förändra detta. BECCS ses trots allt som en avgörande pusselbit för att nå klimatmålen både nationellt och på EU-nivå [57].

3

Metod

Metoden bakom rapporten är kvalitativ, där möjligheter, barriärer och förutsättningar för implementering av BECCUS har undersökts. Analysen baseras på intervjuer med forskare och aktörer som har praktisk eller teoretisk erfarenhet kring BECCUS för att bidra med värdefulla perspektiv.

Intervjuobjekten innefattar aktörer från företag som är verksamma inom, eller undersöker möjligheter för, implementering av BECCUS. För det första innefattar detta flera pappersmassabruk och kraftvärmeverk, på grund av att de är de största punktutsläpparna av biogen koldioxid i Sverige. För dessa intervjuer valdes tre av de större pappersmassabruken samt fyra av de större kraftvärmeverken i Sverige. Punktutsläpparna bidrar med en inblick i potential kring infångningen, men även utmaningarna kopplade till dessa. Eftersom olika företag inom samma typ av verksamhet inte nödvändigtvis behöver ha liknande förutsättningar behöver de heller inte dela samma bild av BECCUS. På grund av detta har intervjustudien därför innefattat flera olika intervjuobjekt inom samma bransch.

Vidare har ett antal företag som ska spegla potentiella användare av den biogena koldioxiden intervjuats. Till dessa hör bland annat två bränsleproducenter och en plastproducent. Deras perspektiv är viktigt eftersom det kan skapa en förståelse för hur den biogena koldioxiden kan användas efter infångning, samt vilka hinder som finns. En av bränsleproducenterna är aktiv inom tillverkning av biobränslen, medan den andra har ett tydligt fokus på infångad biogen koldioxid. Att deras fokusområde skiljer sig kan innebära två olika perspektiv på den framtida utvecklingen av användning av koldioxid vilket är värdefullt att inkludera i analysen. Företaget som tillverkar biobränslen har stor erfarenhet av att konkurrera med fossila alternativ och har dessutom sett över möjligheten att tillverka e-bränslen, vilket är ett värdefullt bidrag för utmaningar kring bränslen från BECCU. Plastindustrin har vidare en stor potential för att använda infångad biogen koldioxid för att tillverka bioplaster och kan bidra med andra erfarenheter kring BECCU.

De forskare som har intervjuats är aktiva inom energisystemvetenskap, systemvetenskap och industrivetenskap. Anledningen till att dessa har valts är att de kan ge en objektiv överblick på hela värdekedjan och utvecklingen kopplad till BECCUS, samt att de kan sätta Sveriges förutsättningar och potential för BECCUS i perspektiv med andra länder.

Till sist har även forskare som är insatta eller har varit involverade i utvecklandet av styrmedel inom BECCUS intervjuats, för att bidra med ett helhetsperspektiv på hur marknaden är reglerad och hur den kan regleras i framtiden. Detta perspektiv medför analys av utmaningar kopplade till utformning av styrmedel samt en utvärdering på dagens styrmedel.

Intervjuerna som genomförts var semistrukturerade, i syfte att försöka lyfta varje aktörs individuella erfarenheter kring BECCUS och lämna utrymme för relevanta följdfrågor. De frågor som alla aktörer och forskare besvarat berör vilka möjligheter och barriärer intervjuobjekten ser med implementering av BECCUS, vilka förutsättningar som finns i dagsläget, vilken roll BECCUS anses ha idag och i framtiden och vilka effekter en storskalig implementering kan leda till.

Intervjumallarna (A, B, C) är i viss mån anpassade efter vilken roll intervjuobjekten har i värdekedjan: antingen biogena utsläppare, användare av biogen koldioxid eller forskare. Detta gjordes med syftet att lyfta de erfarenheter som är specifika för olika aktörer och forskare. Biogena utsläppares specifika tillägg handlar bland annat om hur de ser på den gröna kolatomen och i hur stor omfattning som BECCUS är en del av deras omställning, medan det för potentiella användare handlar om hur deras affärsmodell ser ut för BECCU och vilken roll deras produkt kan spela för klimatomställningen. Forskares specifika tillägg behandlar vilka styrmedel som behövs i framtiden och hur de kan utformas för att de gröna kolatomerna ska hamna där de gör mest nytta.

Efter att intervjuerna genomförts har de transkriberats och sammanfattats av två personer oberoende av varandra; en som deltagit i intervjun och en som inte deltagit, i syfte att få en objektiv helhetsbild. Samma två personer har sedan sammanställt en gemensam sammanfattning vilket är grunden för rapportens resultatdel. Den gemensamma sammanfattningen har dessutom skickats ut till intervjuobjekten med möjlighet till revidering, för att säkerställa att det som slutligen inkluderas i rapporten är korrekt. Antal intervjuobjekt inom varje kategori beskrivs i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Översikt över aktörer och deras benämningar i rapporten

Typ av aktör	Benämning i rapport
Massa- och pappersbruk	Pappersmassabruk A, B, C
Kraftvärmeverk	Kraftvärmeverk A, B, C, D
Styrmedelsforskare	Styrmedelsforskare A, B
Forskare inom energisystem	Forskare A
Systemforskare	Forskare B
Industriforskare	Forskare C
Potentiella användare av biogen koldioxid	E-bränsleproducent A Biobränsle-producent A Plastindustri A

3.1 Avgränsningar

Studien omfattar endast några nordiska aktörer och utgår från Sverige som systemgräns. Analysen baseras på svenska förhållanden, även om de påverkas av europeiska och globala drivkrafter, utmaningar och klimatpolitiska ramar. Rapporten fokuserar på att belysa utmaningar och förutsättningar för hantering av biogen koldioxid, vilket utesluter rena fossila koldioxidflöden. Studien är avgränsad till de största biomassaflödena och tillhörande punktutsläpp. Rapporten utgår från BECCUS som huvudteknik; andra alternativa tekniker nämns men utreds inte vidare.

4

Resultat

Följande kapitel sammanställer vad som framkom under intervjuerna, vilket presenteras utifrån sex olika perspektiv; BECCUS roll i framtiden; befintliga styrmedel; teknik; logistik och infrastruktur; ekonomi; framtida styrmedel. Strukturen är tänkt att spegla en analys av möjligheterna med BECCUS följt av en diskussion av för- och nackdelar med befintliga styrmedel. Sedan presenteras befintliga förutsättningar, men också utmaningar inom teknik, logistik och infrastruktur samt ekonomi. Kapitlet avslutas med en genomgång av förslag, från intervjuerna, på framtida styrmedel samt utformning av dessa för att överkomma de utmaningar som idag finns med BECCUS. I kapitlet identifieras olika trender, men även motsägelser och olika ståndpunkter för att skapa en så nyanserad bild av och förståelse för BECCUS som möjligt.

4.1 BECCUS roll i framtiden och värdet av den gröna kolatomen

I följande avsnitt presenteras resultat om BECCUS möjliga roll i framtidens klimatarbete. Det läggs olika stor vikt i BECCS som klimatstrategi, men många är överens om att det endast ska vara en nödlösning. BECCU som klimatstrategi är mer osäkert, även om det bidrar med en faktisk produkt. Tillgången på biomassa benämns som en avgörande förutsättning för båda teknikernas genomförbarhet. I avsnittet diskuteras även värdet av biogent kol, där flera ser substitutvärdet som viktigt. Flera aktörer lyfter att det däremot inte är givet att ren koldioxid är det mest effektiva substitutet då de menar att det finns energieffektivare sätt att få till en cirkulär användning av biogent kol i produkter. Slutligen lyfts för och nackdelar med en storskalig implementering fram, bland annat konkurrens om biomassa, inlåsningsrisker och energibehov.

4.1.1 BECCUS som klimatstrategi

När det kommer till BECCUS som klimatstrategi väljer nästan samtliga respondenter att särskilja på BECCS och BECCU med anledningen att de bidrar med olika nyttor. BECCS nämns av Forskare A som ett kostnadseffektivt alternativ för att skapa negativa utsläpp. Flera aktörer är överens om att BECCS kommer spela en stor roll i Sveriges klimatstrategi och andra nämner att det kommer vara nödvändigt för att uppnå Parisavtalet. Däremot belyser samma aktörer att andra klimatåtgärder också behövs. Kraftvärmeverk D talar om en trestegstrappa för att illustrera utsläppsåtgärder, där stegen innefattar ”undvika, reducera och ta bort” och att BECCS då hamnar på slutsteget. I dagsläget befinner de sig framför allt på det andra steget: ”Rent strategiskt handlar det mycket om att reducera våra egna utsläpp”. Styrmedelsforskare A anser att energieffektiviseringar ska prioriteras som strategi och att BECCS endast ska ses som en nödlösning. Pappersmassabruk A och C poängterar även att framför allt massaindustrin har andra utvecklingsmöjligheter för att göra klimatnytta. Ligninproduktion och elektrifiering är exempel på två utvecklingsmöjligheter som nämns.

Huruvida BECCU bör vara en del av företags och Sveriges klimatstrategi råder det delade meningar om. Biobränsleproducent A tror att utvecklingen initialt kommer luta mot BECCS och senare skifta till BECCU när behovet av negativa utsläpp minskar. De nämner även BECCU och e-bränslen som bra sätt att lagra elektricitet på. Forskare A menar att BECCU är ett sätt att fasa ut fossila bränslen och utfasningen menar hen är den viktigaste klimatåtgärden. Pappersmassabruk B, C och Plastindustri A ser störst potential i substitutionseffekten som uppstår genom implementeringen av BECCU. Forskare C och Plastindustri A menar dock att det finns effektivare sätt att substituera fossila kolatomer än med infångad biogen koldioxid och säger att det bör ske i ett tidigare steg i kolcykeln för att höja energieffektiviteten. Detta beror på att koldioxid är en stabil kolatom som kräver mycket energi för att brytas, samtidigt som det ofta krävs vätgas för att framställa längre kolväten vilket i dagsläget kräver stora mängder energi (Plastindustri A). I slutändan uttryc-

ker Pappersmassabruk C att det mest hållbara vore att inte generera koldioxid alls, och i stället behålla de gröna kolatomerna i produkterna så länge som möjligt, en strategi som tros bli mer relevant på sikt, särskilt i sektorer där elektrifiering är ett realistiskt alternativ.

Trots mångas övertygelse om BECCU och BECCS nödvändighet är andra mer osäkra. Styrmedelsforskare B är osäker på vilken roll BECCUS kommer spela i framtiden eftersom det ännu är obeprövat och belyser risken att klimatmålen baseras på falska grunder om det visar sig att planerna inte realiseraras.

4.1.2 Industriella tillämpningar och affärsmodeller

Från intervjuerna framgår det att BECCUS både kan ses som ett nödvändigt verktyg för utsläppsminskning och som en affärsmöjlighet i den svenska industrin. Flertalet företag och forskare som intervjuats tror att det kommer att bli dyrare att släppa ut fossil koldioxid i och med att antalet utsläppsrätter minskar och de fria utsläppsrätterna ska avskaffas i EU ETS. Vissa tror även att det på sikt kommer börja kosta pengar att släppa ut biogen koldioxid (Plastindustri A, Pappersmassabruk B). Synen på vilken roll BECCUS kan spela i att reducera utsläpp skiljer sig mellan aktörerna. Vissa ser det som en nödvändighet då de anser att de, genom andra metoder, begränsat sina utsläpp till den grad att BECCS är den metod som återstår för att ytterligare minimera utsläppen (Kraftvärmeverk B, C). Kraftvärmeverk D menar att företag som implementerar BECCUS även kommer att möjliggöra för andra företag att uppnå sina klimatmål, genom att kunna tillgodose dem med en fossilfri produkt, vilket i sig är en potentiell affärsmöjlighet.

Företagens intresse för BECCUS styrs i hög grad av affärsrisk och potentiell avkastning, och ofta finns alternativa lösningar som både förbättrar miljöprofilen och erbjuder bättre affärsutsikter (Kraftvärmeverk B). Pappersmassaindustrin kan exempelvis vara positivt inställd till att fånga in koldioxid, men saknar intresse för vad som händer med den efteråt, så länge investeringarna innebär låg risk och ekonomisk nytta (Pappersmassabruk A, C). Samtidigt betonas att det i många fall finns andra investeringar med större klimatnytta och att BECCS inte ses som en aktuell åtgärd före 2030 (Pappersmassabruk A). BECCU lyfts särskilt fram eftersom det, till skillnad från BECCS, skapar en faktisk produkt. Specifikt för långlivade produkter uppstår det en möjlighet för affärsmodeller med negativa utsläpp, vilket skulle bli en konkurrensfördel (Plastindustri A). Plastindustri A tillägger att det i dagsläget inte räknas som negativa utsläpp i Sverige men att det gör det på EU-nivå. Kraftvärmeverk B trycker också på att det ur ett affärsperspektiv är fördelaktigt att kombinera BECCS och BECCU då de anser att det sprider riskerna och att specifikt BECCU delen kan bidra med en kostnadsreduktion.

4.1.3 Värdet och användningen av biogent kol

Det biogena kolet betraktas i ökande grad som en värdefull men begränsad resurs som behöver användas och nödvändigtvis inte bara lagras (Kraftvärmeverk C, Forskare B och C). Forskare A och B lyfter att det kommer att uppstå en stor efterfrågan på biogent kol som substitut när de fossila kolatomerna fasas ut. Som nämnt tidigare, är det inte givet att det är just biogen koldioxid som är det mest effektiva substitutet. Därför överväger vissa aktörer andra alternativ för att extrahera biogena resurser som kan vara mer energieffektivt och ge bättre råvaror för till exempel bränsle- och plastproduktion (Plastindustri A, Forskare B). Plastindustri A nämner specifikt lignin extraktion som ett intressant utvecklingsområde där det i Sverige finns stora mängder svartlut som går att använda till lignin produktion. Det finns också aktörer som inte ser sina biogena utsläpp som en resurs i dagsläget, men ser att det kan komma till att förändras (Pappersmassabruk A). Forskare B lyfter att det finns risker om systemen inte styrs rätt. Om den ekonomiska uppsidan med BECCS blir för stor finns det en risk med att det skapas ett linjärt kolflöde till lagring, och att det biogena kolet inte kan användas till något annat. Forskare A resonerar vidare att det finns en problematik kring ett scenario där det blir billigare att släppa ut koldioxid för att sedan kompensera med BECCS, vilket blir kontraproduktivt ur ett effektivitetsperspektiv.

4.1.4 Biomassatillgång

Sveriges förutsättningar att implementera BECCUS bedöms som goda tack vare de stora tillgångarna på biomassa och ett relativt lågt motstånd mot dess användning jämfört med i övriga Europa. Det finns redan idag stora punktkällor och betydande mängder biogen koldioxid från exempelvis massa- och kraftvärmeindustrin (samtliga pappersmassabruk och kraftvärmeverk samt Styrmedelsforskare A och Forskare B). Detta skapar potentiellt goda förutsättningar för BECCUS, förutsatt att dessa utsläpp är tillräckligt koncentrerade geografiskt för att kunna dela infrastruktur för transport av koldioxiden (Kraftvärmeverk A).

Samtidigt finns det utmaningar kopplat till biomassatillgångarna. Bland annat pekar flera aktörer på att tillgången på biomassa inte är obegränsad. Konkurrensen om resursen är stor och ett minskande kolupptag från skogen, oberoende av BECCS, kan ytterligare begränsa tillgänglig biomassa (Styrmedelsforskare A, B och Kraftvärmeverk A). Flera företag och forskare pekar på att tillväxttakten för skogen avtar, vilket minskar avverkningspotentialen om kolsänkor ska bevaras (Kraftvärmeverk A). De framhåller också att BECCS framför allt kommer att etableras där tillgången till biomassa är god utan att konkurrera med andra viktiga användningsområden, som jordbruksmark eller vattenresurser: "Bio-CCS kommer att etableras på sådana platser där det finns bra förutsättningar för det" (Kraftvärmeverk A).

Globalt är tillgången på biomassa mer begränsad, vilket innebär att länder med goda förutsättningar, som Sverige, sannolikt kommer att behöva bära en stor del av det globala ansvaret för att uppnå BECCS-målen (Kraftvärmeverk A). Två aktörer nämner avslutningsvis att det inte finns tillräckligt med biomassa och biogen koldioxid för att ersätta allt som i dagsläget är fossilt (Kraftvärmeverk A och Forskare A). En förutsättning för en utbredd implementering av BECCUS i Sverige är samhällets acceptans till tekniken. Något som pappersmassabruk A problematiserar och lyfter under intervjun.

Den stora risken för ett projekt är samhällets acceptans. Varför ska vi göra de här åtgärderna? Och använda svenska skattemedel för sådant här. Det borde vara de [länder] som fortsätter att släppa ut som ska betala.
- Pappersmassabruk A

4.1.5 Effekter av storskalig implementering

En storskalig implementering av BECCUS i Sverige kommer bidra med flera effekter och risker där aktörerna belyser olika delar. Det handlar bland annat om ett ökat energibehov, biomassauttag och inlåsningsrisker. Kraftvärmeverk D anser att "[d]et skulle väl egentligen bara leda till positiva effekter att man implementerar det mer storskaligt". Dock är det inte enbart positiva effekter som tas upp. Flera aktörer menar att en storskalig implementering av BECCUS kommer påverka energibehovet markant och att en stor mängd el kommer behövas (Styrmedelsforskare A och B, Kraftvärmeverk A och C, E-bränsleproducent A, Pappersmassabruk B och C). Kraftvärmeverk C nämner också att implementering av BECCU kommer påverka energibehovet, inte minst för vätgastillverkning. Kraftvärmeverk D ser inte ett problem med ett ökat energibehov utan menar att det snarare är en avvägning eller politisk fråga. Två företag lyfter möjligheten till en ökad självförsörjningsgrad av bränslen i Sverige om en storskalig implementering av BECCU införs, vilket skulle stärka den svenska energisäkerheten och resiliensen (E-bränsleproducent A och Kraftvärmeverk B).

När det gäller biomassatillgången för storskalig implementering argumenterar aktörerna olika. Styrmedelsforskare A och C samt Kraftvärmeverk A ser en risk att biomassauttaget ökar, vilket påverkar kolsänkan negativt. Dessutom belyser Styrmedelsforskare A och B att det finns en potentiell markanvändningskonflikt om uttaget ökar och att mer mark då behövs. Styrmedelsforskare B menar dock att det snarare handlar om att försöka ta hand om de biogena punktutsläppen som finns i dagsläget snarare än att uttaget skulle öka. Styrmedelsforskare A menar att ett ökat uttag påverkar biodiversiteten negativt, medan B lyfter att det kan vara positivt för mångfalden om det innebär att temperaturökningen avstannar.

Vid en storskalig implementering är det många som nämner att utvecklingen och införandet av BECCUS-projekt blir tryggare och mer genomförbart. Pappersmassabruk B anser att de hade känt sig tryggare med att genomföra ett projekt för egen del om det redan finns andra fungerade projekt igång. Kraftvärmeverk C menar även på att infrastruktur och samarbete är en förutsättning för en storskalig implemen-

tering. Detta kommer även sänka kostnaderna och bidra till en kostnadseffektivitet enligt kraftvärmeverk B, C och D: ”Så att med en större etablering och lansering så kommer sannolikt också en kostnadspress, vilket är positivt” (Kraftvärmeverk B).

En potentiell nackdel som flera lyfter är risken för inlåsning. Forskare B och C belyser risken att en inlåsning kan skapas om man satsar stort på BECCUS som lösning, som senare visar sig fungera sämre än förväntat. Forskare B tillägger att det även kan skapas inlåsnings om stöden från EU för denna lösning försvinner vid senare tillfälle. Forskare A framför risken att det blir en ineffektiv åtgärd med BECCS om det visar sig att kolatomen kan göra större nytta i att ersätta fossilt kol, eftersom det är en begränsad resurs.

Kraftvärmeverk D nämner även utmaningen med samhällsacceptansen kring land-baserad lagring, mer specifikt från de som bor i anslutning till lagringsplatsen. De poängterar däremot att acceptansen har ökat och pekar då specifikt på de projekt som finns i Danmark, som något som tyder på det.

4.2 Befintliga styrmedel

I dagsläget finns, som presenterats tidigare i rapporten, ett antal styrmedel som är tänkta att stimulera utvecklingen mot ett fossilfritt samhälle. Intervjuerna med företag och forskare visar på vilket sätt dagens styrmedel påverkar situationen för BECCUS. Biobränsleproducent A nämner att de ser att styrmedel absolut är nödvändigt för att skapa en efterfrågan på deras fossilfria produkter jämfört med fossila alternativ. I kapitlet lyfts bland annat tankar kring existerande styrmedel som de omvända auktionerna, där vissa är mer kritiska och anser att det är för tekniks specifika, medan andra ser det som helt nödvändigt för en fortsatt utveckling.

4.2.1 EU ETS

Kraftvärmeverk C, som eldar avfall och därmed har både fossil och biogen koldioxid, ser att ökade kostnader för utsläppsrätter till EU ETS är en av drivkrafterna för att implementera CCS. De poängterar att priset de betalar för utsläppsrätter är en kostnad som de gärna vill bli av med: ”Vi betalar idag rätt mycket pengar för utsläppsrätter till EU för den fossila delen, så den kostnaden blir man av med om man fångar in det”. E-bränsleproducent A påpekar att inkluderingen av sjöfarten i EU ETS, som skedde 2024, påverkar utvecklingen av BECCU positivt då det skapar ett högre tryck på sjöfarten att fasa ut de fossila bränslen som används idag. Detta gör att de ser ett ökat behov av e-bränslen som kan framställas med hjälp av infångad biogen koldioxid. Något som däremot framgår från samma intervju är att regelverk som EU ETS ibland kan vara komplexa och svåra att förstå. Som exempel ges att massbalans hanteras olika i EU ETS och Förnybartdirektivet vilket gör att aktörer förstår regelverken på olika sätt.

4.2.2 Omvända auktioner

De omvända auktionerna har nämnts i många av intervjuerna eftersom de syftar till att stödja projekt kopplade till just BECCS. Styrmedelsforskare B, som har varit med och utvecklat auktionerna, nämner dock att det är oklart huruvida man kan säga att de fungerar bra eller dåligt eftersom syftet är oklart i förhållande till hur de har genomförts: ”[D]et är ju faktiskt en brist i sig när man designar en auktion, att det inte är tydligt vad målet med auktionen är och det är väldigt många som har klagat på det”. Hen menar att målet med den omvända auktionen antingen kan vara att uppnå så mycket negativa utsläpp som möjligt eller att bidra med så mycket lärande som möjligt gällande BECCS. Hen förklarar vidare att det fungerar bra om målet är att introducera tekniken och utreda under vilka förutsättningar tekniken fungerar och inte fungerar. Forskare A, B och C poängterar dock att det är ett bra styrmedel för att få rullning på ett första projekt som kan få andra att följa efter. Två andra respondenter (Kraftvärmeverk A och D) anser också att det kan hjälpa till att bidra till ett lärande gällande tekniken ”Det är den omvända auktionen som hjälper till för att komma igång och det hoppas vi verkligen att den kan hjälpa till [med] för att bygga upp logistikkedjor för då kanske det är lättare att skala upp därifrån”. De båda tror också att det är viktigt att en första anläggning kommer på plats för en fortsatt utveckling av tekniken.

Vidare kritik av de omvända auktionerna ges av Styrmedelsforskare A och B samt Forskare A. Här poängterar Styrmedelsforskare A att det finns risker med att uppmuntra just BECCS eftersom det kan ge upphov till "mitigation deterrence" där utfasningen av de fossila utsläppen bromsas. Hen anser även att ytterligare en risk med de omvända auktionerna är att den innebär en kraftig statlig subvention, som inte kommer vara långsiktigt hållbar till en implementering på stor skala. På grund av detta kommer andra stödsystem behövas, där den privata sektorn blir mer involverad eftersom "statsbudgeten är väldigt liten jämfört med vad den privata sektorn omsätter", menar Styrmedelsforskare A.

En del respondenter (Pappersmassabruk A och Forskare C) påpekar att de inte tycker att det är en effektiv strategi att låta en aktör få majoriteten av medlen från de omvända auktionerna. Det ökar risken för inlåsnings inom BECCS-projekt om det första projektet används som underlag för kommande projekt. Styrmedelsforskare B framhäver riskerna med att främja en aktörs projekt eftersom man inte kan säkerställa att de utvecklar den mest effektiva tekniken.

De omvända auktionerna har också fått kritik i intervjuerna för att vara ett för tekniskspecifikt styrmedel för BECCS. Framförallt har Styrmedelsforskare B och Forskare A kommenterat detta, där risker för inlåsnings nämns igen, men denna gång eftersom det kan hindra andra typer av lösningar utöver BECCUS från att utvecklas. Forskare A nämner allmänt att tekniskspecifika styrmedel inte behöver leda till effektiva lösningar: "Ett ensidigt främjande av de här teknikerna [BECCUS] kan leda till ineffektivitet jämfört med alternativen". Vidare förklarar hen att de omvända auktionerna således kan riskera att man satsar för mycket på BECCS, och missar att ersätta det fossila från början.

E-bränsleproducent A anser att projekt kopplade till BECCU också bör inkluderas i de omvända auktionerna. Detta beror på att de anser att båda teknikerna kommer behövas i framtiden och med hjälp av de omvända auktionerna hade man kunnat stimulera en tillväxt för båda teknikerna. I intervjun med Forskare C framkommer det dock att anledningen till att BECCU inte inkluderas är på grund av att de inte kan bidra till auktionens mål om kompletterande åtgärder och negativa utsläpp. Dessutom poängterar hen att det kan vara acceptabelt att de omvända auktionerna är tekniskspecifika på grund av att det i dagsläget inte finns några andra alternativ som kan mätas med BECCS när det kommer till negativa utsläpp, då kostnaderna uppskattas vara betydligt högre för alternativa tekniker. Plastindustri A anser att BECCU där man skapar långlivade produkter som håller i över 50 år borde kunna klassas som lagring och därför bör man kunna söka stöd genom de omvända auktionerna för detta.

Kraftvärmeverk B lyfter att de hellre hade sett en annan utformning av de omvända auktionerna. I stället för att få pengarna i efterhand ser de hellre ett investeringsstöd i början av projekten eftersom de initiala kostnaderna kopplade till investeringen är så pass höga. Kraftvärmeverk C och Pappersmassabruk C förklarar att deras BECCS-projekt inte var redo inom den tidsram som sattes för auktionerna. Pappersmassabruk C planerar dock att vara med i nästa omgång. Ett annat hinder som Kraftvärmeverk C har stött på är att regelverket för blandade flöden av koldioxid inte är tydligt. Det är betydligt enklare att hantera och kommersialisera 100 % biogen koldioxid, eftersom blandade flöden med både biogen och fossil koldioxid medför regulatoriska begränsningar. Till exempel får man inte sälja en andel av koldioxiden som biogen utan att särskilja den, vilket innebär att man måste köpa utsläppsrätter för den fossila andelen om koldioxiden går till CCU. Detta gör det dyrare och svårare att konkurrera med aktörer som har helt biogena utsläpp.

4.2.3 RefuelEU och Fuel EU Maritime

Refuel EU och Fuel EU Maritime är två styrmedel som nämnts under intervjuerna. Flera anser att det driver utvecklingen mot att fasa ut fossilt kol ur flyg- och fartygsbränslen. Bland annat nämner Pappersmassabruk B att ”det som finns i Refuel EU och Fuel EU Maritime är väldigt, väldigt bra för att de sätter taktpinnen för målen och det vi ska uppfylla”. E-bränsleproducent A nämner att dessa två direktiv är en stark drivkraft för e-bränslen, vilket även styrks av Forskare A. Biobränsleproducent A tror dock inte att Refuel EU är tillräckligt stora för e-SAF, eftersom direktivet också inkluderar användning av bio-SAF. Då bio-SAF är billigare att framställa anser de att det finns en större efterfrågan på detta och tror snarare att e-SAF kan fungera som komplement ”[b]ut in the short and medium term, biofuels will be the mainstream I think”. Forskare A nämner även här, i likhet med kritiken mot de omvända auktionerna, att styrmedlet är tekniks specifikt, vilket kan anses utgöra en risk för att styra mot en ineffektiv teknik.

4.2.4 Långsiktighet i styrmedel

Många av respondenterna har uttryckt att det finns en osäkerhet gällande hur de direktiv som finns idag kommer att utvecklas i framtiden. Pappersmassabruk B förklarar att eftersom det finns så mycket osäkerhet runt omkring i världen så finns det en stor osäkerhet hos företag i huruvida EU kommer hålla sig fast vid de här kraven”, vilket även nämns av Biobränsleproducent A och Pappersmassabruk A. De förklarar att politiska svängningar i EU och Sverige innebär att man inte kan vara säker på att utvecklingen kring BECCUS kommer vara långvarig.

Pappersmassabruk A förklarar det som att ”[d]et är en påhittad marknad med 100 % politisk styrning och därmed [är den] oförutsägbar”. På grund att detta är det svårt för företag att motivera en stor satsning på BECCUS-projekt om det inte finns tydliga garantier på att det kommer generera vinst. Eftersom marknaden är beroende av styrmedel i rätt riktning för BECCUS innebär det att företagen även är beroende av den garantin (Pappersmassabruk A, B, C och Biobränsleproducent A). Många

forskare visar förståelse för vikten av styrmedel och poängterar att det absolut är en nödvändighet för den fortsatta utvecklingen (Forskare A, C och Styrmedelsforskare A, B). Dock poängterar både Styrmedelsforskare A och Forskare A att ovissheten gällande hur stor roll BECCUS kan spela i framtiden gör att det är svårt att utforma styrmedel som är så pass tekniskspecifikt. Styrmedelsforskare A nämner bland annat att “vi kan inte veta vilka utvecklingsplaner som är vinnare och förlorare i framtiden, och att då styra åt ett visst håll idag, det är supersvårt för politiker”. Detta skapar en form av inlåsning där utvecklingen är beroende av styrmedel, men styrmedel också beror på utvecklingen.

Vikten av långsiktighet gällande styrmedel blir tydligt i intervjuerna med pappersmassabruken. Detta styrks även av Kraftvärmeverk D som tar upp EU ETS och den svenska koldioxidskatten för att exemplifiera två system som har fungerat bra gällande långsiktighetsaspekt. Om man hade kunnat garantera en långsiktighet i de styrmedel som utformas tror de att detta hade resulterat i en bättre pådrivning av utvecklingen av BECCUS.

4.3 Teknik

I följande avsnitt presenteras de tekniska utmaningarna och förutsättningarna med BECCUS. Från intervjuerna framgår det att de tekniska förutsättningarna till största del är på plats och tekniken ses inte som den största utmaningen. Det råder dock delade meningar kring huruvida man kan säga att en infångningsteknik är beprövad eller inte om den endast testats i liten skala. Vid pilottester på ett pappersmassabruk har tekniska problem relaterat till rökgasens karaktär uppstått, men detta ses inte som ett avgörande hinder. En utmaning som flera aktörer nämner är teknikens energiintensivitet vid infångning och framför allt vid vätgasproduktion för vissa BECCU-tillämpningar. Samtidigt menar flera aktörer att förutsättningarna i Sverige är goda tack vare en fossilfri el-mix och ett lågt elpris. För några aktörer innebär det stora energibehovet en förlorad elproduktion medan vissa menar att de istället kan få en ökad fjärrvärmeproduktion. Slutligen tas utmaningar kopplat till slutlagring upp, där några ser renhetskraven på koldioxiden som en utmaning.

4.3.1 Tekniska förutsättningar

Forskare A menar att de tekniska förutsättningarna är bra både för BECCS och BECCU och att de tekniska utmaningarna är en av de mindre utmaningarna, vilket samtliga kraftvärmeverk håller med om. Däremot finns det vissa CCU-tillämpningar där tekniken inte är lika mogen, tillägger Forskare A, något som Styrmedelsforskare B också håller med om.

Det finns vanliga teknikutmaningar som att det kommer vara dyrare i början för att man kommer att stöta på olika tekniska utmaningar som man gör när man bygger nya saker. Men på stor skala så är de tekniska utmaningarna förmodligen mindre än de marknadsmässiga och policymässiga och acceptansmässiga. - Forskare A

4.3.2 Infångningsteknikers mognadsgrad

Kraftvärmeverk C anser att det finns flera infångningstekniker vars tekniska mognadsgrad är för låg för att använda. De har själva valt att gå vidare med en tekniskt mogen aminbaserad teknik. Även E-bränsleproducent A har valt att använda en aminteknik. Trots det anser Pappersmassabruk A att både HPC- och amininfångningsteknikerna inte är lika beprövade som det påstås. Kraftvärmeverk A, som själva har valt att använda HPC-teknik, menar dock att tekniken är beprövad, men inte i stor skala. "Det här är en helt ny grej egentligen då teknologin finns fast i andra applikationer, men ingen har gjort det här förut på det här sättet på den här skalan", förklarar de. Det samma gäller kemiska massabruk menar Forskare C, att "[n]är det gäller tekniska förutsättningar så är det ändå viktigt, tycker jag, att påpeka att man aldrig har testat fånga in koldioxid från kemiska massabruk". Kopplat till hur mogna teknikerna är kan det även tilläggas att Kraftvärmeverk A valde att inte använda aminteknik eftersom de ansåg att det skulle bli svårt att få miljötillstånd på grund av läckage ur anläggningen orsakat av aminerna.

4.3.3 Rökgasens påverkan

Pappersmassabruk A har genomfört mindre framgångsrika pilottester av infångning. Den tekniska utmaningen är kopplad till karaktären på deras rökgas. Styrmedelsforskare B förklarar att en del infångningstekniker inte är kompatibla med vissa rökgaser och att detta är något som skulle kunna sätta stopp för implementering av BECCUS på en anläggning. Forskare A menar däremot att tekniska detaljproblem, som olika partiklar i rökgasen, alltid kommer att finnas men att det inte sätter stopp för utvecklingen. Hen ser det som vanliga ingenjörproblem att överkomma. Även Pappersmassabruk A tror att teknikdelen går att lösa. Forskare B lyfter en annan aspekt kopplat till rökgasernas varierande karaktär. Hen menar att detta gör modularisering av infångningstekniken svårare.

4.3.4 Energibehov

I Sverige är förutsättningarna för BECCUS gällande eltillgång goda, påpekar flera aktörer. Dels är tillgång på en fossilfri el-mix god, menar E-bränsleproducent A, Biobränsleproducent A och Pappersmassabruk C. Dels har Sverige låga elpriser jämfört med resten av Europa, menar E-bränsleproducent A, Pappersmassabruk A och C samt Kraftvärmeverk C. Både BECCS och BECCU kräver dock en stor mängd energi för infångningssteget menar Forskare B, Pappersmassabruk A och C samt Kraftvärmeverk C. För Kraftvärmeverk A och C samt Pappersmassabruk C innebär infångning en minskad elproduktion. Kraftvärmeverk C och Pappersmassabruk C förklarar att det beror på att ånga som annars hade använts till elproduktion går till infångning. Kraftvärmeverk C hade dessutom fått en ökad elförbrukning till följd av installation av pumpar och kompressorer, medan Kraftvärmeverk A menar att de får en lägre elförbrukning då de kommer att köra färre värmepumpar. Vidare menar Kraftvärmeverk A att den minskade elproduktionen är ett större problem för kraftverk än för kraftvärmeverk. Både Kraftvärmeverk A och D menar att fjärrvärmeproduktion är en bra förutsättning för infångning. De förklarar att energin från infångningen kan återanvändas för att få en ökad fjärrvärmeproduktion. Detta påstår Kraftvärmeverk A ger dem en ökad totalverkningsgrad.

BECCU är särskilt energikrävande jämfört med BECCS, menar Forskare A och B samt Pappersmassabruk A och B. Både Forskare A och B förklarar att detta beror på att vätgas behöver tillverkas genom elektrolys för flera produkter. Plastindustri A förklarar att de inte kan tillgodose ett elbehov för vätgasproduktion genom elektrolys lokalt, på grund av otillräcklig kapacitet. Både E-bränsleproducent A och Biobränsleproducent A lyfter att det är en förutsättning för e-bränsleproduktion att energin dessutom är förnybar. Förutom att BECCU är mer energikrävande än BECCS, tar aktörer upp tillgången på vätgas. Plastindustri A ser att den interna och externa tillgången på fossilfri vätgas till ett bra pris är den största utmaningen för BECCU. Även Forskare A tror att det stora behovet av vätgas kan bli en utmaning. Dessutom menar hen att det kan vara särskilt svårt för massabruk att implementera BECCU eftersom de har så stora koldioxidflöden, vilket kommer kräva stora anläggningar och väldigt mycket vätgas.

4.3.5 Tekniska utmaningar med slutlagring

Kraftvärmeverk A lyfter två utmaningar kopplat till slutlagringen. De förklarar att gas, från andra leverantörer, kommer tillbaka in i deras skepp när de töms vid lagringsplatsen. Denna gas får de sen in i deras egen anläggning vilket gör att de behöver ta hänsyn till föroreningar som de själva inte har i sin koldioxid. Den andra utmaningen är att rena koldioxiden till kraven som finns vid lagringsplatserna, vilket Kraftvärmeverk C håller med om.

Kvalitetskraven på koldioxiden är väldigt höga. De är nära food-grade och det är en utmaning att rena koldioxid så pass mycket. [...] Det är väldigt svårt att nå den kvalitetsnivån. - Kraftvärmeverk A

4.4 Logistik och infrastruktur

I följande avsnitt sammanställs utmaningarna och de befintliga förutsättningarna för att få tillstånd, infrastruktur och logistiken på plats genom hela BECCUS värdekedja. Inledningsvis presenteras utmaningarna med infångningsanläggningar, därefter den logistiska värdekedjan och till sist slutlagringen. För att kunna implementera BECCUS behövs stora investeringar göras i hela värdekedjan och dess infrastruktur. Värdekedjan från utsläpparen till slutlagring eller användning kommer delas och bero av flera aktörer vilket leder till utmaningar. Flera aktörer hamnar i ”hönan och ägget”-situationen mellan de inblandade parterna medan andra ser goda förutsättningar att utnyttja befintliga logistikkedjor. Det är också en splittrad uppfattning om lagringskapaciteten i närområdet.

4.4.1 Infångningsanläggning, miljötillstånd och bygglov

För att installera en infångningsanläggning för BECCUS krävs stora investeringar i ny infrastruktur på utsläpparens anläggning. Kraftvärmeverk A och D påpekar att projektering och planering inför implementeringen av sådana här stora projekt tar lång tid och mycket resurser. Något som Kraftvärmeverk C ser som en stor utmaning i planeringsfasen är att deras anläggning kommer behöva vara i drift under tiden som projektet byggs upp. Pappersmassabruk B nämner även att en implementering av en infångningsanläggning kräver att det finns plats för den och för att kombinera det med en BECCU-anläggning krävs ännu mer yta i anslutning till aktörens befintliga anläggning. Sökta miljötillstånd och bygglov behöver godkännas för den nya anläggningen, något som Pappersmassabruk A och B samt Styrmedelsforskare B och Forskare C ser som stora utmaningar och tidskrävande processer. Särskilt utmanande kan det bli med plats för ny infrastruktur, miljötillstånd och bygglov i tätbebyggda områden menar Forskare B.

4.4.2 Logistik och infrastruktur till användning eller slutlagring

För BECCS är logistikkedjan lång och finns inte på plats i nuläget, påpekar Styrmedelsforskare B, Kraftvärmeverk D och Pappersmassabruk C. Pappersmassabruk A och B, som jobbar mycket med både import och export i dagsläget, har däremot mycket erfarenhet och en befintlig logistikkedja vilket gör att de inte ser logistikkedjan som en större utmaning. Pappersmassabruk A påstår att det främst är skogsbolagens erfarenheter och deras befintliga värdekedja som ger dem bättre förutsättningar och kostnadseffektivitet i logistikkedjan jämfört med kraftvärmeverk: ”Så vi är delvis ett transportbolag och det är den stora skillnaden mellan oss och energibolagen”. Pappersmassabruk A utvecklar detta med att jämföra deras logistiska kostnader med tåg till lagring i Danmark beräknas till 40–45 €/ton medan Kraftvärmeverk A beräknar en kostnad på omkring 100 €/ton med båt till lagring i Norge. Pappersmassabruk C verkar däremot inte se värdekedjan som befintlig och ser att samarbete är nödvändigt för att infrastrukturen ska utvecklas. Forskare B poängterar att de utsläppare som har nära till en hamn har en stor fördel, precis som Kraftvärmeverk B planerar skicka i väg sin infångade koldioxid med extern transportör direkt från

deras hamn till slutlagring. På detta sätt kan dessa aktörer slippa en omlastning och extra infrastruktur jämfört med en geografisk placering längre ifrån hav.

För att bygga upp logistikkedjan mellan utsläpparen, mellanlagringen och slutlagringen krävs stora investeringar där de flesta aktörer ser ett behov av samarbete och att slå ihop koldioxidflödena för en bättre skalekonomi. En utmaning som flera respondenter lyft fram är att infrastrukturen och logistikkedjan behöver finnas på plats innan koldioxidinfångningen påbörjas och vem som ska stå för investeringarna när de aktuella parterna i samarbetet har helt olika tidsplaner för när deras infångningsanläggning kommer i drift. Dilemmat beskrivs som ”hönan och ägget”, där Kraftvärmeverk C och D, Styrmedelsforskare B, Forskare A, B och C samt Pappersmassabruk C ser det som en utmaning att logistikkedjan beror av flera aktörer och där alla delar behöver vara på plats samtidigt. Kraftvärmeverk C poängterar att ”alla aktörer måste ha tidsplaner som kuggar i varandra, och det är en utmaning såklart”.

De flesta punktutsläpparna i intervjustudien planerar inte eller har inte intentionen att sköta logistiken ut från sina egna anläggningar, eller åtminstone inte från mellanlagring till slutlagring. Detta leder till att punktutsläpparna förutom att behöva samarbeta med varandra också behöver koordinera sin verksamhet med en extern part. För att komma till investeringsbeslut uttrycker punktutsläpparna att de vill vara trygga med att det kommer finnas infrastruktur för både transport och lagring på plats, men likväl är de externa parterna beroende av det ska finnas koldioxid att hämta och lagra.

Det är en omogen marknad, det finns inga logistikkedjor, det finns inga mellanlager för koldioxid, det finns ett fåtal slutlageraktörer där man kan slutlagra. Man hamnar ofta i hönan och ägget situationen, ja men ska vi investera, då måste vi veta att det finns fartyg som kan komma och hämta koldioxiden, ska de investera måste de veta att det faktiskt finns koldioxid att hämta och vem agerar först och hur fördelar man de riskerna? - Kraftvärmeverk D

En positiv effekt av ett samarbete mellan punktutsläppare är att få större och jämnare flöden av koldioxid över året, något som Kraftvärmeverk B ser som betydande då deras anläggning har stora säsongsvariationer. Detta beror på att under vintern är efterfrågan på fjärrvärme stor, medan den är obefintlig under vissa sommarmånader. Detta leder till att kraftvärmeverken förbränner olika mycket biomassa under året vilket skapar ett ojämnt flöde av koldioxid att fånga in. Genom att utnyttja deras strategiskt placerade hamn kan de hitta fler aktörer att dela deras mellanlager och kontrakterade båtar med och på så sätt få stordriftsfördelar samt sänka deras kostnader och risker.

När det kommer till slutlagring så menar Styrmedelsforskare B, Forskare C samt Pappersmassabruk A och C att det finns goda lagringsmöjligheter i närområdet med Northern lights i Norge och framtida lagringsutrymmen i Danmark. Styrmedelsforskare B säger att man har mycket stor kompetens och erfarenhet av att lagra koldioxid i Norge då detta har gjorts sedan nittioalet. De kraftvärmeverk som kom-

mit långt i projekteringen uppger att de antingen har ingått avtal eller befinner sig i dialog med aktörer som Northern Lights och de danska projekten. Forskare C påstår att lagringen är långt ifrån en begränsade faktor i förhållande till de koldioxidvolymer vi har i Sverige. Kraftvärmeverk A, Forskare B och Styrmedelsforskare B ser dock att det kommer behövas fler lagringsaktörer. Forskare B menar att det finns ett stort gap mellan den förväntade volymen av infångad koldioxid och annonserad lagringskapacitet. Hen menar att fler aktörer behöver komma in på lagringsmarknaden, men att det återigen är samma problematik med ”hönan och ägget”: “Vem vågar gå före när det är så många steg på tekniksidan som måste falla på plats samtidigt?”. Kraftvärmeverk A och Forskare B tror däremot inte att Sverige har kompetensen att skapa egna lagringsdepåer och ligger långt efter andra länder i utvecklingen. De tror att länder som Norge, Danmark, Nederländerna och Storbritannien med kompetens inom olje- och gasindustrin har bättre förutsättningar och försprång att ta fram geologiska lagringsplatser.

4.5 Ekonomi

Detta avsnitt inleds med en översikt av marknaden för BECCUS, följt av kostnadsrelaterade utmaningar och avslutas med ekonomiska faktorer bakom företagets investeringsbeslut. Marknaden upplevs som osäker på grund av beroendet av politiska styrmedel, även om en frivillig marknad existerar. Vissa aktörer har potentiella köpare av negativa utsläpp, medan andra ser en låg efterfrågan på BECCU-produkter. Utan styrmedel är det svårt för BECCU-produkter att konkurrera med betydligt billigare fossila alternativ. Höga kostnader kopplas till teknikens energiintensitet, stora investeringar och transport- samt lagringskostnader. Forskare menar att lagringsplatsernas monopolliknande ställning kan driva upp priser. Flera aktörer påpekar att de verkliga kostnaderna för BECCUS är högre än tidigare uppskattat. Att flera aktörer inte investerar beror på att ekonomin inte går ihop för dem.

4.5.1 Marknad

Eftersom BECCS ännu inte är kommersialiserat finns det i dagsläget ingen större marknad för det. Som Pappersmassabruk A och C beskriver det, så är den dessutom oförutsägbar eftersom den vilar på politiska beslut. Dock växer en frivillig marknad fram där ett fåtal aktörer köper upp negativa utsläppskrediter eller e-bränslen för att nå sina egna klimatmål. Två kraftvärmeverk som kommit längre i projekteringen nämner att de har många potentiella kunder av de negativa utsläppen.

Samtliga intervjuade pappersmassabruk, Plastindustri A, Kraftvärmeverk D och Biobränsleproducent A har inte sett en tillräckligt stor efterfrågan BECCU-produkter för att kunna gå vidare i projektering eller kunna investera. De känner inte att de kan grunda så stora investeringar på en frivillig marknad, eftersom marknaden i dagsläget är omogen. Forskare B ser dock att det kan bli en morot för aktörerna att skapa gröna produkter som grön fjärrvärme och bränslen, vilket E-bränsleproducent A och Kraftvärmeverk A och B håller med om. Plastindustri A och Kraftvärmeverk D ser dock att de var alldeles för tidiga med att försöka uppnå detta genom BECCUS samt att kunderna inte efterfrågar klimatsmarta produkter i den utsträckningen som de initialt trott, därför har de fått pausa sina planer. Kraftvärmeverk D nämner att marknaden för projekt gällande CCU kommit igång senare än vad de initialt trodde och att efterfrågan för syntetiskt bränsle har förskjutits.

Många aktörer lyfter att marknaden för BECCUS blir ännu osäkrare i och med omvärldsläget i dagsläget med krig i närområdet och tuffa handelsförhållanden. Politiken riktar mer fokus och resurser mot att rusta upp försvaret och konkurrenskraften. Flera aktörer uttrycker att de krävs mer styrmedel på plats samtidigt som de uttrycker en oro att politiken ska stå fast vid de redan uppsatta målen. De flesta aktörerna och forskarna ser styrmedel som en grundläggande förutsättning för att skapa en stabil och säkrare marknad.

4.5.2 Konkurrens med icke BECCU-alternativ

Respondenterna som har riktat sig mot BECCU-produkter av olika slag ser en allt för låg efterfrågan när de fossila alternativen fortfarande i många fall är flera gånger billigare. Forskare B ser inte att marknaden för BECCU-bränslen kommer att kunna konkurrera om man inte sätter press på det fossila. Som tidigare nämnt sätter Refuel EU och Fuel EU Maritime press på de fossila bränslena inom flyg- och fartygsbränslen. Forskare C lyfter även fram att BECCU-bränslen inte bara konkurrerar med fossila alternativ utan även andra bränslen och utsläppreducerande åtgärder som till exempel elektrifiering. Biobränsleproducent A nämner också att eSAF är många gånger dyrare än deras bio-SAF. E-bränsleproducent A ser även konkurrens från externa marknader på e-bränslen och att det är något som inte fungerar med de befintliga styrmedlen. Internationell konkurrens är något som påverkar marknaden och utvecklingen av BECCU.

Det vi ser nu är att 3% av [e-]metanolprojekten i Europa har lyckats ta sig till investeringsbeslut. Trots att vi ser att det finns en i princip garanterad marknad. Det är någonting som inte funkar. [...] Det är att marknaden översvämmas av extremt billig subventionerad kinesisk e-metanol.
- E-bränsleproducent A

4.5.3 Höga kostnader

Flera aktörer tar upp höga kostnader och dyra investeringar som utmaningar för implementering av BECCUS. Forskare B, Plastindustri A och Kraftvärmeverk A menar alla att energikostnaden för infångning är stor. Dock, som tidigare nämnts, menar Kraftvärmeverk A att det inte påverkar anläggningar med fjärrvärmesystem på samma sätt. Kraftvärmeverk D menar dessutom att teknikens komplexitet är något som driver upp kostnaderna. Kraftvärmeverk B estimerar att deras kostnad fram till mellanlagring hade legat på 2000–2500 kr per ton infångad koldioxid. De tar upp stora investeringar som en utmaning för BECCUS men nämner inte specifikt infångningskostnaden.

För BECCU är energikostnaden ännu högre. Som tidigare nämnts är energibehovet kopplat till elektrolytproducerad vätgas stort. En hög energikostnad för BECCU tas upp av Forskare A och B, Biobränsleproducent A, Plastindustri A och Pappersmassabruk C. Plastindustri A hade velat se att vätgaskostnaden låg på ungefär en tredjedel av den nuvarande kostnaden. Både Plastindustri A och Pappersmassabruk C refererar till studier som visar på höga energikostnader för BECCU.

Flera studier visar att kostnaden för koldioxid som en CCU-satsning har är en mindre del av produktkostnaden. Det är elen och investeringen i anläggningen som styr produktionskostnader för CCU. - Pappersmassabruk C

För BECCS tillkommer kostnader för transport och lagring. Kraftvärmeverk C menar att det står för en stor del av kostnaden: "Sedan är det kostnaden för transport och lagring. Det är nästan halva kostnaden totalt om man räknar per ton koldioxid, så det är ju jätteviktigt att få ner den kostnaden". Både Forskare B och Styrmedelsforskare B menar att det finns en monopolliknande ställning gällande slutlagring som skulle kunna bidra till ett högt pris.

Lagring, jag ser att det finns flaskhalsar där och att det också finns en monopolistisk ställning, eller monopolliknande i alla fall marknad som eventuellt driver upp priset. [...] Men det jag har hört är att det ligger ganska högt och det kanske är rimligt att det ligger högt för att kostnaden är hög eller så passar man på att krydda lite grann nu. - Styrmedelsforskare B

Att det är dyrt att vara tidig med BECCUS tas upp kopplat till både teknik och infrastruktur. Forskare A och Kraftvärmeverk B menar att det är dyrt att vara tidig med infångningsteknik. Forskare A påpekar att det alltid är dyrare att vara först med att tillämpa en teknik, då man kommer att stöta på diverse olika tekniska utmaningar. Enligt Styrmedelsforskare B är det särskilt dyrt för bioenergi och massabruk, eftersom tillämpningen av tekniken där är relativt ny jämfört med olje- och gastillämpningar. Som tidigare nämnts kan infångningstekniken bli svår att modularisera. Forskare B förklarar att man därför kan förvänta sig att teknikkostnaderna kommer sjunka långsammare med kapacitetsökning än om det istället hade gått att modularisera helt. Forskare B menar dessutom att transport- och lagringskostnaderna kommer vara högre för de första BECCS-projekten.

Sen så har man också på lagringen det här att det är relativt nytt. Man måste få i ordning skeppen, man måste bygga upp hela infrastrukturkedjan. De första som ansluter sig kommer att behöva bära en ganska stor del av de kostnaderna. - Forskare B

4.5.4 Osäkerhet kring kostnader

Förutom att kostnaderna är höga menar flera att de verkliga kostnaderna kommer vara ännu högre än estimerat. Detta tas upp av Styrmedelsforskare A och B, Forskare B, Pappersmassabruk A, Kraftvärmeverk A och D.

Jag har blivit förvånad över kostnadsläget till exempel, som är något helt annat än det kostnadsläge som används i de integrerade bedömningsmodellerna för att rulla ut den här tekniken globalt. - Styrmedelsforskare B

Kraftvärmeverk D lyfter fram att Energimyndighetens kostnadsberäkningar inför de omvända auktionerna inte är i paritet med den verkliga kostnaden. De menar att tekniken är dyrare dels på grund av att komplexiteten har underskattats och dels eftersom man bortsett från omvärldssituationen. Kraftvärmeverk A menar att kostnaderna alltid blir högre när man implementerar en teknik på stor skala första gången. Styrmedelsforskare A trycker på att kostnader är en stor och komplex fråga

och att nu när kostnader har börjat undersökas inom företagen, finns det mycket belägg för att kostnaderna kommer att fördubblas från de förväntade. I Forskare B:s egna kostnadsuppskattningar har hen antagit en mogen teknik där anläggningen inte är den första av sitt slag. Detta menar hen gör att kostnadsuppskattningarna kraftigt skiljer sig från kostnadsbilden industrin tidigt möter.

Styrmedelsforskare B och Forskare B lyfter båda en annan aspekt som skapar osäkerhet kring kostnaderna. Styrmedelsforskare B menar att det är svårt att ta reda på vad det exakta priset för slutlagring är. Forskare B berättar att spannet för infrastrukturkostnaderna är stort och varierande. Hen har hört allt mellan 5–100€ per ton i lagringskostnader, medan transportkostnader beror kraftigt på avstånd, transportsätt och ytterligare faktorer.

4.5.5 Investeringsbeslut

För att aktörerna ska kunna fatta ett investeringsbeslut behöver flera delar falla på plats. Även om de ser många utmaningar lyfts den finansiella risken fram som den största. Styrmedelsforskare B menar att ekonomin inte går ihop för någon av aktörerna utan att en annan part hjälper till att bära kostnaderna och i intervjuerna nämner flera aktörer att de är i behov av statligt stöd för att få ihop finansieringen. Kraftvärmeverket som tilldelades de omvända auktionerna menar att de kunde ta investeringsbeslut tack vare att de vann auktionen i kombination med att de hade säkrat köpare av negativa utsläpp. Pappersmassabruk A ser det som oerhört osannolikt att de skulle investera i BECCS i och med att det har en ansträngd investeringsbudget. De menar att de nya högre kostnaderna som kraftvärmeverket presenterat i sitt investeringsbeslut är avskräckande, och att de därför föredrar att rikta större investeringar mot den egna kärnverksamheten. Forskare A påstår däremot att hens modelleringsstudier visar på att befintliga styrmedel ger en lönsam affärsmodell för pappersmassabruk att investera i BECCU. Hen menar dock att de snarare handlar om vad som är mest lönsamt för pappersmassabruken, BECCU eller en förgasningsprocess.

4.6 Framtida utveckling av styrmedel

Följande avsnitt behandlar hur marknaden är kopplad till styrmedel och komplexiteten det leder till, huruvida befintliga styrmedel räcker till för implementering av BECCUS, samt förslag på hur styrmedel kan utformas i framtiden. En utmaning som tas upp gäller finansieringen av BECCS, framförallt vid en implementering i större skala, då klimatnyttan anses vara den enda nyttan. Utvecklingspotential som tas upp gällande styrmedel för BECCUS är bland annat att skapa långsiktiga regleringar, kombinera statlig och privat finansiering samt sträva mot att skapa större marknader där både BECCUS och andra klimatåtgärder inkluderas.

4.6.1 Räcker dagens styrmedel till?

Flera aktörer, både på forskar- och företagssidan, poängterar att det behövs starkare politiska styrmedel för implementering av BECCS och att marknaden för BECCS styrs till stor del av dessa. Ett kraftvärmeverk fick en stor del av pengarna från de omvända auktionerna, vilket de anser var en avgörande faktor för att kunna ta investeringsbeslut. Styrmedelsforskare A anser att klimatnyttan är den enda nyttan med att implementera BECCS, vilket leder till att styrmedel måste finnas för att få ekonomin att gå ihop och att de bör ”förse med full kostnadstäckning”. Hen trycker på att det inte finns någon som kommer att genomföra dessa projekt annars och att dagens styrmedel inte räcker till. Styrmedelsforskare B benämner också klimatnyttan som en positiv externalitet som kan internaliseras, ”då det är en global klimatnytta som man skänker världen genom att fånga in och lagra [koldioxid]”. Framför allt saknas det styrmedel som stöttar en storskalig implementering av BECCS (Styrmedelsforskare B, C, Forskare B), vilket ett par företag också tar upp i intervjuerna (Pappersmassabruk A, Kraftvärmeverk B). Kraftvärmeverk B tar upp att det först behövs statligt stöd för att projekt inom BECCUS ska komma igång, men att det blir utmanande hur man sedan ska ”få statligt stöd att takta med en växande marknad och när och hur den står på egna ben.” Forskare A utvecklar att det främst saknas styrmedel för företagen att våga investera i och satsa på en implementering av BECCS, men hen tar också upp en grundläggande konflikt i huruvida styrmedel för BECCS ska sättas in i nuläget; att BECCS möjligen bör prioriteras först när fossila bränslen har fasats ut till en nivå då endast de svåraste utsläppsminskningarna kvarstår.

Huruvida de styrmedel som existerar för implementering av BECCU räcker till, är åsikter som skiljer sig från aktör till aktör. Specifikt för massabruk anser Forskare A att de styrmedel som finns är tillräckliga för att våga genomföra investeringar, men att det snarare handlar om en lönsamhetsfråga mellan BECCU, en förgasningsprocess eller andra alternativ för användning av biomassan. Hen anser att utsläppshandelssystemet i kombination med styrmedel för bränsle inom flyg och sjöfart kommer att skapa tillräckliga incitament för BECCU och att det kommer ”finnas en viss marknad för elektrobränslen runt 2030. Sen kommer den bli större efterhand”. Å andra sidan tar några av företagen upp att det saknas tillräckliga styrmedel för att BECCU ska vara lönsamt, och att det krävs en tydligare strategi för billigare vätegasproduktion (via elektrolys för tillverkning av e-bränslen) och en säkrad tillgång

till grön el (Plastindustri A, E-bränsleproducent A). E-bränsleproducent A tar även upp att det finns bättre förutsättningar i styrmedel i vissa andra länder, exempelvis Danmark och Finland. I Finland finns en möjlighet till en skatterabatt för deras BECCU-projekt. De efterfrågar nationella styrmedel i Sverige, exempelvis så kallade differenskontrakt.

Forskare B tillägger även komplexiteten kring att många parter är involverade i olika delar av värdekedjan för BECCUS, vilket kan leda till att statliga subventioner behövs. Flera företag tar upp att marknaden för BECCUS inte är mogen än; att det behövs en långsiktig plan i regleringar. Pappersmassabruk B säger att det antingen behövs ett garantipris för BECCUS på marknaden eller en betydande straffavgift för fossil användning. Styrmedelsforskare A säger att det inte går att lita enbart på att marknaden tar fram de bästa lösningarna, utan att den behöver regleras, då det inte är “säkert att marknaden värderar exempelvis biologisk mångfald lika högt som samhället vill”. Å andra sidan kan de lösningar som idag anses vara effektiva skifta mot andra lösningar i framtiden, vilket leder till en risk med att införa tekniskspecifika styrmedel mot exempelvis BECCS, anser Forskare A.

4.6.2 Komplexitet i finansiering av BECCUS

Flera forskare är överens om att en finansiering av BECCUS med offentliga medel inte är hållbart långsiktigt, utan att en marknadsbaserad lösning behövs för att skapa ett storskaligt fungerande system. Styrmedelsforskare A tar upp att de omvända auktionerna finansieras av offentliga medel, vilket leder till en del kritik; ska då en storskalig implementering ske behöver den privata sektorn involveras mer, genom andra stödsystem, anser hen. Ett kraftvärmeverk som varit med i studien håller på att implementera koldioxidinfångning på deras anläggning för avfallsförbränning, poängterar att det inte är “[...] rimligt att de som lämnar sopor i [stad] ska betala jättemycket mer än alla andra för att de hjälper världen att minska klimatpåverkan”, framförallt när det inte finns några reglerande krav vare sig på koldioxidinfångning eller klimatkompensation.

En barriär som tas upp av Forskare B är att biogena utsläppare inte betalar för sina utsläpp; hen anser att detta är rimligt, men det leder till att finansiering av både BECCUS och utsläppsminskningar blir svåra att motivera. En aktör på ett pappersmassabruk lyfter en personlig åsikt om att man inte bör “förblindas av att det kallas för biogen koldioxid, utan man måste göra någonting utav det”. Där finns också en skillnad mellan massabruk och kraftvärmeverk, tillägger Forskare A; “kraftvärmeverken [har] starkare incitament för att de också har fossila utsläpp från att de förbränner plast”. De som endast släpper ut biogen koldioxid, å andra sidan, behöver en vinst för att genomföra BECCU-projekt, anser E-bränsleproducent A. Plastindustri A ger förslag på att det bör vara förbjudet att förbränna biomassa och att bioråvaran istället ska ses och användas som en strategisk råvara inom kemi- och raffinaderi-industrin innan den förbränns.

Många på forskarsidan är överens om att det behövs en lösning som kombinerar privat och statlig finansiering för implementering av BECCUS (Styrmedelsforskare A, B, Forskare B, C). Styrmedelsforskare B tillägger att det behöver skapas en bred marknad för klimatåtgärder, där BECCUS ingår men inte är den enda möjliga åtgärden.

På sikt får man försöka hitta instrument som skapar större marknader där olika typer av klimatåtgärder får konkurrera med varandra, och skapar den nytta som är mest effektiv. - Styrmedelsforskare B

4.6.3 Förslag på framtida styrmedel för BECCUS

Flera forskare nämner i intervjuerna att negativa utsläppskrediter i EU ETS är ett möjligt framtida styrmedel, men det finns också en del osäkerheter kring hur det skulle implementeras. Styrmedelsforskare A nämner att ”det som talar för att införa det i EU ETS är väl att EU ETS finns, att det är ett fungerande styrmedel i EU; det är ganska lätt att föreställa sig hur det skulle införas.” Å andra sidan är det en tidskrävande process att reformera utsläppshandelssystemet, säger hen, medan många vill att införandet sker så snart som möjligt. En annan faktor som styrmedelsforskaren tar upp är risken för ”mitigation deterrence”; att det skulle kunna bli billigare att köpa BECCS-krediter än att minska sina utsläpp om ETS-priserna för fossil användning blir väldigt höga.

BECCS-krediter får inte tränga bort utsläppsminskningar, samtidigt som det behöver skapas drivkrafter för att bygga upp kapaciteten för BECCS och andra motsvarande tekniker. - Styrmedelsforskare A

Styrmedelsforskaren tar även upp utmaningen som uppkommer vid tidpunkten när de kvarvarande utsläppen är små och det endast är några få aktörer ansvarar för dem. Vid denna tidpunkt påpekar hen att om dessa få aktörer kommer behöva stå för de BECCS-krediter som finns, kommer det inte att gå ihop ekonomiskt för dem.

Kraftvärmeverk A lyfter att en inkludering av negativa utsläppskrediter i EU ETS skulle innebära en positiv fördel för implementeringen av BECCS som kan driva dem framåt.

Ett annat förslag på framtida styrmedel är att införa nationella krav på hur mycket negativa utsläpp varje medlemsland i EU förväntas bidra med. Detta kan liknas vid en påbyggnad av EU ETS, anser Styrmedelsforskare A, för negativa utsläpp. Hen förklarar hur det först måste räknas på hur mycket negativa utsläpp som behövs på EU-nivå, ”sedan fördelas det ansvaret genom svåra förhandlingar mellan olika EU-länder baserat på deras respektive viljor och förutsättningar.” Kraven på negativa utsläpp från varje land skulle då öka om behovet ökar. Styrmedelsforskare B tillägger att kraven för negativa utsläpp kan inkludera både BECCS och andra återtagstekniker, samt att varje land beslutar själva hur finansieringen ska ske och vilka styrmedel som behöver sättas in.

Ytterligare ett förslag är att fondera pengar idag för att finansiera framtida negativa utsläpp som behövs för att kompensera för både kvarvarande (oundvikliga) utsläpp och historiska utsläpp, säger Styrmedelsforskare A.

Lägger man en ytterligare kostnad på de som släpper ut idag [...], kan de pengarna växa och användas längre fram när det finns en kapacitet att genomföra de här enorma volymerna negativa utsläpp, och kostnaderna förhoppningsvis gått ner jämfört med idag. - Styrmedelsforskare A

Hen ser dock en problematik kring acceptans för ett sådant typ av styrmedel. Det är svårt att implementera ett styrmedel för att få i gång projekt inom BECCUS, än svårare är det att styra mot en storskalig marknad. Att då lägga undan medel idag för att finansiera projekten i framtiden är en ännu större utmaning, men någonting som behöver tas tag i redan idag, anser Styrmedelsforskare A.

5

Slutsats

Genomgående anser många aktörer att BECCUS kommer att spela en roll för klimatomställningen, men som en nödlösning efter att energieffektivisering och utsläppsreduceringar har skett. Det lyfts fram att Sverige har goda förutsättningar för att kunna lyckas med implementering av BECCUS, vilket beror på att Sverige både har stora biogena punktutsläpp och relativt låga elpriser jämfört med andra EU-länder. Vidare finns det spridda åsikter om hur utvecklad värdekedjan är, huruvida marknaden är mogen och till vilken grad BECCUS kommer att behövas. Detta gör att det kan vara svårt att skapa en samlad helhetsbild av vad som krävs för en fortsatt utveckling av BECCUS.

Tekniken anses till stor del vara mogen och de tekniska utmaningarna betraktas som mindre och hanterbara även om tekniken inte är beprövad på stor skala. Den största utmaningen som framkommer är istället att marknaden för BECCUS är beroende av politiska styrmedel för att fungera. Flera aktörer vill se en långsiktighet från det politiska hållet för att våga ta investeringsbeslut då en BECCUS-implementering innebär höga investeringskostnader. Specifikt är BECCU beroende av styrmedel då höga produktionskostnader innebär att BECCU-produkter har svårt att konkurrera med fossila alternativ. Flera aktörer vågar inte grunda sina investeringsbeslut på den frivilliga marknaden, då de ser en för låg efterfrågan på BECCU-produkter.

Vad som saknas i befintliga styrmedel och hur framtida styrmedel ska utformas är respondenterna oense om. Vissa lyfter fram att tekniskspecifika styrmedel är viktiga för att få igång de första projekten, medan andra lyfter att det är en riskabel strategi som kan skapa inlåsningar eftersom det inte är säkert vilka tekniker som kommer vara mest effektiva i framtiden. De förslag som tas upp för framtida utformning berör framförallt BECCS, då denna utveckling bygger på att det finns en konstruerad affärsmodell för negativa utsläpp. För BECCU anser en forskare att befintliga styrmedel räcker till, medan det från företagen lyfts att det behövs tydligare strategier för exempelvis fossilfri vätgas och el till ett konkurrenskraftigt pris.

För BECCS är avsaknaden av infrastruktur och logistik en stor utmaning för flera aktörer. Vidare är stora investeringskostnader ett hinder för att få infrastrukturen på plats. De höga kostnaderna blir stora för den enskilda punktutsläpparen samtidigt som en "hönan och ägget"-problematik uppstår. Detta innebär att den tredje parten inte vill ta investeringsbeslut innan punktutsläppare kan garantera ett koldioxidflöde, samtidigt som punktutsläppare heller inte vill ta ett investeringsbeslut innan infrastrukturen finns på plats.

Det finns vissa trender som särskiljer pappersmassabruk från kraftvärmeverk. Pappersmassabruken har en logistisk värdekedja på plats, vilket är en fördel, å andra sidan har de fler möjligheter att införa andra klimatstrategier jämfört med kraftvärmeverken. Kraftvärmeverken kan däremot skapa en ökad fjärrvärmeproduktion med hjälp av infångningen. Utöver dessa skillnader är det svårt att gruppera aktörerna utifrån deras bakgrund. Resultatet tyder på att skillnaderna i uppfattning i första hand är kopplade till individuella aktörer snarare än till vilken bransch de tillhör. Även forskarna har olika ställningstaganden som inte alltid stämmer överens med varandra. Detta kan bland annat bero på att BECCUS ännu inte är implementerat på storskalig nivå, vilket gör att effekterna är svåra att förutsäga.

6

Diskussion

6.1 Diskussion av resultat och slutsats

Resultatet visar att de som har lyckats komma till investeringsbeslut är de som har hittat ett sätt att överkomma den finansiella barriären. Frågan som ställs då är *varför* vissa aktörer är mer benägna att implementera BECCUS än andra. Det går att ana två anledningar till detta. Den första kan antas vara att företaget har identifierat en affärsmöjlighet med BECCUS som de tror på. Det andra alternativet är att de tror att det kan etableras krav på koldioxidinfångning eller utsläppsminskning på biogen koldioxid i framtiden och att det är lönsamt att ligga i fas med dessa regleringar. Vad som ligger bakom en implementering av BECCUS kan få olika effekter. Om implementeringen är frivillig och baserad på en affärsmöjlighet värderas rimligen kostnadseffektivitet högst, vilket kan stimulera teknisk utveckling men inte nödvändigtvis leder till största klimatnytta. Om anledningen istället är politiska påtryckningar, kan detta med större säkerhet få önskad klimatnytta, men leda till lägre stimulans av innovation. Detta är ett dilemma vid framtagning av styrmedel, då det egentligen hade varit eftersträvarsvärt att uppnå både en hög klimatnytta och kostnadseffektivitet samtidigt som fortsatt utveckling stimuleras.

Synen på BECCS kontra BECCU skiljer sig mellan de olika intervjuobjekten. Exempelvis är kraftvärmeverken mer inställda på BECCS, medan pappersmassabruken inte har en stark preferens på om koldioxiden lagras eller används. Anledningen till detta kan dels bero på förutsättningar som finns för specifika anläggningar, till exempel geografisk placering. Något annat som kan påverka valet mellan BECCS och BECCU är synen på den biogena kolatomen som resurs. För att ersätta det fossila kolet som idag finns i exempelvis bränsle och plastprodukter så kommer det krävas en stor tillgång på biogent kol. Detta är ett argument för att användning är ett mer rimligt slutsteg för infångad koldioxid. För att åstadkomma så stora nationella utsläppsminskningar som möjligt är istället BECCS en mer effektiv strategi.

I intervjustudien har respondenternas roller och expertområden inte viktats i analysen av enskilda frågor. Samtliga aktörer har fått spekulera fritt, vilket innebär att vissa svar kan komma från respondenter med begränsad insyn i den specifika frågan. Intervjuerna genomfördes enskilt, vilket innebär att utsagor som berör andra aktörer inte har kunnat kommenteras eller revideras av dessa. Det finns också en potentiell risk att vissa aktörer inte återgett en helt objektiv bild av sina förutsättningar och intentioner kopplade till BECCUS, särskilt då det kan föreligga ett kommersiellt egenintresse i frågan.

6.2 Diskussion av metod och framtida forskning

Intervjustudien baseras på semistrukturerade intervjuer och intervjumallarna som använts har anpassats efter olika typer av intervjuobjekt. Det innebär att en problematik kan uppstå kring möjligheten att visualisera trender bland intervjusvaren eftersom att alla aktörer inte svarar på exakt samma frågor. Att en aktör nämner en utmaning som en annan aktör inte nämner, betyder inte nödvändigtvis att den utmaningen inte existerar för båda. Ett möjligt sätt att motverka detta är att genomföra en enkätbaserad intervjustudie eller utgå ifrån en universell frågemall för alla typer av aktörer. Det hade däremot kunnat leda till att intervjuerna inte blir lika samtalsbaserade och hade potentiellt exkluderat intressant information. Intervjumallen är baserad på öppna frågor kring utmaningar, förutsättningar och BECCUS roll i klimatomställningen, vilket gör att statistik inte går att genomföra på intervjusvaren. Statistiska resultat hade krävt en mer kvantifierad intervjustudie med flervalsfrågor, exempelvis till vilken grad en viss aktör håller med om ett påstående.

Även om de intervjuade aktörerna i hög grad bidragit till en helhetsbild, hade ytterligare typer av aktörer kunnat inkluderas för att bredda perspektivet och täcka hela värdekedjan. Det handlar bland annat om aktörer inom infrastruktur och lagring, köpare av slutprodukter och beslutsfattare. Det hade varit särskilt intressant att få lagringsplatsernas perspektiv på marknaden, med tanke på den monopolliknande situationen som tas upp av några intervjuobjekt. Dessutom hade det varit intressant att höra hur potentiella kunder av BECCU-produkter ser på marknaden, då den beskrivs som omogen av flera intervjuobjekt. Även om forskare som har varit med och utvecklat styrmedel har intervjuats hade det varit intressant att höra hur politikerna som tar beslut ser på BECCUS roll i Sveriges klimatstrategi, vad syftet med de omvända auktionerna var och hur de ser på långsiktighet i politiken.

Referenslista

- [1] IPCC, "Summary for policymakers," i *Global Warming of 1.5° C*, Cambridge University Press, juni 2022, s. 1–24. DOI: 10.1017/9781009157940.001.
- [2] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2024," 2024. URL: www.iea.org/terms.
- [3] F. Johnsson, L. Zetterberg och K. Möllersten, "Mot nettonollutsläpp - hur kan koldioxidavskiljning bidra?" *SNS Analys*, nov. 2023. URL: <https://www.sns.se/artiklar/sns-analys-98-mot-nettonollutslapp-hur-kan-koldioxidavskiljning-bidra/#:~:text=om%20projektet,utformas%20f%C3%B6r%20att%20fr%C3%A4mja%20klimatomst%C3%A4llningen..>
- [4] Europeiska kommissionen: Generaldirektoratet för klimatpolitik, "Ett klimatneutralt Europa år 2050 : En strategisk långsiktig vision för en stark, modern, konkurrenskraftig och klimatneutral ekonomi i EU," *Publikationsbyrån*, 2019. DOI: 10.2834/410767. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2834/410767>.
- [5] Miljö- och jordbruksutskottet, "Miljö- och jordbruksutskottets betänkande 2016/17: MJU24; Ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige," 2016. URL: <https://www.energimyndigheten.se/klimat/klimat/sveriges-energi--och-klimatmal/det-klimatpolitiska-ramverket/>.
- [6] Statens offentliga utredningar (SOU), "Vägen till en klimatpositiv framtid," 2020, ISSN: 0375-250X. URL: www.nj.se/offentligapublikationer.
- [7] Statens energimyndighet, "Första, andra, tredje... – Förslag på utformning av ett stödsystem för bio-CCS," 2021, ISSN: 1403-1892.
- [8] R. Chauvy och G. De Weireld, "CO2 Utilization Technologies in Europe: A Short Review," *Energy Technology*, årg. 8, nr 12, dec. 2020, ISSN: 21944296. DOI: 10.1002/ente.202000627.
- [9] Fossilfritt Sverige, "Strategi för biogen koldioxidinfångning," Fossilfritt Sverige, 2021. URL: <https://fossilfritt Sverige.se/strategier/strategi-for-biogen-koldioxidinfangning/>.
- [10] P. Karlsson, M. Lundblad, C. Josefsson Ortiz, P.-E. Wikberg och T. Gustafsson, "Kartläggning av inhemska biogena koldioxidutsläpp i Sverige," Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, 2023, ISSN: 1653-8102.
- [11] C. Roberge, J. Dahlgren, P. Nilsson, P.-E. Wikberg och J. Fridman, "Skogsdata 2024," SLU Institutionen för skoglig resurshållning, 2024, ISSN: 0280-0543.
- [12] Eurostat, *Area of wooded land (EFA questionnaire)*, 2024. DOI: 10.2908/FOR_AREA_EFA. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/for_area_efa/default/table?lang=en&category=for.for_sfm.

- [13] S. Svensson, E. Furusjö, O. Cintas Sanchez m. fl., "Kartläggning av biogena kolflöden i de skogsbaserade värdekedjorna i Sverige," RISE Research Institutes of Sweden, 2023. URL: <https://www.bioinnovation.se/projekt/omradesanalys-for-kartlaggning-av-biogena-kolfloden/>.
- [14] P. Börjesson och L. Björnsson, "Perspektiv på bioenergi: Biomassans framtida roll i en föränderlig värld," Miljö- och energisystem, LTH, Lunds universitet, Lund, 2024, ISSN: 1102-3651. URL: <https://www.miljo.lth.se>.
- [15] Statistiska centralbyrån, *Totala utsläpp och upptag av växthusgaser efter växthusgas och sektor*, 2023. URL: https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0107/TotaltUtslappN/.
- [16] Statistiska centralbyrån, *Utsläpp av växthusgaser från industrin efter växthusgas och bransch*, 2023. URL: https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0107/MI0107IndustriN/.
- [17] H. Skoglund, C. Fu, S. Harvey och E. Svensson, "Integration of carbon capture in a pulp mill—effect of strategic development towards better biomass resource utilization," *Frontiers in Thermal Engineering*, årg. 3, nov. 2023. DOI: 10.3389/fther.2023.1282028.
- [18] Naturvårdsverket. "Skog, utsläpp och upptag av växthusgaser." (online). (dec. 2024), URL: <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-och-upptag-i-skogen/>.
- [19] Skogsstyrelsen, "Rapport 2023-10 Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan," 2023.
- [20] O. Olsson, C. Bang, M. Borchers m. fl., "Deployment of BECCS/U value chains: Technological pathways, policy options and business models," IEA Bioenergy, juni 2020. URL: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-deployment-of-beccs-u-value-chains-technological-pathways-policy-options-and-business-models/>.
- [21] S. Karlsson, A. Eriksson, F. Normann och F. Johnsson, "Large-Scale Implementation of Bioenergy With Carbon Capture and Storage in the Swedish Pulp and Paper Industry Involving Biomass Supply at the Regional Level," *Frontiers in Energy Research*, årg. 9, okt. 2021, ISSN: 2296598X. DOI: 10.3389/fenrg.2021.738791.
- [22] E-on. "Kolsänkor och CCS teknik." (online). (okt. 2024), URL: <https://www.eon.se/artiklar/kolsaenkor-och-ccs-teknik>.
- [23] E. Wetterlund et. al., "Framtidssäkrade biodrivmedel för vägtransporter och flyg genom ökad nytta från biogent kol - Kol-, klimat-, och kostnadseffektivitet (Executive summary)," Publ. nr FDOS 33:2022, 2022. URL: <https://f3centre.se/sv/samverkansprogram/>.
- [24] N. Markusson, D. McLaren och D. Tyfield, "Towards a cultural political economy of mitigation deterrence by negative emissions technologies (NETs)," *Global Sustainability*, årg. 1, s. 1–9, 2018. URL: <https://doi.org/10.1017/sus.2018.10>.
- [25] European Scientific Advisory Board on Climate Change, "Scaling up carbon dioxide removals -Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU," 2025. DOI: 10.2800/3253650.

- [26] B. Dziejarski, R. Krzyżyńska och K. Andersson, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment," *Fuel*, årg. 342, juni 2023, ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127776.
- [27] E. Nilsson och E. Östlund, "Möjligheterna att implementera bio-CCS och CCS på Högdalenverket," Linköpings universitet | Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling, juni 2021.
- [28] COWI, "CinfraCap-Gemensam infrastruktur för transport av koldioxid Förstudierapport," mars 2021. URL: <https://cowi.sharepoint.com/sites/>.
- [29] S. Ingvarsson, "New roles for chemical pulp mills in the future energy system," diss., Chalmers University Of Technology, Gothenburg, 2024.
- [30] J. Kihlman, AFRY. "Optimising lignin extraction: Utilising current pulp mill resources." (online). (jan. 2025), URL: <https://afry.com/en/insight/optimising-lignin-extraction-utilising-current-pulp-mill-resources>.
- [31] IPCC, "Framing and Context," i *Global Warming of 1.5°C*, Cambridge University Press, maj 2022. DOI: 10.1017/9781009157940.003.
- [32] Regeringskansliet, "SÖ 2000:48 – 1996 års protokoll till 1972 års konvention om förhindrandet av havsföroreningar till följd av dumpning av avfall och annat material," Utrikesdepartementet, 2000, ISSN: 1102-3716.
- [33] Romina Pourmokhtari. "Transport av infångad koldioxid." (online). (mars 2023), URL: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svar-pa-skriftlig-fraga/transport-av-infangad-koldioxid_ha12453/.
- [34] R. Gholami, A. Raza och S. Iglauer, "Leakage risk assessment of a CO2 storage site: A review," *Earth-Science Reviews*, årg. 223, dec. 2021, ISSN: 00128252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103849.
- [35] International Energy Agency (IEA), "Putting CO2 to Use," sept. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.
- [36] Council of the EU, "Climate action: Council and Parliament agree to establish an EU carbon removals certification framework," febr. 2024. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/02/20/climate-action-council-and-parliament-agree-to-establish-an-eu-carbon-removals-certification-framework/>.
- [37] European Bioplastics, "Bioplastic market development update 2022," European Bioplastics, 2022. URL: <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/>.
- [38] H. A. Daggash, C. F. Patzschke, C. F. Heuberger m. fl., "Closing the carbon cycle to maximise climate change mitigation: Power-to-methanol: vs. power-to-direct air capture," *Sustainable Energy and Fuels*, årg. 2, nr 6, s. 1153–1169, 2018, ISSN: 23984902. DOI: 10.1039/c8se00061a.
- [39] European Union, "Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law)," *Official Journal of the European Union*, årg. L 243, s. 1–17, juni 2021. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>.

- [40] Europaparlamentet. "EU:s system för handel med utsläppsrätter: en överblick." (online). (febr. 2017), URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/sv/article/20170213ST062208/darfor-kravs-en-reform-av-eu-s-system-for-handel-med-utslappsratter-ets>.
- [41] European Commission, *Innovation Fund projects*. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/innovation-fund-projects_en.
- [42] W. Rickels, A. Proelß, O. Geden, J. Burhenne och M. Fridahl, "Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading," *Frontiers in Climate*, årg. 3, juni 2021, ISSN: 26249553. DOI: 10.3389/fclim.2021.690023.
- [43] UNFCCC. "The Paris Agreement." (online), URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- [44] UNFCCC. "Paris Agreement Crediting Mechanism." (online), URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-64-mechanism>.
- [45] European Commission. "ReFuelEU Aviation." (online), URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en.
- [46] European Commission. "Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime." (online), URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en.
- [47] European Commission, "Renewable Fuels of Non-Biological origin in the European Union: Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains & Markets," European Commission, 2023, ISSN: 1831-9424.
- [48] Europeiska Rådet. "55 %-paketet: uppnåendet av klimatmål inom sektorerna för markanvändning och skogsbruk." (online). (2023), URL: <https://www.consilium.europa.eu/sv/infographics/fit-for-55-lulucf-land-use-land-use-change-and-forestry/>.
- [49] Naturvårdsverket. "Klimatet och skogen." (online). (dec. 2024), URL: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-skogen/>.
- [50] Europeiska Kommissionen, "Meddelande från kommissionen till europaparlamentet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén," 2024.
- [51] Regeringskansliet. "Det klimatpolitiska ramverket." (online). (juni 2017), URL: <https://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/>.
- [52] Naturvårdsverket. "Utsläpp av biogen koldioxid från förbränning av biomassa i Sverige." (online). (dec. 2024), URL: <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/utslapp-av-biogen-koldioxid-fran-forbranning-av-biomassa-i-sverige/>.
- [53] Energimyndigheten. "Stöd för bio-CCS genom omvänd auktion." (online). (april 2025), URL: <https://www.energimyndigheten.se/klimat/ccs/stod-inom-ccs/statligt-stod-for-bio-ccs/>.

-
- [54] Energimyndigheten. "State aid for BECCS." (online). (mars 2022), URL: <https://www.energimyndigheten.se/en/sustainability/carbon-capture-and-storage/state-aid-for-beccs/>.
- [55] S. Karlsson, F. Normann och F. Johnsson, "Cost-optimal CO2 capture and transport infrastructure—A case study of Sweden," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, årg. 132, febr. 2024, ISSN: 17505836. DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.104055.
- [56] Energimyndigheten. "Nu öppnar nya stödet för bio-CCS." (online). (2024), URL: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2024/nu-oppnar-nya-stodet-for-bio-ccs/>.
- [57] M. Fridahl, "Pre- and post-Paris views on bioenergy with carbon capture and storage," i *Bioenergy with Carbon Capture and Storage: Using Natural Resources for Sustainable Development*, Elsevier, jan. 2019, s. 47–62, ISBN: 9780128162293. DOI: 10.1016/B978-0-12-816229-3.00003-X.
- [58] Europeiska Rådet. "55 %-paketet: mer grönare bränsle inom luft- och sjöfart." (online). (jan. 2025), URL: <https://www.consilium.europa.eu/sv/infographics/fit-for-55-refueu-and-fueu/>.

A

Intervjumall: Utsläppare av biogen koldioxid

1. Hur ser er **hållbarhetsstrategi** ut för att minska era koldioxidutsläpp, och i vilken omfattning inkluderas BECCUS i den planen?
2. Hur ligger ni till i arbetet för att implementera BECCUS?
3. Vilka **drivkrafter** finns det inom ert företag att implementera BECCUS?
4. Finns det några **externa drivkrafter** (från t.ex., Sverige eller EU) som gör att ert företag tittar på att implementera BECCUS?
5. Vad ser ni för **effekter av storskalig implementering** av BECCUS i Sverige?
6. Hur skulle ni beskriva **förutsättningarna** för BECCUS i Sverige?
7. Vilka **utmaningar** upplever ni att det finns gällande BECCUS i Sverige?
8. Har er syn på de gröna kolatomerna ändrats den senaste tiden (10 år?), och hur tänker ni kring framtiden för den biogena koldioxiden ni har i era processer?

B

Intervjumall: Potentiella användare av biogen koldioxid

1. Berätta lite om er **teknik**.
2. Hur ser affärsmodellen ut för er produkt?
3. Varför har ni valt att använda biogen CO₂ till just **X**? Finns det några alternativ till **X**?
4. Hur skalbar är er process, dvs är det endast något för en lokal svensk kontext, eller kan det bli en viktig pusselbit för Europas omställning?
5. Vad ser ni för **effekter av storskalig implementering** av BECCUS i Sverige?
6. Kan er process användas på olika typer av punktutsläpp (av biogen CO₂), eller finns det praktiska/ekonomiska/tekniska/juridiska begränsningar som ni behöver ta i beaktande?
7. Vilka **drivkrafter** finns det inom ert företag att implementera BECCUS?
8. Finns det några **externa drivkrafter** (från t.ex., Sverige eller EU) som gör att ert företag tittar på att implementera BECCUS?
9. Vilka **utmaningar** finns det kopplat till att köpa och använda biogen koldioxid?

C

Intervjumall: Forskare

1. Vill du börja med att berätta kort om vad du jobbar med?
2. Hur stor roll kan BECCUS spela i att uppnå ett hållbart kolflöde?
3. Vilka **förutsättningar** finns för implementering av BECCUS?
4. Vilka **utmaningar** finns för implementering av BECCUS?
5. Vad ser du för **effekter av storskalig implementering** av BECCUS?
6. **Vilka policies behöver implementeras i framtiden** för att kunna nå de mål som satts upp gällande “kompletterande klimatåtgärder”?
7. Hur kan man med miljöpolitiska medel styra utvecklingen så att den **gröna kolatomen hamnar där den gör mest klimatnytta** - att den används eller lagras vid rätt tillfälle/ på rätt plats?

INSTITUTIONEN FÖR RYMD-, GEO- OCH MILJÖVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS