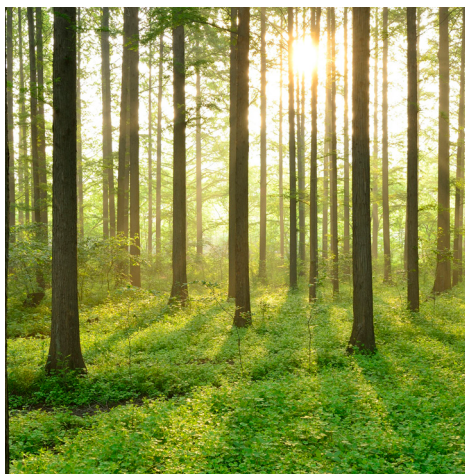


BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN – SYNTES

RAPPORT 2022:842



BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN – SYNTES

HÅKAN SKÖLDBERG, JOHANNA BEIRON, MATHIAS FRIDAHL
JENNY GODE, CECILIA GRUBBSTRÖM, MATHIAS GUSTAVSSON
JOHAN HOLM, FILIP JOHNSON, JAN KJÄRSTAD
LIV LUNDBERG, EBBA LÖFBLAD, KENNETH MÖLLERSTEN
THERESE NEHLER, ÅSA ROMSON, JENNY SAHLIN
MARTYNA SOLIS, LINNEA STEEN, MAJA-STINA SVANBERG FRISINGER
THOMAS UNGER, JENS WOLF, LARS ZETTERBERG

ISBN 978-91-7673-842-9 | © Energiforsk januari 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Negativa utsläpp kommer sannolikt att krävas för att för att Sverige ska kunna uppnå sina klimatmål. Det här projektet har utrett möjligheterna för fjärrvärmebranschen att bidra med negativa utsläpp genom avskiljning, transport och lagring av biogen koldioxid från kraft- och fjärrvärmeanläggningar inklusive avfallsförbränningsanläggningar.

Uppvärmningssektorn har som vision att år 2045 vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen. Inom sektorn finns stor potential för bio-CCS eftersom en betydande andel av Sveriges biogena utsläpp kan härledas till punktutsläpp inom sektorn. Men för att realisera potentialen och uppvärmningssektorns vision om att bli en kolsänka krävs konkreta insatser.

Målet med projektet har varit att ta fram ett kunskapsunderlag som visar hur fjärrvärmesektorn kan bli en kolsänka till år 2045 genom avskiljning och lagring av biogen koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall. Underlaget har legat till grund för fjärrvärmesektorns arbete med att utveckla en strategi för bio-CCS vid kraft- och värmeproduktion inklusive förbränning av avfall.

Projektet ger konkret vägledning till fjärrvärmeföretagen när det gäller implementering av bio-CCS. I arbetet har ingått att visa på robusta utvecklingsvägar för utbyggnaden av bio-CCS och hur bio-CCS från år 2030 kan drivas på affärsmässiga grunder. Arbetet har omfattat sex arbetspaket samt en sammanfattande syntes kring ekonomi, teknik, infrastruktur, policy, regelverk och hållbarhetsaspekter för storskalig introduktion och användning av bio-CCS i fjärrvärmebranschen. En mindre kunskapssammanställning kring CCU har också genomförts inom projektet.

Energiforsk har varit värd för projektet som har letts av Jenny Gode (Profu) och utförts av ett 20-tal forskare och experter från Profu, IVL Svenska Miljöinstitutet, Chalmers Tekniska Högskola, Linköpings Universitet och RISE. Projektet har utförts i nära samverkan med fjärrvärmebranschen, avfallsbranschen, myndigheter och andra aktörer längs värdekedjan för bio-CCS.

Energiforsk vill rikta ett tack till medverkande forskare och företag som bidragit med stor kunskap och stort engagemang under projektet. Sammantaget har över 100 personer från mer än 40 olika organisationer bidragit till projektets genomförande. Energiforsk vill också rikta ett särskilt tack till Energimyndigheten, deltagande företag och organisationer som har finansierat projektet.

Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Den svenska fjärrvärmesektorn har stor potential att bidra med negativa koldioxidutsläpp genom bio-CCS, minst 10 Mton per år. Den största osäkerheten beträffande möjligheterna för bio-CCS gäller marknadsförutsättningarna.

Uppvärmningsbranschen har en vision om att år 2045 utgöra en kolsänka. Ett sätt att åstadkomma detta är genom att avskilja och lagra koldioxidutsläpp med biogent ursprung. Ett antal fjärrvärmeföretag har redan olika långt gångna planer på att satsa på bio-CCS. De har sett ett värde i att samarbeta kring hur detta kan åstadkommas. Ett led i detta är projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn* som består av ett gediget underlag baserat på forskning kring olika aspekter av frågan samt en strategi baserad på det underlaget. I denna rapport redovisas en syntes av detta forskningsarbete.

Projektet visar att fjärrvärmesektorn har stor teoretisk potential att bidra med negativa koldioxidutsläpp, minst 10 Mton per år. I huvudsak är avskiljning, transport och lagring av koldioxid beprövad teknik även om tillämpningen i detta fall är ny. Även om bio-CCS är förknippad med energianvändning så bidrar tekniken sett ur ett systemperspektiv med stor nytta för att minska koldioxidutsläppen. Bio-CCS är en relativt dyr teknik och det är angeläget att utnyttja samverkan och kluster för att exempelvis skapa ökad kostnadseffektivitet i transport och mellanlagring.

Tillgång till lagringsplatser är en förutsättning för framgång och flera alternativ bedöms bli tillgängliga. Det kan dock uppstå konkurrens om tillgången till lagringsplatserna. De regelmässiga förutsättningarna för bio-CCS i Sverige har förbättrats avsevärt de senaste dryga decennierna. Flera regelmässiga hinder kvarstår dock. En del utgör mindre barriärer, andra är av mer betydande karaktär.

Den största osäkerheten beträffande möjligheterna för bio-CCS gäller ekonomin. Flera potentiella finansieringsmetoder har studerats, både stöd, regleringar och frivilligmarknader. Det finns fortfarande oklarheter kring syftet med planerade stöd och det framtida ägandet av de negativa utsläppen.

Det genomförda projektet har skapat ett forum för kunskapsuppbyggnad, erfarenhetsutbyte och nätverkande, vilket de deltagande företagen bedömt vara mycket värdefullt.

Nyckelord

Bio-CCS, koldioxidinfångning, koldioxidtransport, koldioxidlagring, negativa utsläpp, incitament, klimatpolitik, styrmedel, BECCS, växthusgasbalanser, FN:s hållbarhetsmål, fjärrvärmeproduktion, avfallsförbränning

Summary

The Swedish district heating sector has great potential to contribute with negative carbon dioxide emissions through bio-CCS, at least 10 Mtons per year. The greatest uncertainty regarding the possibilities for bio-CCS concerns the market conditions.

The heating industry has a vision to be a carbon sink by 2045. One way to achieve this is by separating and storing carbon dioxide emissions of biogenic origin. A number of district heating companies already have far-reaching plans to invest in bio-CCS. They have seen a value in collaborating on how this can be achieved. Part of this is the project *Bio-CCS in the district heating sector*, which consists of a solid foundation based on research on various aspects of the issue and a roadmap based on that research. This report presents a synthesis of this research work.

The project shows that the district heating sector has a great theoretical potential to contribute with negative carbon dioxide emissions, at least 10 Mton per year. Essentially, carbon capture, transport and storage are proven technologies, even if the application in this case is new. Although bio-CCS is associated with energy use, the technology contributes from a system perspective with great benefit in reducing carbon dioxide emissions. Bio-CCS is a relatively expensive technology, and it is important to utilize collaboration and clusters to, for example, create increased cost efficiency in transport and intermediate storage.

Access to storage space is a prerequisite for success and several alternatives are expected to become available. However, competition for access to storage sites may arise. The regulatory conditions for bio-CCS in Sweden have improved significantly over the past decade. However, several regular obstacles remain. Some are minor barriers, others are of a more significant nature.

The biggest uncertainty regarding the possibilities for bio-CCS concerns the economy. Several potential financing methods have been studied, both support, regulations, and voluntary markets. There is still uncertainty about the purpose of planned support and the future ownership of the negative emissions.

The completed project has created a forum for knowledge building, exchange of experience and networking, which the participating companies judged to be very valuable.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Tre viktiga frågor relaterade till bio-CCS i fjärrvärmesektorn	11
1.2	Läsanvisning	12
2	De viktigaste resultaten	13
2.1	Potentialen för branschen är minst 10 Mton negativa utsläpp per år	13
2.2	Avskiljning av koldioxid är beprövad teknik, men tillämpningen är ny	14
2.3	Samverkan/"kluster" kan ge fördelar för transport och mellanlagring	14
2.4	Tillgång till lagringsplatser avgörande	15
2.5	Analys av systemkonsekvenserna visar på stora fördelar, trots energibehov m.m.	16
2.6	Det största hindret för introduktion av bio-CCS i fjärrvärmesektorn är finansieringen	17
2.7	Flera möjliga sätt att finansiera bio-CCS, men många frågetecken återstår	17
2.8	Osäkerhet angående syftet med omvänd auktion och ägande av de negativa utsläppen	19
2.9	Tillståndsfrågor, barriärer och "regel-hinder"	20
2.10	Bio-CCS skapar en rad möjligheter	21
2.11	Stort värde av dialog och samverkan inom projektet	22
3	AP1. Företagsekonomiska förutsättningar för affärsmässig drift	23
3.1	Finansieringsmodeller för Bio-CCS	23
3.1.1	Modell 1. Staten som köpare	24
3.1.2	Modell 2. Kvotplikt på utvalda sektorer som förorenar	25
3.1.3	Modell 3. Deltagare i EU:s utsläppshandel, eller liknande system, tillåts använda Bio-CCS-krediter	25
3.1.4	Modell 4. Privata köpare för frivillig klimatkompensering	26
3.2	Sekvensering av Bio-CCS-modellerna	27
3.2.1	Modell 5. Blandat avfall – plast och biomassa	28
4	AP2. Teknik, systemintegration och kostnader	29
4.1	Marginalkostnadskurva för CCS på svenska kraftvärmeverk	30
4.1.1	Processmodellering av typanläggningar	30
4.1.2	Resultat	31
4.2	Avskiljning med HPC processen	32
4.3	Alternativa processer	34
4.4	Utökad systemanalys	36
4.4.1	Resultat	36
5	AP3. Infrastruktur för transport och lagring	40
5.1	Det finns många olika typer av samverkan kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid	41
5.2	Olika transportslag har sina fördelar respektive nackdelar	41

5.3	Projektet har identifierat fyra potentiella kluster för samverkan kring infrastruktur	43
5.4	Det finns potentiellt stora volymer koldioxid som behöver transporteras och lagras i Sverige	46
5.5	Många faktorer inverkar på om det är lönsamt att samverka eller inte	46
5.6	Den teoretiska lagringspotentialen är inte densamma som den verkliga lagringskapaciteten	47
5.7	Lagar och regelverk måste hänga med	49
5.8	Vem har ansvar för koldioxiden?	50
6	AP4. Acceptans och lagar samt regelverk	52
6.1	val av styrform för att skapa incitament för bio-CCS	52
6.2	Handlingsrekommendationer	53
6.3	Dilemman och potentiella målkonflikter	53
6.4	Ett möjlighetsfönster att agera	54
6.5	Sammanställning av kunskapsläget kring gällande regelverk för bio-CCS i Sverige	55
7	AP5. Hållbarhetsaspekter	58
7.1	Syfte	58
7.2	Analytisk ansats	58
7.3	Bio-CCS	59
7.4	Kvantifiering energi- och CO ₂ -balanser samt resursförbrukning	60
7.4.1	Typanläggning utan respektive med CCS	60
7.4.2	Koldioxidtransport och -lagring	60
7.5	Hållbarhetsanalys	62
7.5.1	Kraftvärmeanläggning	62
7.5.2	Koldioxidtransport	63
7.5.3	Geologisk lagring av koldioxid	63
7.5.4	Diskussion hållbarhetsanalys	64
8	AP6. Avfall – särskilda analyser	65
8.1	Lärdomar från Norge och Danmark	65
8.1.1	Lärdomar kring tekniken	65
8.1.2	Lärdomar kring acceptansen	66
8.1.3	Lärdomar kring finansieringen	66
8.1.4	Lärdomar kring logistiken	67
8.2	Potentialen för minskade utsläpp och minusutsläpp genom avfalls-CCS	67
8.3	Kostnaden för CCS på de tio största avfallsförbränningsanläggningarna	69
8.4	Vad krävs för att realisera potentialen för avfalls-CCS?	70
8.4.1	Analys av möjligheterna att överföra CCS-kostnader uppströms på avfallslämnaren	70
8.4.2	Acceptansen för CCS vid avfallsförbränning är inte ett problem idag men kan bli ett problem i framtiden och ytterligare acceptansstudie behövs	75
8.5	Ökat energibehov medför ökad bränsletillförsel av avfall	76

9	Resultatdiskussion	77
	9.1 Behov av fortsatt forskning	79
10	Referenslista	81

1 Inledning

Uppvärmningsbranschen har en vision om att år 2045 utgöra en kolsänka. Ett sätt att åstadkomma detta är genom att avskilja och lagra koldioxidutsläpp med biogent ursprung. Ett antal fjärrvärmeföretag har redan olika långt gångna planer på att satsa på bio-CCS. De har sett ett värde i att samarbeta kring hur detta kan åstadkommas. Ett led i detta är projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn* som består av ett gediget underlag baserat på forskning kring olika aspekter av frågan samt en strategi baserad på det underlaget. I denna rapport redovisas en syntes av detta forskningsarbete.

Sverige som nation har ett klimatpolitiskt mål om att år 2045 uppnå nettonollutsläpp av växthusgaser. Med det som utgångspunkt har den svenska uppvärmningssektorn, inom ramen för regeringsinitiativet *Fossilfritt Sverige*, tagit fram en färdplan för fossilfri konkurrenskraft. I den färdplanen redovisas en vision: *”Uppvärmningssektorn ska vara fossilbränslefri år 2030. År 2045 ska sektorn vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen. Samverkan är ett viktigt medel för att åstadkomma omställningen”*.

För att förverkliga visionen åtar sig alltså branschen att skapa en kolsänka. Det förutsätter att ”negativa koldioxidutsläpp” skapas. Ett sätt att åstadkomma detta är genom avskiljning och lagring av koldioxid från biogena källor, bio-CCS (där CCS står för Carbon Capture and Storage). Ett antal svenska fjärrvärmeföretag¹ har redan olika långt gångna planer på bio-CCS. Man ser ett värde av att samordna sina ansträngningar för att åstadkomma en sådan utbyggnad. Ett led i det arbetet är att ta fram en gemensam strategi baserad på ett gediget forskningsunderlag. Därför tog man tillsammans med Energiforsk initiativ till projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn*. Denna syntesrapport sammanfattar det forskningsarbete som ligger till grund för strategin.

I projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn* har alltså fjärrvärmeföretagen tagit fram en strategi som visar hur fjärrvärmesektorn med hjälp av bio-CCS (avskiljning och lagring av biogen koldioxid) kan bli en kolsänka och bidra till att Sverige senast år 2045 uppnår nettonollutsläpp av växthusgaser och därefter negativa utsläpp. Strategin fokuserar på avskiljning och lagring av koldioxid från förbränning av biobränslen och/eller avfall. Strategin baseras på projektets grundliga genomgång av förutsättningarna för bio-CCS inom den svenska fjärrvärmesektorn.

Kunskapssammanställningen och strategin ger konkret vägledning till fjärrvärmeföretagen när det gäller implementering av bio-CCS. Projektet visar på robusta utvecklingsvägar för utbyggnaden av bio-CCS och hur bio-CCS från år 2030 kan drivas på affärsmässiga grunder. Projektet beskriver också hur fjärrvärmesektorn och andra sektorer kan samverka för att minska kostnader och investeringsrisker kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid.

¹ När vi i denna rapport använder begreppet fjärrvärmeföretag inkluderar vi också företag som bedriver energiåtervinning från avfall där värmen levereras till fjärrvärmesystem.

Arbetet med kunskapssammanställningen och strategin har genomförts i en tät dialog mellan medverkande företag och projektets forskare samt övriga berörda aktörer. På så vis har arbetet med kunskapssammanställningen och strategin fungerat som en mötesplats och plattform för dialog, kunskapsutbyte och samordning rörande frågeställningar om bio-CCS i Sverige.

Kunskapssammanställningen och strategin bygger på fördjupade analyser kring ett antal centrala frågeställningar för introduktion och användning av bio-CCS i svenska fjärrvärmeanläggningar. Analyserna har genomförts i samarbete mellan projektets forskare, medverkande företag och organisationer samt Energiforsk. Projektet omfattar åtta arbetspaket (AP):

- AP1. Företagsekonomiska förutsättningar för affärsmässig drift²
- AP2. Teknik, systemintegration och kostnader³
- AP3. Infrastruktur för transport och lagring⁴
- AP4. Acceptans och lagar samt regelverk⁵
- AP5. Hållbarhetsaspekter⁶
- AP6. Avfall – särskilda analyser⁷
- AP7. Syntes
- AP8. Strategi (benämndes inledningsvis för Färdplan)

Projektet genomfördes under oktober 2020 till december 2021 av forskare från Chalmers Tekniska Högskola, Linköpings Universitet, IVL, Profu, RISE och Energiforsk. Projektet har finansierats av ett 20-tal fjärrvärmeföretag och organisationer (via Energiforsk) samt Energimyndigheten och Stiftelsen IVL.

Energiforsk har varit huvudansvarig och värd för projektet och Profu har varit huvudprojektledare. Projektgruppen inkluderar ett flertal av Sveriges ledande experter inom CCS och bio-CCS, varav flera har bidragit med underlag och som experter till den statliga Klimatpolitiska vägvalsutredningen.

Projektet består av två huvuddelar, se Figur 1. Dels forskningen som bedrivits inom arbetspaketen 1 - 6 samt syntesen av de arbetena, denna rapport, dels själva strategin som är de inblandade företagens strategi för utbyggnaden av CCS inom fjärrvärmesektorn. Forskarna ansvarar alltså för arbetspaketen 1 - 7, medan företagen själva ansvarar för strategidelen.

² Zetterberg, L. Johnsson, F., Möllersten, K. (2022) Incitament för Bio-CCS i fjärrvärmen, Rapport 2022:836. ISBN 978-91-7673-836-8

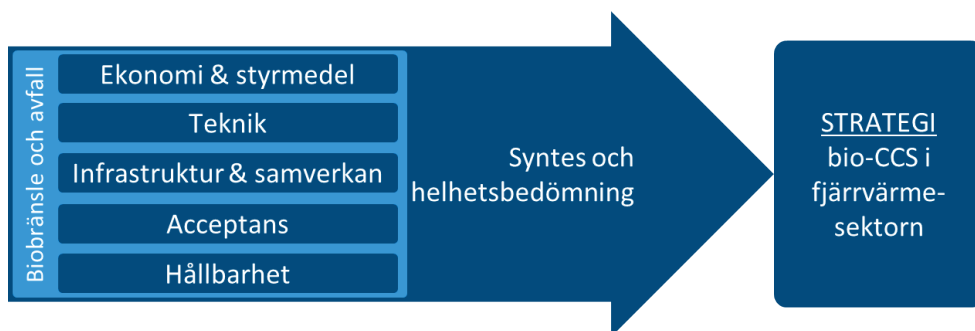
³ Beiron, J. m.fl. (2022). Teknik, systemintegration och kostnader, Rapport 2022:837. ISBN 978-91-7673-837-5

⁴ Löfblad, E. m.fl. (2022). Samverkan kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid, Rapport 2022:838. ISBN 978-91-7673-838-2

⁵ Fridahl, M., Lundberg, L. & Nehler, T. (2022). Stödsystem för bio-CCS i Sverige, Rapport 2022:839. ISBN 978-91-7673-839-9

⁶ Möllersten, K. & Gustavsson, M. (2022). Hållbarhetsbedömning av bio-CCS i fjärrvärmesektorn, Rapport 2022:840. ISBN 978-91-7673-840-5

⁷ Redovisas i avsnitt 8 i denna syntesrapport



Figur 1 Schematisk bild av projektets uppbyggnad och uppdelningen mellan forskning och företagets strategi

Projektets resultatredovisning sker genom separata delrapporter från de fem första arbetspaketen samt en syntesrapport (denna rapport). Dessutom redovisas själva färdplanen i ett eget dokument.

Vissa förutsättningar har ändrats under projektets gång. Delvis har vi alltså, exempelvis när det gäller styrmedel, "skjutit mot ett rörligt mål". Inom ett område där utvecklingen går så fort är detta nästan ofrånkomligt. Vi ber därför om överseende med att analysen i enstaka fall byggt på något föråldrade förutsättningar. Eftersom arbetet i de olika arbetspaketen bedrivits parallellt kan det finnas vissa olikheter i val av systemgräns och terminologi. Ambitionen har dock varit att så väl som möjligt vara tydliga med sådana skillnader och hur de kan påverka resultaten.

1.1 TRE VIKTIGA FRÅGOR RELATERADE TILL BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN

Redan i inledningskapitlet ställer vi tre frågor som relaterar till bio-CCS i fjärrvärmesektorn. Man kan se det som att dessa frågor ramar in det genomförda forskningsprojektet.

Behövs "negativa utsläpp" av koldioxid?

Kan fjärrvärmesektorn erbjuda en teknisk lösning för negativa utsläpp av koldioxid?

Finns de ekonomiska förutsättningarna för negativa utsläpp från fjärrvärmesektorn?

Den första frågan kan redan här besvaras med ett ja. IPCC:s 1,5 graders-scenarier visar att de globala utsläppen efter 2050 måste vara negativa för att målet om högst 1,5 grader temperaturhöjning ska kunna nås. Negativa utsläpp eller andra kompletterande åtgärder kommer också att behövas för Sveriges mål om nettonollutsläpp år 2045 eftersom vissa växthusgasutsläpp, exempelvis från jordbruket, kommer att vara svåra att helt eliminera.

Svaret på de övriga två frågorna återkommer vi till längre fram i denna syntesrapport.

1.2 LÄSANVISNING

Efter detta inledningskapitel följer en redovisning av huvudresultaten från den genomförda forskningen om bio-CCS inom fjärrvärmesektorn. Därefter följer en mer fullständig resultatredovisning arbetspaket för arbetspaket. Dessa redovisningar följs av en diskussion kring mer övergripande iakttagelser.

2 De viktigaste resultaten

Mycket kortfattat visar projektet att fjärrvärmesektorn har stor teoretisk potential att bidra med negativa koldioxidutsläpp, minst 10 Mton per år. I huvudsak är avskiljning, transport och lagring av koldioxid beprövad teknik även om tillämpningen i detta fall är ny. Även om bio-CCS är förknippad med energiförluster så bidrar tekniken sett ur ett systemperspektiv med stor nytta för att minska koldioxidutsläppen. Bio-CCS är en relativt dyr teknik och det är angeläget att utnyttja samverkan och kluster för att exempelvis skapa ökad kostnadseffektivitet i transport och mellanlagring. Tillgång till lagringsplatser är en förutsättning för framgång och flera alternativ bedöms bli tillgängliga. Det kan dock uppstå konkurrens om tillgången till lagringsplatserna. Den största osäkerheten beträffande möjligheterna för bio-CCS gäller ekonomin. Flera potentiella finansieringsmetoder har studerats, både stöd, regleringar och frivilligmarknader. Det finns fortfarande oklarheter kring syftet med planerade stöd och det framtida ägandet av de negativa utsläppen. Det genomförda projektet har skapat ett forum för kunskapsuppbyggnad, erfarenhetsutbyte och nätverkande, vilket de deltagande företagen bedömt vara mycket värdefullt.

I detta kapitel sammanfattar vi de viktigaste resultaten från forskningsdelen av projektet om bio-CCS i fjärrvärmesektorn. I de sex efterföljande kapitlen redovisas sammanfattningar av de olika arbetspaketen. Där underbyggs de huvudresultat som lyfts fram nedan. Vill man ha ännu mer fullständiga redovisningar av den genomförda forskningen i arbetspaketen hänvisar vi till de delrapporter som vart och ett av arbetspaketen tagit fram.

2.1 POTENTIALEN FÖR BRANSCHEN ÄR MINST 10 MTON NEGATIVA UTSLÄPP PER ÅR

Projektets analyser visar att fjärrvärmesektorn kan skapa negativa koldioxidutsläpp på minst 10 Mton per år. Detta är en teoretisk potential som kan uppnås om CCS med 90 % avskiljningsgrad byggs ut på de 110 biobränsle- och avfallseldade kraftvärmeanläggningar som ingår i projektets beräkningar. Det är svårt att ge ett entydigt svar på hur stor potentialen är eftersom storleken på potentialen för de negativa utsläppen påverkas av valet av avskiljningsprocess, graden av energiåtervinning som väljs, om nya kraftvärmeverk tillkommer eller existerande anläggningar fasas ut, hur den framtida bränslesammansättningen ser ut, m.m.

Samtidigt som de negativa utsläppen skapas så finns en potential för avskiljning och lagring även av koldioxid med fossilt ursprung från avfallsförbränning. I det restavfall som går till energiåtervinning ingår exempelvis plast som vid förbränningen orsakar fossila koldioxidutsläpp. Potentialen för avskiljning av fossil koldioxid uppgår till ca 3 Mton per år (beräknad enligt samma metodik som

beskrivs i stycket ovan). Om man i framtiden genom åtgärder högre upp i material- och avfallskedjorna lyckas minska innehållet av plast i restavfallet kan potentialen för negativa utsläpp öka på bekostnad av mängden avskild koldioxid av fossilt ursprung.

Kostnaden för avskiljning och transport till hamn varierar mellan olika anläggningar. I projektet har sådana kostnader uppskattats, utifrån generella antaganden, för kraftvärmeverken. Med detta som bas kan man göra uppskattningar av potentialen för CCS givet antaganden om hur hög kostnaden i kr/ton avskild koldioxid kan tilltas vara för att projekten ska realiseras.

Koldioxidavskiljningen är en energikrävande process och vid ett givet totalt värme- och elbehov innebär det att andra energiproduktionsanläggningar måste producera mer. Detta kan i sin tur leda till tillkommande koldioxidutsläpp. Vi återkommer nedan till resultat från denna typ av systembetraktelser.

2.2 AVSKILJNING AV KOLDIOXID ÄR BEPRÖVAD TEKNIK, MEN TILLÄMPNINGEN ÄR NY

Avskiljning av koldioxid från blandade gasflöden är känd teknik och det finns flera möjliga processer för att åstadkomma detta. En stor del av dessa tekniska lösningar har använts under lång tid inom kemiindustrin (för produktion av syngas, naturgas och ammoniak) men där partialtrycket av CO₂ är högre än i rökgas från kraftvärmesektorn. I detta projekt har vi fokuserat på två så kallade "post combustion"-tekniker - MEA (monoethanolamine) och HPC (hot potassium carbonate). Jämfört med MEA-processen förbrukar HPC-processen betydligt mer el men är å andra sidan mindre eller inte alls beroende av ånga från turbinen. Det finns ännu fler möjliga tekniker för koldioxidavskiljning som bedömts inom projektet. Ytterligare fyra tekniker har bedömts översiktligt inom projektet. Valet av process avgörs av de specifika förutsättningarna för den enskilda anläggningen. Sammanfattningsvis kan man konstatera att avskiljning av koldioxid är beprövad teknik, men att tillämpningen för bio-CCS är ny.

På samma sätt kan man konstatera att även transport och lagring av koldioxid är beprövad teknik, men att tillämpningen för bio-CCS är ny. Inga oöverstigliga tekniska hinder har identifierats inom projektet. Man ställs dock inför en mängd valsituationer när det gäller avskiljningsprocess, transport, mellanlagring och slutlig lagring. Utmaningen är att finna det mest kostnadseffektiva sättet att åstadkomma den eftersträlvade avskiljningen och lagringen av biogen koldioxid för att på så sätt åstadkomma negativa utsläpp.

2.3 SAMVERKAN/"KLUSTER" KAN GE FÖRDELAR FÖR TRANSPORT OCH MELLANLAGRING

Efter avskiljning av koldioxid krävs transport, och i de flesta fall mellanlagring, innan den slutliga lagringen. I dessa led finns stora möjligheter till samverkan för att hitta kostnadseffektiva lösningar. Inom projektet har en lång rad workshops genomförts för att koppla samman olika aktörer – både olika företag från fjärr-

värmesektorn, och andra aktörer som exempelvis industriföretag, transportörer och hamnar.

Fyra olika transportalternativ har studerats, var och ett med sina fördelar och nackdelar – fartyg, lastbil, tåg och rörledning.

Projektet har identifierat några huvudsakliga kluster för lokal samverkan kring olika delar av logistikkedjan. De fyra klustren valdes baserat på lokalisering och storlek av punktutsläpp från såväl fjärrvärmesektorn som från andra sektorer, på möjlig samverkan kring lokal logistik samt på möjlig samverkan kring utskeppning av koldioxid till lagringsplats. Sammanfattningsvis ser vi inom projektet främst tre möjliga samverkansalternativ:

- En hubb i Göteborg varifrån koldioxid skeppas ut till lagringsplats.
- En hubb i Malmö med gemensam transport av koldioxid med fartyg till Norge alternativt med fartyg eller rörledning till Danmark.
- Ett antal fartyg från Ostkusten där samverkan främst avser att kapa kostnader för fartygstransport och mellanlagring genom att optimera antal fartyg.

Ett flertal anläggningar, både inom fjärrvärmesektorn och andra branscher, har planer på att avskilja och lagra koldioxid. I projektet har vi analyserat hur olika anläggningars planer ser ut över tid. Det är större sannolikhet att samverkansfördelar realiserar om planerna matchar i tid.

Många faktorer inverkar på om det är lönsamt att samverka eller inte. Det finns skalfördelar för flera delar av kedjan, exempelvis förvätskning, mellanlagring och skeppstransport. Viktigt att beakta är dock att ju större fartyg desto större mellanlagringskapacitet behövs. Likaså, ju längre avstånd till lagringsplatsen desto större kostnader för mellanlager på grund av ökad omloppstid. För de flesta lagringsalternativ förutsätts fartygstransport. Vid stor volym och kort avstånd skulle dock rörledningsalternativet kunna bli attraktivt.

2.4 TILLGÅNG TILL LAGRINGSPLATSER AVGÖRANDE

Geologisk lagring av koldioxid i någon form utgör den sista delen i hela kedjan från avskiljning och infångning av koldioxid vid anläggning samt transport till lagringsplats. Globalt sett är den teoretiska lagringspotentialen enorm. Den faktiska (effektiva) och praktiska lagringskapaciteten är däremot betydligt mindre och det finns dessutom en stor osäkerhet i storleken på denna. Det finns lång erfarenhet av lagring av koldioxid kopplat till utvinning av olja, och det är också i anslutning till denna industri som det nu pågår ett antal stora projekt i framför allt Nordsjöområdet för att lagra koldioxid. Utöver detta finns ett stort antal planerade lagringsprojekt.

De lagringsalternativ som förefaller mest rimliga för svensk del är lagring i akvifärer och eventuellt uttömda olje- och gasfält i vår närhet. Det finns ett flertal pågående eller planerade lagringsprojekt i Sveriges närhet – exempelvis i Norge Danmark, Nederländerna och Storbritannien – som skulle kunna vara aktuella för lagring av koldioxid från anläggningar i Sverige, och som har diskuterats inom projektet.

Under projektet har fjärrvärmeaktörerna, samt externa aktörer som projektet haft dialog med, flera gånger uttryckt en förhoppning om en framtida möjlighet till koldioxidlagring i svensk berggrund. Osäkerheterna kring detta är dock stora och bedömningen är att lagring i svensk berggrund inte kommer att kunna bli aktuell förrän efter 2030 även om processen inleds omgående. Fördjupande platsundersökningar, kompetensuppbyggnad och vissa legala hinder är exempel på sådant som behöver åstadkommas eller åtgärdas.

Under diskussionerna inom projektet har farhågan lyfts om en "övertäckning" av de lagringsplatser som är först ut, och hur svenska aktörer ska agera för att inte bli utan lagringsplats.

En central och återkommande fråga i projektet handlar om hur man ska hantera ansvaret för koldioxiden längs med infrastrukturkedjan. I mars 2020 bad den norska regeringen EU-kommissionen om ett förtydligande beträffande ansvarsfrågan vad gäller den avskilda koldioxiden. EU bekräftar det norska ställningstagandet att ansvaret för eventuella koldioxidläckage ligger på anläggningsägaren (där koldioxiden avskildes) fram till dess att den lastats av vid slutlagringsplatsen. Där övertar den som äger och driver lagret ansvaret.

Som en del av EU-kommissionens Fit for 55-paket av den 14 juli 2021 finns dock som förslag att ansvaret för utsläppen av koldioxid under transporten ska ligga hos den som ansvarar för transporterna och inte den som äger/driver infångningsanläggningen.

2.5 ANALYS AV SYSTEMKONSEKVENSERNA VISAR PÅ STORA FÖRDELAR, TROTS ENERGIBEHOV M.M.

Eftersom avskiljning av koldioxid är en energikrävande process medför införande av bio-CCS att annan el- och värmeproduktion måste tillföras för att möta ett givet energibehov. Inom projektet har modellberäkningar genomförts för att studera sådana systemeffekter. Modellen innehåller beskrivningar av all fjärrvärme i Sverige och av elsystemet både i Sverige och i våra grannländer. Beräkningarna har gjorts för ett läge omkring år 2035 och för olika val av avskiljningsprocess. I modellbeskrivningen kan ett kraftvärmeverk leverera tre nyttigheter: el, fjärrvärme och negativa utsläpp. Mellan de tre nyttigheterna finns vissa "trade off"-effekter. Vilket driftläge som väljs i varje timme bestäms av elpris, alternativkostnad för fjärrvärmeproduktionen och de förpliktelser man har att leverera negativa utsläpp (här förutsätts ett auktionsåtagande).

Beräkningarna visar att det som en följd av introduktion av bio-CCS tillkommer viss energiproduktion, och koldioxidutsläpp med fossilt ursprung som kopplar till dessa, för att täcka den energianvändning som avskiljningsprocessen skapar. Dessa minskar dock endast de totala resulterande negativa utsläppen med 5 – 10 %.

Vid ansträngd elförsörjning blir elpriserna höga. Då kan kraftvärmeverken reagera på detta och minska eller helt stoppa avskiljningen för att på det sättet minska energiförlusterna och maximera kraftvärmens elproduktion. Med detta driftsätt ger bio-CCS ingen påverkan på elbalansen under de timmar då elsystemet är som mest ansträngt.

Inom ramen för projektet har det också genomförts en hållbarhetsanalys. Syftet med denna är att utifrån ramverket för Agenda för Hållbar utveckling 2030 analysera hur värdekedjan för CCS-lösningar i Sverige inom fjärrvärmesektorn faller ut i ett hållbarhetsperspektiv. Analysen utgår från Agenda 2030 och Förenta nationernas (FN) 17 hållbarhetsmål (Sustainable Development Goals, SDG). Dessa mål skapar ett ramverk för hur vi kan betrakta olika dimensioner av hållbarhet.

Bio-CCS och de negativa utsläpp som därmed skapas ger direkt positiv påverkan framför allt på hållbarhetsmål 13 - *Bekämpa klimatförändringarna* genom att bidra till att begränsa halten av koldioxid i atmosfären. Detta positiva bidrag till hållbarhetsagendan är själva drivkraften för investeringen. Utöver detta identifieras direkt och indirekt påverkan även på andra hållbarhetsmål. Denna påverkan kan både vara positiv och negativ.

2.6 DET STÖRSTA HINDRET FÖR INTRODUKTION AV BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN ÄR FINANSIERINGEN

Som vi redan konstaterat så är avskiljning, transport och lagring av koldioxid känd och beprövad teknik, även om den nu aktuella tillämpningen för bio-CCS är ny. Ny är också kedjan av infrastruktur som behövs för att åstadkomma de önskade negativa utsläppen. Även om det finns utmaningar när det gäller de tekniska lösningar så bedöms dessa inte vara oöverstigliga.

Bio-CCS är dock en relativt dyr teknik. Projektets analyser pekar på att den totala kostnaden för att åstadkomma negativa utsläpp via bio-CCS, avskiljning till och med lagring, ligger på minst 1000 kr/ton koldioxid. Det finns flera möjliga intäktsmöjligheter i framtiden, både i form av styrmedel och från frivilligmarknader. Detta diskuteras vidare nedan.

Eftersom intäktsmöjligheterna fortfarande är osäkra kan vi konstatera att det största hindret för introduktion av bio-CCS i fjärrvärmesektorn är osäkerheten kring finansieringen. Det gäller både för nödvändiga inverteringar och för de tillkommande rörliga driftskostnaderna.

2.7 FLERA MÖJLIGA SÄTT ATT FINANSIERA BIO-CCS, MEN MÅNGA FRÅGETECKEN ÅTERSTÅR

Vi har redan konstaterat att det behövs tillkommande intäktsströmmar för att bio-CCS ska bli ekonomiskt attraktiv. Inom projektet har vi studerat olika modeller för finansiering. För att kunna implementera system som skapar incitament behövs dock först regelverk för mätning, rapportering och verifiering av bio-CCS-projekt. Detta kan sen ligga till grund för skapandet av en handelsvara, "bio-CCS-krediter" som kan handlas med.

Inom projektet har fyra modeller för finansiering av bio-CCS studerats. Dessutom diskuteras också de speciella förutsättningarna för avfalls-CCS. De fyra modellerna är:

Staten som köpare: Modellen innebär att staten betalar för negativa utsläpp från bio-CCS. Det kan ske genom långsiktiga avtal med bio-CCS-producenter där staten

garanterar att köpa en viss volym. För att minimera statliga kostnader kan avtalen auktioneras ut i delar till den lägsta budgivaren. För att skapa konkurrens är det önskvärt med flera budgivare. En annan metod är att staten köper negativa utsläpp till en fast lagringspeng. Huvudskillnaden från auktion är att staten bestämmer priset per ton men har begränsad rådighet över hur många ton som producenterna vill sälja till det priset. En stor fördel med en statligt finansierad lösning är att staten i ett inledande skede kan skapa gynnsamma förhållanden för upprättandet av de första bio-CCS-anläggningarna, eftersom långvariga kontrakt skapar en förutsägbarhet för de som driver bio-CCS-anläggningarna. En nackdel med att staten köper negativa utsläpp är att det blir dyrt för staten och skattebetalarna. I nuläget talar det mesta för att ett stöd i form av omvänd auktion kommer att införas.

Kvotplikt för förorenare: Staten lägger här en kvotplikt på vissa sektorer med kvarvarande utsläpp, motsvarande en del av deras växthusgasutsläpp. Kvotplikten kan riktas mot sektorer där det är svårt att bli av med växthusgasutsläppen, exempelvis jordbruk och delar av transportsektorn. Kvotplikten skapar en efterfrågan på negativa utsläpp som kan bidra till att finansiera bio-CCS. En fördel med denna metod är att den inte belastar statsbudgeten och därmed skattebetalarna. En nackdel är att basen för intäkterna, den kvotpliktiga volymen, är osäker och därmed inte upplevs som trygg för bio-CCS-investeringarna.

Deltagande i EU:s utsläppshandel, eller annan liknande mekanism: Negativa utsläpp från bio-CCS skulle kunna tillåtas delta i EU:s utsläppshandelssystem (EU ETS) för koldioxid. Det är idag inte tillåtet. En fördel med att inkludera bio-CCS i EU ETS är att bio-CCS då skulle ingå i världens största koldioxidmarknad. Det skapar en betydande efterfrågan på bio-CCS. Det kommer dock att ta tid innan bio-CCS-krediter blir ett intressant alternativ till utsläppsminskningar. Med en kostnad för bio-CCS på ca 1000 kronor per ton eller mer krävs ett utsläppspris i paritet med den kostnaden för att bio-CCS ska blir ett konkurrenskraftigt alternativ för deltagarna i systemet. I dagsläget talar det mesta för att bio-CCS inte inom de närmaste åren kommer att tillåtas ingå i utsläppsrechtshandelssystemet. Det finns exempelvis en oro för att detta skulle kunna försena den nödvändiga utfasningen av fossila bränslen. På lång sikt, när EU ska nå nettonollutsläpp av koldioxid måste dock EU ETS modifieras för att kunna neutralisera vissa kvarvarande växthusgasutsläpp som är mycket svår att bli av med. Då har bio-CCS en tydlig roll. På kortare sikt diskuteras dock införandet av en separat mekanism för att skapa efterfrågan på negativa utsläpp. Alltså ett separat handelssystem för negativa utsläpp. Något beslut om detta finns dock inte. Utsläppshandelssystem har fördelar och nackdelar som liknar de som kvotpliktssystem skapar.

Frivillig klimatkompensering: Marknaden för frivillig klimatkompensation växte fram i början av 2000-talet parallellt med utvecklingen av internationella koldioxidmarknader under Kyotoprotokollet. Efterfrågan på krediter kommer från att företag eller individer vill kompensera en del av eller hela sitt klimatavtryck. Ett finansieringssystem för bio-CCS baserat på frivillig kompensation skulle innebära att de som vill klimatkompensera på frivillig basis köper bio-CCS-krediter. Det finns redan stora internationella företag som förbundit sig att bli klimatneutrala genom att köpa stora volymer krediter baserat på negativa koldioxidutsläpp. Att

sälja negativa utsläpp internationellt kan dock innebära en risk för dubbelräkning. Om ett företag, till exempel Microsoft (USA), köper bio-CCS-krediter från en svensk bio-CCS-producent för att kompensera sitt företags koldioxidavtryck, finns det en risk att samma negativa utsläpp redovisas i både producentlandet (Sverige) och i landet där köparen finns (USA). För systemets trovärdighet är det viktigt att handeln med sådana krediter sker på ett sätt som hindrar dubbelräkning. En nackdel med frivilligmarknaderna är att efterfrågan är osäker och att betalningsviljan troligen inte är tillräckligt hög för att på egen hand motivera bio-CCS-investeringar.

Det är fullt möjligt att bio-CCS samtidigt kommer att finansieras med intäkter från mer än en av de ovan refererade modellerna. Vid avfallsförbränning uppstår koldioxid både från biogena och fossila källor. Den del av koldioxidutsläppen som kommer från biogena källor kan vid CCS-utnyttjande omfattas av de finansieringsmodeller som beskrivs ovan. För de fossila koldioxidutsläppen medför CCS att kostnaderna för utsläppsätter kan reduceras, vilket kan ses som en intäkt. I nuläget är dock denna intäkt mindre än kostnaden för CCS. Det innebär att det kan behövas ytterligare styrmedel för att göra avfalls-CCS ekonomiskt konkurrenskraftig. Investeringsstöd skulle kunna ge denna kompletterande finansiering.

På sikt är det osannolikt att satsningar på bio-CCS kan förlita sig på direkta statliga stöd. Det är därför angeläget att så snart som möjligt etablera marknadslösningar för finansiering. Det kan både utgöras av frivilligmarknader och tvingande styrmedel, exempelvis kvotplikt.

2.8 OSÄKERHET ANGÅENDE SYFTET MED OMVÄND AUKTION OCH ÄGANDE AV DE NEGATIVA UTSLÄPPEN

I samband med planeringen av styrmedel som har som syfte att ge incitament för bio-CCS är det viktigt att "politiken" tar ställning till syftet med stödet. Syftar stödet till att introducera och demonstrera bio-CCS i olika branscher eller att uppnå högsta möjliga volym negativa utsläpp till lägsta möjliga kostnad? Inriktningen kan få stor betydelse för lokaliseringen och branschfördelningen av bio-CCS. Viktigt är också att tydligt kommunicera om staten stödjer utvecklingen av svensk bio-CCS i syfte att bidra till att fylla kvoten för Sveriges kompletterande åtgärder. I den mån ambitionen är att skapa kompletterande åtgärder bör det specificeras om stödet främst syftar till att bygga kapacitet att bidra till kvoten år 2045 eller om det också finns en önskan om att bokföra bio-CCS som kompletterande åtgärd redan 2030. Detta är avgörande för "ägandet" av de negativa utsläppen. Företagens önskan att handla med minusutsläpp på en internationell marknad står då mot statens eventuella önskan om att kunna bokföra minusutsläpp i det svenska utsläppsregistret. Ytterligare målkonflikter på detta tema har identifierats.

I dagsläget är omvänd auktion det mest sannolika styrmedlet på kort sikt för stöd till bio-CCS. Med det som utgångspunkt har ett stort antal intervjuer genomförts med personer från näringslivet, politiken och den nationella förvaltningen. När svaren sammanställs framgår att auktioner förespråkas av en stor majoritet, men inte av alla, som huvudalternativ till stödsystemets utformning. Motivet är att nå

en hög kostnadseffektivitet och på så vis bygga långsiktig acceptans för stöd-systemet. I detaljutformningen av den omvända auktionen rekommenderas att vara tydlig med utropad auktionsvolym eller tillgänglig budget men att presentera den som flexibel (införa ett mjukt tak). Dessutom bör ett dolt pristak inkluderas för att avlasta risk från staten. Pristakets existens bör kommuniceras men nivån bör hållas hemlig för att undvika strategisk budgivning. Slutligen konstateras att en auktionsvolym eller ett budgettak bör väljas som gynnar konkurrens bland aktörerna och som inte utesluter större aktörer från att delta på grund av att deras CCS-potential överstiger efterfrågan hos auktionären.

I skrivandets stund finns ett stort momentum kring bio-CCS. Att sjösätta stöd-systemet redan 2022 är mycket ambitiöst och har åtminstone delvis politiska motiv. Att sjösätta systemet och påbörja processen för tilldelning av kontrakt innan nästa val anses öka förutsättningarna för att systemet ska bestå även under framtida mandatperioder. Även om klimatfrågan kräver hög ambitionsnivå och goda exempel uttrycker många av de intervjuade näringslivsaktörerna att 2022 möjligen är en lite väl ambitiös målsättning, även om initiativet i grunden applåderas. Risken finns naturligtvis att en tidig sjösättning av ett auktionsbaserat stödsystem kommer vara kostnadsdrivande genom att alltför få aktörer är redo att lägga bud för att skapa konkurrens i auktionen. Samtidigt är det viktigt att balansera risken för höga kostnader mot risken för att en för låg auktionsvolym undergräver det positiva momentum som idag omgärdar bio-CCS.

2.9 TILLSTÅNDSFRÅGOR, BARRIÄRER OCH "REGEL-HINDER"

De regelmässiga förutsättningarna för bio-CCS i Sverige har förbättrats avsevärt de senaste dryga decenniet. Exempelvis har EU antagit CCS-direktivet som reglerar ansvar för lagring av koldioxid, Internationella sjöfartsorganisationen IMO har antagit en resolution som tillåter export av koldioxid i syfte att lagras under havsbotten, FN:s klimatpanel har förtydligat att bio-CCS kan och bör bokföras som ett negativt utsläpp och Europeiska kommissionen har klargjort att de tolkar EU:s handelsdirektiv som att skeppstransport av koldioxid är att betrakta som likställd med rörtransport och därmed kompatibelt med CCS. Trenden inom politiken är att utveckla regelsystemet i en mer tillåtande riktning, till stöd för CCS inklusive bio-CCS.

Flera regelmässiga hinder kvarstår dock. En del utgör mindre barriärer, andra är av mer betydande karaktär. Nedan listas de utmaningar som bedöms vara av störst betydelse för bio-CCS i Sverige:

- Avskiljning: Det saknas regler för hur biogen koldioxid ska mätas och rapporteras vid anläggningar som tillämpar bio-CCS, både inom Sverige och EU. Ett regelverk som kan tillämpas inom det framväxande svenska stödsystemet för bio-CCS är dock under utformning.
- Gränsöverskridande transport: Via ett tillägg i Londonprotokollet tillåts transport av koldioxid för lagring i annan stat, men tillägget har ännu inte trätt i kraft. Transport av koldioxid kräver därför en provisorisk tillämpning av tillägget, vilket i sin tur ställer krav på ett bilateralt avtal mellan berörda stater.

- Lagring i närtid: CCS-direktivet skiljer inte på koldioxidmolekylernas ursprung. Läckage av biogen koldioxid kan därför kräva kompensation genom överlåtande av utsläppsrätter inom EU:s system för utsläppshandel vilket i sin tur kan försvåra och fördyra bio-CCS.
- Hela teknikkedjan: Moratoriet i konventionen om biologisk mångfald tillåter inte klimatrelaterade geoengineering-aktiviteter som kan påverka biologisk mångfald. Infångning och lagring av koldioxid från fossila bränslen undantas uttryckligen från moratoriet, men inte bio-CCS, vilket därmed kan utgöra ett hinder för svensk bio-CCS.

För ett potentiellt svenskt lager på längre sikt tillkommer ytterligare utmaningar:

- I dagsläget tillåter inte Helsingforskonventionen lagring av koldioxid i Östersjön. Konventionen måste därför ändras eller kompletteras med en resolution som medger en tolkning som tillåter geologisk lagring.
- Några av de möjliga svenska lagringsplatserna sträcker sig till territorium eller ekonomiska zoner utanför Sverige och potentiellt även utanför Europeiska unionens territorium. Detta utgör ett problem då geologisk lagring utanför territoriet för länder som ställt sig bakom Europeiska unionens CCS-direktiv är otillåten.
- Olje- och gasfynd regleras i Offshoredirektivet. Eventuella olje- och gasfynd som påträffas vid undersökning och användning av geologiska lagringsplatser i havsbotten regleras därmed inom ramen för detta direktiv.
- Regeringskansliet har utrett ett förbud av utvinning av fossila bränslen. Om det nuvarande förslaget omsätts i lag kommer det att försvåra för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. Skälet är att bormning för att åstadkomma lagringsplatser skulle kunna leda till att mindre mängder olja och/eller naturgas oavsiktligt erhålls.

2.10 BIO-CCS SKAPAR EN RAD MÖJLIGHETER

I det genomförda projektet har vi haft som ambition att studera förutsättningarna för att introducera bio-CCS i den svenska fjärrvärmesektorn. I en del av sammanfattningspunkterna ovan blir det därför ett fokus på de svårigheter som finns längs vägen för en sådan utveckling. Det kan vara behov av ekonomiska incitament, regelproblem, svåra valsituationer i samband med olika val av avskiljningsprocess, transport och lagringsalternativ. Bortom dessa dilemman och potentiella målkonflikter finns också en rad möjligheter.

Den mest uppenbara av dessa fördelar är den viktiga klimatnyttan av att skapa nödvändiga negativa koldioxidutsläpp. Utöver detta kan bland annat lyftas fram potentialen i att bio-CCS kan bidra till stärkt konkurrenskraft på marknader för exempelvis el, värme, massa- och pappersprodukter samt transportbränslen. På vissa marknader finns det rimligtvis möjlighet att utveckla segment som kan vara villiga att betala en premie för produkter som producerats vid anläggningar som installerat bio-CCS.

Det finns också möjligheter att finansiera bio-CCS genom internationell efterfrågan på kolsänkor. Stater eller företag i tredje land kan tänkas vilja köpa svenska minusutsläpp, exempelvis baserat på kvalitetskriterier, mot att de förs ut ur det

svenska utsläppsinventariet eller annulleras i Sverige. Utländska företag skulle potentiellt också kunna vara intresserade av att delfinansiera svensk bio-CCS även om minusutsläppet bokförs i det svenska utsläppsinventariet. Sådan finansiering kan syfta till att bidra till en global klimatnytta, oavsett var minusutsläppet bokförs. På detta sätt blir ”negativa utsläpp” en möjlig framtida exportprodukt.

Den svenska uppvärmningsbranschens färdplan för fossilfrihet har en vision som innebär att branschen ska utgöra en kolsänka år 2045. Bio-CCS är en viktig del i att nå detta mål. Sedan den färdplanen togs fram har förväntningarna på i vilken takt bio-CCS kan introducerats ökat och de negativa utsläppen från bio-CCS kan komma tidigare och kanske också i större omfattning än vad som då bedömdes.

Om den svenska fjärrvärmebranschen kommer igång med bio-CCS i kommersiell skala kommer vi att vara bland de första i världen med denna teknik. De erfarenheter som vi då skaffar oss i Sverige kommer att kunna ligga till grund för export av både teknik och kunskap till resten av världen. Därigenom kan exportintäkter och arbetstillfällen skapas. Sverige blir också ett föregångsland när det gäller negativa utsläpp, något som IPCC i sina utsläppsscenarioer pekar på som en nyckellösning för att begränsa den globala temperaturökningen.

2.11 STORT VÄRDE AV DIALOG OCH SAMVERKAN INOM PROJEKTET

Det genomförda projektet har samlat representanter från en stor del av fjärrvärmebranschen. Det har möjliggjort att forskningsresultat på ett effektivt sätt kunnat spridas och diskuteras. Inspel från branschen har också löpande påverkat forskningens inriktning på ett värdefullt sätt. Samverkan och nätverkande har dock inte stannat vid branschföreträdarna utan har också involverat intressenter från andra sektorer och branscher, exempelvis industriföretag, transportföretag, hamnar, lagringsaktörer och myndigheter. En lång rad workshops har genomförts inom projektet vilket bidragit till informations- och kunskapsöverföring och kontaktskapande. Från projektets sida är vi tacksamma för det stora engagemanget och vårt intryck är att även övriga deltagare vid workshops och andra samverkansinitiativ har upplevt dessa som värdefulla och att projektet bidragit till ökad kunskap och att viktiga kontakter skapats.

Det fullständiga projektet om Syntesrapport bio-CCS (2022-842) inom den svenska fjärrvärmesektorn består dels av den forskning som redovisas i denna syntesrapport och i underlagsrapporterna från de olika arbetspaketen, del de deltagande företagens strategi för bio-CCS-utbyggnaden. Den första delen ansvarar forskargruppen för, medan själva färdplanen är företagets ansvar. Färdplanen uttrycker företagets åtaganden och vad som behövs från omvärlden för att visionen ska kunna förverkligas. Färdplanen redovisas i ett fristående dokument, *Så når vi negativa utsläpp från fjärrvärmesektorn, en strategi för bio-CCS vid kraft- och värmeproduktion inklusive förbränning av avfall*. Forskningsresultaten utgör ett viktigt underlag för företagets strategi.

3 AP1. Företagsekonomiska förutsättningar för affärsmässig drift

Detta syntesbidrag utgör en del av avrapporteringen från arbetspaket 1 i projektet om bio-CCS i fjärrvärmen. Syftet är att beskriva olika finansieringsmodeller för bio-CCS i fjärrvärmen. Sammanställningen är framtagen genom litteraturstudier och egna analyser som sedan diskuterats med representanter från den svenska fjärrvärmesektorn.

3.1 FINANSIERINGSMODELLER FÖR BIO-CCS

Flera författare hävdar att det finns ett behov av snabb introduktion av politiska och ekonomiska incitament för bio-CCS (och andra negativa utsläppstekniker) för att stödja kommersialisering och distribution, i synnerhet styrmedel som styr efterfrågan^{8 9 10}. Men trots att flera författare pekar på behovet finns det bara ett begränsat antal artiklar som beskriver sådana styrmedel^{11 12 13 14 15}. Även om det finns ett behov av styrmedel så är det heller inte uppenbart hur sådana ska samspela med styrmedel som prissätter fossil koldioxid så att skeva incitament undviks^{16 17}.

För att kunna implementera system som skapar incitament behövs först regelverk för mätning, rapportering och verifiering av bio-CCS-projekt. Detta kan sen ligga till grund för skapandet av en handelsvara, "bio-CCS-krediter" som kan handlas med. En övervakande myndighet utfärdar krediter till bio-CCS-producenten som sen kan sälja dem vidare. Varje kredit har ett unikt ID-nummer och ett register håller koll på utfärdandet av krediter, vem som äger dem, samt alla handels-transaktioner.

⁸ Fridahl, M. et al. (2020). Mapping Multi-Level Policy Incentives for Bioenergy With Carbon Capture and Storage in Sweden. *Frontiers in Climate* 2: 604787

⁹ Fuss, S., and Johnsson, F. (2021). The BECCS implementation gap-a Swedish case study. *Front. Energy Res.* 8:553400. doi: 10.3389/fenrg.2020.553400

¹⁰ Bellamy, R., Fridahl, M., Lezaun, J., Palmer, J., Rodriguez, E., Lefvert, A., et al. (2021). Incentivising bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) responsibly: comparing stakeholder policy preferences in the United Kingdom and Sweden. *Environ. Sci. Policy* 16, 47–55. doi: 10.1016/j.envsci.2020.09.022

¹¹ Pour, N., Webley, P., & Cook, P. (2018). Opportunities for application of BECCS in the Australian power sector. *Applied Energy*, 615-635

¹² Vivid economics, 2019. Greenhouse gas removal (GGR) policy options. Vivid Economics Limited 163 Eversholt Street London NW1 1BU United Kingdom.

¹³ Burke, J., Byrnes, R., & Fankhauser, S. (2019). How to price carbon to reach net-zero emissions in the UK. Policy report, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, London

¹⁴ Jeffery, L., Höhne, N., Moisio, M., Day, T., & Lawless, B. (2020). Options for supporting Carbon Dioxide Removal. New climate institute. Retrieved from <http://newclimate.org/publications>

¹⁵ Zetterberg L, Johnsson F and Möllersten K (2021). Incentivizing BECCS— A Swedish Case Study. *Front. Clim.* 3:685227. doi: 10.3389/fclim.2021.685227

¹⁶ Fuss, S., and Johnsson, F. (2021). The BECCS implementation gap-a Swedish case study. *Front. Energy Res.* 8:553400. doi: 10.3389/fenrg.2020.553400

¹⁷ Zetterberg L, Johnsson F and Möllersten K (2021). Incentivizing BECCS— A Swedish Case Study. *Front. Clim.* 3:685227. doi: 10.3389/fclim.2021.685227

I det följande beskriver och analyserar fyra modeller för finansiering av bio-CCS och en modell för blandat avfall med fossila och biogena delar.

3.1.1 Modell 1. Staten som köpare

Modellen innebär att staten betalar för bio-CCS. Det kan ske genom långsiktiga avtal med bio-CCS-producenter där staten garanterar att köpa en viss volym bio-CCS under en viss tidsperiod. För att minimera statliga kostnader kan avtalen auktioneras ut i delar till den lägsta budgivaren. Långsiktiga avtal med auktion har fördelen att priset kan pressas, men det kan finnas risk att vissa producenter inte klarar av att leverera.

En annan metod är att staten köper negativa utsläpp till en fast lagringspeng, analogt med inmatningstariffer. Huvudskillnaden från auktion är att staten bestämmer priset per ton men har begränsad rådighet över hur många ton som producenterna vill sälja till det priset. Systemet kan jämföras med en negativ skatt, i den meningen att bio-CCS-producenten betalas för varje ton avskild och lagrad CO₂. Priset behöver vara tillräckligt högt och erbjudas under tillräckligt lång tid för att för att producenterna ska vilja leverera. En fast lagringspeng har fördelen att staten betalar i efterhand för utförd leverans, men nackdelen att det är svårt för staten att fastställa en lämplig prisnivå. Med ett för lågt pris kommer knappast några volymer att produceras alls.

En stor fördel med en statligt finansierad lösning är att staten i ett inledande skede kan skapa gynnsamma förhållanden för upprättandet av de första bio-CCS-anläggningarna, eftersom långvariga kontrakt skapar en förutsägbarhet för Bio-CCS-producenterna. En annan fördel är att staten kan ha viss kontroll över hur stora volymer negativa utsläpp produceras och hur länge staten vill stödja dem. Genom långsiktiga avtal kan staten i förväg bestämma vilka volymer den vill köpa, till exempel 1 Mt bio-CCS-minskningar/år.

En nackdel med att staten köper negativa utsläpp är att det blir dyrt för staten och skattebetalarna. Som exempel, Vägvalsutredningen¹⁸ föreslår att staten köper motsvarande 1,8 Mt bio-CCS per år till år 2030, vilket skulle innebära en kostnad på ca 1,8 miljarder kronor per år, förutsatt en bio-CCS-kostnad på 1000 kr/ton CO₂.

Ett flertal potentiella avfalls-CCS-producenter ser en möjlighet att komplettera den statliga finansieringen genom att sälja krediter från sina projekt, antingen till privata företag för frivillig kompensation eller till EU ETS. Om syftet med det svenska stödet är att handla upp negativa utsläpp som kompletterande åtgärd för att klara det svenska klimatmålet så behöver det förtydligas innan auktionerna genomförs¹⁹.

¹⁸ Regeringen (2020). SOU 2020:4. Vägen till en Klimatpositiv Framtid - Betänkande av Klimatpolitiska Vägvalsutredningen, 2020. Stockholm, Norstedts Juridik

¹⁹ Fridahl, M., and Lundberg, L. (2021). Aktörspreferenser i Design av ett Stödssystem för bio-CCS. Linköpings universitet, tema miljöförändring.

3.1.2 Modell 2. Kvotplikt på utvalda sektorer som förorenar

Modell 2 innebär att staten lägger en kvotplikt på vissa sektorer med kvarvarande utsläpp, motsvarande en del av deras växthusgasutsläpp. Det är inte självklart vilka sektorer som ska bli föremål för kvotplikten. Eftersom bio-CCS erbjuder negativa utsläpp så kan man tycka att det bör riktas mot sektorer där det är svårt att få ner utsläppen, till exempel transporter (väg, flyg, sjöfart) och jordbruk.

Transporter är den sektor som för närvarande släpper ut de flesta växthusgaser i Sverige, cirka 16 Mt CO₂e år 2019²⁰. Om en kvotplikt läggs på fossila transportbränslen motsvarande 10% av utsläppen skulle det skapa en efterfrågan på 1,6 Mt bio-CCS-krediter idag, dvs. ungefär samma nivå som det bio-CCS-mål som föreslås i Vägvalsutredningen²¹ för år 2030. Kostnadsökningen för bensen och diesel skulle i så fall bli ca 32 öre/liter respektive 29 öre/liter²².

Kvotplikt har fördelen att kostnaderna för bio-CCS inte belastar statsbudgeten utan riktas mot sektorer som har kvarvarande utsläpp av växthusgaser, vilket både skapar incitament för att minska utsläppen, samt finansieringsunderlag för bio-CCS. En möjlig nackdel med att rikta kvotplikten mot transportsektorn är att över tid, när utsläppen minskar, kommer finansieringsunderlaget att krympa. Därför bör denna finansieringsmodell på sikt även riktas mot andra sektorer som har kvarvarande utsläpp, exempelvis jordbruk.

3.1.3 Modell 3. Deltagare i EU:s utsläppshandel, eller liknande system, tillåts använda Bio-CCS-krediter

Med nuvarande reglerna kommer utsläppstaket i EU:s utsläppshandelssystem (EU ETS) att nå noll 2058, vilket innebär att det sista utsläppsrätterna kommer att utfärdas 2058. Europeiska rådet har dock beslutat att växthusgasutsläppen från hela EU ska nå netto noll till 2050. Detta kräver en översyn av EU ETS så att nollutsläpp nås år 2050 eller tidigare. EU-kommissionen har i sitt klimatpaket "Fit for 55" föreslagit att utsläppshandelssystemet skärps så att "utsläppsbubblan" minskas med 4,3% per år med start 2021. När vi närmar oss året för nollutsläpp är det troligt att det finns kvarvarande utsläpp som är mycket kostsamma att minska (t.ex. inom luftfarten och vissa industriutsläpp). Bio-CCS kan då utgöra ett sätt att kompensera för de återstående utsläppen i utsläppshandelssystemet.

En fördel med att inkludera bio-CCS i EU ETS är att bio-CCS då skulle ingå i världens största koldioxidmarknad. Det skulle bidra till att sänka kostnaderna för deltagare i EU:s utsläppshandelssystem och skulle kunna skapa en betydande efterfrågan på bio-CCS. Det kommer dock att ta tid innan bio-CCS-krediter blir ett intressant alternativ till utsläppsminskningar. Med en kostnad för bio-CCS på ca 1000 kronor per ton eller mer krävs ett utsläppsrättspris i paritet med den kostnaden för att bio-CCS ska bli ett alternativ för deltagarna i systemet. Med denna modell finns en risk att deltagare i EU ETS använder bio-CCS-krediter

²⁰ Naturvårdsverket (2021). Sweden's Territorial Emissions and Uptake of Greenhouse

²¹ Regeringen (2020). SOU 2020:4. Vägen till en Klimatpositiv Framtid - Betänkande av Klimatpolitiska Vägvalsutredningen, 2020. Stockholm, Norstedts Juridik

²² Zetterberg, L., Källmark, L., & Möllersten, K. (2019). Incitament och finansiering av Bio-CCS i Sverige. IVL Svenska Miljöinstitutet.

istället för att minska sina egna utsläpp. Men detta motverkas på kort sikt av att kostnaden för bio-CCS är högre än priset på utsläppsrätter idag.

Ur ett svenskt perspektiv är det svårt att förutsäga vad efterfrågan på BECSS-krediter skulle kunna bli. Efterfrågan skulle bero på kostnadsstrukturen i Sverige jämfört med andra länder och jämfört med andra typer av utsläppsminskningar.

Om svenska bio-CCS-reduktioner används av deltagare i EU ETS är det viktigt att samma reduktioner inte användas för att kompensera för kvarvarande utsläpp i det svenska jordbruket eftersom jordbrukssektorn inte ingår i handelssystemet.

Ett separat EU system för negativa utsläpp

Man kan även tänka sig att ett separat system skapas på EU-nivå för negativa utsläpp. I en rapport från ICAP²³ beskrivs hur en EU marknad för negativa utsläpp skulle kunna se ut. På tillförselsidan produceras negativa utsläpp genom olika tekniker - inbindning i skog och mark, biokol, Bio-CCS, samt direktinfångning och lagring (DACCS). Efterfrågan kan skapas genom att medlemsstater eller EU centralt handlar upp negativa utsläpp (liknande modell 1 i denna rapport), att en kvotplikt införs (likt modell 2 i denna rapport) eller att privata organisationer på frivillig basis köper negativa utsläpp (likt modell 4 i denna rapport). ICAP-rapporten beskriver även hur ett sådant system skulle kunna förhålla sig till EU ETS – antingen 1) helt isolerat; 2) helt länkat med EU ETS, eller 3) länkat men där överföringar till EU ETS begränsas.

3.1.4 Modell 4. Privata köpare för frivillig klimatkompensering

Marknaden för frivillig klimatkompensation växte fram i början av 2000-talet parallellt med utvecklingen av internationella koldioxidmarknader under Kyoto-protokollet. Efterfrågan på krediter kommer från att företag eller individer vill kompensera en del av eller hela sitt klimatavtryck. Ett finansieringssystem för bio-CCS baserat på frivillig kompensation skulle innebära att de som vill klimatkompensera på frivillig basis köper bio-CCS-krediter. Ser man internationellt har stora företag som till exempel Microsoft, Stripe och Shopify förbundit sig att bli klimatneutrala genom att köpa stora volymer krediter baserat på negativa koldioxidutsläpp²⁴. Det tycks även som att det inom standarder för företags netto-nollutsläpp finns preferenser för negativa utsläpp, snarare än att köpa utsläppsminskningar²⁵. Detta skulle kunna leda till ett ökat intresse för bio-CCS-krediter.

Att sälja negativa utsläpp internationellt kan dock innebära en risk för dubbelräkning. Om ett företag, till exempel Microsoft (USA), köper bio-CCS-krediter från en svensk bio-CCS-producent för att kompensera sitt företags koldioxidavtryck, finns det en risk att samma negativa utsläpp redovisas i både producentlandet (Sverige) och i landet där köparen finns (USA). Det är därför viktigt att sådan

²³ La Hoz Theuer, S., Doda, B., Kellner, K. and Acworth, W. (2021). Emission Trading Systems and Net Zero: Trading Removals. Berlin: ICAP.

²⁴ Microsoft. (2021). Microsoft carbon removal. Microsoft corporation

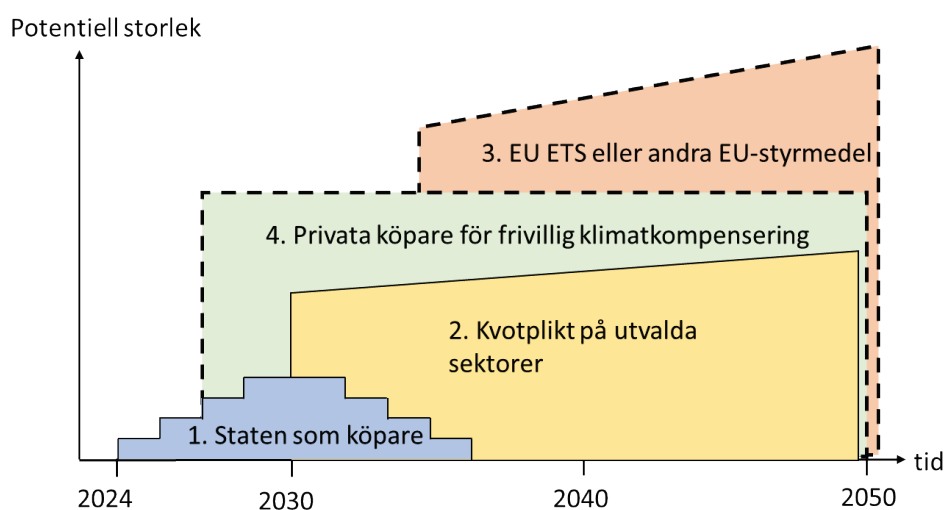
²⁵ Allen, M. o.a., (2020). The Oxford Principles for Net Zero Aligned Carbon Offsetting, u.o.: Smith school of enterprise and the environment, Oxford university

handel sker på ett sätt som hindrar dubbelräkning, eftersom det annars skulle undergräva Parisavtalets integritet²⁶.

En nackdel med frivilligmarknaderna är att efterfrågan är osäker och att betalningsviljan troligen inte är tillräckligt hög för att på egen hand motivera bio-CCS-investeringar. Potentiella producenter av negativa utsläpp kommer troligen inte investera i avskiljningsanläggningar enbart baserat på en frivillighetsmarknad, då det finns stora osäkerheter och därmed risker med en sådan finansiering²⁷.

3.2 SEKVENSERING AV BIO-CCS-MODELLERNA

Figur 2 ger en schematisk illustration av tidpunkten för införandet av fyra policymodellerna. De angivna volymnivåerna anges i förhållande till nivån på det svenska stödet till år 2030, 1,8 Mton per år, som det är formulerat i Vägvalsutredningen²⁸. Även om det verkar nödvändigt att införa de olika modellerna i sekvens, är det inte uppenbart hur en sådan sekvens kan fastställas eftersom rådigheten ligger hos olika organisationer (svenska regeringen, EU och privata företag).



Figur 2. En schematisk illustration av potentiella volymer och tid för fyra av modellerna. Prickade linjer anger modeller där Sverige inte har rådighet. Följande antaganden har gjorts: Modell 1: Den svenska regeringen köper bio-CCS med start 2024 motsvarande 0,5 Mt per år och ökande för att nå en maximal nivå på 1,8 miljoner ton per år 2030 och därefter en nedtrappning mot noll år 2035. Modell 2 innebär att en kvotplikt införs i transportsektorn år 2030 för en del (t ex 10%) av utsläppen från fossila bränslen. Kvotplikt växer linjärt till 100% år 2045 för att kompensera för minskade utsläpp men också för att öka efterfrågan över tid. Modell 3: Vi antar att bio-CCS-krediter kan användas i EU ETS från 2035 och framåt, men efterfrågan på svenska bio-CCS-krediter är osäker. Frivilliga marknader (modell 4) kan stå för en betydande efterfrågan men är svårt att uppskatta, både gällande tid och potentiella volymer.

²⁶ Schneider, L., Kollmuss, A. & Lazarus, M., 2014. Addressing the risk of double counting emission reductions under the UNFCCC, u.o.: Stockholm Environment Institute

²⁷ Nylén, L., Vattenfall, personlig kommunikation, 2021.

²⁸ Regeringen (2020). SOU 2020:4. Vågen till en Klimatpositiv Framtid - Betänkande av Klimatpolitiska Vägvalsutredningen, 2020. Stockholm, Norstedts Juridik

3.2.1 Modell 5. Blandat avfall – plast och biomassa

En stor del av fjärrvärmeproduktionen sker där bränslet består av blandat avfall, som regel hushållsavfall (innehållande plast) och icke farligt industriavfall (exempelvis rivningsvirke). Svenska avfallsförbränningsanläggningar släppte år 2017 ut ca 370 kg fossil CO₂/ ton avfall²⁹. Den fossila andelen av de totala koldioxidutsläppen (fossil och biogen) uppskattas till ca en tredjedel³⁰.

Om vi ser på finansieringsmodeller för bio-CCS i fjärrvärmen kan plastinnehållet i avfallet innebära ett problem. Om plasten förbränns tillsammans med den biogena fraktionen av avfallet kommer den avskilda koldioxiden vara av både fossilt och biogent ursprung. Om till exempel staten sedan vill betala anläggningsägaren för att kompensera för svenska utsläpp (se finansieringsmodell 1) är det rimligt att staten bara vill betala för den biogena delen av den avskilda koldioxiden, eftersom det bara är den biogena delen som innebär negativa utsläpp.

Men svenska avfallsförbränningsanläggningar ingår i EU:s utsläppshandelssystem och måste köpa utsläppsrätter som motsvarar de fossila koldioxidutsläppen. Priset på utsläppsrätter är ca 80 euro per ton CO₂ (13 december 2021). Enligt EU:s direktiv om handel med utsläppsrätter slipper ägaren köpa utsläppsrätter om förbränningsanläggningen avskiljer och lagrar koldioxiden³¹. Det innebär att om en anläggningsägare investerar i en avskiljningsanläggning så sparas 80 euro per ton fossil CO₂.

Kostnaden för avskiljning och lagring är dock högre än 80 euro per ton, 100 euro per ton eller mer. Det finns dock möjligheter att söka investeringsstöd för CCS-anläggningar från exempelvis EU:s innovationsfond. Ett sådant stöd skulle inte behöva täcka hela kostnaden för avskiljningen eftersom anläggningsägaren slipper köpa utsläppsrätter.

²⁹ Sundqvist, J-O, IVL Svenska Miljöinstitutet, personlig kommunikation.

³⁰ Avfall Sverige (2012). Determination of the fossil carbon content in combustible municipal solid waste in Sweden. Rapport U2012:05 ISSN 1103-4092.

³¹ Fridahl, M. et al. (2020). Mapping Multi-Level Policy Incentives for Bioenergy With Carbon Capture and Storage in Sweden. *Frontiers in Climate* 2: 604787

4 AP2. Teknik, systemintegration och kostnader

I projektets arbetspaket 2 har tre aktiviteter genomförts: 1. Framtagande av en övergripande marginalkostnadskurva för avskiljning av koldioxid från svenska kraftvärmeverk, 2. en diskussion om avskiljning med alternativa processer med fokus på HPC processen samt 3. en utökad systemanalys för att undersöka vilka effekter koldioxidavskiljning får på den svenska fjärrvärmesektorn och den nordiska elmarknaden.

Följande slutsatser kan dras:

Den totala CO₂-avskiljningspotentialen (biogen och fossil CO₂) från alla anläggningar uppgår till 13,9 Mt/år, 16,0 Mt/år samt 19,3 Mt/år för tre olika fall av värmeåtervinning (118%, 64% samt utan), där den infångade mängden koldioxid återspeglar kraftvärmeverkens bränsleförbrukning. Av dessa infångade CO₂-utsläpp är 2,6, 2,7 respektive 2,9 Mt av fossilt ursprung, vilket ger cirka 10, 13 och 16 Mt negativa utsläpp. För de tre värmeåtervinningsfallen kan ungefär 6,4–7,8 MtCO₂/år (biogent och fossilt) avskiljas och transporteras till en hub till en kostnad lägre än 75 €/tCO₂, medan 10,6–13,6 MtCO₂/år kan vara tillgängligt till en maximal kostnad av 100 €/tCO₂. Dessa kostnader inkluderar inte kostnaderna för vidare fartygs-transport och lagring (till exempel till Nordsjön vilket beräknas kosta ungefär 30 - 55 €/ton beroende på transportavstånd).

När det gäller alternativa avskiljningsprocesser har fokus legat på post-combustion-processer dvs som kan tillämpas på existerande anläggningar. Speciellt har den så kallade " Hot Potassium Carbonate" processen (HPC) studerats. HPC processen förbrukar mer el jämfört med MEA processen men är å andra sidan mindre eller inte alls beroende av ånga från turbinen. Det finns därför ingen risk att turbinen måste stängas av på grund av ångbrist. I teorin kan HPC processen köras i ren eldrift. Elbehovet kan tillgodoses via kraftvärmeverkets egen turbin eller från elnätet.

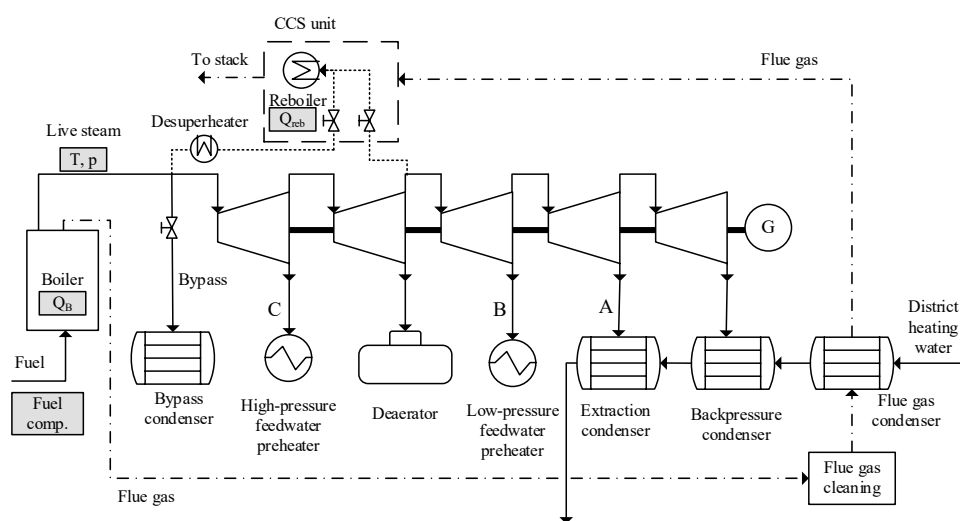
Den utökade systemanalys utgår från ett omvärldsscenario för den framtida utvecklingen som i allt väsentligt överensstämmer med Energimyndighetens "Elektrifieringsscenario". Inom analysen har totalt fyra beräkningsfall analyserats inklusive en jämförelse mellan MEA och HPC som avskiljningsteknik. Resultaten från analysen visar att bortfallet av levererad värme på grund av avskiljningsanläggningen kan ersättas med andra lokala värmeproduktionsenheter exempelvis hetvattenpannor eller värmepumpar. Bortfallet av elleverans kan ersättas med lokala enheter men också med elimport från Europa. Vilket produktionsslag (i Sverige eller utanför) som behöver producera mer el bestäms av rådande lastsituation, överföringsbegränsningar och tillgängligheten hos olika kraftslag. Resultaten visar att den extra värme som kraftvärmeverken levererar och som uppstår vid HPC-infångning ersätter primärt spillvärme och värmepumpar. Ersättningen av hetvattendrift är begränsad på grund av att denna produktion är delvis tvingad då det i HPC-fallet även finns ett CCS-åtagande för hetvattenpannor. I fallet där avskiljningen antas göras med MEA-processen blir skillnaden

för kraftvärmeverk på aggregerad nivå nästan oförändrad, detta beror på att den värmeleverans som försvinner i avfallskraftvärmeverken i många system vägs upp av biokraftvärmeverk som antingen går med högre produktion för samma tidsperiod eller som växlar över från kraftvärmedrift till mer hetvattendrift. Detta görs att undvika att ännu dyrare produktionsslag ska behöva starta och leverera värme.

4.1 MARGINALKOSTNADSKURVA FÖR CCS PÅ SVENSKA KRAFTVÄRMEVERK

4.1.1 Processmodellering av typanläggningar

Stationära processmodeller av kraftvärmeverk har tagits fram i simuleringsverktyget Ebsilon Professional för att uppskatta hur ångcykelns prestanda påverkas av att integrera aminbaserad CO₂-avskiljning. För att täcka in de olika svenska kraftvärmeverken så studeras totalt 14 ångcykelutföranden med avseende på ångdata, alfa-värde och bränsletyp. Figur 3 ger en översikt över de ångcykelutföranden som modellerats, där ångavtappningar A – C är valbara för att täcka in de 14 anläggningarna som används som referens. För de avfallseldade anläggningarna antas avfallets biogena andel antas vara 52%³².



Figur 3. Processchema för kraftvärmeångcykler som simuleras. Bokstäverna A-C betecknar de olika avtappningsfallen för de olika processmodellerna (dvs olika antal förvärmare och kondensorer) som representerar de olika KVV typerna.

³² SCB, 2019. Electricity supply, district heating and supply of natural and gasworks gas 2018, Sveriges officiella statistik.

Tre fall med olika grad av värmeåtervinning jämförs:

1. Ingen värmeåtervinning (0%);
2. Värmeåtervinning genom värmeväxlare, motsvarande 64% av energin i ångan som extraheras för att driva CCS-reboilern³³; och
3. Värmeåtervinning motsvarande fall b) och i tillägg värmepumpar (värmefaktor 3) för att producera fjärrvärme från kylbehovet (dvs. avskiljningsanläggningens procesströmmar med temperaturer <60°C som behöver kylas), vilket resulterar i upp till 118% total värmeåtervinning i förhållande till energin i ångan som tappas av. Värmepumpens elförbrukning uppskattas till 0,17 MWh/tCO₂. Detta fall betecknas som "118%", även om vissa anläggningar kan ge något lägre total värmeåtervinningsprocent.

Kostnadsuppskattningen inkluderar avskiljning, kompression och förvätskning av CO₂, samt lastbilstransport av CO₂ från anläggningen till en mellanlagringshub för att invänta vidare fartygstransport till en permanent lagringsplats.

4.1.2 Resultat

Figur 4 visar marginalkostnadskurvor för koldioxidavskiljning från de svenska kraftvärmeverken (de 110 som ingår i studien) med 90% infångning för de tre värmeåtervinningsfallen, inklusive kostnad för lastbilstransport till närmaste hub. Varje stapel representerar den modellerade mängd CO₂ som fångats från ett kraftvärmeverk, med kostnadskomponenter angivna i €/tCO₂-infångat. Den totala CO₂-avskiljningspotentialen (biogen och fossil CO₂) från alla anläggningar uppgår till 13,9 Mt/år, 16,0 Mt/år samt 19,3 Mt/år för de tre fallen 118% värmeåtervinning, 64% värmeåtervinning samt utan värmeåtervinning, där den infångade mängden koldioxid återspeglar kraftvärmeverkens bränsleförbrukning. Av dessa infångade CO₂-utsläpp är 2,6, 2,7 respektive 2,9 Mt av fossilt ursprung, vilket ger cirka 10, 13 och 16 Mt negativa utsläpp. Detta kan jämföras med det föreslagna bio-CCS målet om 1,8 Mt/år vid år 2030 samt 3–10 Mt/år vid 2045. Det kan också jämföras med Sveriges totala fossila CO₂-utsläpp som är 41 Mt (2019).

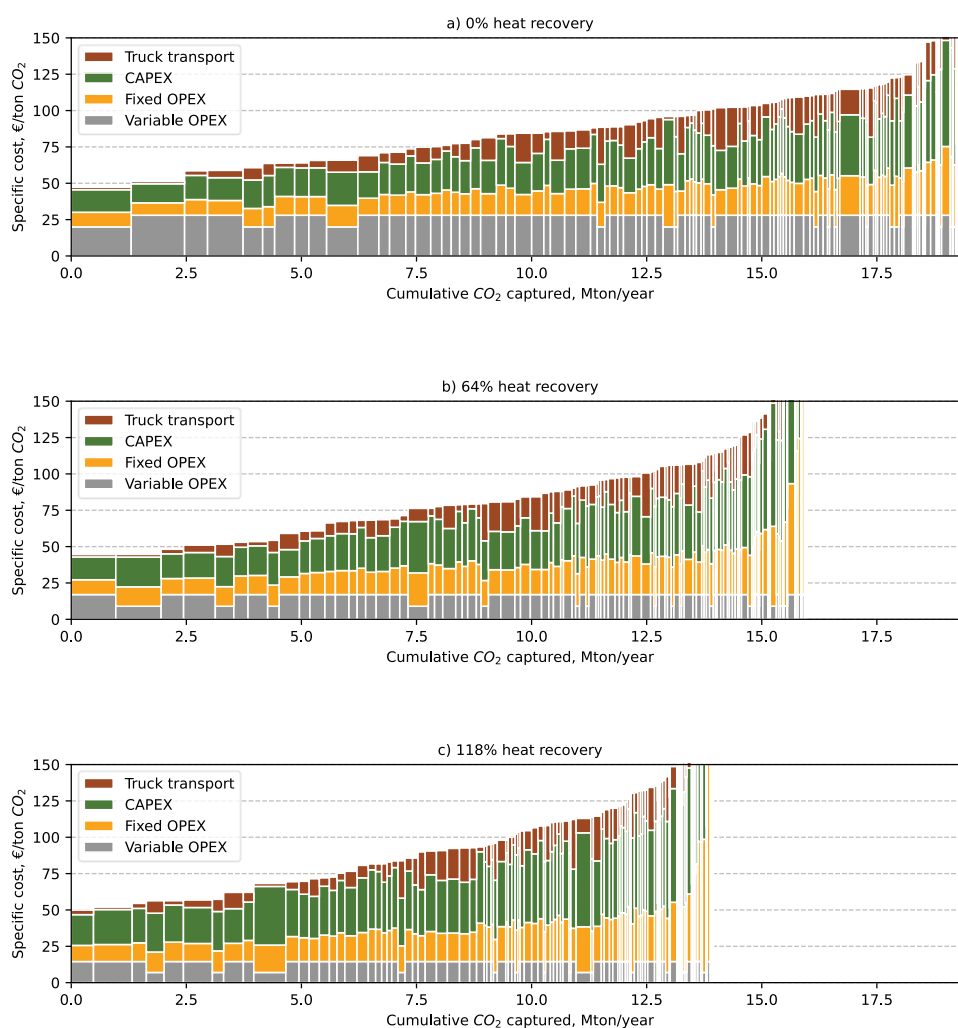
Figur 4 visar att **för de tre fallen kan ungefär 6,4–7,8 MtCO₂/år (biogen och fossilt) avskiljas och transporteras till en hub till en kostnad lägre än 75 €/tCO₂, medan 10,6 – 13,6 MtCO₂/år kan vara tillgängligt till en maximal kostnad av 100 €/tCO₂**. Observera dock att dessa kostnadsberäkningar inte inkluderar kostnaderna för vidare fartygstransport och lagring (till exempel till Nordsjön vilket beräknas kosta ungefär 30 - 55 €/ton beroende på transportavstånd³⁴). Figur 4 visar även att kostnaden för infångning och lastbilstransport från de minsta eller minst utnyttjade anläggningarna är ganska hög, dvs väsentligt högre än vad som normalt är förknippat med CCS på cirka 100 €/tCO₂.

Sammanfattningsvis kan konstateras att kostnaderna varierar måttligt med grad av värmeåtervinning. Minskningen av OPEX med ökad värmeåtervinning motverkas generellt av en ökning av CAPEX på grund av att mindre CO₂ avskiljs och de extra

³³ Ignell, V., Johansson, E., 2021. Local Infrastructures for CCS Clusters - A Case Study of Two CHP Plants in Gothenburg [MSc Thesis]. Chalmers Tekniska Högskola.

³⁴ Sandberg, P. (Equinor), 2020. Northern Lights - A European CO₂ transport and storage network [Presentation slides]. Retrieved from <https://zeroemissionsplatform.eu/co2-ts-infrastructure/>.

investeringskostnaderna för värmepumpen i 118% värmeåtervinningsfallet, så att den lägsta kostnaden för avskiljning och lastbilstransport ligger inom intervallet 45 – 50 €/tCO₂ i samtliga fall.



Figur 4. Marginalkostnadskurvor för koldioxidinfångning vid svenska kraftvärmeverk. X-axeln ger den totala potentialen för infångning (inklusive biogen och fossil CO₂) för fall med: a) 0% värmeåtervinning; b) 64% värmeåtervinning; och c) 118% värmeåtervinning. Y-axeln har kapats vid 150 €/t.

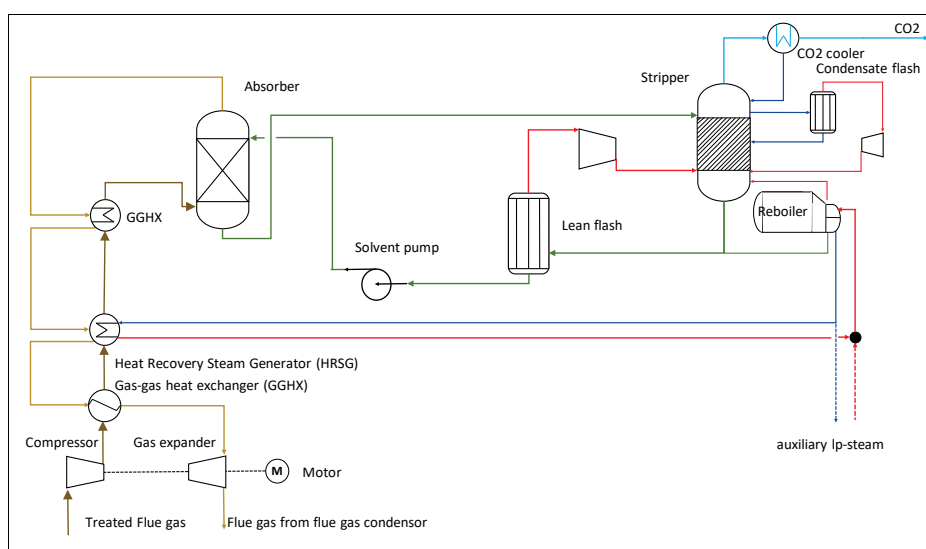
4.2 AVSKILJNING MED HPC PROCESSEN

Jämfört med den aminbaserade MEA processen förbrukar Hot Potassium Carbonate (HPC) processen mycket mer el men är å andra sidan mindre eller inte alls beroende av ånga från turbinen. Det finns därför ingen risk att turbinen måste stängas av på grund av ångbrist. I teorin kan HPC-el processen köras i ren eldrift. Elbehovet kan tillgodoses via kraftvärmeverkets egen turbin eller från elnätet eller en närliggande vindpark. Det är också möjligt att minska elförbrukningen och köra

processen i blandat el/ång-drift. Samtidig har HPC processen ett minde kylbehov än MEA processen då absorbern har en temperatur på över 80 °C.

Kylbehovet i CO₂-avskiljnings- och förvätskningsanläggningen kräver att kraftvärmeverk som inte ligger vid havet eller en å med kylvattentillgång behöver installera kyltorn (våta om det finns vatten) eller luftkylare. Jämfört med kolkraftverk med en kondensturbine har ett svenskt biomassaeldat kraftvärmeverk i regel inget kylbehov. Fjärrvärmenätet koler processen. En del kraftvärmeverk är byggda på platser utan tillgång till kylvatten.

I en HPC process hålls temperaturen över 60°C och gärna ännu högre för att undvika utfällning av kaliumbikarbonat. Processen illustreras i Figur 5.



Figur 5. Kaliumkarbonatbaserad avskiljning av CO₂ – principskiss baserad på (Midroc & BluCarbon Solutions 2020³⁵).

Rökgasen kan föras till kompressorn direkt från rökgaskondensorn eller kylas längre ner med kylvatten i en tillkommande rökgaskondensor. Rökgastemperaturen begränsas egentligen inte av den ökande elförbrukningen utan av kompressorns kravspecifikation för maximal utloppstemperatur och volymflöde. Värmen som alstras under kompressionen kan återvinnas helt och hållet i processen både som högvärdig värme över 60°C och som minskat ångbehov i återkokaren.

Temperaturskillnaden mellan absorber och stripper är mycket lägre i en HPC process än i en MEA process. Det är därför inte nödvändigt att investera i en dyr solvent/solvent-värmeväxlare. Genom kyleffekten av leanflashen behövs det inte heller någon solventkylare innan absorbern. Elförbrukningen är däremot hög per ton CO₂. Det är framför allt trycksättningen av rökgaserna till 6 - 8 bar (för att åstadkomma rätt partialtryck hos CO₂ i absorbern) som är elintensiv.

³⁵ Midroc & BluCarbon Solutions (2020). Tekniken bakom CCS, webinarium, 21 oktober 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=aoFNHVjwXs&feature=youtu.be>, besökt den 23 februari 2021.

För att täcka värmebehovet i ren eldrift, alltså utan förbrukning av lågtrycksånga, har ett elbehov mellan 0,7 och 1 MJ/t rapporterats. Beräkningar i detta projekt har bekräftat en elförbrukning kring 0,9 MJ/t. Värmebehovet i återkokaren på HPC processen tillgodoses genom ångkompression och av återvunnen värme från rökgaskompressor. Om den "interna" ångan inte räcker till behövs kompletterande lågtrycksånga från antingen turbinen eller annan källa. Investeringskostnader för HPC processen förväntas vara i samma storleksordning som för MEA processen. Driftkostnaderna är som i MEA processen mest beroende på prisersättning av el och fjärrvärme. HPC processen har inget eget kylbehov eftersom lösningsmedlet i absorbern inte behöver kylas. Kylbehovet finns dock i förvätskningsanläggningen där det behövs antingen en värmepump eller kylvatten plus en kylanläggning som i MEA-processen

Energiförbrukningen i HPC processen är mer känslig för CO₂-halten i rökgasen än i en MEA process vilket ger HPC processen en nackdel i avfallsförbränningsanläggningar. På plussidan för HPC står att karbonat/bikarbonatlösningen inte oxideras av den högre syrekoncentrationen i rökgasen från avfallsförbränning. Driftkostnaderna för lösningsmedlet förväntas därför vara betydligt lägre än för MEA. Det behövs dock troligtvis en mer detaljerad studie med tester på degradering.

4.3 ALTERNATIVA PROCESSER

Den tekniska mognadsgraden för runt 25 olika tekniker för CO₂-avskiljning har utvärderats av The Global CCS Institute under våren 2021. Antalet processer är ännu fler om olika konfigurationer och olika aminer skulle ses som egna tekniker. En stor del av dessa tekniska lösningar har använts under lång tid inom kemiindustrin (för produktion av syngas, naturgas och ammoniak) men där partialtrycket av CO₂ är högre än i rökgaser från kraftvärmesektorn samt att avskiljningen är en del av processen och kostnaden därmed inte kopplad till en kostnad för att minska klimatpåverkan. Under de senaste 20 åren har man lyckats tillämpa några av dessa processer på CO₂-infångning från förbränning av kol och naturgas och de bör därför även vara möjliga att använda för avskiljning från kraftvärmeverk som eldas med biobränsle eller avfall. I Tabell 1 listas de avskiljningstekniker som i tillägg till MEA och HPS processerna bedöms som relevanta tekniker som alltså skulle vara möjliga att tillämpa även om det är osäkert vad kostnaderna skulle bli.

Tabell 1. Alternativa avskiljningstekniker som bedöms vara tekniskt möjliga att tillämpa även om osäkert vad kostnaden skulle bli

Teknik	Företag	Beskrivning
CSI processen	Saipem (CO2 Solution Inc) äger rättigheterna	• Skulle kunna kallas "Cold Potassium Carbonate" process. • Använder biokatalysator • Regenerering sker i vakuum med ca 80 °C varmvatten istället för lågtrycksånga. • Högre elbehov än MEA processen då vakuum i strippen men lägre än HPC processen, då ingen rökgaskompression. • Investeringskostnader förväntas vara högre än för MEA processen eftersom regenerering av lösningsmedlet sker i vakuum vilket kräver dyrare utrustning. • En referens i form av en industrianläggning finns vid Saint-Félicien massabruk i Québec, Kanada där den infångade koldioxiden används i ett närliggande växthus.
Oxyfuel-tekniken	Tekniken ägs inte av något företag och kan levereras av till exempel Alstom och IHI men också andra	• Oxyfuel-tekniken har framgångsrikt demonstreras i Vattenfalls 30 MW (termiskt) pilotanläggning i Schwarze Pumpe, Tyskland. • Oxyfuel-processen skulle kunna vara intressant för nya anläggningar. Befintliga är oftast inte tillräckligt täta för att förhindra luftläckage in i CO2 strömmen. • Det är möjligt att dimensionera en oxyfuelpannan för både oxyfuel- och luftdrift. Om elen är dyr så kan processen gå på luft som en kommersiell panna. • Om stora mängder syrgas skulle finnas tillgängligt från en närliggande elektrolysör förbättras förutsättningar för Oxyfuel-tekniken väsentligt
Membranteknik (PolyActive™)	Cool Planet Technologies Limited (CPT) med sin partner Helmholtz-Zentrum hereon GmbH (Hereon)	• Membranteknik för CO2 infångning har mognat och börjar bli tillgänglig i större skala. • CPT och Hereon har tecknat ett Memorandum of Understanding med Holcim Deutschland GmbH (Holcim) för att bygga och demonstrera en CO2 - avskiljningsanläggning vid Holcims Höver -cementverk, nära Hannover, baserat på Hereons PolyActive™ - membranteknik • Vid lyckad demonstration planeras att expandera anläggningen i två ytterligare faser som fångar upp 170 000 ton per år med start 2024 samt 1,3 miljoner ton per år från 2026. • Enligt CPT är elförbrukningen 0,5 MWh/t avskild CO2 (=1,8 MJ/kg) • Tekniken är modulbaserad och kapaciteten kan ökas genom att lägga till fler standardmoduler som körs parallellt. Renheten av CO2 kan ökas succesiv genom att lägga till fler moduler i serie.
Chilled ammonia process (CAP)	Tekniken har ursprungligen tagits fram av Alstom i Växjö och ägs numera av General Electric (GE)	• Absorptionsprocess som använder ammoniak som lösningsmedel. • Ångbehovet i återkokaren är lägre än i MEA processen (2,2 – 2,8 MJ/kg, CO2) men den fördelen äts mer eller mindre upp av den högre CAPEX och en mer komplex process. Det gäller särskilt för ett kraftvärmeverk som har driftuppehåll under sommar. CAPEX får då en ökad betydelse. • Ökat CAPEX kan härledas från behovet av utrustning som förhindrar utsläpp av ammoniak till atmosfären. • Kylbehovet är större för CAP processen än för MEA och HPC processen, vilket är en nackdel om inte kylning med kallt havsvatten finns tillgänglig.

4.4 UTÖKAD SYSTEMANALYS

Syftet med denna analys är att studera effekterna av att införa bio-CCS i olika omfattning, och i olika processutförande, på den svenska fjärrvärmesektorn och den nordiska elmarknaden. Med omfattning menar vi vilka anläggningar som utrustas med bio-CCS och med processutförande avser vi de så kallade HPC- och MEA-processerna. Som nämnts ovan så är den förra processen elintensiv medan den senare förbrukar både el och värme. I modellbeskrivningen kan ett kraftvärmeverk leverera tre nyttigheter: el, fjärrvärme och negativa utsläpp. Mellan de tre nyttigheterna finns vissa trade-off-effekter. Vilket driftläge som väljs i varje timme bestäms av elpris, alternativkostnad för fjärrvärmeproduktionen och de förpliktelser man har att leverera negativa utsläpp (till exempel från ett ekonomiskt incitament i form av det nu föreslagna omvända auktioneringsförfarandet). De två förra parametrarna är modellresultat och beror på omvärldsförutsättningarna medan den tredje, volymen av negativa utsläpp, ges som indata från en potentialuppskattning baserad på en simulering utan CCS. Antagandet är därmed att anläggningar med CCS fångar in 90 % av utsläppen under ett år. Analysen görs i ett framtida perspektiv, omkring 2035. Fjärrvärmesektorn förutsätts då vara helt fossilfri och det samlade fjärrvärmeunderlaget antas vara något lägre än idag till följd av ökad konkurrens på värmemarknaden och klimatförändringar.

I vår analys utgår vi från ett omvärldsscenario för den framtida utvecklingen som i allt väsentligt överensstämmer med Energimyndighetens "Elektrifieringsscenario" som avrapporterades under våren 2021. Scenariot förutsätter, på sikt, en omfattande elektrifiering inom framför allt industri och transporter.

4.4.1 Resultat

Infångad koldioxid och total förändring av el- och värmeproduktion

Total infångad koldioxid (biogen och fossil) i MEA-scenariot är 11,2 Mt och den biogena infångningen uppgår till 8,8 Mt. För HPC gäller samma siffror för kraftvärmeverk men den tekniska potentialen i bioeldade hetvattenpannor uppgår till 3,7 Mt och total infångning ökar då till 14,9 Mt varav 12,4 Mt blir biogen infångning.

Total produktion av el och värme i MEA-fallet är i princip samma som för referensfall utan CCS medan i fallet med HPC minskar levererad el med 2 TWh samtidigt som återvunnen värme gör att värmeleveransen från kraftvärmeverk + CCS-process ökar med 1,9 TWh.

Förändrad bränsletillförsel och direkta utsläpp

Då energi går åt till att fånga in koldioxid minskar den leverans av värme och el som tidigare nyttjades i el- och fjärrvärmesystemen. Detta bortfall av leverans måste ersättas med annan produktion. Inom fjärrvärme görs detta med andra lokala värmeproduktionsenheter exempelvis hetvattenpannor eller värmepumpar. Bortfallet av elleverans kan ersättas med lokala enheter men också med elimport från Europa. Vilket produktionsslag (i Sverige eller utanför) som behöver producera mer el bestäms av rådande lastsituation, överföringsbegränsningar och tillgängligheten hos olika kraftslag

Resultaten visar att den extra värme som kraftvärmeverken levererar och som uppstår vid HPC-drift ersätter primärt spillvärme och värmepumpar. Ersättningen av hetvattendrift är begränsad på grund av att denna produktion är delvis tvingad då det i detta scenario även finns ett CCS-åtagande för hetvattenpannor. Åtagandet resulterar i att hetvattenpannor måste producera för att generera negativa utsläpp. I MEA-processen blir skillnaden mellan med och utan avskiljning för kraftvärmeverk på aggregerad nivå nästan oförändrad, detta beror på att den värmeleverans som försvinner i avfallskraftvärmeverken i många system vägs upp av biokraftvärmeverk som antingen går med högre produktion för samma tidsperiod eller som växlar över från kraftvärmedrift till mer hetvattendrift. En övergång till mer hetvattendrift görs för att undvika att ännu dyrare produktionsslag ska behöva starta och leverera värme. En annan förklaring är att vid tidpunkter när kraftvärmeverk går på dellast finns det kapacitet att öka den totala pannlasten för att både tillgodose fjärrvärmebehovet och energibehovet i CCS-processen.

Direkta utsläpp

De direkta fossila utsläppen från den el och värmeproduktion som ersätter den energi som går till CCS-processen uppgår till 550 kton för MEA-fallet och 770 kton för HPC-fallet. I omvärldsscenarioet finns det fortfarande en del fossil elproduktion kvar, denna finns främst på kontinenten och är förhållandevis dyr. Att ta bort produktion/skapa ett behov av el i Sverige resulterar i modellen då i utsläpp på andra ställen inom det nordeuropeiska elsystemet. HPC-fallet skapar ett högre behov av ersättande elproduktion vilket driver upp dess ökade direkta fossila utsläpp. Nettoförändringen för koldioxidbalansen är en minskning, om man tar hänsyn till de direkta utsläppen och reducerar med biogena (negativa) utsläpp. För MEA blir nettominskningen av koldioxid 8,2 Mton (tidigare 8,8) för HPC 11,6 Mton (12,4).

Skillnader vid införande av CCS på bio- och avfallsanläggningar

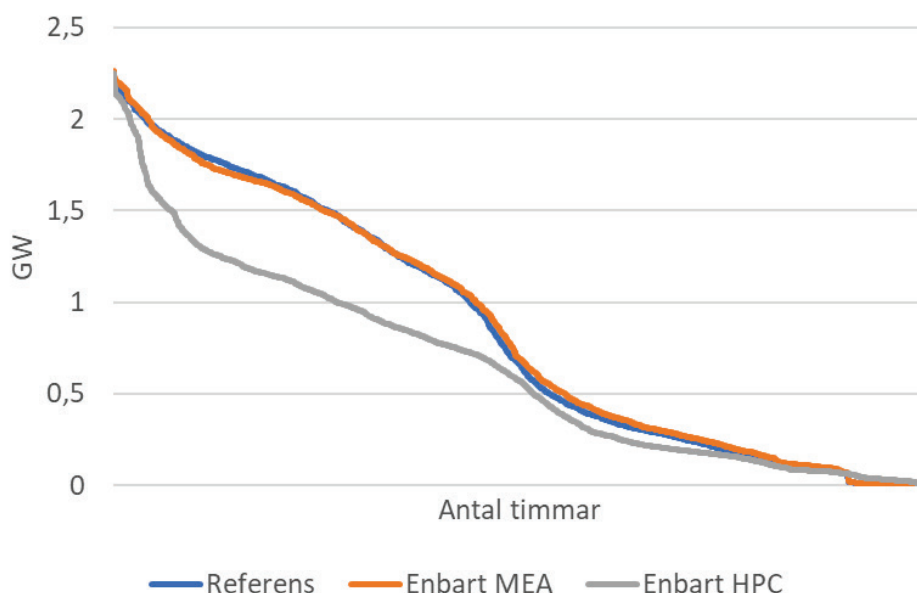
Förutom beräkningsfallen med MEA och HPC på alla anläggningar har två fall som behandlar skillnader med CCS på olika bränsletyper studerats, nämligen CCS på enbart avfallsförbränning eller biobränsle. I dessa scenarier används MEA som CCS-process förutom på enstaka anläggningar som uttryckt en satsning på HPC-tekniken.

Total mängd infångad CO₂ blir störst om CCS introduceras hos enbart avfallsanläggningar (6,6 Mt) jämfört med bioeldade anläggningar (4,6 Mt). För enbart biogen infångad koldioxid (som skapar negativa utsläpp) är potentialen större för bioeldade anläggningar (4,6 Mt jämfört med 4,0 Mt biogen CO₂ i avfallsanläggningar).

Påverkan på kraftvärmens elproduktion

I diagrammet nedan är produktionen av el från kraftvärmeverken sorterad i fallande ordning för tre scenarier, referensfallet utan CCS, CCS på alla anläggningar (MEA) och CCS på alla anläggningar (HPC). Denna typ av diagram berättar inte i tid när produktionen är på en viss nivå, men visar under hur många timmar, för ett år, som elproduktionen ligger på olika nivåer. Längst till vänster visas hur mycket kraftvärmeverken producerat som max och till höger vad som är lägsta

uteffekten. Däremellan fås ett stort antal olika elproduktionsnivåer beroende på olika last- och produktionssituationer.



Figur 6. Varaktighetsdiagram för elproduktion från kraftvärmeverk. Med (MEA samt HPC) och utan koldioxidavskiljning.

Det är intressant att **elproduktionen vid referensfallet (det vill säga en framtid helt utan bio-CCS) och MEA är relativt lika sett över tid**. Då diagrammet inte visar samma tidpunkt för varje serie betyder detta att kraftvärmeverken i scenariot med MEA "tar igen" elproduktion under vissa, i referensfallet, lågproduktions-tider. Att maximal produktion är relativt lika indikerar att när systemet behöver el som mest väljer modellen att avstå CCS, mer om det nedan under "Perioder med ansträngd elbalans". HPC-anläggningarna drar så pass mycket el att det konsekvent blir lägre elproduktion jämfört med referens och MEA-scenario, och kraftvärmeverken har inte möjlighet att täcka upp den el som behöver användas för att nå 90 % infångning på årsbasis.

Perioder med ansträngd elbalans

I dessa scenarier antas CCS-processen vara så pass flexibel att den kan reagera på elprisförändringar, detta betyder att modellen vid höga elpriser kan välja att avstå CCS och vid låga priser välja att öka sin CCS (jämfört med referensfallet).

Om el måste styras till CCS-processen under denna tidsperiod skulle effektbalansen på grund av CCS bli sämre. Men det visar sig i stället att i de två scenarierna med HPC och MEA så fortsätter kraftvärmeverken att producera el likt referensfallet under de ansträngda perioderna. Åtagandet om 90 % infångning på årsbasis får alltså inte någon effekt på den mest ansträngda tidsperioden. Vidare syns ingen märkbar ökning av spetsproduktion under andra ansträngda perioder vilket indikerar att även timmar som är ansträngda (men inte de mest utmanande) inte genererar mer spetsproduktion på grund av ett CCS-åtagande av denna form.

CCS i fjärrvärmesystemens påverkan på priset av el

Elpriset ökar i båda beräkningsfallen med MEA och HPC, men mest med HPC, detta då den processen är mer elintensiv än MEA. Elpriset ökar med 1 - 2 % för MEA-processen beroende på elprisområde och ökningen är 3 - 5 % för HPC jämfört med referensen.

Utnyttjningstider

I referensfallet är utnyttjningstiden för hela kraftvärmekollektivet för referensfallet på ca 3700 h. Detta är alltså en blandning av bio och avfallskraftvärmeverk, där avfallseldade verk oftast har en längre utnyttjningstid då dessa i princip alltid går som basproduktion samt bidrar med en extra resurs i form av avfallshantering (som det finns behov av året runt).

Med CCS fås en ökad total utnyttjningstid av kraftvärmeverkens pannor. I scenariot med enbart MEA på kraftvärmeverk ökar den med 1000 timmar och för scenariot med HPC är ökningen 420 timmar. Anledningen till en större ökning av total utnyttjningstid för MEA är på grund av att denna process kräver mer värme. CCS skapar ny efterfrågan på värme och el vilket förlänger kraftvärmeverkens drifttider.

Med CCS minskar dock nyttjandet av turbin och fjärrvärmekondensor, då ånga i panncykeln istället nyttjas i CCS-processen. Sammantaget har pannans ångcykel fått en längre utnyttjningstid men individuella komponenter ser en minskad utnyttjningstid då ånga i stället för att gå genom en turbin passerar helt eller delvis till CCS-processen.

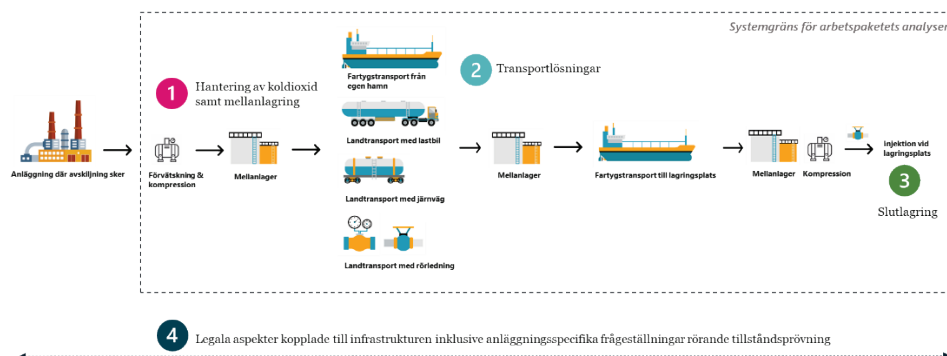
5 AP3. Infrastruktur för transport och lagring

Effektiv infrastruktur för transport och lagring av koldioxid kommer att vara en förutsättning för att realisera infångning av koldioxid som en klimatåtgärd. Att få infrastrukturen på plats och därigenom kunna realisera tekniken fullt ut kräver stora investeringar, där samverkan mellan de aktörer som vill nyttja tekniken sannolikt blir avgörande.

Syftet med arbetspaket 3 har varit att analysera hur infrastrukturen för transport och lagring av koldioxid kan samordnas och successivt byggas ut i samverkan mellan fjärrvärmeföretagen och andra aktörer. En stor tyngdpunkt i detta arbetspaket har legat på dialog mellan fjärrvärmeföretagen och externa aktörer och intressenter inom området genom intervjuer, workshopar och seminarier.

Diskussioner har förts med alltifrån stora industriaktörer med egna utsläpp av antingen biogen eller fossil koldioxid, logistikaktörer, hamnar och infrastrukturägare till myndigheter, miljöjurister och forskare. Fokus i arbetspaketet har legat på att diskutera, analysera och visa på hur samverkan kan minska kostnaderna för aktörerna samt vad som krävs för att realisera samverkan kring infrastrukturen. Systemgränsen för analyserna i detta arbetspaket framgår av Figur 7.

Infrastrukturkedjan för transport och lagring av koldioxid



Figur 7. Systemgränserna för analyserna inom arbetspaket 3. Analyserna och de workshopar som har genomförts har behandlat 1) Hantering av koldioxid samt mellanlagring, 2) Transportlösningar, 3) Slutlagring samt 4) Legala aspekter kopplade till infrastrukturen inklusive anläggnings-specifika frågeställningar rörande tillståndsprövning enligt svensk miljölagstiftning.

Överlag har det varit ett stort intresse från externa aktörer att medverka i dialogen och diskutera frågorna kopplat till infrastrukturen för transport och lagring av koldioxid inklusive de potentiella möjligheterna till samverkan kring denna. Utifrån diskussionerna och de analyser som har genomförts inom arbetspaketet har ett antal övergripande slutsatser dragits, vilka sammanfattas under ett antal rubriker.

5.1 DET FINNS MÅNGA OLIKA TYPER AV SAMVERKAN KRING INFRASTRUKTUR FÖR TRANSPORT OCH LAGRING AV KOLDIOXID

Samverkan kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid kan ske på olika nivåer och utifrån olika drivkrafter. Dels kan det handla om att man ser ett behov av att samlas kring frågor och utmaningar som behöver lösas, och tillsammans verka för att lyfta dessa för att kunna realisera investeringar och/eller samarbeten. Dels kan det handla om samverkan kring praktiska delar i infrastrukturen, t.ex. att identifiera lämpliga, gemensamma utskeppningshamnar eller att undersöka de potentiella förutsättningarna för lagring av koldioxid inom svenskt territorium. Men det främsta incitamentet för samverkan handlar om att identifiera potentiella möjligheter till kostnadsbesparingar för att få till infrastrukturen.

Goda logistiska förutsättningar gör investeringar i infrastruktur mer attraktiva, och ett flertal fjärrvärmeverk och industrier med stora koldioxidutsläpp ligger längs den svenska kusten, vilket underlättar utbyggnad av infrastruktur och skapar förutsättningar för samarbeten. Eftersom det handlar om betydande investeringar för enskilda företag är samverkan kring infrastrukturen, både mellan fjärrvärmeföretag och tillsammans med andra industrier och aktörer, sannolikt avgörande för utbyggnad av infrastrukturen. Den övergripande frågan handlar därför om hur man kan identifiera samarbeten som kan innebära minskade kostnader för deltagande aktörer, jämfört med att aktörer på egen hand löser infrastrukturen kopplat till transport från enskilda anläggningar. Även ekonomi för lagring är en viktig fråga. Stor lagringspotential och erfarenhet finns i Norge, men möjligheter kan även finnas i Storbritannien, Nederländerna och Danmark. Hur de potentiella förutsättningarna för lagring inom Sveriges gränser ser ut och eventuellt kan realiseras är också en fråga där samverkan mellan aktörer och stat kommer att bli nödvändig.

Av de diskussioner som har förts inom arbetspaketet mellan fjärrvärmeföretagen och de externa aktörer som har bjudits in till dialog är det tydligt att intresset för samverkan generellt är stort. Initialt handlar det om en vilja att kunna samlas och få upp frågorna på bordet och utifrån det identifiera gemensamma problem att lösa och synergier att identifiera och realisera. Diskussionerna har visat på att viljan finns till samverkan mellan svenska aktörer, men att man ser flera utmaningar eftersom det ännu finns stora osäkerheter på olika nivåer kring bio-CCS-kedjan. En fråga som har lyfts vid mer än ett tillfälle är risken för att man istället blir konkurrenter, t.ex. om stödpengar, lagringsplatser och auktionssystem. Det handlar också om olika aktörers skilda drivkrafter och incitament, olikheter i värdekedjan hos olika typer av verksamheter och inte minst tidplaner som ska synkas i flera led för att få hela kedjan på plats.

5.2 OLIKA TRANSPORTSLAG HAR SINA FÖRDELAR RESPEKTIVE NACKDELAR

Skeppstransport sker i vätskefas vid låg temperatur. Det är flexibelt – i och med att fartygen kan flyttas mellan anläggningar och lagringsplatser/terminaler – och kostnadseffektivt för relativt moderata volym (1 - 2 Mt/år) över längre sträckor (>100 km). Fordrar två fasändringar (vid anläggningen och inför injektion) vilket

kostar energi och fördyrar. Skeppstransport fordrar även mellanlager vilket höjer kostnaderna ytterligare. Branschen har lång erfarenhet av att frakta CO₂ i vätskefas inom livsmedelsindustrin. I dagsläget saknas tillgång till förnybara fartygsbränslen på den kommersiella marknaden, även om det just nu sker stora satsningar på metanoldrivna fartyg hos de stora rederierna. Dagens tilltänkta bränsle (LNG) bör på sikt ersättas med fossilfria alternativ.

Tågtransport sker i vätskefas vid låg temperatur. Tågtransport är helt beroende av spåranslutning men om den finns så kan tåg transportera relativt stora mängder (med svenska mått mätt, dvs åtminstone kring en miljon ton per år) snabbt och effektivt över längre sträckor (flera hundra km). Fordrar två fasändringar (vid anläggningen och inför injektion) vilket kostar energi och fördyrar. På samma sätt som skeppstransport så fordrar även tågtransport tillgång till mellanlager vilket höjer kostnaderna. Svenska tågtransportörer har ingen erfarenhet av att frakta trycksatt koldioxid i vätskeform men däremot har de bred erfarenhet av att frakta kemiska produkter som t ex flygbränsle. Merparten av all tågtrafik i Sverige är idag elektrifierad, men det finns fortsatt behov av elektrifiering av tågtrafiken på t.ex. gods- och industrispår till hamnar och terminaler. Det sker dock idag stora satsningar på helelektrifiering av all logistik till/från flera av våra stora svenska hamnar.

Lastbilstransport sker i vätskefas vid låg temperatur. Det är flexibelt och särskilt användbart i områden med komplicerad omgivning (industriområden, städer) men endast relevant för mindre volymer på kortare sträckor. Även lastbilstransport fordrar två fasändringar (vid anläggningen och inför injektion) samt mellanlager vilket höjer kostnaderna. Branschen har stor erfarenhet av att frakta olika trycksatta och/eller kryogena gaser och vätskor. Dagens lastbilstransporter kan köras på bl.a. HVO och biogas och det sker dessutom en snabb utveckling vad gäller eldrivna lastbilar.

Rörtransport sker främst vid högt tryck i superkritisk fas dvs vid ca 73 bar. Rörtransport innebär investeringar i en fast infrastruktur men det är mycket kostnadseffektivt för stora volymer över relativt korta sträckor. Fordrar endast en fasomvandling (till superkritisk fas vid anläggningen) och inget mellanlager, dvs koldioxiden kan transporteras hela vägen från anläggningen och injekteras rakt in i reservoaren, vilket bidrar till den höga kostnadseffektiviteten. Har en relativt hög energiförbrukning (el) vid kompressionen upp till superkritisk fas men i övrigt låg energiförbrukning och potential för låga CO₂-utsläpp (beroende på el-mixen). Under mycket korta sträckor (några få kilometer), t ex inom industriområden från infångningsanläggning till förvätskningsanläggning (som t ex kan vara gemensam för flera närliggande anläggningar som i Cinfracap-projektet³⁶), kan transport i gas- eller vätskefas vara fördelaktigt, bl a därför att det minskar behoven för omlastningar. Detta behöver emellertid utredas i varje enskilt fall.

I Tabell 2 sammanfattas fördelar och nackdelar med respektive transportslag.

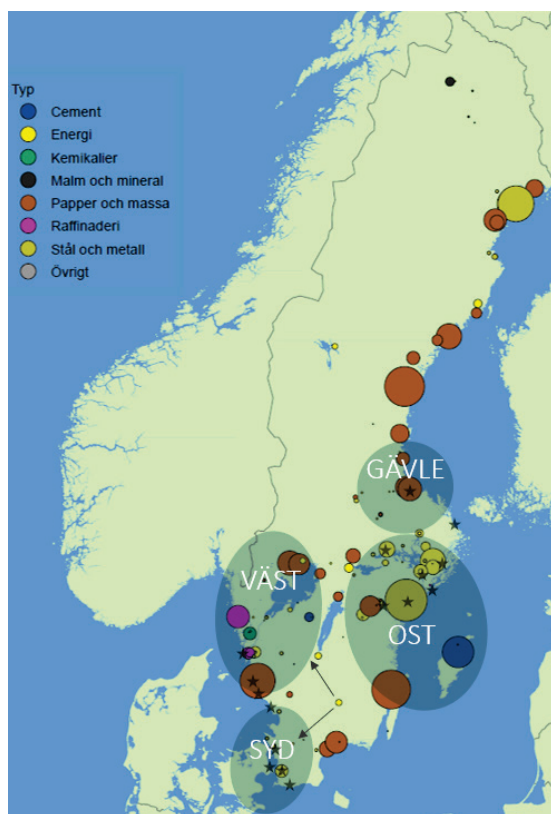
³⁶ <https://www.goteborgshamn.se/hamnens-projekt/cinfracap/>

Tabell 2. Fördelar och nackdelar med olika transportslag relevanta för transport av koldioxid i Sverige.

	CO ₂ -tillstånd under frakten	Sannolik tillämpning	Flexibilitet	CO ₂ frakterfarenhet	Antal fasomvandlingar	Behov av mellanlager	Nuvarande CO ₂ -utsläpp
Fartyg 	Som vätska vid lågt tryck och låg temperatur	Moderata volymer/långa avstånd	Hög	God	2	Ja	Hög
Lastbil 	Som vätska vid lågt tryck och låg temperatur	Små volymer/korta avstånd	Hög	Låg	2	Ja	Låg
Tåg 	Som vätska vid lågt tryck och låg temperatur	Moderata volymer/medel och långa avstånd	Låg	Ingen	2	Ja	Låg
Rör 	I superkritisk fas (samma som vid injektion i lagringsreservoaren)	Stora volymer/korta och medellånga avstånd	Låg	God	1	Nej	Låg

5.3 PROJEKTET HAR IDENTIFIERAT FYRA POTENTIELLA KLUSTER FÖR SAMVERKAN KRING INFRASTRUKTUR

Projektet har identifierat fyra huvudsakliga kluster för lokal samverkan kring olika delar av logistikkedjan. De fyra klustren är Västkusten/Vänern, Skåne/Danmark, Ostkusten/Mälardalen samt Gävleområdet. De fyra klustren valdes baserat på lokalisering och storlek av punktutsläpp från såväl fjärrvärmesektorn som från andra sektorer, på möjlig samverkan kring lokal logistik samt på möjlig samverkan kring utskeppning av koldioxid till lagringsplats. På kort sikt är lagring i Norge det absolut mest sannolika alternativet, eftersom Norge genom Northern Lights-projektet i dagsläget har kommit längst i planeringen att erbjuda externa parter lagringsutrymme. I projektet har vi även tittat på andra alternativa lagringsplatser, t.ex. i Danmark (se även i Figur 8).



Figur 8. Fyra studerade kluster i projektet. Teckenförklaring enligt figur.

Klustret Västkusten/Vänern har stora fördelar med gynnsam lokalisering av Göteborgs Hamn och ett flertal industrier som kan samverka lokalt. Projektet CinfraCap detaljanalyserar just dessa möjligheter och de har kommit långt i planeringen. Göteborg kan även fungera som en "hubb" för samordning av koldioxid även från anläggningar längre bort. Vid Vänern och längs Göta Älv finns exempelvis ett flertal anläggningar som skulle kunna transportera koldioxid till Göteborg. Här finns dock begränsningar i fartygsstorlek. Tågtransport kan då vara ett alternativ. Även andra anläggningar kan ansluta till Göteborg genom transport med fartyg, rörledning eller tåg/lastbil. Flera fjärrvärmeföretag ser detta som rimligt alternativ, även anläggningar som ligger relativt långt bort från Göteborg. Transport av koldioxid från Göteborg till lagringsplats kan alltså samordnas mellan ett flertal anläggningar, vilket innebär betydligt lägre kostnader. Som exempel har beräkningar i projektet visat att kostnaden för fartygstransport (inklusive mellanlager men exklusive förvätskning) till den norska lagringsplatsen utanför Kollsnes sjunker från ca 530 SEK/ton till ca 160 SEK/ton om den transporterade koldioxidvolymen ökar från 100 kton/år till 1 Mton/år³⁷. Förutom nämnda lagringsplats finns även ett antal andra tänkbara lagringsplatser inom rimliga avstånd, i exempelvis Danmark. Vissa av dessa skulle även kunna nås med rörledning, vilket kan sänka kostnaderna ytterligare.

Klustret Skåne/Danmark är kanske främst intressant på grund av potentiell samverkan med danska anläggningar inklusive tänkbar transport med rörledning till en akvifär som kan nås från Själland (Havnsø). Lagring i denna akvifär ligger förmodligen ganska långt fram i tiden, mer rimligt på kort sikt är sannolikt fartygstransport till andra lagringsplatser i exempelvis Norge eller Danmark. I Danmark pågår flera initiativ för att utreda möjliga lagringsplatser samt infrastruktur för lokal och regional samverkan. CMP (*Copenhagen Malmö Port*) är engagerade i detta arbete och kan komma att bli en länk mellan Sverige och Danmark. Både i fallet med samverkan kring koldioxidlogistik med danska anläggningar och vid utskeppning från hamnen i Malmö. Kemiras hamn i Helsingborg är ett annat alternativ som har nämnts inom klustret som en tänkbar hamn. Klustret innebär i övrigt inte samma möjligheter till lokal samverkan som i Göteborg, då anläggningarna ligger relativt utspridda i förhållande till varandra. Samverkan inom detta kluster handlar därför sannolikt främst om utskeppning och lagring.

Klustret Ostkusten/Mälardalen innehåller ett flertal anläggningar varav de flesta är fjärrvärmeverk. De ligger dock relativt utspridda så det finns inte så stora möjligheter till lokal samverkan. Samverkan handlar istället om att minska kostnaderna för utskeppning till lagringsplats genom att dela fartyg på ett optimalt sätt. Fartygstransport från anläggningar belägna kring Stockholmsområdet och Mälardalen till Kollsnes i Norge tar mellan 6 - 7 dygn, vilket innebär stora

³⁷ Hamnkostnader har beräknats baserat på kostnadsuppgifter från olika hamnar i Sverige och utgör en stor del av kostnaderna (opex) för skeppstransport. Om skeppen har kort avstånd till en lagringsplats (kort anloppstid, dvs många hamn-anlopp) så har hamnkostnaderna beräknats uppgå till uppemot 50% av skeppens opex och närmare en tredjedel av totala årliga kostnaderna. Det är osäkert hur hamnkostnader påverkas av fasta anlopp över flera år men det är grund till att anta att de är betydligt lägre än den fasta kostnad som har påförts de olika transportsystem beräknat inom detta projekt.

omkostnader för mellanlager. Vid transport genom Mälaren finns dessutom begränsningar i maximal nyttolast. Den specifika kostnaden minskar med större fartyg, men ett ökat antal fartyg har istället fördelen att omloppstiden och därmed kostnaden för mellanlager minskar. Det mest ekonomiskt optimala behöver alltså inte nödvändigtvis vara största möjliga fartyg. Som exempel har Chalmers inom ramen för ZERO-projectet beräknat kostnader för samarbete kring fartygstransport mellan Värtaverket, Cementa Slite och Södra Mönsterås. Beräkningarna visar att det mest optimala ur kostnadssynpunkt är att dessa tre anläggningar delar på två fartyg. Det ger lägre totala kostnader jämfört med antingen varsitt fartyg eller ett enda gemensamt fartyg. Kostnadsbesparingen behöver dock fördelas mellan de olika samarbetande anläggningarna, baserat på bland annat totalflöde av koldioxid och anlop till hamnar. För kluster Ostkusten/Mälardalen är det alltså troligt att samverkan främst kommer att ske kring fartygstransport. Antalet fartyg kommer bland annat att avgöras av hur väl olika anläggningars CCS-planer tajmar med varandra samt hur koldioxidflödena matchar över året mellan olika anläggningar. Möjligen skulle samarbete också kunna underlättas om en tredjepartsaktör tar ansvar för logistiken att hämta upp koldioxid från olika anläggningar och gemensamt transportera till lagringsplats.

Kluster Gävle är främst intressant då det finns två stora skogsindustriella anläggningar med både höga koldioxidflöden och mycket gynnsamma lägen. Förutom dessa anläggningars egna hamnar finns även Gävle hamn som tänkbart alternativ. Det finns även två fjärrvärmelanläggningar lokalt i detta kluster samt ett antal anläggningar som skulle kunna ha Gävle som tänkbar utskeppningsort. Lokal samverkan ur ett fjärrvärmeperspektiv är troligen begränsat till de två lokala anläggningarna som skulle kunna samverka med de större industrierna. Annars ter sig största samverkansvinsten vara gemensam fartygstransport från hamn till lagringsplats. Som ett exempel har beräkningar i projektet visat att den specifika kostnaden för transport från Gävle hamn till slutlagringsplats för Vattenfall Uppsala och Mälarenergi minskar kraftigt genom att dela fartyg med t ex den större anläggningen Korsnäsverken. Kostnaden skulle då minska från ca 600 SEK/ton om de använder varsitt fartyg till ca 400 SEK/ton jämfört med om de delar fartyg med Korsnäsverken (se fotnot 37). Men det är viktigt att understryka även i detta fall att Korsnäsverken då inte är kompenserad för sin betydligt högre andel av totallasten. Detta skulle minska Korsnäsverkens kostnad något och öka Vattenfalls och Mälarenergis kostnad något.

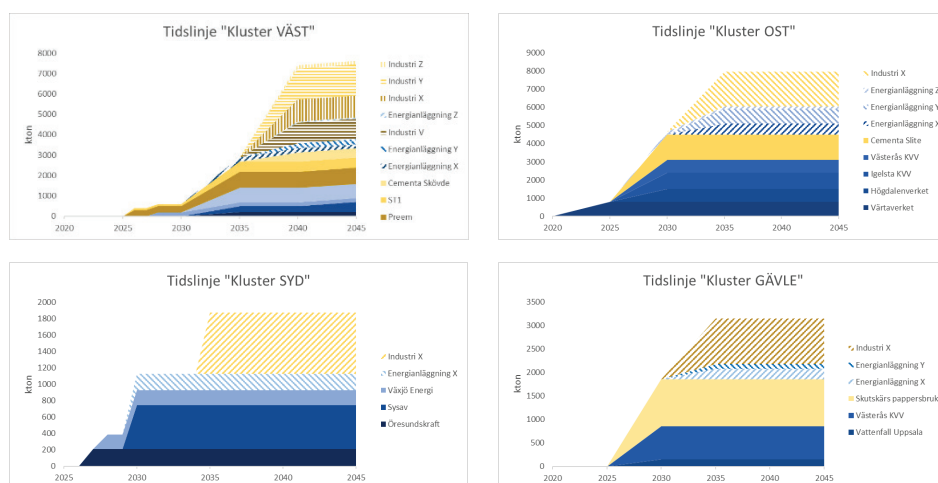
Sammanfattningsvis ser vi inom projektet främst tre möjliga samverkansalternativ:

1. En hubb i Göteborg varifrån koldioxid skeppas ut till lagringsplats. Koldioxiden kan komma från såväl lokala anläggningar som kan samverka kring lokal logistik, men också från mer avlägsna anläggningar som transporterar koldioxiden till Göteborg med rörledning, fartyg, tåg eller lastbil.
2. En hubb i Malmö med gemensam transport av koldioxid till med fartyg till Norge alternativt med fartyg eller rörledning till Danmark. I fallet med fartyg påminner denna lösning om alternativ 1 ovan. Även hamn i Helsingborg har lyfts som ett tänkbart alternativ, men det behöver utredas vidare. Om koldioxiden kan transporteras med rörledning från Malmö ända till lagringsplats i Danmark finns potentiellt kostnader att spara.

3. Ett antal fartyg från Ostkusten där samverkan främst avser att kapa kostnader för fartygstransport och mellanlagring genom att optimera antal fartyg. Denna lösning skulle kunna underlättas av en tredjepart som samordnar.

5.4 DET FINNS POTENTIellt STORA VOLYMER KOLDIOXID SOM BEHÖVER TRANSPORTERAS OCH LAGRAS I SVERIGE

Ett flertal anläggningar, både inom fjärrvärmesektorn och andra branscher, har planer på att avskilja och lagra koldioxid. Det gäller såväl koldioxid av biogent som fossilt ursprung. I projektet har vi analyserat hur olika anläggningars planer ser ut över tid. Det är större sannolikhet att samverkansfördelar realiseras om planerna matchar i tid. I nedanstående figurer sammanfattas ungefärliga tidslinjer för olika anläggningars planer på CCS, inkluderande både fjärrvärmearläggningar och andra industriella anläggningar.



Figur 9. Tidslinjer för olika anläggningars ungefärliga planer för CCS. Blå fält avser energianläggningar och gula industriella anläggningar. Skuggade fält visar exempel på några tänkbare ytterligare anläggningar som skulle kunna ansluta till respektive kluster. Tidslinjerna ska ses som en illustration och inte någon exakt potential.

5.5 MÅNGA FAKTORER INVERKAR PÅ OM DET ÄR LÖNSAMT ATT SAMVERKA ELLER INTE

Kostnaden för förvätskning (och/eller kompression) av koldioxid är starkt volymberoende, dvs den specifika kostnaden per ton minskar betydligt vid ökande volym. Samtidigt är det få infångningsanläggningar som ligger så nära varandra att de kan uppnå denna volymeffekt eftersom det fordrar att koldioxiden måste fraktas i gasfas (långt tryck, 2 bar) eller vätskefas (mellantryck, runt 18 bar) från infångning fram till förvätskningsanläggningen eller kompressorn. Samma effekt gör också att den specifika kostnaden ökar om förvätskningsanläggningen måste hantera variabla flöden eftersom effektbehov dimensioneras enligt det maximala flödet som går genom systemet vid varje tidpunkt.

Kostnaden för skeppstransport minskar betydligt vid större volym, dvs om t ex flera anläggningar kan dela skepp. Om skeppets omloppstid ökar så ökar dock kostnaden för mellanlager, dvs om skeppet t ex behöver anlöpa flera hamnar för

att samla ihop volym så ökar kostnaden för mellanlager. Det är osäkert hur stora skepp som kan användas bl a beroende på skeppets djupgående och hamnens möjlighet att ta emot olika storlekar. Northern Lights³⁸ ser på möjligheterna att använda 20 000 - 30 000 m³ stora skepp. I detta projekt har vi utgått från skepp uppåt till 40 000 m³ vilket t ex motsvarar transport av ca 1,75 Mt/år från Skutskär till Kollsnes i Norge, om vi utgår från att flödet fördelar sig jämt över 8 000 timmar per år. Likaså, ju längre avstånd till lagringsplatsen desto större kostnader för mellanlager på grund av ökad omloppstid. Till exempel är det ca tre gånger så långt från Göteborg till Kollsnes som från Göteborg till Kalundborg, där Havnsøreservoaren ligger³⁹. Rörtransport har hög CAPEX men låg OPEX, vilket leder till att den positiva kostnadseffekten kan bli betydande vid ökande volym (skeppstransport har framför allt hög OPEX). Beroende på avstånd så finns det en tröskelvolym där kostnaden minskar mycket snabbt, dvs ju kortare avstånd desto lägre volym fordras för att nå denna nivå. Från västkusten till Havnsø är det så pass kort avstånd att rörtransport kan bli kostnadseffektivt, men det kommer kräva ganska stora volymer (över 5 Mt/år enligt beräkningar gjorda i Nordiccs-projektet⁴⁰). Även kostnaden för tågtransport kan leda till lägre kostnader vid samarbeten och större volymer. Det kommer dock kräva att alla anläggningar är spåranslutna fram till ett huvudspår.

5.6 DEN TEORETISKA LAGRINGSPOTENTIALEN ÄR INTE DENSAMMA SOM DEN VERKLIGA LAGRINGSKAPACITETEN

Geologisk lagring av koldioxid i någon form utgör den sista delen i hela kedjan från avskiljning och infångning av koldioxid vid anläggning samt transport till lagringsplats. Globalt sett är den teoretiska lagringspotentialen enorm. Den faktiska (effektiva) och praktiska lagringskapaciteten är däremot betydligt mindre och det finns dessutom en stor osäkerhet i storleken på denna. I de flesta fall kommer det att krävas omfattande seismologiska undersökningar, bormning och kanske även testinjektion innan injektions- och lagringskapacitet kan fastställas vilket både är kostsamt och tidkrävande. Till exempel anges kostnaden för en ny brunn i Northern Lights-projektet (dvs i norska delen av Nordsjön) till NOK 1 140 miljoner (2020 års priser)⁴¹.

Det finns lång erfarenhet av lagring av koldioxid kopplat till utvinning av olja, och det är också i anslutning till denna industri som det nu pågår ett antal stora projekt i framför allt Nordsjöområdet för att lagra koldioxid. Utöver detta finns ett stort antal planerade lagringsprojekt.

De lagringsalternativ som förefaller mest rimliga för svensk del är lagring i akvifärer och eventuellt uttömda olje- och gasfält i vår närhet. Det finns ett flertal pågående eller planerade lagringsprojekt i Sveriges närhet som skulle kunna vara aktuella för lagring av koldioxid från anläggningar i Sverige, och som har diskuterats inom arbetspaketet, se Figur 10.

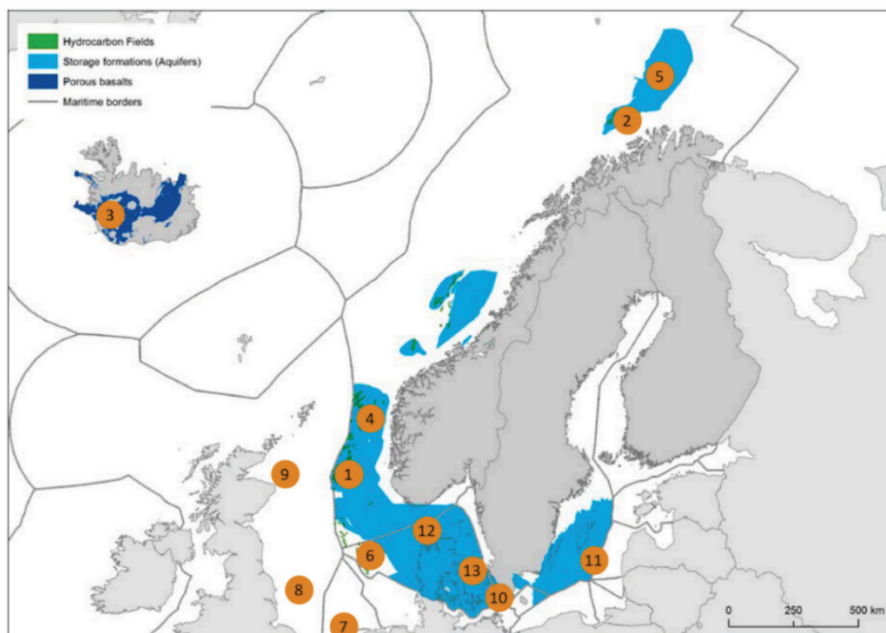
³⁸ <https://northernlightscs.com/>

³⁹ Havnsø är inte heller certifierad som lagringsplats än.

⁴⁰ <https://www.sintef.no/en/projects/2011/nordiccs-nordisk-ccs-kompetansesenter/>

⁴¹ Stortingsmelding 33 "Langskip – fangst og lagring av CO₂"

<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20192020/id2765361/>



Figur 10. Siffrorna representerar några av de kända lagringsmöjligheter som antingen är pågående, planerade eller potentiella i Sveriges närhet. De klarblå fälten visar kända akvifärer i Norden (utan bedömning av lämplighet för koldioxidlagring), gröna fält kolvätefält, mörkblå fält porös basaltbergart på Island. Källa: Kartan är från NORDICCS (2014).

Under projektet har fjärrvärmeaktörerna, samt externa aktörer som projektet haft dialog med, flera gånger uttryckt en förhoppning om en framtida möjlighet till koldioxidlagring i svensk berggrund. I maj 2021 genomfördes en workshop inom ramen för projektet på temat koldioxidlagring där de potentiella utmaningarna kopplat till de framtida eventuella möjligheterna till koldioxidlagring i Sverige diskuterades. Förutom den stora kostnad som denna typ av infrastruktur-satsningar kommer att kräva lyfte SGU behovet av mer noggranna och fördjupade platsundersökningar, för att kunna utreda den faktiska och praktiska potentialen för lagring i svensk berggrund.

Utöver detta handlar det om att Sverige måste bygga upp kompetens samt undanröja vissa legala hinder. I Sverige, jämfört med våra nordiska grannländer Norge och Danmark, saknar vi dessutom den praktiska erfarenheten och kompetensen, men också befintlig infrastruktur, som hör samman med olja- och gasutvinning. Länder med lång erfarenhet av detta har ett stort försprång då man ska bygga upp pilotanläggningar, borrhål och testinjekteringar för koldioxidinlagring under havsytan.

Legala hinder som behöver undanröjas rör bl.a. Offshore-direktivet, Helsingforskonventionen och CCS-direktivet. Dessutom finns en del oklarheter i svensk lagstiftning vad gäller frågan om hantering av gas och olja som påträffas vid ej forskningsbaserade koldioxidlagringsprojekt. SGU lyfter detta som en viktig fråga att hantera för att det inte blir en hämsko för framtida satsningar på svensk koldioxidlagring. Bland ser SGU inte det som realistiskt med en svensk etablerad lagringsplats för av koldioxid förrän tidigast någon gång in på 2030-talet (förutsatt att man sätter igång med processen idag).

Utöver detta finns fortfarande viss osäkerhet kring social acceptans runt denna typ av infrastruktur, inte minst vad gäller själva lagringen av koldioxid under havsytan eller på land. Det kan därför vara en fördel att Sverige inte går först utan istället lär sig av de erfarenheter som andra länder bygger upp kring denna typ av infrastruktur. Däremot har diskussionerna inom projektet tydligt visat på ett stort intresse och stora förhoppningar om att på sikt kunna lagra koldioxid även inom Sverige, framför allt för att säkra upp lagringskapacitet. En fråga som har dykt upp under diskussionerna har handlat just om farhågan vid en "övertäckning" av de lagringsplatser som är först ut, och hur svenska aktörer ska agera för att inte bli utan lagringsplats.

5.7 LAGAR OCH REGELVERK MÅSTE HÄNGA MED

I gällande lagar och regelverk, både inom svenskt och internationellt lagrum, finns fortfarande utmaningar att ta hänsyn till och lösa för att verksamhetsutövare ska kunna tillämpa bio-CCS-tekniken och få infrastrukturkedjan på plats. Som en del i detta arbetspaket har det genomförts två översiktliga analyser av status på detta område, både vad gäller svensk miljölagstiftning och andra svenska regelverk samt regelverk på EU-nivå och internationell nivå som berör och påverkar bio-CCS-kedjan.

Slutsatserna från dessa analyser pekar på ett antal områden som kräver behandling inför en framtida implementering av bio-CCS, det handlar bland annat om hur negativa utsläpp ska beräknas och redovisas genom hela kedjan för bio-CCS, hur moratoriet kring geo-engineering inom ramen för konventionen om biologisk mångfald kopplar till bio-CCS samt frågeställningar rörande bilaterala avtal mellan Sverige och lagringsstat. Till dags dato omfattas negativa utsläpp inte av något europeiskt ramverk, varken utsläppshandelssystemet eller direktivet om mätning och rapportering. Det finns därför fortfarande stora osäkerheter kring hur negativa utsläpp ska hanteras och rapporteras.

Vad gäller tillståndsprövningar anger flera aktörer som har intervjuats inom ramen för projektet risken för långa handläggningstider och utdragna tillståndprocesser som en mycket kritisk fråga. Den största utmaningen handlar om det faktum att det rör sig om en ny process/teknik som inte tidigare har prövats hos länsstyrelser och i mark- och miljödomstol. Det blir därför svårt att bedöma ramarna för tillståndsansökan samt att veta hur domstolen kommer döma fallen. Det finns inte heller någon upparbetad handläggning kring dessa frågor hos myndigheter som kan ha synpunkter i processen, vilket kan innebära att tillståndprocessen tar längre tid. Prövning av ny teknik innebär att det saknas erfarenhet från tidigare prövningar vad gäller miljökonsekvenser och villkor. Merparten av dessa svårigheter minskar när ett par tillståndsprövningar genomförts.

Den pågående Miljöprövningsutredningen⁴² tittar på frågor om hur tillståndprocessen kan bli enklare och snabbare i syfte att underlätta för en grön omställning. Vid workshop 5 redogjorde huvudsekreterare Erika Ekman närmare om utredningens arbete och hon betonade då att de tittar på ändringar som får

⁴² <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/kommittedirektiv/2020/08/dir.-202086/>

generell effekt för grön omställning, inte tekniskspecifik, och att nivån på miljöskyddet kommer att kvarstå.

Generellt anses det negativt om en avskiljningsanläggning skulle bli föremål för omprövning av hela verksamheten snarare än att man kan gå in med en ansökan om ändringstillstånd. Vad som avgör huruvida det räcker med ändringstillstånd eller inte är *graden* av förändring av verksamheten/anläggningen som en bio-CCS-anläggning anses medföra. Detta är en fråga som bör tas upp tidigt i dialogen med tillsynsmyndigheterna.

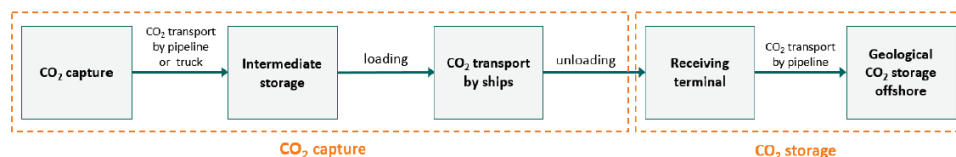
En annan viktig fråga här hur man inom en infrastrukturkedja hanterar tillståndsfrågorna, dvs. vem som äger tillstånden. Inom framför allt CinfraCap-projektet avser de gemensamt förhandlande parterna att utveckla en verksamhet som del av en affärskedja, där vardera parter ansvarar för att söka tillstånd för vardera delar av projektet som de är ansvariga för. Detta är inget som är nytt för just bio-CCS. Även om anläggningen är en del av en affärskedja så ansvarar den som har en tillståndspliktig anläggning på sin mark för att tillstånd söks. Tillsyns- och prövningsmyndigheter/domstolar kan hantera tillståndsprocesser där anläggningar är starkt beroende av andra anläggningar. I områden med industriell symbios, som exempelvis det i Stenungssund, har var och en av företagen sitt tillstånd trots att dessa ibland behöver ändras med tajt tidsplan för att få kedjan att fungera.

5.8 VEM HAR ANSVAR FÖR KOLDIOXIDEN?

En central och återkommande fråga i projektet handlar om hur man ska hantera ansvaret för koldioxiden längs med infrastrukturkedjan.

I mars 2020 bad den norska regeringen EU-kommissionen om ett förtydligande beträffande ansvarsfrågan. I sin förfrågan redogjorde de för sin tolkning enligt citat och figur nedan.

“... it is our understanding that the capture operator in the CCS demonstration project will be liable for any leakages of captured CO₂, until the CO₂ is transferred to the storage operator at the receiving terminal. Furthermore, according to Annex IV of the MRR, section 21 A, it is our understanding that the capture operator's permit and monitoring plan must cover the capture installation, transport by pipeline and/or trucks to the intermediate storage at the harbour, and the transport by ship to the receiving terminal at Øygarden. This is illustrated in Figur 11 below.



Figur 11. Transfer of responsibility regarding emitted CO₂.

The receiving terminal will be part of the storage operator's permit. The storage operator must have a permit and monitoring plan covering both the receiving terminal, the transport by pipeline and the storage activity.”

EU-kommissionen återkom med sitt svar i juli 2020 och bekräftade den norska regeringens tolkning:

“The installations remain of course responsible for any CO₂ released into the atmosphere and for surrendering the corresponding amount of allowances - the measurement of the losses would indeed take place at the point of delivery.”

Detta betyder härmed att EU i dagsläget menar att ansvaret för eventuella koldioxidläckage ligger på anläggningsägaren fram till dess att den lastats av vid slutlagringsplatsen.

Som en del av EU-kommissionens Fit for 55-paket av den 14 juli 2021 finns dock som förslag att ansvaret för utsläppen av koldioxid under transporten ska ligga hos den som ansvarar för transporterna och inte den som äger/driver infångningsanläggningen.

6 AP4. Acceptans och lagar samt regelverk

Avskiljning och geologisk lagring av biogen koldioxid, bio-CCS, har succesivt fått en mer framskriven funktion i svensk klimatpolitik. AP4 har syftat till att ”öka förståelsen för hur olika intressentgruppers inställningar till bio-CCS kan påverka förutsättningarna för genomförande” (projektbeskrivningen, s. 3). På så vis kompletterar AP4 den analys som görs i AP1 där fokus också legat på styrverkan och kostnadseffektivitet. Regeringen har gett Energimyndigheten i uppdrag att sjösätta ett stödsystem för bio-CCS med start 2022. Nedan sammanfattas delresultat från pågående forskning vid Linköpings universitet och RISE om hur svenska nyckelaktörer för bio-CCS ser på potentialen i olika styrmedel samt hur de anser att stödsystemet bör utformas. Syftet med rapporten är att identifiera potentiella dilemman och målkonflikter för att bidra till ökade möjligheter till proaktiv problemhantering genom systemdesign. Energimyndighetens uppdrag är begränsat till att utreda ett stödsystem baserat på omvända auktioner eller fasta ersättningsnivåer, vilket också utgör huvudfokus i denna rapport.

6.1 VAL AV STYRFORM FÖR ATT SKAPA INCITAMENT FÖR BIO-CCS

Styrmedelsanalys omfattar vanligtvis studier av styrverkan, kostnadseffektivitet och genomförbarhet.⁴³ AP4 är designat för att bidra med kunskap om genomförbarhet i termer av acceptans för olika styrformer bland nyckelaktörer för bio-CCS i Sverige. Baserat på intervjuer med runt 40 respondenter i näringslivet, politiken och den nationella förvaltningen är det uppenbart att i princip samtliga aktörer önskar sig förenklingar i regelverket samt långsiktigt stabila ekonomiska incitament som grund för beslut att investera i bio-CCS.

Av de styrmedel som förslås i AP1 är intresset störst för att utveckla EU:s system för handel med utsläppsrätter till att också omfatta bio-CCS. Hur detta kan åstadkommas i praktiken beskrivs av Rickels et al.⁴⁴ genom forskning som delfinansierats av AP1 och AP4. Spridningen i åsikter om vilken typ av styrmedel som bör utvecklas för att skapa förutsättningar att bedriva bio-CCS på affärsmässiga grunder är dock stor. Flera alternativ till EU:s handelssystem lyfts, varav ett separat EU-baserat handelssystem utgör ett av huvudalternativen. Flera aktörer upplever sig också brända på systemet med kvotplikt och certifikatshandel för förnyelsebar el i Sverige och Norge. De uttrycker stor tveksamhet till att stödja politik som syftar till att skapa ett liknande system för bio-CCS. Utmaningarna med att identifiera ett lämpligt betalningskollektiv för en kvotplikt ses också som en stor utmaning.

⁴³ Fridahl, 2019. Incitamentsstrukturer för bioenergi med koldioxidavskiljning och -lagring i Sverige och Europeiska unionen: Underlagsrapport till Klimatpolitiska vägvalsutredningen (M 2018:07).

⁴⁴ Rickels, Proelß, Geden, Burhenne, och Fridahl, 2021. Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading.

I princip samtliga nyckelaktörer anser att det framväxande svenska stödsystemet bör förstås som temporärt. Många aktörer anser att stödsystemet bör utformas så att det skapar trygghet för investeringar i ett begränsat antal anläggningar i en begränsad tidsperiod. Det råder stor samsyn kring att det kommer vara svårt att övertyga både politiken och allmänheten om att allmänna medel ska avsättas för att skala upp investeringar i bio-CCS till högre nivåer i ett längre perspektiv. För detta ändamål anser i princip samtliga respondenter att det behövs ett för staten kostnadsneutralt – eller åtminstone mindre kostsamt – styrmedel samt att EU utgör en lämplig styρνivå.

6.2 HANDLINGSREKOMMENDATIONER

På basis av de intervjuer som gjorts i delprojektet om acceptans för olika styrformer dras slutsatserna att det finns goda skäl till att:

1. Förespråka auktioner som huvudalternativ till stödsystemets utformning. Auktioner har stöd hos en stor majoritet av de intervjuade aktörerna med motiv att öka kostnadseffektiviteten och på så vis bygga långsiktig acceptans för stödsystemet.
2. Vara tydlig med utropad auktionsvolym eller tillgänglig budget men presentera den som flexibel (införa ett mjukt tak). Det mjuka takets existens bör kommuniceras men spannet i flexibiliteten bör vara dolt för att minimera strategisk budgivning.
3. Inkludera ett dolt pristak för att avlasta risk från staten. Pristakets existens bör kommuniceras men nivån bör hållas hemlig för att undvika strategisk budgivning.
4. Välja en auktionsvolym eller ett budgettak som gynnar konkurrens bland aktörerna och som inte utesluter större aktörer från att delta på grund av att deras CCS-potential överstiger efterfrågan hos auktionären.

Vidare föreslås att politiken:

1. Specificerar grundprincipen för stödsystemet. Syftar stödet till att introducera och demonstrera bio-CCS i olika branscher eller att uppnå högsta möjliga volym till lägsta möjliga kostnad. Inriktningen kan få stor betydelse för lokaliseringen och koncentrationen av bio-CCS.
2. Tydligt kommunicerar om staten stödjer utvecklingen av svensk bio-CCS i syfte att bidra till att fylla kvoten för kompletterande åtgärder.
3. I den mån ambitionen är att skapa kompletterande åtgärder, specificerar om stödet främst syftar till att bygga kapacitet att bidra till kvoten år 2045 eller om det också finns en önskan om att bokföra bio-CCS som kompletterande åtgärd redan 2030.
4. Förtydligar volymmålen för stödsystemet alternativt hur stor långsiktig budget stödsystemet disponerar.

6.3 DILEMMAN OCH POTENTIELLA MÅLKONFLIKTER

I rapporten identifieras också flera *potentiella* målkonflikter. Om målkonflikter uppstår är delvis beroende på hur målsättningen med stödsystemet preciseras. Potentiella målkonflikter kan uppstå mellan:

1. Näringslivets önskan att handla med minusutsläpp på en internationell reglerad marknad och statens eventuella önskan om att kunna bokföra minusutsläpp i det svenska utsläppsregistret.
2. Näringslivets önskan att handla med minusutsläpp på en svensk marknad för kompensation av fossila koldioxidutsläpp och statens önskan om att primärt reservera utsläppsutrymmet för 2045 (10,7 MtCO₂eq) till sektorer med höga utsläpp av metan och lustgas.
3. Näringslivets önskan att kunna sälja minusutsläpp till svenska aktörer med stora punktutsläpp av fossil koldioxid—som täcks av EU:s system för handel med utsläppsrätter, ETS—och det faktum att klimatmålet för 2030 enbart täcker den icke handlande sektorn:
 - a. Om staten vill att bio-CCS ska bidra till att fylla kvoten för kompletterande åtgärder 2030 (3,7 MtCO₂eq) kan bio-CCS inte användas för kompensation av utsläpp som täcks av ETS.
 - b. Företag som täcks av ETS tillåts inte att använda bio-CCS-krediter för att kompensera för fossila utsläpp i syfte att undvika krav på överlåtelse av utsläppsrätter.
4. Näringslivets önskan om att engagera sig i klimatkompensation på oreglerade marknader och en statlig önskan om att bibehålla omställningstrycket på att fasa ut fossila utsläpp.
5. Näringslivets önskan om hög flexibilitet i leverans av kontrakterad bio-CCS och statens eventuella önskan att bokföra bidraget från bio-CCS som kompletterande åtgärd vid specifika målår (2030, 2040 och 2045).

6.4 ETT MÖJLIGHETSFÖNSTER ATT AGERA

I skrivandets stund finns ett stort momentum kring bio-CCS. Flera av de intervjuade näringslivsrespondenterna ser fram emot att staten ska sjösätta ett stödsystem. Intresset är stort och växande. Fler intresserade tillkommer varje månad. Störst intresse tycks finnas bland kommunalägda bolag, delvis pådrivet genom ägardirektiv.

Att sjösätta stödsystemet redan 2022 är väldigt ambitiöst och har åtminstone delvis politiska motiv. Delar av politiken signalerar att en ambitiös tidplan hänger ihop med riksdagsvalet 2022 och risken för att en politisk majoritet för ett stödsystem urholkas. Att sjösätta systemet och påbörja processen för tilldelning av kontrakt innan nästa val anses öka förutsättningarna för att systemet ska bestå även i framtida mandatperioder.

Även om klimatfrågan kräver hög ambitionsnivå och goda exempel uttrycker många av näringslivsaktörerna att 2022 möjligen är en lite väl ambitiös målsättning, även om initiativet i grunden applåderas. Risken finns naturligtvis att en tidig sjösättning av ett auktionsbaserat stödsystem kommer vara kostnadsdrivande. En tidig auktion kan innebära att för få aktörer är redo att lägga bud för att skapa konkurrens i auktionen. Denna risk kan tala för en mindre offensiv första auktionsrunda. Samtidigt är det viktigt att balansera risken för höga kostnader mot risken för att en för låg auktionsvolym undergräver det positiva momentum som idag omgärdar bio-CCS. Signalvärdet som ges genom första auktionsrundan kommer troligtvis vara väldigt stort. En låg auktionsvolym kan

leda till ett tappat momentum. Det talar för en offensiv första auktionsrunda, även om det kan medföra något ökade totalkostnader för staten.

Avslutningsvis bör påminnas om att denna rapport haft som syfte att identifiera dilemman och målkonflikter för att bidra till en proaktiv design av det svenska stödsystemet för bio-CCS. Bortom dessa dilemman och potentiella målkonflikter finns också en rad möjligheter. I rapporten lyfts bland annat potentialen i att bio-CCS kan bidra till stärkt konkurrenskraft på marknader för el, värme, pappersprodukter och transportbränslen. På vissa marknader finns det rimligtvis dessutom möjlighet att utveckla segment som kan vara villiga att betala en premie för produkter som producerats vid anläggningar som installerat bio-CCS. Det finns också möjligheter att finansiera bio-CCS genom internationell efterfrågan på kolsänkor. Stater eller företag i tredje land kan tänkas vilja köpa svenska minusutsläpp, exempelvis baserat på kvalitetskriterier, mot att de förs ut ur det svenska utsläppsinventariet eller annulleras i Sverige. Utländska företag skulle potentiellt också kunna vara intresserade av att delfinansiera svensk bio-CCS även om minusutsläppet bokförs i det svenska utsläppsinventariet. Sådan finansiering kan syfta till att bidra till en global klimatnytta, oavsett vart minusutsläppet bokförs.

Det är i dagsläget alldeles för tidigt för att fastslå exakt vilka marknader för minusutsläpp som kommer att växa fram och hur dess kommer att regleras politiskt. Denna rapport vittnar dock om att svenska aktörers intresse för att bio-CCS ska kunna bidra till det globala klimatarbetet är stort och växande. Möjligheten att, genom väl utformad politik, bidra till att realisera delar av den tekniska potentialen för svensk bio-CCS har aldrig varit större.

I sammanhanget bör noteras att kunskapen om lämpliga styrformer, liksom politiken kring koldioxidavskiljning och -lagring, är i snabb utveckling. Intervjuerna för denna analys genomfördes i perioden januari till april 2021 och bör förstås i ljuset av den snabba utveckling av kunskap och politik, vilken rimligtvis påverkar nyckelaktörernas acceptans för olika styrformer.

Rapporten om aktörspreferenser publicerades i april 2021 och kan laddas ned via: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1548418/FULLTEXT01.pdf>

6.5 SAMMANSTÄLLNING AV KUNSKAPSLÄGET KRING GÄLLANDE REGELVERK FÖR BIO-CCS I SVERIGE

De regelmässiga förutsättningarna för bio-CCS i Sverige har förbättrats avsevärt de senaste dryga decenniet. Exempelvis har EU antagit CCS-direktivet som reglerar ansvar för lagring av koldioxid, Internationella sjöfartsorganisationen IMO har antagit en resolution som tillåter export av koldioxid i syfte att lagras under havsbotten, FN:s klimatpanel har förtydligat att bio-CCS kan och bör bokföras som ett negativt utsläpp och Europeiska kommissionen har klargjort att de tolkar EU:s handelsdirektiv som att skeppstransport av koldioxid är att betrakta som likställt med rörtransport och därmed kompatibelt med CCS. Trenden inom politiken är att utveckla regelsystemet i en mer tillåtande riktning, till stöd för CCS inklusive bio-CCS.

Flera regelmässiga hinder kvarstår dock. En del utgör mindre barriärer, andra är av mer betydande karaktär. Nedan listas de utmaningar som bedöms vara av störst betydelse för bio-CCS i Sverige. I dagsläget bidrar dessa hinder till ökad osäkerhet, vilket försvårar investeringsbeslut. Aktörer inom politik, näringsliv och förvaltning, som vill förbättra förutsättningarna för bio-CCS i Sverige, bör därför trycka på för en revidering av regelsystemet.⁴⁵

1. Hela teknikkedjan
 - a. Moratoriet i konventionen om biologisk mångfald tillåter inte klimatrelaterade geoengineering-aktiviteter som kan påverka biologisk mångfald. Infångning och lagring av koldioxid från fossila bränslen undantas uttryckligen från moratoriet, men inte bio-CCS, vilket därmed kan utgöra ett hinder för svensk bio-CCS.
2. Avskiljning:
 - a. Det saknas regler för hur biogen koldioxid ska mätas och rapporteras vid anläggningar som tillämpar bio-CCS, både inom Sverige och EU. Ett regelverk som kan tillämpas inom det framväxande svenska stödsystemet för bio-CCS är dock under utformning och förväntas baseras på årlig rapportering av massbalanser.
3. Gränsöverskridande transport:
 - a. Via ett tillägg i Londonprotokollet tillåts transport av koldioxid för lagring i annan stat, men tillägget har ännu inte trätt i kraft. Transport av koldioxid kräver därför en provisorisk tillämpning av tillägget, vilket i sin tur ställer krav på ett bilateralt avtal mellan berörda stater. En ytterligare förenkling av regelsystemet för gränsöverskridande transport vore att föredra.

⁴⁵ Frågor om tillståndprocesser och frågor om politik för att skapa incitament för bio-CCS hanteras i andra rapporter inom forsknings- och samverkansprojektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn*.

1. Lagring i närtid:
 - a. CCS-direktivet skiljer inte på koldioxidmolekylernas ursprung. Läckage av biogen koldioxid kan därför kräva kompensation genom överlåtande av utsläppsrätter inom EU:s system för utsläppshandel vilket i sin tur kan försvåra och fördyra bio-CCS.
2. Potentiellt svenskt lager på längre sikt:
 - a. I dagsläget tillåter inte Helsingforskonventionen lagring av koldioxid i Östersjön. För att möjliggöra lagring av koldioxid i Sverige krävs att Helsingforskonventionen ändras eller att en resolution som medger en tolkning som tillåter geologisk lagring av koldioxid i havsbotten antas.
 - b. Några av de möjliga svenska lagringsplatserna sträcker sig till territorium eller ekonomiska zoner utanför Sverige och potentiellt även utanför Europeiska unionens territorium. Detta utgör ett problem då geologisk lagring utanför Europeiska unionens territorium är otillåten.
 - c. Olje- och gasfynd regleras i Offshoredirektivet. Eventuella olje- och gasfynd som påträffas vid undersökning och användning av geologiska lagringsplatser i havsbotten regleras därmed inom ramen för detta direktiv, vilket är något som måste hanteras vid anläggande av svenska lagringsplatser för koldioxid.
 - d. Regeringskansliet har utrett ett förbud av utvinning av fossila bränslen. Om det nuvarande förslaget omsätts i lag kommer det att försvåra för geologisk lagring av koldioxid i Sverige.

7 AP5. Hållbarhetsaspekter

Avskiljning, transport och lagring av koldioxid, CCS från den engelska förkortningen av "carbon capture and storage", i anslutning till kraftvärmeanläggningar ger möjlighet att reducera klimatpåverkan från el- och värmeproduktion. Samtidigt som koldioxid från förbränningen av bränsle fångas in och lagras, uppstår annan påverkan inom en rad hållbarhetsaspekter. Detta är både positiv påverkan som jobbskapande och anpassning av samhället till minskad klimatpåverkan, men även negativ påverkan, såsom reducerade mängder el och i många fall värme som energitjänster ut från kraftvärmeanläggningen med CCS jämfört med samma anläggning utan CCS, på ekosystem samt även utsläpp av växthusgaser vid transporter och annan verksamhet. Lagar och regleringar säkerställer att verksamheters påverkan ligger inom nivåer som är acceptabla. Den sammantagna hållbarhetsbedömningen är mer strategisk och avser en sammantagen bedömning av ett brett spektrum av kvantitativa och kvalitativa aspekter, risker och möjligheter.

7.1 SYFTE

Syftet med denna delrapport är att utifrån ramverket för Agenda för Hållbar utveckling 2030 analysera hur värdekedjan för CCS-lösningar i Sverige inom fjärrvärmesektorn faller ut i ett hållbarhetsperspektiv. Analysen utgår från Agenda 2030 och Förenta nationernas (FN) 17 hållbarhetsmål (Sustainable Development Goals, SDG). Dessa mål skapar ett ramverk för hur vi kan betrakta olika dimensioner av hållbarhet. De 17 hållbarhetsmålen är sammansatta (integrerade) och kan diskuteras enskilt men skall alltid betraktas som en del av alla 17 målen – hållbarhetsbedömningen är alltid en sammansatt bedömning av alla målen gemensamt. Ett mål, kan vidare inte kompensera för ett annat mål utan det är en helhet som skall betraktas.

7.2 ANALYTISK ANSATS

Koldioxidavskiljning är en lösning att fånga koldioxid vid en utsläppskälla och därefter transportera och lagra in koldioxiden i geologiska formationer för många tusen år. Genom infångningen och sedan lagring av koldioxiden fås en netto-påverkan på mängden kol i biosfären. I de fall som koldioxid från fossila material fångas in fås en "nära noll koldioxidemission" och i de fall koldioxid från biobaserade material fångas in fås en "negativ koldioxidemission" från bränsle- och förbränningssteget. Fokus för hållbarhetsanalysen i denna delrapport ligger på påverkan från infångning och associerade hjälpsystem och värdekedjan fram till den slutliga lagringen av koldioxid.

En konventionell kraftvärmeanläggning idag producerar *el och värme som energitjänster*. I en kraftvärmeanläggning med CCS kommer även energitjänsten koldioxidinfångning läggas till el- och värmetjänsterna. Tillägget med koldioxid-

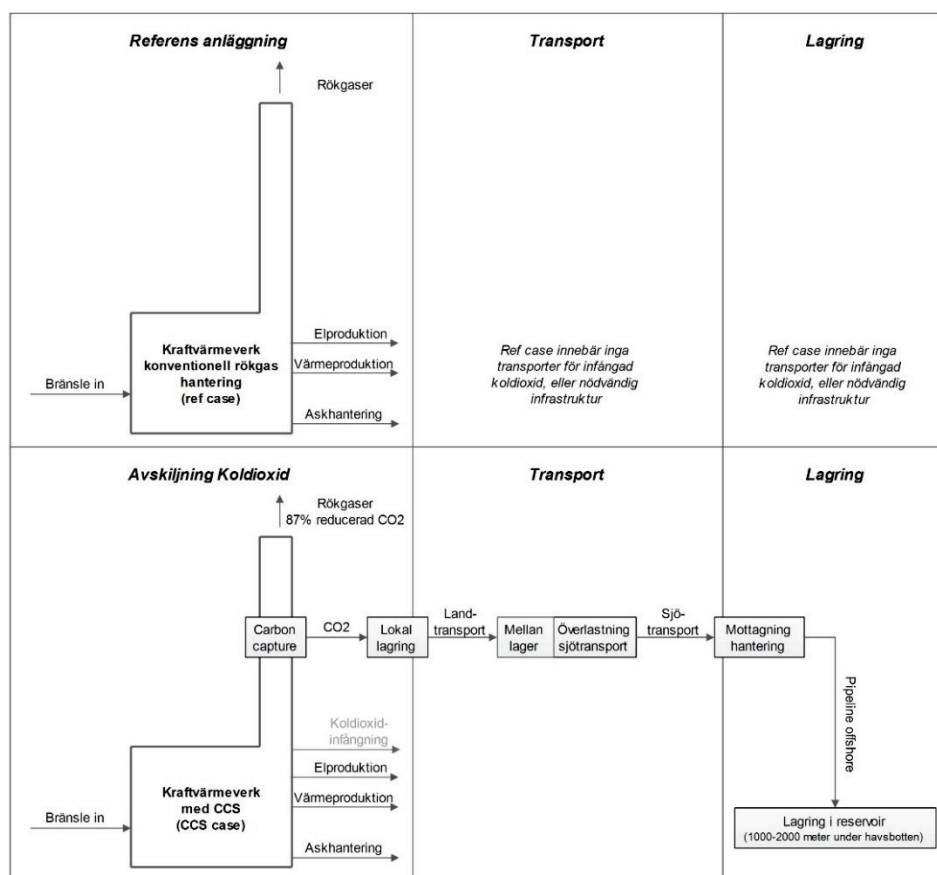
infångning kommer reducera mängden el och många fall värme ut från kraftvärmeanläggningen med CCS jämfört med samma anläggning utan CCS. Denna ansats är utgångspunkten för hållbarhetsanalysen. För att kunna erhålla komparativa resultat kopplat till värdekedjan för CCS hålls bränslet in i anläggningen konstant. Därmed kan *skillnaden* i effekterna på energitjänster från referensanläggning och anläggning med CCS studeras, samt den associerade hållbarhetspåverkan längs värdekedjan.

7.3 BIO-CCS

CCS är en kedja bestående av tre länkar:

1. avskiljning av koldioxid,
2. transport av den avskilda koldioxiden till en lagringsplats, och
3. långsiktig lagring av koldioxiden på lagringsplatsen.

Bio-CCS innebär att CCS tillämpas på koldioxid med biogent ursprung, såsom vid förbränning av biomassa. I och med att denna koldioxid har ursprung i biogent kol och därmed del av kolets naturliga kretslopp kommer nettoeffekten bli ett negativt utsläpp.



Figur 12. En förenklad bild av kraftvärmeanläggning med CCS och efterföljande steg för transport och slutförvar samt av referensfall för komparativ analys av hållbarhetspåverkan. I referensfallet där anläggningen inte har någon koldioxidinfångning kommer det inte att uppstå någon transport eller behov av lagring.

För analysen hålls bränslet in i anläggningen konstant för att skapa en analys hur de facto själva CCS-anläggningen och efterföljande värdekedja påverkar hållbarhetsmålen⁴⁶.

7.4 KVANTIFIERING ENERGI- OCH CO₂-BALANSER SAMT RESURSFÖRBRUKNING

7.4.1 Typanläggning utan respektive med CCS

Två anläggningstyper har betraktats och beräkningar har gjorts för dessa utan respektive med CCS.

Koldioxidavskiljningen förbrukar energi och kommer därmed ha en inverkan på de energitjänster av el och värme som erhålls från anläggningen jämfört med referensanläggning. I Tabell 3 framgår hur el- och värmeproduktion påverkas baserat på ca. 90% avskiljningsgrad mellan en anläggning med CCS och motsvarande referensanläggning utan CCS. Hänsyn är tagen till energibehov för förvätskning av koldioxiden. Bränsletillförseln är densamma för båda fallen.

Tabell 3. Påverkan på energitjänster av CCS

	Skillnad mellan bio-CCS- och referensanläggning	
	Koldioxidavskiljning med MEA	Koldioxidavskiljning med HPC-processen
Elproduktion	-19%	-67%
Fjärrvärme	-31%	+25%
Koldioxidavskiljning	+90%	+90%

Likartade relationer har utöver detta antagits för avfallseldat kraftvärmeverk. En avsevärd skillnad är dock att ca. en tredjedel av koldioxiden i avfallsfallet är av fossilt ursprung.

7.4.2 Koldioxidtransport och -lagring

De nyckeltal som har använts vid beräkningar av energiförbrukning och koldioxidutsläpp som uppstår i samband med transport av koldioxid redovisas i Tabell 4.

För koldioxidmarginal vid elproduktion har ett värde valts som representerar koldioxidmarginalen år 2030 i ett scenario med hög klimatambition. Det valda scenariot kan anses förenligt med en utveckling som omfattar utbyggnad av bio-CCS i Sverige. För vägtransporter har 66 procent biodiesel antagits, vilket är i linje med reduktionsnivåer till 2030 för bensin och diesel som har beslutats av riksdagen.

⁴⁶ Skulle tex elenergiproduktionen hållas konstant fås effekter i uppströms miljöpåverkan som ligger utanför CCS anläggningens påverkan. Åtgärder för att hantera den minskade energiproduktionen till förmån för den skapade koldioxidinfångningstjänsten kan hanteras på olika vis och avser total energisystemsanalys med åtgärder på tillförsel, slutanvändning och kombinationslösningar.

Tabell 4. Antaganden energiåtgång och beräkning av koldioxidutsläpp för olika transportalternativ.

	Lastbil	Järnväg	Fartyg	Pipeline
Energiförbrukning (kWh/tkm)	0,4	0,04	0,04	0,25
Emissionsfaktorer (kgCO ₂ /kWh)	Nordisk elmix	CO ₂ -marginal	Fossil diesel	
	0,09	0,35	0,27	

Transport av flytande koldioxid är förknippad med generering av avkokningsgas. Avkokningsgasen är den ånga som produceras under transport på grund av rörelsers påverkan på lastinnehållet samt på grund av temperaturskillnaden mellan lasten och omgivningen. Graden av avkokning påverkas vidare även av transportavstånd och tankdesign mm. Det saknas exakta värden i litteraturen avseende avkokningsgraden per dag för koldioxidtransport, men approximationer i spannet 0,12 - 0,15 procent har föreslagits. I föreliggande studie har en daglig avkokning om 0,15 procent antagits.

I beräkningarna har koldioxidlagring vid det norska Northern Lights-projektet antagits. Uppgifter om koldioxidutsläppen på livscykelbasis för transport och lagring för det norska fullskaleprojektet har använts för att beräkna utsläppsnivån specifikt för transport och lagring räknat från omlastningsterminalen i Öygarden.

Översiktsartiklar som har analyserat resultat från LCA-studier av CCS visar att byggnation och avveckling av infrastruktur för CCS (inklusive avskiljning, transport och lagring) ger en försumbar inverkan på växthusgasutsläppen. Ur ett livscykelperspektiv motsvarar dessa utsläpp i storleksordningen 0,2 till 0,3 procent av geologiskt lagrad koldioxid.

Ett antal illustrativa transport- och lagringskedjor har definierats och för dessa har energiförbrukning och koldioxidutsläpp beräknats.

De fall som har beräknats är:

- Exempel 1: Transport från ort i Mälardalen med lastbil 15 mil till hamn på Östkusten, fartygstransport 182 mil till Northern Lights omlastningsterminal i Öygarden. Transport till koldioxidlagret och geologisk lagring.
- Exempel 2: Transport från ort i Mälardalen med järnväg 38 mil till Göteborgs hamn, fartygstransport till Northern Lights omlastningsterminal i Öygarden. Transport till koldioxidlagret och långsiktig lagring.
- Exempel 3: Transport från ort i Mälardalen fartyg 164 mil till Northern Lights omlastningsterminal i Öygarden. Transport till koldioxidlagret och långsiktig lagring.
- Exempel 4: Transport från ort i Göteborgsregionen med pipeline 15 mil till Göteborgs hamn, fartygstransport 65 mil till Northern Lights omlastningsterminal i Öygarden. Transport till koldioxidlagret och långsiktig lagring.

För fartygs- och lastbilstransporter har returresa med tom last antagits. Beräkningarna visar att koldioxidutsläpp förknippade med transport och lagring varierar i intervallet 4 - 9 procent av mängden geologiskt lagrad koldioxid. För avfalls-CCS utgör koldioxidutsläpp förknippade med transport- och lagringsaktiviteter 4,5 - 14 procent av lagrad biogen koldioxid.

Några slutsatser som kan dras när det gäller utsläpp förknippade med transporter är att lastbilstransport ger stora bidrag till koldioxidutsläpp även vid relativt korta transportavstånd, vilket hänger samman med en hög energiförbrukning per tonkilometer. Tågtransport framstår som ett koldioxideffektivt transportalternativ. Fartygstransport ger märkbara koldioxidutsläpp men har en betydande potential för reduktion genom alternativa drivmedel.

7.5 HÅLLBARHETSANALYS

Här nedan diskuteras slutsatser som kan dras baserat på SDG-analysen och implikationer av dessa ur ett hållbarhetsperspektiv. SDG analysen har utgått från påverkan på varje enskilt hållbarhetsmål utifrån direkt/indirekt samt potentiell positiv/risk för negativ påverkan. För varje enskilt mål har flera aspekter kunnat lyftas, men en sammanvägd bedömning per mål har utvecklats. Presentationen följer de tre stegen i Figur 12.

7.5.1 Kraftvärmeanläggning

Genomförande av CCS i kraftvärmeanläggningar innebär relativt referensfallet att koldioxid fångas in som annars hade släppts ut i atmosfären. För biogen koldioxid medför detta att den tas bort ur biosfärens kretslopp. Detta ger direkt positiv påverkan framför allt på hållbarhetsmål 13 - *Bekämpa klimatförändringarna* genom att bidra till att begränsa halten av koldioxid i atmosfären. Detta positiva bidrag till hållbarhetsagendan är själva drivkraften för investeringen. Infångningen av koldioxid kräver en rad efterföljande steg för att resultatet skall bli en netto påverkan på mängden växthusgaser i biosfären.

Ytterligare en tydlig direkt positiv påverkan fås på hållbarhetsmålen 9 - *Hållbar industri, innovationer och infrastruktur* och genom bidraget till införandet av ny teknik som är nödvändig i en värld med stränga växthusgasrestriktioner.

En direkt negativ påverkan uppstår i relation till hållbarhetsmål 7 - *Hållbar energi för alla* när mängden förnybar energi som levereras till samhället (givet en viss biomassainsats) minskar på grund av den reducerade mängd el- och värmeenergi som koldioxidavskiljningen resulterar i. Utveckling och kommersialisering av nya tekniker för koldioxidavskiljning har potential att bidra till kraftigt minskade energiförluster och därmed reducera påverkan på hållbarhetsmålet. För de fall när den levererade mängden energi till samhället förblir relativt oförändrad, men det sker på bekostnad av ett relativt sett större elbortfall, kan en diskussion om energikvalitet föras. Hållbarhetsmålet gör dock ingen direkt åtskillnad mellan olika energibärare.

Resonemangen ovan för biobränsleeldade anläggningar gäller i stort även för avfallseldade anläggningar. En skillnad avseende hållbarhetsmål 13 - *Bekämpa klimatförändringarna* är att bidraget till negativa utsläpp blir mindre påtagligt

eftersom bränslet består av en biogen och en fossil fraktion. När det gäller hållbarhetsmål 15 - *Ekosystem och biologisk mångfald* kan en indirekt positiv påverkan uppstå om tekniken anammas och bidrar till ett minskat behov av renodlad bio-CCS. En risk för en indirekt negativ påverkan föreligger i relation till hållbarhetsmål 12 - *Hållbar konsumtion och produktion* om ökad användning av avfalls-CCS skulle motverka en utveckling mot cirkularitet avseende den fossila fraktionen i avfall.

7.5.2 Koldioxidtransport

Direkt positiv påverkan fås på hållbarhetsmål 8 - *Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt* genom att arbetstillfällena och delvis nya verksamheter (tex logistikcentra/"hubbar") skapas samt 9 - *Hållbar industri, innovationer och infrastruktur*, och 11 - *Hållbara städer och samhällen* genom att utveckling av system för koldioxidtransporter skapar förutsättningar för minskade koldioxidutsläpp genom CCS, inklusive möjligheten att bidra till negativa utsläpp. Lösningar som bidrar till en möjlig optimering av koldioxidlogistiken, med inslag som regionala hubbar, ger har potential att ge särskilt påtagliga bidrag till dessa tre hållbarhetsmål. Statlig och multilateral koordinering kan spela en viktig roll för att tillvarata potentialen i detta.

Direkt negativ påverkan på hållbarhetsmålen 3 - *Hälsa och välbefinnande* - 7: *Hållbar energi för alla*, 12 - *Hållbar konsumtion och produktion* och 13 - *Bekämpa klimatförändringarna* vilka alla framför allt är kopplad till det ökade trafikarbetet som kommer krävas för transporterna. Påverkan från vägbaserade transporter är tydligast då energieffektiviteten är låg och påverkan sker i flera dimensioner, inklusive risk för trafikolyckor, resurseffektivitet och klimatpåverkande utsläpp. Järnväg och fartygstransporter är jämförelsevis energieffektiva. I bedömningen har antagits att fartyg använder diesel som drivmedel. Vid ett antagande om LNG som fartygsbränsle kan växthusgasutsläppen reduceras med 10 – 27 procent om metanutsläpp i samband med utvinning och vidare hantering av naturgas tas med i beräkningarna. Med introduktion av förnybara fartygsbränslen skulle emissionerna av koldioxid från fossila resurser reduceras ytterligare.

7.5.3 Geologisk lagring av koldioxid

Enligt analysen uppstår direkt positiv påverkan på hållbarhetsmål 8 - *Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt* och 9 - *Hållbar industri, innovationer och infrastruktur* genom att arbetstillfällena och nya verksamheter skapas. Etableringen av koldioxidlager möjliggör för fler aktörer att fånga in och sedan leverera koldioxid för permanent lagring. Anläggningens utformning/affärsmodell i avseende att ta emot koldioxid från flera leverantörer avgör hur stor positiv påverkan som fås.

Koldioxidlagring bedöms ha en direkt negativ påverkan på hållbarhetsmål 7 - *Hållbar energi för alla*, 12 - *Hållbar konsumtion och produktion*, 13 - *Bekämpa klimatförändringarna* och 14 - *Hav och marina resurser*. Den negativa påverkan är dels kopplad till ett ökat energibehov som kan förväntas leda till konsumtion av fossila energikällor i någon utsträckning, dels en ökad naturresursanvändning. Livscykelanalyser visar dock att denna påverkan är begränsad. Viss direkt negativ påverkan i form av påverkan på marina ekosystem kan också förväntas (14.1, 14.2).

Risk för framtida läckage från koldioxidlagret behöver hanteras genom en grundlig riskhanteringsstrategi i samband med urval av lagringsplats, under lagrets operativa fas samt efter stängning. Risken för läckage minskar med tiden bland annat till följd av mineralisering av lagrad koldioxid.

7.5.4 Diskussion hållbarhetsanalys

Analysen har visat att avskiljning, transport och lagring av koldioxid i anslutning till biobränsle- och avfallseldade kraftvärmeanläggningar kan bidra till tydligt negativa utsläpp sammantaget för hela värdekedjan och därmed ett tydligt bidrag till att bekämpa klimatförändringarna. Samtidigt som koldioxid från förbränningen av bränsle fångas in och lagras, uppstår annan påverkan inom en rad hållbarhetsaspekter. Detta är både positiv påverkan som jobbskapande och anpassning av samhället i en riktning mot lägre klimatpåverkan, men även negativ påverkan på ekosystem samt även utsläpp av växthusgaser vid transporter och annan verksamhet.

En konventionell kraftvärmeanläggning idag producerar *el och värme som energitjänster*. I en kraftvärmeanläggning med CCS kommer även energitjänsten koldioxidinfångning läggas till el- och värmeförbrukarna. Tillägget med koldioxidinfångning kommer reducera mängden el och i många fall värme ut från kraftvärmeanläggningen med CCS jämfört med samma anläggning utan CCS.

Till viss del kan ny teknik för koldioxidavskiljning bidra till minskade energiförluster, men samhället kan också på sikt möta utmaningen med tillkommande energiförluster i tillförselledet med ökad energieffektivisering i användarledet. Det finns exempelvis en signifikant potential att reducera värmebehovet i fastigheter.

I ett kortare tidsperspektiv kan ökad tillförsel av hållbar energi i olika former, som kompenserar för energiförlusterna, bidra till minskad påverkan på hållbarhetsmål 7. Till exempel kan kompletterande tillförselsystem baserade på förnybara energikällor införas i fjärrvärmenäten (t.ex. solvärmesystem med säsongslagring) och genom en ökad biobränsletillförsel till kraftvärmeverken kan levererad värmemängd bibehållas. Det senare behöver dock ställas i relation till pågående diskussioner om skogen som råvarubas och å andra sidan som naturmiljö och källa till olika ekosystemtjänster till nytta för samhället. Studier av potentialer och möjliga utvecklingar inom olika energi- och industrisektorer visar att efterfrågan på skogsbaserad biomassa i Sverige kan öka betydligt. Flera av de svenska miljökvalitetsmålen är relevanta för biobränslen från skogen. Uppföljningen av de svenska miljökvalitetsmålen indikerar att målet med levande skogar är svårt att följa upp men ökade uttag av biomassa, under rådande förvaltning, bidrar till ökad förurning, kvicksilverutlakning, och påverkan på biodiversitet. Utvecklingen på lång sikt och påverkan på hållbarhetsmål 15 - *Ekosystem och biologisk mångfald* kommer till stor del bero på hur efterfrågan på biomassa totalt sett, för alla sektorer, kommer utvecklas i Sverige, EU och globalt.

8 AP6. Avfall – särskilda analyser

Uppvärmningssektorns långsiktiga vision är att år 2045 vara en kolsänka som hjälper till att minska de totala svenska växthusgasutsläppen.⁴⁷ För att göra det möjligt krävs flera åtgärder bland annat kopplat till avfall. Mängden avfall av fossilt ursprung som går till förbränning måste minska kraftigt, vilket kräver en mängd åtgärder uppströms i värdekedjan. Sektorn kan även erbjuda åtgärder som skapar en sänka för växthusgasutsläpp (så kallade *minusutsläpp*), exempelvis genom koldioxidavskiljning och -lagring från anläggningar där man förbränner restavfall. Det finns ett antal aspekter som är specifika för CCS vid avfallsförbränning som behöver belysas innan tekniken kan införas framgångsrikt i Sverige.

8.1 LÄRDOMAR FRÅN NORGE OCH DANMARK

Lärdomar från Norge och Danmark visar att finansieringen är den största osäkerheten kring CCS vid avfallsförbränning, inte tekniken eller acceptans.

8.1.1 Lärdomar kring tekniken

Intervjuade aktörer från både Norge och Danmark bedömer att aminateknik är mest lämplig avskiljningsteknik för CCS vid avfallsförbränningsanläggningar. Enligt intervjuerna under våren 2021 är det den enda teknik som har testats på rökgas från en fullskalig anläggning. I Norge byggdes en CCS-pilotanläggning kopplad till en storskalig avfallsförbränningsanläggning⁴⁸, inte med främsta syfte att testa själva tekniken utan för att verifiera och mäta lösningsmedelsnedbrytningen och utsläppen på en specifik rökgas. Resultaten från pilotanläggningen visar låga aminutsläpp och låg nedbrytningshastighet och att aminatekniken är adekvat för CCS vid avfallsförbränning.⁴⁹ Detta bekräftas delvis av analyser i detta projekt som visar att aminer har både fördelar och nackdelar jämfört med andra tekniker vid avskiljning av koldioxid från avfallsförbränning (se resultat från AP2). Här konstateras även att det behövs mer detaljerade studier med tester för att öka förståelse för teknikaspekter och driftkostnader för olika avskiljningsprocesser vid avfallsförbränning.

En aspekt som är viktig att nämna är exergiförlusten när el används för CCS-processen i stället för att säljas. Det innebär en minskad intäkt från elförsäljning, vilket oroar de svenska fjärrvärmeföretagen. De utländska aktörerna bekräftade

⁴⁷ Fossilfritt Sverige, 2019. Färdplan för fossilfri uppvärmningsbransch.

⁴⁸ Fortum, 2018. A full-scale CCS project initiated in Norway.

<https://www.fortum.com/media/2018/11/full-scale-carbon-capture-and-storage-ccs-project-initiated-norway>

⁴⁹ Fortum, 2019. Positive results from the carbon capture and storage pilot in Oslo.

<https://www.fortum.com/about-us/blog-podcast/forthedoers-blog/positive-test-results-carbon-capture-and-storage-pilot-oslo>

denna utmaning men såg också en möjlighet. Med tanke på att energibehovet är stort och ånga potentiellt kan användas från den egna anläggningen har fjärrvärmeföretagen möjlighet att återvinna värmen från infångningsprocessen och använda för fjärrvärme. Detta är positivt ur energisynpunkt med hänsyn till att det inte är möjligt på samma sätt i industrier som inte har närhet till ett fjärrvärmenät och som själva inte har behov av värme vid dessa temperaturnivåer. Detta är också en relevant punkt i en debatt om acceptansen för CCS vid avfallsförbränning.

8.1.2 Lärdomar kring acceptansen

Norge och Danmark har arbetat med acceptans för avfalls-CCS på olika sätt. I Norge har acceptansen hittills inte varit ett problem eftersom CCS har utförts i flera år offshore. De acceptansrelaterade frågorna har i Norge hittills liknat typiska frågor relaterade till avfallsförbränning nära bostadsområden och ses som en del av det allmänna arbetet med affärsutveckling snarare än ett enskilt ämne som behöver behandlas. I Danmark å andra sidan har acceptans skapats genom kommunikation med allmänheten med betoning på att det är bättre och mer effektivt att genomföra CCS vid avfallsförbränning (än förbränning av andra bränslen). Motiv för detta är 1) längre drifttid än annan fjärrvärmeproduktion, 2) anslutning till fjärrvärmenät och möjlighet att leverera fjärrvärme som biprodukt från processen, 3) att både biogen och fossil koldioxid minskas vilket innebär att CCS vid avfallsförbränning i de flesta fall kan bidra till negativa utsläpp, 4) att det är "oundviklig" koldioxid som kommer från avfallshantering som fångas upp.

8.1.3 Lärdomar kring finansieringen

Enligt intervjuade aktörer är den största osäkerheten kring CCS-teknikutvecklingen kostnaden, inte själva tekniken eller acceptansen. Det norska Langskip-projektet har bedömt nettokostnaderna per ton för avskild, transporterad och lagrad koldioxid. De visar att för 800 000 ton per år (dvs när CCS införs inom avfallsförbrännings- och cementindustrierna) är kostnaden cirka 1280 NOK per ton CO₂^{50,51}, vilket sannolikt kommer att minska med fullt utnyttjande av transport- och lagringslösningarna. I en analys⁵² av åtgärder för att göra CCS ekonomiskt lönsamt i olika sektorer inkl. avfallsförbränning som genomfördes 2019 är den huvudsakliga slutsatsen att oavsett vilken åtgärd (eller kombination av åtgärder) som ska antas, finns det ingen universallösning. Det som är nödvändigt för att möjliggöra en utbredd CCS-spridning är stabilt politiskt stöd över flera år. För avfallsförbränningssektorn i Norge beskrivs att en lösning exempelvis kan vara att lägga till extra kostnader för CCS till avfallsavgiften som användaren eller kunder betalar för denna tjänst. Grova uppskattningar visar att CCS-implementering skulle öka den årliga avfallsavgiften med 20–40 %, tex. cirka 750 NOK (drygt 730

⁵⁰ Detta motsvarar cirka 1292 SEK per ton CO₂, källa: xe.com, 18 maj 2021

⁵¹ Gassnova, 2020. Developing Longship. Key lessons learned. <https://gassnova.no/en/news/report-developing-longship-key-lessons-learned>

⁵² Multiconsult, 2019. Hvordan Gjøre CO₂-Fangst Og -Lagring Lønnsomt? -Hvordan Nye Virkemidler Kan Utvikle Markeder for Lavkarbonprodukter. 10209499-TVF-RAP-001.

<https://www.nho.no/contentassets/931076d7f29042eba38a0b8e4d72a85b/rapport-multiconsult---hvordan-gjore-co2-fangst-og-lagring-lonnsomt.pdf>

SEK)⁵³ för en familj på fyra.⁵⁴ I januari 2021 föreslog den norska regeringen att höja avgiften på växthusgasutsläpp till 2000 NOK per ton CO₂ år 2030^{55,56}, vilket skulle betyda mer än en tredubbling jämfört med idag. Om förslaget träder i kraft kommer det att sätta ett långsiktigt tryck på att hitta lösningar för att minimera växthusgasutsläppen.

I Danmark beräknas kostnaden för CO₂-avskiljning vid avfallförbränningsläggningar vara cirka 345 DKK per ton CO₂⁵⁷ på kort sikt medan den totala kostnaden i dagsläget (inkl. kostnad för transport och lagring) hamnar på cirka 595 - 1160 DKK per ton CO₂.^{58,59} Denna kostnad antas vara möjlig att sänka ytterligare på lång sikt. Dessutom anses kustlagring vara den billigaste lösningen. Olika potentiella finansiella lösningar diskuteras i Danmark. Exempelvis övervägs en nationell koldioxidskatt som skulle införas på alla avfallsförbränningsanläggningar som inte använder CCS-teknik, dvs. på samma sätt som i Norge.

8.1.4 Lärdomar kring logistiken

Slutligen ligger många pågående eller planerade avfalls-CCS-projekt i stora städer där utrymmet är begränsat och i många fall är avfallsförbränningsanläggningarna inte placerade i direkt anslutning till hamnar. Därför finns framtida utmaningar att tillhandahålla nödvändig infrastruktur. En utmaning som nämns i samband med ett avfalls-CCS-projekt i Köpenhamn och som eventuellt kan vara en utmaning även på andra ställen är att säkerställa möjligheten att leverera restvärme från processen till fjärrvärmenätet. Köpenhamns fjärrvärmenätverk är stort, men det är oklart om det finns avsättning för de potentiellt stora volymerna restvärme från andra planerade CCS-projekt belägna på mindre orter med mindre värmebehov. Samma situation kan finnas i vissa fjärrvärmenät även i Sverige.

8.2 POTENTIALEN FÖR MINSKADE UTSLÄPP OCH MINUSUTSLÄPP GENOM AVFALLS-CCS

Den teoretiska potentialen för minusutsläpp genom CCS på de tio största avfallsförbränningsanläggningarna beräknas uppgå till cirka 3,6 Mton CO₂ år 2045.

CCS vid avfallsförbränning är inte i första hand en åtgärd för att minska de fossila utsläppen utan för att bidra med så mycket negativa utsläpp som möjligt. De fossila utsläppen bör främst reduceras genom åtgärder högt upp i avfalls-/materialkedjan. Det är alltså av stor vikt att arbeta med utfasning av plast från

⁵³ Växelkurs NOK-SEK xe.com, 19 juli 2021

⁵⁴ IEA Bioenergy, 2021. Deployment of bio-CCS: case study on Waste-to-Energy – Fortum Oslo Varme (FOV). <https://task36.ieabioenergy.com/publications/deployment-of-bio-ccs-case-study-on-waste-to-energy/>

⁵⁵ Regjeringen, 2021. Heilskapeleg plan for å nå klimamålet. <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/heilskapeleg-plan-for-a-na-klimamalet/id2827600/>

⁵⁶ Detta motsvarar cirka 2019 SEK per ton CO₂, källa: xe.com, 18 maj 2021

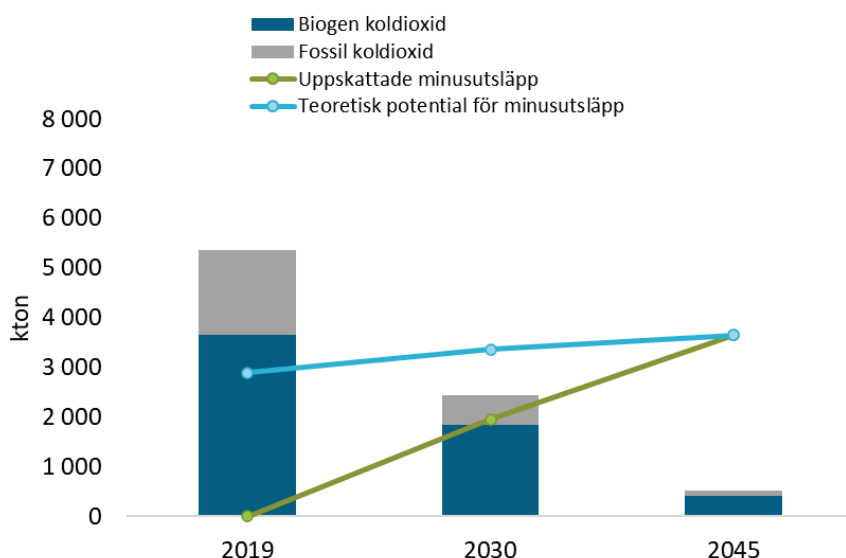
⁵⁷ Detta motsvarar cirka 470 SEK per ton CO₂, källa: xe.com, 18 maj 2021

⁵⁸ Detta motsvarar cirka 810 - 1580 SEK per ton CO₂, källa: xe.com, 18 maj 2021

⁵⁹ Ramböll, 2020. CO₂ FANGST PÅ DANSKE AFFALDSENERGIANLÆG. <https://danskaffaldsforening.dk/udgivelser/co2-fangst-fra-danske-affaldsenergianlaeg>

restavfallet. Viss plast kommer vara svår att återvinna på annat sätt än genom förbränning med energiåtervinning och då är CCS ett bra sätt att undvika utsläppen.

Projektet har uppskattat den framtida teoretiska potentialen för utsläppsminskning och minusutsläpp om CCS installeras på de tio största avfallsförbränningsanläggningarna i Sverige. Antaganden har gjorts om 1) minskad mängd fossilplast i restavfallet baserat på planerade investeringar och förväntad ökad utsortering av plast från restavfallet innan avfallsförbränning samt förbättrad källsortering av plast samt 2) konstant mängd avfall till förbränning vid varje anläggning. Både utsorteringen av plast till material- och kemisk återvinning samt produktion och användningen av biobaserad plast antas öka i Sverige i framtiden. Utsortering av matavfallet antas öka medan användning av papper antas minska. Alla dessa trender gör att andelen svenskt avfall till avfallsförbränning minskar medan importandelen ökar. Figur 13 utgår från de tio största anläggningarna som förbränner avfall i Sverige och visar potentialen för minusutsläpp om CCS införs på de fem största anläggningarna⁶⁰ från 2030 och på samtliga tio största anläggningar från 2045. År 2030 (CCS på fem anläggningar) uppgår då minusutsläppet till knappt 3 Mton och år 2045 (CCS på tio anläggningar) uppgår det till drygt 3,6 Mton.



Figur 13. Den blå linjen visar utvecklingen av den teoretiska potentialen för minusutsläpp från de tio största anläggningar som helt eller delvis förbränner avfall. Den gröna linjen visar uppskattade erhållna minusutsläpp med antaganden att CCS införs på de fem största anläggningarna år 2030 och de tio största anläggningarna år 2045. Staplarna visar uppskattade utsläpp av biogen och fossil koldioxid.

⁶⁰ Med största anläggningar avses anläggningar med minst 50 kton totala utsläpp år 2019 och som har tillstånd att förbränna avfall 2019.

I en tidigare studie⁶¹ beräknades potentialen för infångning av fossil koldioxid från avfallsförbränningsanläggningar med CCS till cirka 700 kton år 2045, vilket är omkring 200 kton lägre än i föreliggande studie. Skillnaden i resultat förklaras av olika antaganden kring bland annat vilka anläggningar som utrustas med CCS samt hur omfattande utfasningen av plast i avfallet blir.

8.3 KOSTNADEN FÖR CCS PÅ DE TIO STÖRSTA AVFALLSFÖRBRÄNNINGSANLÄGGNINGARNA

Införandet av CCS på de tio största avfallsförbränningsanläggningarna uppskattas att kosta cirka 7 miljarder SEK (CAPEX och OPEX).

Preliminära kostnadsbedömningar inom AP2 och AP3⁶² i detta projekt visar att kostnaden (både investerings- och driftskostnader) för att införa CCS på de fem största anläggningarna varierar mellan cirka 750 och 900 SEK / ton CO₂ medan kostnaden för de tio största anläggningarna varierar mellan cirka 750 och 1500 SEK / ton CO₂. Observera att dessa siffror inte innehåller lagringskostnaden. Northern Lights har uppskattat lagringskostnaden till 30 – 55 EUR / ton CO₂.⁶³ I våra beräkningar utgår vi från lagringskostnaden 400 SEK / ton CO₂, vilket alltså är ett medelvärde av detta. Den totala kostnaden för att införa CCS på de tio största avfallsförbränningsanläggningarna i Sverige uppgår då till 1150 – 1900 SEK / ton CO₂. Dessa kostnader är något högre jämfört med kostnadsbedömningar i Norge (ca 1290 SEK / ton CO₂) och i Danmark (ca 810 – 1580 SEK / ton CO₂) vilket kan bero mindre gynnsam lokalisering samt viss osäkerhet kring kostnaden för infrastrukturen i olika fall. Storleksordningarna är dock desamma. Totalkostnaden för infrastrukturen beror på främst: 1) volym; 2) avstånd till hamn; och 3) avstånd mellan hamn och lagringsplats.⁶⁴ I AP6 beräknades transportkostnaderna med antagandet att svensk koldioxid transporteras till Kollsnes för lagring i Nordsjön genom Northern Lights-projektet. I framtiden kan det finnas fler möjliga och mer kostnadseffektiva alternativ. Det finns dessutom ytterligare möjligheter till kostnadsbesparingar genom att samarbeta och till exempel ”dela fartyg”. Detta diskuteras vidare i AP3.

Den totala kostnaden för att erhålla den teoretiska potentialen för minusutsläpp från de tio största anläggningarna år 2045 beräknas uppgå till cirka 6,7 miljarder SEK. En känslighetsanalys visar att kostnaden blir ungefär densamma om CCS i stället införs på de anläggningar som bedöms ha lägst CCS-kostnad (enligt Chalmers beräkningar i projektet). Det betyder att de största anläggningarna i stort sett också är de mest kostnadseffektiva.

⁶¹ 2050 Consulting, 2021. Backcasting – Hur når Sverige fossilfri avfallsförbränning från avfallsförbränning?

⁶² Kostnadsbedömningen av alla steg exkl. lagring gjordes av Chalmers

⁶³ Sandberg, 2020. Northern Lights. A European CO₂ transport and storage network.

⁶⁴ Kommunikation med Jan Kjärstad, Chalmers

8.4 VAD KRÄVS FÖR ATT REALISERA POTENTIALEN FÖR AVFALLS-CCS?

För att realisera CCS-potentialen krävs samarbete mellan olika aktörer i CCS-kedjan, finansieringslösning för att täcka CCS-kostanden samt acceptans för CCS vid avfallsförbränning.

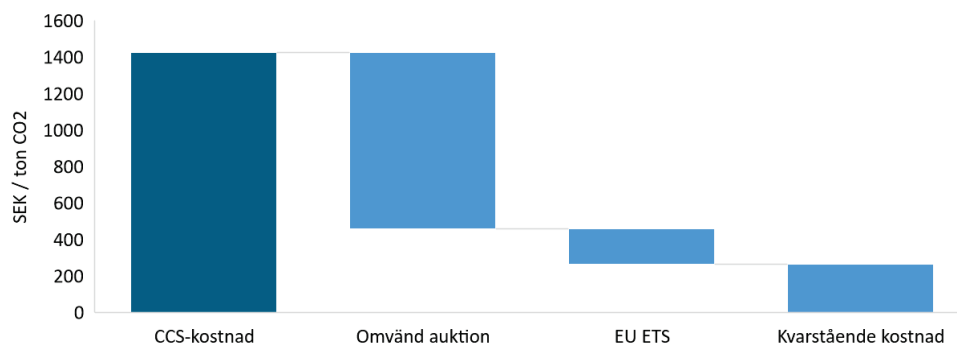
Om potentialen ska realiseras behövs framför allt en finansieringslösning anpassad för CCS vid avfallsförbränning och acceptans behöver säkerställas. Dessa två aspekter beskrivs närmare nedan. Samarbete mellan olika aktörer skulle också kunna sänka kostnaderna och underlätta implementeringen. Detta analyseras vidare i AP3.

8.4.1 Analys av möjligheterna att överföra CCS-kostnader uppströms på avfallslämnaren

En av de viktigaste avfallsspecifika frågorna är att förbränningen av blandat avfall leder till utsläpp av både biogen och fossil koldioxid. Svenska avfallsförbränningsanläggningar ingår i EU ETS och CCS innebär därmed att en stor del av kostnaden för utsläppsrätter kan undvikas. Priset på utsläppsrätter är dock inte högt nog för att täcka kostnaden för fossil CCS, se Figur 14. Detta gäller även vid dagens (september 2021) historiskt höga utsläppsrättspriser.⁶⁵ Staten har indikerat att det styrmedel (omvända auktioner) som är under framtagande inte kommer att betala för den avskilda och lagrade fossila koldioxiden. För närvarande kan det alltså vara svårt att få betalt för CCS av den fossila delen av avfallet. Förutsatt att man vinner en omvänd auktionering finns därför starkare incitament att avskilja biogen koldioxid. I takt med att priset på utsläppsrätter stiger ökar dock incitamenten för avfalls-CCS. Ersättningsnivån för CCS-kostnaden genom omvända auktioner beror på den biogena andelen av utsläppen från en avfallsförbränningsanläggning och det blir därmed svårt att lägga ett konkurrenskraftigt bud i auktioneringen. För att CCS ska vara ekonomiskt genomförbart för avfallsförbränningsanläggningar måste CCS-kostnaden sänkas medan utsläppspriserna och budnivåerna måste höjas så mycket som möjligt.

Förutsatt att den biogena andelen vid avfalls-CCS kan finansieras via det styrmedel som Energimyndigheten nu utreder, återstår alltså frågan hur avskiljning och lagring av den fossila andelen kan finansieras. I AP6 analyseras därför om det är möjligt att finansiera CCS vid avfallsförbränning genom att ta ut kostnaden uppströms i avfallskedjan. I AP1 diskuteras även andra finansieringsmöjligheter såsom investeringsstöd, intäkter genom försäljning av negativa emissioner på en frivilligmarknad alternativt som premiumprodukter samt kvotplikt på andra sektorer.

⁶⁵ Ember climate. Carbon price viewer



Figur 14. Ett genomsnittligt exempel på CCS -finansieringsstruktur för en avfallsförbränningsanläggning. Ett exempel av uppskattad CCS-kostnad kommer från resultat levererad av AP2 och AP3⁶⁶ inom det här projektet samt resultat från Northern Lights projekt.⁶⁷ Budets nivå beräknades med antaganden att andel biogen koldioxid motsvarar medelvärde av andel biogen koldioxid (70%) av de tio största anläggningarna (störst totala utsläpp år 2019) som helt eller delvis förbränner avfall. Priset på utsläppsätter beräknades vara ca 607 SEK/ton (20 september 2021).⁶⁸

Bakgrund till modellen

Restavfall till svenska avfallsförbränningsanläggningar kommer från olika marknadssegment. Fördelningen av mängder från dessa segment illustreras i Figur 15. Det allra mesta avfallet till avfallsförbränning i Sverige har genomgått sortering - antingen vid källan i hushåll eller verksamheter, eller i kommersiella sorteringsanläggningar för avfall.⁶⁹ De största mängderna avfall till förbränning utgörs av svenskt avfall från privata entreprenörer, följt av kommunalt avfall som handlas upp via offentliga upphandlingar. Importerat avfall utgör tillsammans ca 24 %, varav 10 procentenheter kommer från Storbritannien och lika mycket från Norge. Import från Finland, Irland, Tyskland, Italien och Polen utgör sammanlagt cirka 4%.

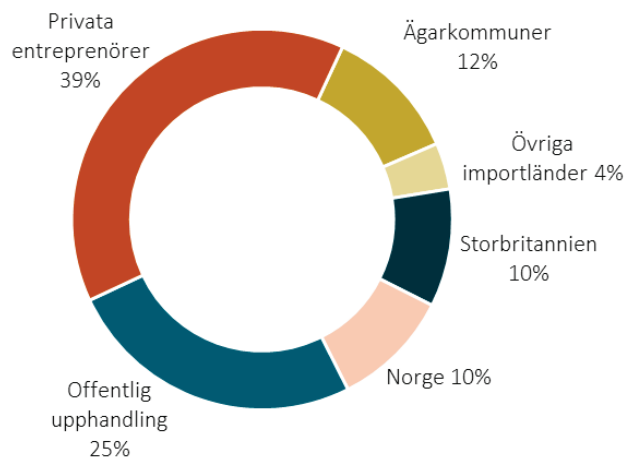
En möjlig finansieringsmodell för CCS skulle kunna vara att överföra kostnaden på avfallslämnaren. Avfallslämnaren är vanligen ett avfallsbolag (privat eller kommunalt) eller en kommun (som handlar upp tjänsten energiåtervinning), som har anlitats av den som genererat avfallet. Den som genererar avfallet är en verksamhet eller invånarna i en kommun. Det förekommer också att en verksamhet tecknar avtal direkt med en anläggning för energiåtervinning och anlitar en transportör som ombesörjer transporten, men det är mindre vanligt. Kostnaden för avskiljningen skulle i så fall adderas på mottagningsavgiften som avfallslämnaren betalar för tjänsten energiåtervinning, och för vidare på dem som genererat avfallet. På så sätt förs kostnaden över på verksamheten direkt, eller på kommuninvånarna via avfallstaxan.

⁶⁶ Kostnadsbedömningar genomfördes av Chalmers

⁶⁷ Sandberg, 2020. Northern Lights. A European CO₂ transport and storage network.

⁶⁸ Ember climate. Carbon price viewer, 20 september 2021; växelkurs EUR-SEK xe.com, 20 september 2021

⁶⁹ Avfall Sverige, 2021. Kapacitetsutredning 2021-Energiåtervinning och mängder restavfall.



Figur 15. Andel av respektive marknadssegment av det avfall som förbrändes i Sverige under år 2020.⁷⁰

Idag består mottagningsavgiften av en behandlingsrelaterad kostnadsdel samt pålagor för delar av förbränningsskatt och inköp av utsläppsrätter. De senare betalas av avfallsförbrännaren, och förs i olika grad över på avfallslämnaren. Det är dock en principiell skillnad att påföra en kostnad för CCS, som är grundad i ett adderat värde som CCS utgör, jämfört med att ta ut en kostnad för ett tvingande styrmedel såsom förbränningsskatten och inköp av utsläppsrätter. Kunden måste vara villig att betala merkostnaden för CCS, annars går avfallet till någon som tar hand om det billigare. De tvingande styrmedlen kommer däremot ingen undan. Idag är det dock olika hur stor del av de tvingande styrmedlens som överförs. I en förhandlingssituation kan man därför tänka sig att vissa avfallslämnare hellre lämnar avfallet till en mottagare som tar ut en lägre avgift för utsläppsrätterna. Det finns alltså en risk att avfall styrs till sämre behandlingsalternativ. En invändning är också att en sådan avgift tydligare för fokuseras på dem som har ansvar för att plast hamnar i restavfall. Det kan vara tillverkare av plastråvara, plastprodukter, användare, m.m. Det är där rådigheten för att minska plast i restavfallet i stor utsträckning finns.

Jämförelse av kostnadsnivåer

Mottagningsavgifter i Sverige ligger på cirka 550 SEK / ton avfall exklusive förbränningsskatt och utsläppsrätter.⁷¹ Förbränningsskatten är 100 SEK / ton avfall år 2021, nettovärde cirka 80 SEK / ton (avdrag får göras för aska). Kostnad för utsläppsrätter är cirka cirka 607 SEK / ton CO₂ (20 september 2021)⁷².

Kostnaden för avskiljning och lagring av koldioxid varierar mellan olika anläggningar beroende på en rad faktorer, men vi antar här en kostnad omkring 1400 SEK / ton CO₂.⁷³ Omräknat per ton avfall blir det: 1400 SEK / ton CO₂ * 0,4 ton CO₂ / ton avfall = 560 SEK / ton avfall⁷⁴.

⁷⁰ Profu för Avfall Sverige, 2021. Kapacitetsutredning 2021 - Energiåtervinning och mängder restavfall.

⁷¹ Avfall Sverige. 2021. Svensk Avfallshantering 2020.

⁷² Ember climate. Carbon price viewer, 20 september 2021; växelkurs EUR-SEK xe.com, 20 september 2021

⁷³ För detaljerade kostnadsberäkningar hänvisas till andra delrapporter inom projektet.

⁷⁴ Antaget att de fossila utsläppen från förbränning av blandat avfall är cirka 0,4 ton CO₂ / ton avfall.

Man kan konstatera att kostnaden för CCS per ton avfall blir hög i förhållande till mottagningsavgiften och jämfört med andra pålagor. En risk med höga mottagningsavgifter är att avfallslämnaren bedömer det vara en för stor kostnad för att få avfallet behandlat, och att avfallet lämnas till sämre behandling, till exempel förbränning utan CCS, export (med sämre avfallsbehandling) eller till och med dumpning (illegal avfallshantering). Om CO₂-priset och eventuella intäkter för negativa utsläpp blir tillräckligt höga, så uppvägs CCS-kostnaden av undvikna utsläppsrettskostnader. Då blir det inget behov av ökad mottagningsavgift.

Prissättning och kostnadsöverföring i olika marknadssegment

För de olika marknadssegmenten (Figur 15) sker prissättning med olika metoder, vilket påverkar förutsättningarna att överföra kostnader uppströms i avfallskedjan. Tabell 5 visar huvuddragen och potentiella för- och nackdelar med att överföra CCS-kostnaden på avfallslämnaren.

Offentlig upphandling

Offentliga företrädare handlar upp avfallsbehandlingstjänsten energiåtervinning av avfall för en viss tidsperiod. Priset sätts genom att anbudsgivarna jämförs med lägsta pris, som kan var inklusive transport från uppsamlingsplatsen. Vanliga perioder för tjänsten är 1 – 2 år. Anbudsgivarna ger lägsta pris för tjänsten, och utvärderas efter givna kriterier, vilket vanligen omfattar transport från en punkt till behandlingsanläggning, oavsett om denna tjänst ingått i upphandlingen eller ej. Kostnaden överförs sedan på kommuninvånare via avfallstaxan. En årlig uppföljning av upphandlingar visar att det varierar om den upphandlande enheten vill att pålagor för förbränningsskatt och inköp av utsläppsätter ska ingå eller inte i anbudspriset.⁷⁵ Om priset inte ingår, anger anbudsgivarna att dessa ska påföras, och vilka summor som avses. Samma undersökning visar att förbränningsskatten har kunnat överföras på avfallslämnarna i Sverige. Det har däremot varit svårt att i befintliga kontrakt överföra ökade kostnader för utsläppsätter på avfallslämnaren, eftersom priserna steg kraftigt under en kort period. Då fanns det inte en beredskap för denna kostnadsökning. I analogi kan man resonera att det skulle vara möjligt att överföra kostnadsökningar relaterade till CCS på den offentliga sektorns avfallslämnare. Det kan ske om kostnaderna är tvingande av styrmedel, eller för att den som vill lämna avfallet vill att förbränningen sker med CCS, även om det inte finns lagkrav. Oavsett, behöver det redan i upphandlingen specificeras att förbränningen ska ske tillsammans med CCS.

Ägarkommuner

I ägarkommuner med tillräckligt stor kontroll över verksamheten sätts priset ofta genom internprissättning. Denna baseras till exempel på ett genomsnitt av priset i övriga kontrakt för samma tjänst. Kostnaden överförs sedan på kommuninvånare via avfallstaxan. Undersökningar visar att förbränningsskatten överförs på avfallslämnarna även vid denna prissättning.⁷⁶ Om ägarkommunerna valt att satsa på

⁷⁵ ULVEN - analysverktyg och databas över mottagningsavgifter. www.profu.se/ulven.htm

⁷⁶ Avfall Sverige. 2021. Kapacitetsutredning 2021 - Energiåtervinning och mängder restavfall till år 2026.

CCS kan man utgå från att de är beredda att betala vad det kostar att lämna avfallet till energiåtervinning med CCS.

Privata entreprenörer

Dessa hanterar avfall från verksamheter och pris och villkor avtalas mellan entreprenören och den mottagande anläggningen för energiåtervinning. De privata entreprenörerna tar sedan ut priset på den avfallslämnande verksamheten. Även här har skatten har kunnat överföras från energibolaget på entreprenören, men det varierar om entreprenören i sin tur har kunnat överföra skatten på avfallslämnaren. Kostnaden för utsläppsrätter har endast till liten del kunnat överföras på entreprenören. För att kunna överföra CCS-kostnaden på entreprenörerna behöver de eller deras kunder värdesätta CCS och betala för den tillkommande kostnaden för avskiljning, transport och lagring. Annars väljer de att skicka avfallet till den som erbjuder lägst mottagningsavgift.

Tabell 5. Huvuddragen och potentiella för- och nackdelar för en finansieringsmodell för CCS: Överföra kostnaden på avfallslämnaren.

Finansieringsmodell	Primär finansiär	Potentiella för- och nackdelar
Överföra kostnad på avfallslämnaren	Den som genererar avfall: privatperson eller verksamhet	+ Den som orsakar plastavfallet belastas med kostnaden, vilket indirekt ger incitament till förändring - I takt med att plastandelen i avfall minskar, reduceras även betalningsunderlaget för att finansiera CCS - Olika möjlighet till kostnadsöverföring på privata, offentliga och internationella marknader gör det otydligt - Risk att avfallslämnaren bedömer CCS-kostnaden vara för stor för att få avfallet behandlat, och att avfallet lämnas till sämre behandling, t.ex. förbränning utan CCS, export (med dålig koll på behandling) eller till och med dumpning (illegal avfallshantering)

Importerat avfall

Avfall importeras ofta med en mäklare eller avfallsbolag som mellanhand, men vissa importörer handlar direkt med exportörer och bygger egna logistik- och leverantörskedjor. Det importerade avfallet kan komma både från hushåll och verksamheter. Priset sätts på en EU-gemensam marknad för energiåtervinning, men villkor förhandlas mellan parterna. På marknaden finns aktörer både som avfallslämnare och behandlare i flera länder. Såsom för övriga segment ska kostnaden överföras till företag eller kommuninvånare som genererar avfall. Samma undersökning visar att skatten endast delvis har kunnat överföras till dessa internationella aktörer och att kostnad för utsläppsrätter inte har kunnat överföras. Utmaningen med att priset sätts på en marknad efter utbud och efterfrågan, gör att det kan vara svårt att överföra kostnader för CCS här. Hur man lyckas beror på om aktörerna är beredda att betala för ett adderat värde som CCS utgör, på samma sätt som gällande avfall via privata entreprenörer. Även här finns risken att avfallsströmmarna går till annan, sämre behandling.

8.4.2 Acceptansen för CCS vid avfallsförbränning är inte ett problem idag men kan bli ett problem i framtiden och ytterligare acceptansstudie behövs

En annan viktig pusselbit som kan krävas för att realisera potentialen är att säkerställa acceptans för CCS vid avfallsförbränning. Bristen på acceptans har stoppat tidigare CCS-initiativ, till exempel Vattenfalls satsningar i Tyskland 2008–2011.⁷⁷

För att få en mer fullständig bild av åsikten om acceptans för CCS vid avfallsförbränning skickades en kort anonym enkät till 25 representanter för 15 fjärrvärme-företag, avfallsaktörer och energibranschorganisationer. Svarsfrekvensen uppgick till 56 %. Resultaten från enkäten visar att majoriteten av respondenterna anser att acceptans för CCS vid avfallsförbränning i Sverige inte är ett problem idag men kan bli ett problem i framtiden. På frågan om hur man säkerställer acceptans för CCS vid avfallsförbränning i Sverige, svarade respondenterna exempelvis:

- visa tydligt arbete för att minimera plast i restavfallet;
- tillse att avfallshierarkin vidmakthålls och förbränning inte blir den enkla vägen ut i stället för återvinnig;
- bidra med kunskap och fakta till debatten;
- visa nyttan med avfallsförbränning och dess roll i en cirkulär ekonomi;
- undersöka hur acceptansen ser ut idag;
- börja med att säkerställa acceptansen för avfallsförbränning och sedan ställa krav så att återvinningsbolag får redovisa att allt som kan materialåtervinnas och uppmuntra / kräva att bidra till CCS för avfall som inte kan materialåtervinnas.

Några av respondenterna trodde att acceptansen för CCS vid avfallsförbränning kommer att vara en ickefråga i framtiden och att det inte kommer att finnas acceptans för avfallsförbränning utan CCS. Detta har tagits upp under diskussionen med branschen. Åsikterna var delade - en del trodde att fossila utsläpp inte kommer att accepteras i framtiden medan andra trodde att det kommer att bero på fokus i diskussionen i framtiden dvs. hur viktig denna fråga kommer att vara jämfört med andra viktiga frågor, till exempel mikroplastproblem.

Majoriteten av respondenterna tyckte dessutom att det finns ett behov av ytterligare acceptansstudie och projektförslag som nämndes är exempelvis:

- undersökning av acceptans inom olika intressentgrupper och orsaker till olika acceptans;
- analys av eventuellt motstånd hos olika intressentgrupper, tex. miljöorganisationer, fjärrvärmekunder och myndigheter / beslutsfattare;
- och mer specifikt - undersökning av fjärrvärmekunders syn på köp av energi från avfall i kombination med avfalls-CCS.

⁷⁷ Vattenfall. The climate issue. In the line of fire. <https://history.vattenfall.com/stories/in-the-line-of-fire/the-climate-issue>

Resultaten från enkäten och diskussionen visar tydligt att acceptansen för CCS vid avfallsförbränning behöver undersökas vidare och inte kan underskattas i den framtida utvecklingen och spridningen av CCS-tekniken i Sverige.

8.5 ÖKAT ENERGIBEHOV MEDFÖR ÖKAD BRÄNSLETILLFÖRSEL AV AVFALL

Införandet av CCS vid avfallsförbränning innebär ökat energibehov vilket medför en ökad bränsletillförsel av avfall.

Vad skulle hända om de ekonomiska förutsättningarna inte kommer att vara tillräckligt bra och ingen energiåtervinnare⁷⁸ i Sverige beslutar att investera i CCS? För att ta itu med denna fråga och visa konsekvenserna om alla respektive inga avfallsförbränningsanläggningar inför CCS, samarbetade AP6 med AP2 för att modellera och analysera dessa två scenarier. Sammanfattningsvis visar resultat från modelleringen att CCS innebär ett ökat energibehov vilket medför en ökad bränsletillförsel av avfall. Detta betyder också att utnyttjningstiden för avfalls-pannorna ökar samtidigt som utnyttjningstiden av komponenter för el (turbin) och värme (kondensor) minskar. Det krävs alltså ökad förbränning av avfall om värme- och elproduktionen ska bibehållas. Alternativt bibehålls mängden förbränt avfall medan värme- och elproduktionen minskar. Då måste denna energi ersättas med andra produktionskällor.

CCS på avfallsförbränningsanläggningar medför dock inte nödvändigtvis sämre eleffektbalans under de mest ansträngda perioderna, givet att CCS-processen är tillräckligt flexibel. Enligt modellanalysen medför det inte heller någon ökad drift av spetsproduktion i elsystemet, eftersom avskiljningen stängs av vid höga el- och/eller värmepriser medan den fokuseras på timmar med lägre elpriser. Mera detaljer om modelleringen och analysen beskrivs i delrapporten från arbetspaket 2.

⁷⁸ I Sverige finns idag (2021) 35 anläggningar för avfallsförbränning ur blandat hushållsavfall (soppåsar).

9 Resultatdiskussion

I detta kapitel diskuteras ett antal iakttagelser som inte tagits upp i de sammanfattande slutsatserna men som har betydelse för introduktionen av bio-CCS i den svenska fjärrvärmesektorn. Här tar vi också upp kompletterande resonemang om fenomen som redan berörts, men där vi vill lyfta andra perspektiv.

Behövs ”negativa utsläpp” av koldioxid? Ja

IPCCs 1,5 graders-scenarier visar att de globala utsläppen efter 2050 måste vara negativa för att målet om högst 1,5 grader temperaturhöjning ska kunna nås. Negativa utsläpp eller andra kompletterande åtgärder kommer också att behövas för Sveriges mål om klimatneutralitet år 2045 eftersom vissa växthusgasutsläpp, exempelvis från jordbruket, kommer att vara svåra att helt eliminera.

Kan fjärrvärmesektorn erbjuda en teknisk lösning för negativa utsläpp av koldioxid? Ja

I dagsläget uppgår den svenska fjärrvärmeproduktionens totala utsläpp av koldioxid till 18 Mton per år. Av dessa kommer 15 Mton från biogena källor. Eftersom dessa är förnybara och inte ger några nettoutsläpp av koldioxid så innebär avskiljning och lagring av dessa att negativa utsläpp skapas. Avskiljning av koldioxid sker med känd, beprövad teknik och innebär inga oöverstigliga utmaningar. Även transport och lagring av koldioxid kan göras på ett säkert sätt.

Finns de ekonomiska förutsättningarna för negativa utsläpp från fjärrvärmesektorn? Delvis

På kort sikt planerar staten för stöd till bio-CCS, sannolikt i form av omvänd auktion. Då betalar staten för avskiljning och lagring av en begränsad mängd biogen koldioxid från bio-CCS under såg 15 år. Här konkurrerar fjärrvärmeföretagen med andra som kan erbjuda bio-CCS på ett kostnadseffektivt sätt, främst skogsindustrin. För att långsiktigt ge ekonomiska incitament för ytterligare bio-CCS behövs styrmedel och/eller marknadslösningar som gör det möjligt för fjärrvärmeföretagen att satsa på och driva bio-CCS-anläggningar, vilket möjliggör de nödvändiga negativa utsläppen, utan att det medför generellt ökade kostnader för fjärrvärmekunderna eller hotar företagens konkurrenskraft och överlevnad.

En förutsättning för ”biobränsle-CCS” är att biobränslen är fortsatt konkurrenskraftiga och ses som klimatneutrala.

Det pågår för närvarande en intensiv debatt om det svenska skogsbruket. Invändningar mot nuvarande skogsbruk och utnyttjande av skogsresurserna framförs av vissa grupper. Invändningarna kan delas in i ”naturkris”

(biodiversitet, rekreation, m.m.) och ”klimatkris” (huruvida skogsresurserna ska betraktas som klimatneutrala). Det finns parallellt med detta en diskussion om hur de begränsade skogsresurserna effektivast ska användas när fossila alternativ ska ersättas. Där menar vissa att marknaden bör styra genom att resursen går till den tillämpning som har högst betalningsvilja, medan andra menar att resurserna bör styras till de tillämpningar som saknar andra alternativ för att fasa ut fossila bränsle/råvaror, oberoende av betalningsviljan.

En förutsättning för bio-CCS vid biobränsleeldade kraftvärmeverk är att bio-bränslen även fortsättningsvis ses som klimatneutrala och att de kan användas på ett konkurrenskraftigt sätt för produktion av el och fjärrvärme. Om biobränsle-kraftvärme skulle äventyras så försvåras självklart bio-CCS.

Avfalls-CCS ska inte ses som ett sätt att fortsätta elda plast på ett oreflekterat sätt.

Avfalls-CCS ger nyttan att avskilja utsläpp av fossil koldioxid samtidigt som den skapar negativa utsläpp genom avskiljning av biogen koldioxid. Avfalls-CCS ska dock inte ses som ett skäl för att fortsätta elda plast på ett oreflekterat sätt. Det behövs fortfarande åtgärder högre upp i avfalls-/materialkedjan för att minska plastinnehåll i restavfallet som ett led i pågående cirkularitetssträvanden. Det kan handla om ytterligare verklig materialanvändning, kemisk återvinning av plast, återanvändning av produkter, design av plastprodukter som möjliggör effektiv materialåtervinning, ickefossil plastråvara, m.m. Även eftersortering av restavfall inför förbränning är ett sätt att minska plastinnehållet vid förbränning.

Samtidigt bör man vara medveten om att allt talar för att det även fortsättningsvis kommer att finnas ett restavfall som kräver behandling och där förbränning med energiåtervinning under lång tid kommer att behövas. Trots ansträngningar i linje med det som listas ovan kommer det att finnas ett visst fossilt innehåll i det restavfallet. Vissa avfallsslag bör inte heller cirkuleras, t.ex. giftigt och smittbärande avfall.

För en given avfallsförbränningsanläggning med CCS leder ett minskat fossilt innehåll i restavfallet till att ett större negativt koldioxidutsläpp kan skapas genom att mer biogent avfall kan förbrännas. Detta utgör en tillkommande drivkraft för att minska plastinnehållet i restavfallet till förbränning.

Det är olämpligt att maximera CCS genom att använda biobränslen på ett ineffektivt sätt, exempelvis genom CCS utan energiåtervinning. Resurshushållning är viktig.

Runt om i samhället görs stora ansträngningar för att fasa ut fossila bränslen och råvaror. Ett sätt att göra detta är genom att utnyttja biobränslen för energiproduktion och bioråvaror i tillverkningen av produkter. Detta skapar en ökad efterfrågan på skogsråvaror och andra bioresurser. Det blir därmed viktigt att utnyttja dessa bioråvaror på ett effektivt och resurshushållande sätt. De svenska kraftvärmeverken eldade med biobränslen har typiskt hög energieffektivitet i dagsläget.

Hittills skapar kraftvärmeverken två nyttigheter – el och fjärrvärme. Om bio-CCS tillämpas på kraftvärmeverken tillkommer ytterligare en nyttighet – negativa utsläpp (genom avskiljning och lagring av koldioxid). Om värdet av de negativa utsläppen i framtiden skulle bli mycket högt skulle man hypotetiskt kunna tänka sig att det skapar en drivkraft att maximera avskiljningen av koldioxid från kraftvärmeverk genom att elda biobränsle med sämre effektivitet. På det sättet kan mer biobränsle förbrännas för att ge en given mängd el och fjärrvärme och på det sättet maximera avskiljningen av koldioxid och därmed de negativa utsläppen. En sådan utveckling bör undvikas och resurshushållning bör även fortsättningsvis eftersträvas.

Lagringen av avskild koldioxid från bio-CCS bör inte bidra till ökad utvinning av fossil olja och gas.

Vi förutsätter att den lagring som blir aktuell inte kommer att leda till ökad olje- och naturgasutvinning (inte "enhanced oil and gas recovery"). Det för närvarande mest näraliggande kommersiella lagringsalternativet, det norska "Northern Light", är i linje med detta och utnyttjar inte koldioxidlagringen för att öka olje- och gasutvinningen. Dock kan avskild koldioxid av biogent ursprung komma att lagras tillsammans med avskild koldioxid av fossilt ursprung. Redan genom att införa CCS på energiåtervinning från avfall, vilket ingår i den analys av bio-CCS som genomförs i detta projekt, sker avskiljning av både biogen och fossil koldioxid eftersom det restavfall som förbränns innehåller både biogena och fossila material. Därmed sker som en konsekvens av detta gemensam lagring av koldioxid med både biogent och fossilt ursprung.

9.1 BEHOV AV FORTSATT FORSKNING

Här redovisar vi kortfattat ett antal områden där styrgruppen och/eller forskargruppen bedömt att det finns behov av ytterligare forskning:

- **Marknad för bio-CCS-krediter**
Hur kan en marknad för bio-CCS-krediter byggas upp?
- **Finansiering och policydesign för CCS**
Balans mellan olika målsättningar i styrmedelsdesign, infasning i tid och ansvarsfördelning i olika nivåer av styrning. Finansiering av CCS vid avfallsförbränning inkl. hur kostnaden kan överföras till andra delar av värdekedjan?
- **CCS-implementering i Sverige (fjärrvärme och övrig industri)**
Potential, anläggningar, volymer, tidsperspektiv, lokalisering, infrastrukturens samverkan. Hur kan potentialen realiseras?
- **Vidare tekniska analyser**
T.ex. rökgaser från avfallsförbränning, integrering ångkompression och värmepumpar, effektivare lösningsmedel/avskiljningsprocesser
- **Alternativa lagringsplatser/-system**
Möjligheter till lagring i Sveriges närhet (t.ex. Danmark – samverkan med GEUS), i svensk basalt (samverkan med LTU m.fl.) samt på lång sikt i svenska akviferer (samarbete med SGU).

- **Förbättrade kostnadsunderlag för hela CCS-kedjan**
Exempelvis kostnader för hamnar, älv-pråmar, tåg och utilities i förbindelse med el, kylvatten, lastning, lossning.
- **Systemanalys på längre sikt (typ 2040/2045)**
Hur stor kan potentialen bli i framtida fjärrvärmescenarier med ökad respektive minskad förbränning av avfall/biobränslen?
- **CCS respektive CCU**
När är vilken lösning bäst? Vilken klimatnytta kan olika alternativ ge?
- **Acceptansstudier**
Acceptans för CCS vid förbränning av biobränslen respektive avfall i olika intressentgrupper? Uppdaterad intervjustudie av acceptans kring styrmedel för CCS?

10 Referenslista

- 2050 Consulting, 2021. Backcasting – Hur når Sverige fossilfri avfallsförbränning från avfallsförbränning?
- Allen, M. o.a., (2020). *The Oxford Principles for Net Zero Aligned Carbon Offsetting*, u.o.: Smith school of enterprise and the environment, Oxford university
- Avfall Sverige (2012). Determination of the fossil carbon content in combustible municipal solid waste in Sweden. Rapport U2012:05 ISSN 1103-4092.
- Avfall Sverige (2021). Kapacitetsutredning 2021 - Energiåtervinning och mängder restavfall.
- Avfall Sverige (2021). Svensk Avfallshantering 2020.
- Beiron, J. m.fl. (2022). Teknik, systemintegration och kostnader för bio-CCS, Rapport 2022:837. ISBN 978-91-7673-837-5
- Bellamy, R., Fridahl, M., Lezaun, J., Palmer, J., Rodriguez, E., Lefvert, A., et al. (2021). Incentivising bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) responsibly: comparing stakeholder policy preferences in the United Kingdom and Sweden. *Environ. Sci. Policy* 16, 47–55. doi: 10.1016/j.envsci.2020.09.022
- Burke, J., Byrnes, R., & Fankhauser, S. (2019). How to price carbon to reach net-zero emissions in the UK. Policy report, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, London
- CinfraCap-projektet (2021). <https://www.goteborgshamn.se/hamnens-projekt/cinfracap/>
- Ember climate. Carbon price viewer, 20 september 2021; växelkurs EUR-SEK xe.com, 20 september 2021
- EU kommissionen (2021)., COM (2021) 551 final, DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757.
- Fortum, 2018. A full-scale CCS project initiated in Norway. <https://www.fortum.com/media/2018/11/full-scale-carbon-capture-and-storage-ccs-project-initiated-norway>
- Fortum, 2019. Positive results from the carbon capture and storage pilot in Oslo. <https://www.fortum.com/about-us/blog-podcast/forthedoers-blog/positive-test-results-carbon-capture-and-storage-pilot-oslo>
- Fossilfritt Sverige, 2019. Färdplan för fossilfri uppvärmningsbransch.

- Fridahl, M. (2019). Incitamentsstrukturer för bioenergi med koldioxidavskiljning och -lagring i Sverige och Europeiska unionen: Underlagsrapport till Klimatpolitiska vägvalsutredningen (M 2018:07). Linköping: Linköpings universitet och SEI.
- Fridahl, M. et al. (2020). Mapping Multi-Level Policy Incentives for Bioenergy With Carbon Capture and Storage in Sweden. *Frontiers in Climate* 2: 604787
- Fridahl, M., and Lundberg, L. (2021). Aktörspreferenser i Design av ett Stödsystem för bio-CCS. Linköpings universitet, tema miljöförändring.
- Fridahl, M., Lundberg, L. & Nehler, T. (2022). Stödsystem för bio-CCS i Sverige, Rapport 2022:839. ISBN 978-91-7673-839-9
- Fuss, S., and Johnsson, F. (2021). The BECCS implementation gap-a Swedish case study. *Front. Energy Res.* 8:553400. doi: 10.3389/fenrg.2020.553400
- Gassnova, 2020. Developing Longship. Key lessons learned. <https://gassnova.no/en/news/report-developing-longship-key-lessons-learned>
- IEA Bioenergy, 2021. Deployment of bio-CCS: case study on Waste-to-Energy – Fortum Oslo Varme (FOV). <https://task36.ieabioenergy.com/publications/deployment-of-bio-ccs-case-study-on-waste-to-energy/>
- Ignell, V., Johansson, E., 2021. Local Infrastructures for CCS Clusters - A Case Study of Two CHP Plants in Gothenburg [MSc Thesis]. Chalmers Tekniska Högskola.
- Jeffery, L., Höhne, N., Moisio, M., Day, T., & Lawless, B. (2020). Options for supporting Carbon Dioxide Removal. New climate institute. Retrieved from <http://newclimate.org/publications>
- Johnsson, F., Normann, F., Svensson, E. (2020). Marginal abatement cost curve of industrial CO₂ capture and storage - a swedish case study. *Front. Energy Res.* 8:175. doi: 10.3389/fenrg.2020.00175
- La Hoz Theuer, S., Doda, B., Kellner, K. and Acworth, W. (2021). Emission Trading Systems and Net Zero: Trading Removals. Berlin: ICAP.
- Löfblad, E. m.fl (2021). Samverkan kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid, Rapport 2022:838. ISBN 978-91-7673-838-2
- Microsoft. (2021). Microsoft carbon removal. Microsoft corporation
- Midroc & BluCarbon Solutions (2020). Tekniken bakom CCS, webinarium, 21 oktober 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=aoFNHVNjwXs&feature=youtu.be>, besökt den 23 februari 2021.
- Miljöprövningsutredningen (2021). <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/kommittedirektiv/2020/08/dir.-202086/>

- Multiconsult, 2019. Hvordan Gjøre CO2-Fangst Og -Lagring Lønnsomt? -Hvordan Nye Virkemidler Kan Utvikle Markeder for Lavkarbonprodukter. 10209499-TVF-RAP-001.
<https://www.nho.no/contentassets/931076d7f29042eba38a0b8e4d72a85b/rappport-multiconsult---hvordan-gjore-co2-fangst-og-lagring-lonnsomt.pdf>
- Möllersten, K. & Gustavsson, M. (2022). Hållbarhetsbedömning bio-CCS i fjärrvärmesektorn, Rapport 2022:840. ISBN 978-91-7673-840-5
- Naturvårdsverket (2021). Sweden's Territorial Emissions and Uptake of Greenhouse Gases. <http://www.naturvardsverket.se/klimatutslapp> (nedladdad 19 mars, 2021).
- Nordiccs-projektet (2021). <https://www.sintef.no/en/projects/2011/nordiccs-nordisk-ccs-kompetansesenter-/>
- Northern Light (2021). <https://northernlightscs.com/>
- Nylén, L., Vattenfall, personlig kommunikation, 2021.
- Pour, N., Webley, P., & Cook, P. (2018). Opportunities for application of BECCS in the Australian power sector. *Applied Energy*, 615-635
- Ramböll, 2020. CO2 FANGST PÅ DANSKE AFFALDSENERGIANLÆG. <https://danskaffaldsforening.dk/udgivelser/co2-fangst-fra-danske-affaldsenergianlaeg>
- Regeringen (2020). SOU 2020:4. Vägen till en Klimatpositiv Framtid - Betänkande av Klimatpolitiska Vägvalsutredningen, 2020. Stockholm, Norstedts Juridik
- Regjeringen, 2021. Heilskapeleg plan for å nå klimamålet. <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/heilskapeleg-plan-for-a-na-klimamalet/id2827600/>
- Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J. & Fridahl, M. (2021). Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading. *Front. Clim.* 3:690023. doi. 10.3389/fclim.2021.690023.
- Sandberg, P. (Equinor), 2020. Northern Lights - A European CO₂ transport and storage network [Presentation slides]. Retrieved from <https://zeroemissionsplatform.eu/co2-ts-infrastructure/> .
- SCB, 2019. Electricity supply, district heating and supply of natural and gasworks gas 2018, Sveriges officiella statistik.
- Schneider, L., Kollmuss, A. & Lazarus, M., 2014. Addressing the risk of double counting emission reductions under the UNFCCC, u.o.: Stockholm Environment Institute
- Stortingsmelding 33 "Langskip – fangst och lagring av CO₂" <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20192020/id2765361/>

Sundqvist, J-O, IVL Svenska Miljöinstitutet, personlig kommunikation.

ULVEN - analysverktyg och databas över mottagningsavgifter.
www.profu.se/ulven.htm

Vattenfall. The climate issue. In the line of fire.
<https://history.vattenfall.com/stories/in-the-line-of-fire/the-climate-issue>

Vivid economics, 2019. Greenhouse gas removal (GGR) policy options. Vivid Economics Limited 163 Eversholt Street London NW1 1BU United Kingdom.

Zetterberg L, Johnsson F and Möllersten K (2021). Incentivizing BECCS—A Swedish Case Study. *Front. Clim.* 3:685227. doi: 10.3389/fclim.2021.685227

Zetterberg, L., Källmark, L., & Möllersten, K. (2019). Incitament och finansiering av Bio-CCS i Sverige. IVL Svenska Miljöinstitutet.

Zetterberg, L. Johnsson, F., Möllersten, K. (2021) Incitament för Bio-CCS i fjärrvärmerna, Rapport 2022:836. ISBN 978-91-7673-836-8

BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN – SYNTES

Uppvärmningsbranschen har en vision om att år 2045 utgöra en kolsänka. Ett sätt att åstadkomma detta är genom att avskilja och lagra koldioxidutsläpp med biogent ursprung. Ett antal fjärrvärmeföretag har redan olika långt gångna planer på att satsa på bio-CCS. De har sett ett värde i att samarbeta kring hur detta kan åstadkommas. Ett led i detta är projektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn* som består av ett gediget underlag baserat på forskning kring olika aspekter av frågan samt en strategi baserad på det underlaget. I denna rapport redovisas en syntes av detta forskningsarbete.

Projektet visar att fjärrvärmesektorn har stor teoretisk potential att bidra med negativa koldioxidutsläpp, minst 10 Mton per år. Den största osäkerheten beträffande möjligheterna för bio-CCS gäller marknadsförutsättningarna.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk