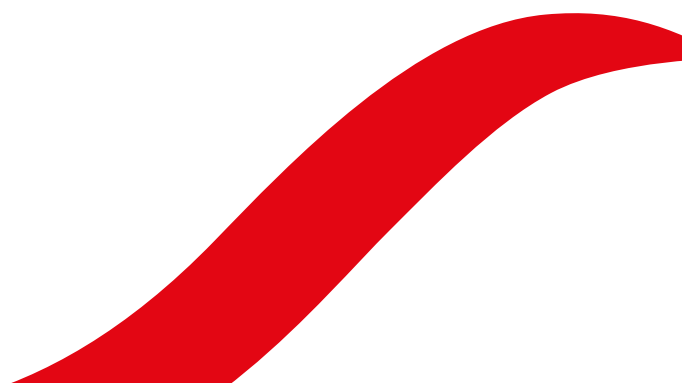




Från små steg till stora kliv

– En syntes av Industriklivets projekt
inom bio-CCS

ER 2022:11



Energimyndighetens publikationer kan laddas ner eller
beställas via www.energimyndigheten.se

Statens energimyndighet, juni 2022

ER 2022:11

ISSN 1403-1892

ISBN (pdf) 978-91-7993-079-0

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma

Förord

Senast år 2045 ska Sverige inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, för att därefter uppnå negativa utsläpp. För att nå detta mål måste nya lösningar utvecklas, effektiviseras och tillgängliggöras. Här spelar industrisektorns arbete och utvecklingsvägar en avgörande roll.

Satsningen Industriklivet är ett långsiktigt åtagande från staten för att stödja den svenska industrins omställning till fossilfrihet. Sedan uppdragets start år 2018 har stödet resulterat i åtskilliga satsningar som varit nödvändiga för att utveckla innovativa och teknikskiftande lösningar – däribland CCS-tekniken.

Industriklivet kan stödja CCS som en lösning om andra rimliga alternativ saknas. CCS är samtidigt – i form av bio-CCS – en kompletterande åtgärd till kraftiga utsläppsminskningar för att möjliggöra negativa utsläpp. Totalt har det beviljats stöd till ett 20-tal projekt med bäring på bio-CCS inom ramen för Industriklivet sedan dess start. Detta innebär att det har byggts upp en stor kunskapsbas som bland annat kan komma nya och återvändande sökanden till gagn. Likaså den som önskar få en fördjupad förståelse för utvecklingen av bio-CCS i Sverige och de förutsättningar som präglar industrins framtida vägval gynnas av denna samlade kunskap.

Denna rapport har tagits fram av CIT Industriell Energi inom ramen för Energimyndighetens CCS-arbete. Genom rapporten vill Energimyndigheten skapa en kunskapsbas inom ett område som är växande och under utveckling. Tillgången till andras erfarenheter är av väsentlig betydelse för den som önskar genomföra fördjupande studier på CCS och därigenom bidra till ett fossilfritt Sverige år 2045.

Mila Brandt
Enhetschef Näringsliv

Klara Helstad
Enhetschef Hållbar industri

Eskilstuna i juni 2022

Innehåll

Sammanfattning	3
Förkortningar	4
1 Inledning	5
2 Projektöversikt	7
2.1 Genomförbarhetsstudier	7
2.2 Projekt med pilottester	12
2.3 Samverkansprojekt	15
3 Kunskapssammanställning	17
3.1 Resultat och slutsatser från genomförbarhetsstudier	17
3.2 Resultat och slutsatser från pilotprojekt	24
3.3 Resultat och slutsatser från samverkansprojekt	25
4 Analys – Gemensamma nämnare och skillnader	28
4.1 Avskiljning	28
4.2 Förvätskning, mellanlagring och transport	31
4.3 Permanent lagring	32
4.4 Hela värdekedjan	32
5 Reflektioner	36
6 Sammanfattande slutsatser	37
6.1 Nyckelinformation för nya sökande	37
6.2 Resultat av Industriklivet-stödet	38
Appendix A: Mål – pågående genomförbarhetsstudier	40
Appendix B: Urval av tabeller och figurer från projektrapporter	42
Appendix C: Huvudresultat från Energiforsks rapport "Bio-CCS i fjärrvärmesektorn"	54

Sammanfattning

Ett flertal projekt som mottagit stöd från Industriklivet för förstudier kring bio-CCS visar på tekniskt och ekonomiskt möjliga lösningar för avskiljning, förvätskning, transport och permanent lagring av biogen koldioxid. Eftersom det än så länge inte finns en fullskalig värdekedja demonstrerad återstår dock ännu osäkerheter kring vad de faktiska kostnaderna för bio-CCS på svenska anläggningar kommer att bli. Baserat på slutrapporterna från projekten kan dock ett antal punkter lyftas fram som särskilt viktiga för att skapa rätt förutsättningar och underlag för bio-CCS och accelerera kostnadseffektiv implementering.

- Förutsättningarna för koldioxidavskiljning skiljer sig åt mellan anläggningar. Generellt är det fördelaktigt med stora koldioxidvolym, höga koldioxidhalter i rökgaserna och många fullasttimmar, men antal skorstenar, tillgängligt utrymme och tillståndssituation är också exempel (bland flera) på faktorer som påverkar kostnader, praktisk genomförbarhet och val av teknik.
- Ytterligare tester av tekniken i mindre skala kan krävas för att validera och utveckla tekniken i vissa tillämpningar och få ner kostnaderna.
- Fördjupade utredningar av energiintegrationsmöjligheter behövs utifrån varje anläggnings förutsättningar.
- Det är av stor vikt att tidigt förbereda och samordna tillstånds- och samrådsprocesser för att undvika långa ledtider.
- Affärsmodell bör utarbetas utifrån olika scenarier om möjliga intäktsströmmar på grund av osäkerheter i olika föreslagna/potentiella finansieringslösningar.
- Skalfördelar och möjlighet att dela på investering och risker gör det tydligt motiverat att om möjligt samverka med andra aktörer kring förvätskning och infrastruktur och logistik för transport och mellanlagring.

Listan ovan bygger på en sammanställning och analys av de resultat som redovisats av projekten, och som presenteras i mer detalj i den här rapporten. Utöver kunskapssyntesen från avslutade projekt presenterar rapporten en översikt och kategorisering av såväl avslutade som pågående projekt som beviljats stöd från Industriklivet med relevans för området bio-CCS. Sammanställningen av avslutade projekt visar att stödet från Industriklivet har lett till ökad kunskap om möjligheten att implementera bio-CCS, och i flera fall lagt grunden till fördjupade studier och fortsättningsprojekt och till att samarbeten inlemts och utvecklats mellan olika aktörer.

Förkortningar

AMP/DMSO	AMP: 2-amino-2-metyl-1-propanol; DMSO: Dimetylsulfoxid
BECCS	Bio-Energy Carbon Capture and Storage (bio-CCS)
CAP	Chilled Ammonia Process (kyld ammoniakprocess)
CAPEX	Capital Expenditure (investeringskostnad)
CCS	Carbon Capture and Storage (koldioxidavskiljning och lagring)
CCU	Carbon Capture and Utilization (koldioxidavskiljning och användning)
DAC	Direct Air Capture (avskiljning direkt från luften)
FEED	Front-End Engineering Design (detaljerad teknisk planering)
HPC	Hot Potassium Carbonate (varm kaliumkarbonat)
HPC FE	HPC Full Electric (helelektrisk HPC)
HPC ES	HPC Electric Steam (el- och ångdriven HPC)
HSE	Health, Safety and Environment (hälsa, säkerhet och miljö)
HVC	Hetvattencentral
IED	Industrial Emissions Directive (Industriutsläppsdirektivet)
KVV	Kraftvärmeverk
MEA	Monoetanolamin
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning
MMD	Mark- och miljödomstolen
MPD	Länsstyrelsens miljöprövningsdelegation
OPEX	Operating Expenditure (driftkostnader)
PSA/Cryo	Pressure Swing Adsorption/Cryogenic separation (adsorption och förvätskning)
tg	Torr gas
TRL	Technology Readiness Level (teknisk mognadsgrad)

1 Inledning

Sveriges riksdag har antagit klimatmålet att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären 2045 och därefter uppnå negativa utsläpp. Vägen mot nettoutsläpp kräver stora utsläppsminskningar, men också kompletterande åtgärder för att kompensera för utsläpp som är mycket svåra att undvika, och för att på sikt nå negativa nettoutsläpp. För att nå detta krävs satsningar på innovativa och teknikskiftande lösningar. En sådan teknisk lösning är CCS (Carbon Capture and Storage), det vill säga avskiljning och lagring av koldioxid. CCS från fossila utsläppskällor är en utsläppsminskande insats i likhet med andra åtgärder som energieffektivisering och minskad användning av fossil energi. När CCS används för att fånga in och permanent lagra koldioxid från biogena utsläppskällor (Bio-CCS) leder det till negativa utsläpp.

Genom att bio-CCS leder till negativa utsläpp, är det en av få möjliga tekniker som kan användas som kompletterande åtgärd. Bio-CCS ses därför som en nödvändig teknik för att uppnå Sveriges klimatmål, men också som en viktig pusselbit för att nå de negativa utsläpp som krävs för att hålla den globala temperaturökningen väl under två grader. Sverige har sällsynt goda möjligheter till bio-CCS tack vare goda tillgångar på biomassa. Biomassan används som råvara för massa- och pappersindustrin och restprodukter från massaindustri och skogsbruk används för fjärrvärmeproduktion. Detta har resulterat i att Sverige har ett stort antal stora punktsläppskällor av biogen koldioxid.

Ett medel för att stödja klimatomställningen i svensk industri är den långsiktiga satsningen Industriklivet som Energimyndigheten ansvarar för. Inom Industriklivet kan bidrag ges till förstudier, forsknings-, pilot- och demonstrationsprojekt och investeringar inom följande tre områden:

- Processindustrins utsläpp av växthusgaser
- Negativa utsläpp
- Strategiskt viktiga insatser inom industrin

Att Industriklivet omfattar området negativa utsläpp skapar förutsättningar att stödja den teknikomställning som krävs för att nå de nationella klimatmålen om negativa utsläpp. Genom Industriklivet finns därmed en långsiktig satsning för stöd till sådan forskning, innovation och investeringar som krävs för att realisera bio-CCS i Sverige.

Energimyndigheten fick genom Regleringsbrev för 2018 i uppdrag att ansvara för Industriklivet. I och med vårändringsbudgeten 2019 utvidgades Industriklivet för att också ge stöd till investeringar i teknik som kan leda till negativa utsläpp genom att avskilja, transportera samt geologiskt lagra växthusgaser av biogent ursprung eller som tagits ut ur atmosfären. Sedan starten har Industriklivet beviljat drygt 1 586 miljoner kronor till olika projekt, varav 490 miljoner kronor till projekt inom CCS. Den stora omfattningen av beviljat stöd till CCS-projekt innebär att det har byggts upp en stor kunskapsbas inom området. Bland de beviljade projekten finns projekt både för att minska processrelaterade utsläpp och för att skapa negativa utsläpp genom CCS från biogena utsläppskällor (Bio-CCS). Det finns också projekt inom olika delar av värdekedjan för CCS – avskiljning, mellanlagring och transport, och projekt som täcker in hela värdekedjan från avskiljning till permanent lagring.

En mycket stor del av projekten har koppling till just bio-CCS antingen direkt, genom att de är genomförbarhetsprojekt för bio-CCS på olika anläggningar eller samverkansprojekt kring bio-CCS, eller indirekt, genom sin inriktning mot logistik/infrastruktur för transport och lagring av koldioxid som då också inkluderar biogen koldioxid. Detta gör att det finns ett särskilt intresse av att sammanställa resultat och kunskap från Industrilivet inom just området bio-CCS.

Genom projekten har det byggts upp en stor kunskapsbas som bland annat kan komma nya och återvändande sökanden till gagn. Likaså den som önskar få en fördjupad förståelse för utvecklingen av bio-CCS i Sverige och de förutsättningar som präglar industrins framtida vägval gynnas av denna samlade kunskap. Tillgången till andras erfarenheter är av väsentlig betydelse för den som önskar genomföra fördjupande studier på CCS och bidra till ett fossilfritt Sverige år 2045. Denna rapport sammanställer lärdomar och erfarenheter från CCS-projekt som mottagit stöd från Industrilivet, och som har betydelse för utvecklingen av bio-CCS. Syftet med syntesen är dels att tillhandahålla en kunskapsbas för nya sökanden i Industrilivet så att de kan börja längre fram i processen med att realisera CCS på sina anläggningar, dels att understödja kunskapsutbyte och samarbete mellan gamla och nya sökanden i Industrilivet.

Urvalet av projekt för kunskapssyntesen har gjorts av Energimyndigheten, och har utgått ifrån att projekten ska ha en tydlig koppling till utvecklingen av bio-CCS. CCS-projekt med huvudsaklig inriktning mot fossila utsläpp ingår därför inte. Även rena forskningsprojekt har uteslutits, och syntesen inkluderar därmed projekt i form av förstudier/genomförbarhetsstudier, samverkansprojekt och pilottester.

Sedan 2021 har Energimyndigheten också andra pågående uppdrag inom CCS-området och speciellt med inriktning mot negativa utsläpp med hjälp av bio-CCS. Energimyndigheten har som uppdrag att vara ett Nationellt centrum för CCS och det övergripande målet är att ta fram, tillhandahålla och på ett enkelt sätt förmedla oberoende och trovärdig kunskap rörande utveckling av olika aspekter av CCS-området. Energimyndigheten har också fått i uppdrag att ansvara för ett statligt stödsystem för bio-CCS med en budgetram på 36 miljarder kronor för perioden 2026–2046.

2 Projektöversikt

Det här avsnittet ger en översiktlig beskrivning av projekten. Projekten har delats upp i tre kategorier:

- Genomförbarhetsstudier/förstudier för specifika anläggningar (med fokus på avskiljning eller hela värdekedjan för CCS).
- Projekt som inkluderar pilottester.
- Samverkansprojekt (infrastrukturprojekt, syntesprojekt).

2.1 Genomförbarhetsstudier

Den stora gruppen projekt är genomförbarhetsstudier¹ (övergripande genomförbarhetsstudier, förstudier, pre-FEEDs) med enskilda anläggningar i fokus där koldioxidavskiljning kan implementeras. I Tabell 1 listas avslutade genomförbarhetsstudier med syfte och mål. Det finns också en stor grupp av pågående projekt av den här typen. De har alla liknande övergripande mål: att fördjupa kunskap om CCS på anläggningen/i det lokala systemet samt att ta fram underlag och affärsmodeller för kommande beslut, projektering och tillståndprocesser. Mål och syfte för de pågående genomförbarhetsprojekten finns i Appendix A, Tabell A.1. Syfte och mål som beskrivs i tabellerna baseras på projektansökningar och/eller slutrapporter, men har bearbetats för att korta ner formuleringarna.

Som framgår av målbeskrivningarna täcker projekten i allmänhet in hela värdekedjan, även om en majoritet av projekten har en tyngdpunkt på avskiljning och/eller lokala logistiklösningar för mellanlagring och transport till hamn när det gäller de teknoekonomiska utvärderingarna. Detta är också de delar aktörerna själva har störst rådhighet över. Stora Ensos uppföljande projekt fokuserar dock enbart på energibehovet för avskiljningen, men har å andra sidan en mer övergripande genomförbarhetsstudie som grund.

¹ I stödhänseende är dessa projekt att se som miljöstudier (Artikel 49 Stöd för miljöstudier, GBER).

Tabell 1. Avslutade genomförbarhetsstudier – Syfte och mål.

	Syfte och mål
Genomförbarhetsstudie för Bio-CCS inom Stora Enso svenska sulfatfabriker	Utreda om det är tekniskt, operationellt, marknadsmässigt och ekonomiskt möjligt att implementera ett fullskaligt system för avskiljning, förvätskning, transport och lagring av biogena koldioxidutsläpp från Stora Ensos (SE) svenska sulfatfabriker (Skoghall och Skutskär).
Energiutvärdering av koldioxidinfångnings-tekniker i ett svenskt sulfatmassabruk (Stora Enso)	– Undersöka om det är möjligt att reducera behovet av extern energi genom att studera olika infångnings- och förvätsknings-teknologier som är mest lämpade för energiintegration med en sulfatfabrik. – Undersöka vilka former av extern energi som behöver förse infångningsanläggningen och hur det är möjligt att försäkra sig om att dessa är miljövänliga.
Genomförandestudie bioCCS på Igelstaverket (Söderenergi)	Ta fram grundläggande förutsättningar för att etablera BECCS-anläggning på Igelstaverket (inklusive utvärdering av infångningstekniker, transport och lagring) – Ta fram olika förslag med varierande infångad mängd CO₂ för att utvärdera vilken lösning som passar bäst för Igelstaverket på sikt.
Rollen av BioCCS för negativa koldioxid-utsläpp i Uppsala kommun (Vattenfall)	– En teknoekonomisk beskrivning av hur många ton CO₂/år som kostnads-effektivt kan tas bort ur rökgaserna genom CCS på olika delar i Bolandsverket, dvs avfallsblock 1, 4 och 5, Carpe Futurum (KVV, kraftvärmeverk) och HVC (hetvattencentral). – Utvärdera logistiklösningar, klimatpåverkan från ett LCA-perspektiv och ännu ej kommersialiserade CCS-tekniker. – Utföra energisystemsmoduleringar för Uppsala kommuns energisystem. – Projektet utvärderar också produktion och användning av biokol samt användning av CO₂ i framställningen av metanol (dvs Carbon Capture and Utilization, CCU).
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Mälarenergis Kraftvärmeverk i Västerås	Öka förståelsen för hur implementering av fullskalig koldioxidavskiljnings-avskiljning vid kraftvärmeverket i Västerås (KVV) kommer påverka befintlig verksamhet och huruvida det är en realistisk investering – Uppskatta vilken investering och vad för logistikkedja som skulle krävas av avskild koldioxid till lagringsplats.
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Bodens Energis kraftvärmeverk	Analysera om det är genomförbart att etablera fullskalig avfalls-CCS vid Bodens kraftvärmeverk – Identifiera nödvändiga partnersamarbeten med relevanta aktörer. – Ta fram scenarier för hållbar affärsmodell och bygga kunskap om risker och kostnader längs hela logistikkedjan. – Identifiera vilken teknik för koldioxidavskiljning som är bäst lämpad för Bodens Energis förutsättningar. – Bygga kunskap om möjliga logistik- och transportlösningar.
Sysav – övergripande förstudie avfalls-CCS	Ta fram underlag för fördjupad förstudie – Lista med screenade infångningstekniker med bedömning om hur de passar för energianläggningen. – Detaljerade utvärderingar av utvalda infångningstekniker. – Utvärdera tänkbara alternativ för transport och lagring utifrån Sysavs förutsättningar. – Analyser av de ekonomiska och juridiska förutsättningarna för investering och drift.

Anläggningarna har olika förutsättningar för att realisera CCS. Viktiga faktorer inkluderar vad det är för typ av anläggning (till exempel biokraftvärme eller avfallskraftvärmeverk), lokalisering (närhet till hamn/andra transportmedel, närhet till permanent lagringsplats), vilka koldioxidvolymerna det handlar om, antal skorstenar och koldioxidkoncentrationer i rökgaserna. De specifika förutsättningar för att realisera CCS är sammanfattade i Tabell 2 (avslutade projekt) och Tabell 3 (pågående projekt). På grund av skillnader i detaljnivå i slutrapporterna (till exempel om koncentrationer är angivna på torr eller våt basis) skiljer sig också detaljnivån i beskrivningarna av förutsättningar något.

Tabell 2. Avslutade genomförbarhetsstudier – Specifika förutsättningar. För förklaring av förkortningar hänvisas till listan på sida 4.

	Typ av anläggning	Volym koldioxid	Andra specifika förutsättningar
Genomförbarhetsstudie för Bio-CCS inom Stora Enso svenska sulfatfabriker	Massa- och papper: Sulfatmassabruk Fokus på SE Skutskär (kustnära)	ca 1 milj ton biogen CO ₂ /år	– Koldioxid från 2 sodapannor och mesaugnarna. – Jämförelse av fem olika avskiljningstekniker (Amine based, HPC Electric, HPC Steam, Chilled ammonia, PSA/Cryo). – Koldioxidkonc. 22 % från mesaugnar, och 12 % resp 16 % från de två sodapannorna.
Energiutvärdering av koldioxidinfångningstekniker i ett svenskt sulfatmassabruk (Stora Enso)	Massa- och papper: Sulfatmassabruk Modellanläggning	ca 1 milj ton biogen CO ₂ /år	– Modellfabrik (modern, energieffektiv, har t.ex. stor kondensator). – Jämförelse av fyra avskiljningstekniker (Amine based, HPC electric, HPC Steam, PSA/Cryo).
Genomförandestudie bioCCS på Igelstaverket (Söderenergi)	Värmeverk och biokraftvärmeverk Hamnnära	Totalt 835 000 ton biogen CO ₂ /år varav Kraftvärmeverket 650 000 ton/år, värmeverket 185 000 ton/år	– Igelsta värmeverk: tre pannor för fjärrvärmeproduktion. – 12 % CO₂ från bägge anläggningar (torr gas). – Egen kaj för transporter från Södertälje. Närhet till Södertälje hamn där ytor kan användas för ett eller flera delsteg i bio-CCS-kedjan.
Rollen av BioCCS för negativa koldioxidutsläpp i Uppsala kommun (Vattenfall)	KVV (avfall & biobränsle) + (HVC) Inland	Totalt ca 600 000 ton biogen och fossil CO ₂ /år varav HVC 49 000 ton/år (bio), Carpe Futurum 141 000 ton/år (bio), avfalls-KVV 411 000 ton/år (varav 240 000 ton biogent).	– Avfallskraftvärmeverken är av typ moving-grate, HVC är av typ suspensionsförbränning, Carpe Futurum är av typ bubblande fluidiserad bädd (ej färdig än). – HPC, aminer och CAP utvärderas. – CO₂-halt: 8,5–9,5 % tg för avfalls-KVV, 12 % tg för HVC, 15,7 % för Carpe Futurum. – Bolandsverket ligger inte vid kusten. Logistiklösningar undersöks där systemgränsen dras från mellanlager på site (efter förvätskning) till mellanlager innan permanent lagring.
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Mälarenergis Kraftvärmeverk i Västerås	Biokraftvärme Hamnnära	Totalt ca 820 000 ton CO ₂ /år varav 460 000 ton biogent – Block 6: ca 360 000 ton fossil CO ₂ /år och 200 000 ton biogen CO ₂ /år – Block 7: 260 000 ton biogen CO ₂ /år	– Hanterar idag olika logistiklösningar för bränsle. – Avståndet mellan rökgasstackarna är för stort och utrymmet för litet för att leda rökgaserna till gemensam avskiljningsanläggning. – HPC, aminer och CAP utvärderas. – Block 6: 12,7 % CO₂ tg & Block 7: 17,7 % CO₂ tg Generellt 10–17 % CO₂ (dellast kräver högre luftöverskott => ner mot 10 %). – Två alternativ för förvätskad CO₂: 7 bar -55C (billigare och högre densitet) och 15 bar -25C. – Antar transport av CO₂ via fartyg/järnväg i hamnen. – Greensand (Danmark) är vald som lagringsplats.

	Typ av anläggning	Volym koldioxid	Andra specifika förutsättningar
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Bodens Energis kraftvärmeverk	Avfall Inland	Möjlig avskiljning 112 000 – 144 000 ton CO ₂ per år varav 77 000 – 105 000 ton biogent	– Två avfallseldade pannor. – Liten aktör med små utsläpp. – Lokaliserad ca 4 mil från Luleå. – Koldioxidkoncentration i rökgaser 7–10 %. – HPC, aminer och CAP utvärderas. – Integration av värmepump har utretts för aminer och CAP. – Tågtransport till antingen Narvik eller Luleå. – Lagringsalternativ: Horisont Energi, Northern Lights & Greensand.
Sysav – övergripande förstudie avfalls-CCS	Avfall Kustnära	Möjlig avskiljning (fossilt+biogent) ca 430 000 ton CO ₂ /år från befintliga pannor och ytterligare ca 200 000 ton/år från ny panna	– Befintlig anläggning för energiåtervinning från avfall. – Grundsценariot har varit avskiljning från befintliga pannor P3 and P4, med ett alternativt scenario där även en framtida panna P5 inkluderas. – P3 och P4: ca 9,3 % CO₂ (våt gas). P5 ca 9,7 % CO₂. – Antagande: mängden avfall till förbränning och fjärrvärme-produktionen oförändrad jämfört med basfallet utan CCS. – Utvärdering av två avskiljningstekniker: aminbaserad teknik (MEA) och HPC. – Två alternativ för transport & lagring: rörtransport från anläggning till kustnära lagring alternativt lastbilstransport till hamn följt av fartygstransport till offshore-lagring.

Tabell 3. Pågående genomförbarhetsstudier – Specifika förutsättningar.

	Typ av anläggning	Volym koldioxid	Andra specifika förutsättningar
Systemstudie bio-CCS Igelsta (Söderenergi)	Värmeverk och biokraftvärme Hamnnära	Totalt 835 000 ton biogen CO ₂ /år varav Kraftvärmeverket 650 000 ton/år, värmeverket 185 000 ton/år	– Södertälje hamn ska involveras som aktiv part med fokus på logistik och transportlösningar.
Sundsvall som nod för infångning och mellanlagring av koldioxid (SIMCO2) (Sundsvall Energi)	Avfall Kustnära (hamnnära)	Potential nuvarande projektmedlemmar: 120 000 ton biogen CO ₂ per år och 80 000 ton fossil CO ₂ per år	– Avskiljning från en eller flera anläggningar. – Tillgängliga bergrum skulle kunna användas som mellanlager. – Industrietät region med väl utbyggd hamninfrastruktur.
Positiv klimatpåverkan med kraftvärme-integrerad BECCS – förberedelsefasen (POSCLIMB-prepare) (Växjö Energi)	Biokraftvärme Inland	180 000 ton biogen CO ₂ per år (släpper idag ut 200 000 ton/år)	– Har inte valt teknik initialt, låter upphandlingen styra teknikvalet.
Helsingborgs innovativa Carbon capture and Storage projekt, HICAS (Öresundskraft)	Avfall Kustnära	Fullskalig anläggning: 210 000 ton CO ₂ /år varav 120 000 ton biogent	– Anläggningen drivs som baslast (ca 8 200 drifttimmar per år). – Fjärrvärmenät som är sammanvävt mellan tre städer. – Utredning av HPC-teknik (tidigare har aminbaserad teknik utvärderats).
Genomförbarhetsstudie av BECCS vid Johannes samt logistikkoncept via Gävle hamn (Gävle Kraftvärme)	Biokraftvärme Kustnära (hamnnära)	Vid ev fullskalig implementering: 110 000 ton/år biogen CO ₂ (Potential för bio-CCS-kluster: 2,6 milj ton/år)	– Utredning kring logistiksamarbete med t.ex. Korsnäsverken, Bomhus Energi och Skutskärs bruk (tot ca 2,6 milj ton biogen CO ₂). – Jämförelse av tre avskiljningstekniker. – Hela logistikkedjan utreds, med mellanlagring i Gävle hamn.
Genomförbarhetsstudie och förberedelse för investering av Bio-CCS på Hedensbyn kraftvärmeverk (Skellefteå)	Biokraftvärme Kustnära	Långsiktigt 150 000 ton biogen CO ₂ per år	
Hamnnära Bio-CCS vid Norrlands knutpunkt (Umeå Energi)	Biokraftvärme och avfall Kustnära (hamnnära)	Potential ca 300 000 ton biogen CO ₂ per år (plus ca 60 000 ton fossilt)	– Två kraftvärmeverk på samma område: en avfallspanna och en biopanna med gemensam skorsten. – Spillvärmeöverskott under sommarmånaderna. – Arbetet med transportlösningar kommer att samordnas med byggandet av Dåva Terminal och Norrbottniabanan, med NLC (Nordic Logistic Center) samt med Umeå Hamn.

	Typ av anläggning	Volym koldioxid	Andra specifika förutsättningar
Klimatpositiv fjärrvärme med BECCS (Skövde Energi)	Biokraftvärme och avfall Inland	Potential ca 100 000 ton biogen CO ₂ per år (plus idag knappt 30 000 ton fossila utsläpp)	– Avskiljning från två kraftvärme-pannor: en biopanna och en avfallspanna, med varsin skorsten. – Tre teknikalternativ för avskiljning jämförs. – Tillgång till spillvärme från flera industrier i kommunen. – Lokal och regional samverkan kring logistik och transportinfrastrukturen bedöms ha stor betydelse för genomförbarheten. Olika alternativ för transport till hamn utreds, t.ex. rörledning och tågtransport.
BECCS som största kolsänka i Mariestad (Katrinefors Kraftvärme)	Biokraftvärme	Potential efter utbyggnad av produktionskapacitet ca 120 000 ton biogen CO ₂ per år	– Installation av koldioxidavskiljning och förvätskning i samband med ökad nyttjandegrad och i kombination med eventuell ny förbränningspanna. – Kraftvärmeverket producerar fjärrvärme, men också processånga till närliggande industri. – Lokal och regional samverkan kring logistik och transportinfrastrukturen bedöms ha stor betydelse för genomförbarheten. Därför initieras samarbeten kring logistik, transport och mellanlagring med bolag och industrier i närheten av Mariestad och företag runt Vänern.
Genomförbarhetsstudie för bio-CCS på Åby och Händelö kraftvärmeverk (E.ON Energiinfrastruktur)	Kraftvärme bio och avfall	Totalt upp till 800 000 ton CO ₂ /år (inkl fossil CO ₂)	– Händelö: Närhet till Bråviken (fartygstransport av CO₂). – Åby: Mitten av Närke (troligen tågtransport av CO₂).

2.2 Projekt med pilottester

Fyra av projekten inkluderar testning i pilotskala. I samtliga projekt handlar det om testning av post combustion-teknik. Tre av projekten avser testning av HPC-tekniken, och ett projekt som har mer tyngdpunkt på forskning är inriktat på en solvent som kallas AMP/DMSO². Dessa forsknings- och utvecklingsprojekt listas i Tabell 4 med en beskrivning av syftet och målet med respektive pilotstudie. I alla projekt handlar det bland annat om att skapa underlag för dimensionering, verifiering av beräkningsmodeller och skaffa erfarenhet av drift. Specifika förutsättningar för de fyra studierna presenteras i Tabell 5.

² HPC: Hot Potassium Carbonate (varm kaliumkarbonat) AMP/DMSO: 2-amino-2-metyl-1-propanol/Dimetylsulfoxid

Tabell 4. Projekt med tester i pilotfas – Syfte och mål. För förklaring av förkortningar hänvisas till listan på sida 4.

	Status	Syfte/mål
Tester av BECCS genom HPC vid kraftvärmeverk (Stockholm Exergi)	Avslutat	– Utvärdera om det går att använda en kaliumkarbonatlösning (HPC) för infångning av koldioxid från Värtaverkets kraftvärmepanna KVV8 (365 MW_m) eldad med biomassa. – Undersöka om additiv i form av bor och vanadin kan göra koldioxidinfångningen mer effektiv. – Bygga upp erfarenhet i form av drifttimmar. – Erbjuder bättre möjligheter till teknoekonomisk utvärdering av BECCS-anläggning med HPC. – Komplettera med simuleringar för att förutsäga prestandan i en fullskalanläggning. – Jämföra HPC med andra CCS processer.
Utvidgade tester av BECCS genom HPC vid kraftvärmeverk (Stockholm Exergi)	Pågående	Skapa underlag för dimensionering med 70–95 % infångningsgrad (ambitionen är 90 %) genom att bygga en ny anläggning med högre kolonnhöjder (framför allt absorbern) för att bättre kunna se potentialen för infångad CO₂. Grund för beslut om fullskalig anläggning. – Identifiera driftförhållanden som minimerar driftkostnader och åtgång av högvärdig ånga/eleffekt. – Utvärdera hur additiv påverkar infångningsgraden och energiflöden och investeringskostnad. – Verifiera att optimala driftbetingelser inte deaktiverar lösningen. – Utvärdera passande placering, storlek och typ av utrustning för en framtida storskalig anläggning.
Energisnål koldioxid-infångning med AMP/DMSO (Lunds universitet)	Pågående	Påvisa att AMP/DMSO-tekniken på ett energieffektivt sätt kan användas för infångning av koldioxid från bio- och avfallseldade kraftvärmeverk. – Utveckla, designa och bygga absorptionskolonn, separation av amin och lösningsmedel, värmeväxlare, desorptionskolonn och kylsystem anpassat till AMP/DMSO-tekniken. – Energiförbrukning på < 1,2 GJ/ton CO₂ för regenerering och < 0,5 GJ/ton CO₂ för integrerat system.
HPC pilottest för avfallsförbrännings-anläggning, HICAS (Öresundskraft)	Pågående	Utveckla och utvärdera HPC-processen för avfallsförbränning och ge underlag till teknoekonomisk och miljömässig utvärdering av HPC-baserad CCS-kedja, praktisk erfarenhet av drift av pilotanläggningen, information till allmänheten, och stärkt möjlighet till stöd från t.ex. EUs innovationsfond. – Fastställa optimalt partialtryck av koldioxid i avskiljningsprocessen för rökgasen. – Fastställa sammansättning, koncentration och förbrukning av sorbent och katalysatorer, degradering av sorbent och eventuella degraderingsprodukter som uppstår med rökgasen. – Fastställa hur absorptions- och desorptionskolonnernas fyllkroppspackning ska dimensioneras. – Verifiera energiförbrukning med målsättning att understiga 1 MJ/kg CO₂ genom värmeåtervinning. – Fastställa beräkningsmodell för emissioner som CO₂, SO_x och NO_x. – Underlag för att verifiera och förfina modell av Filbornaverket med HPC.

Tabell 5. Projekt med tester i pilotfas – Specifika förutsättningar. För förklaring av förkortningar hänvisas till listan på sida 4.

	Typ av anläggning	Volym koldioxid	Andra specifika förutsättningar
Tester av BECCS genom HPC vid kraftvärmeverk (Stockholm Exergi)	Biokraftvärme med flis (blandning av GROT, bark, stamvedsflis mm). Har även tillstånd för att elda flisat returträ (RT)	KVV8: Totalt 0,9 Mton biogen koldioxid/år varav en fullt utbyggd process skulle fånga in ungefär 0,8 Mton biogen koldioxid/år	– Delar av rökgasen (ca 100–250 Nm³/h) från kraftvärmeanläggningen KVV8 nyttjas till en pilotanläggning där koldioxid fångas in med HPC-tekniken (Hot Potassium Carbonate). Rökgasen kyles till 20 °C och komprimerad i en rök-gaskompressor till 4–7 bar. 14,7–14,9 % CO₂ under tester. – Tester görs med olika rök-gasflöden, temperaturer på solventen, kvot mellan vätska och gas m m. – Flytande koldioxid (-50C, 7 bar) är slutprodukten.
Utvidgade tester av BECCS genom HPC vid kraftvärmeverk (Stockholm Exergi)	Biokraftvärme med flis (blandning av GROT, bark, stamvedsflis mm). Har även tillstånd för att elda flisat returträ (RT)	KVV8: Totalt 0,9 Mton biogen koldioxid/år varav en fullt utbyggd process skulle fånga in ungefär 0,8 Mton biogen koldioxid/år	– Grundförutsättningarna samma som ovan. – Användning av högre kolonner (30 m istället för 1 m): i) Minskad påverkan av mätfel på resultatet. ii) Förbättrade möjligheter att utvärdera den fulla effekten av katalysatorerna. iii) En längre reaktionsgradient gör det praktiskt möjligt att mäta och studera reaktionsförloppet i kolonnerna. – Förbättrad isolering för att minska risken för utfällning av salter. – Snabbare analys av uttagna prover genom automatisering. – Variation av pH för att se hur reaktionshastigheten påverkas.
Energisnål koldioxidinfångning med AMP/DMSO (Lunds universitet)	Flera kraftvärmeverk – Växjö Energis Sandviksverk (bio) – Sysavs Panna 3 eller 4 (avfall) – Öresundskrafts Filbornaverket (avfall)	Vid fullskalig implementering: 630 000 ton/år biogen CO ₂ och 270 000 ton/år fossil CO ₂ fångas in	– Solvent: AMP/DMSO vilket är en amin löst i organiskt lösningsmedel. Ger utfällning vid reaktion med CO₂ som kan avskiljas från lösningsmedlet innan regenerering, vilket minskar energibehovet drastiskt. Lösningen kan också regenereras vid lägre temperaturer vilket gör det möjligt att nyttja överskottsvärme. – Pannor med befintlig rök-gaskondensering dvs låg rök-gastemperatur.
HPC pilottest för avfallsförbrännings-anläggning, HICAS (Öresundskraft)	Avfall, kraftvärme	Fullskalig anläggning 210 000 ton CO ₂ /år varav 120 000 ton biogent	– Koldioxidkoncentration ca 10–11 %. – HPC-teknik för rökgaser från avfallsförbränning.

2.3 Samverkansprojekt

Några av projekten som har fått stöd av Industrilivet har karaktären av bredare samverkansprojekt. Till den här kategorin hör inte minst Energiforsks forsknings- och syntesprojekt kring bio-CCS i fjärrvärmesektorn. Här finns också de två delprojekten CinfraCap (fas I och fas II), som handlar om samverkan kring infrastruktur för transport och mellanlagring i Göteborgs hamn. CinfraCap-projekten kan också klassificeras som genomförbarhetsstudier, men inte för de enskilda anläggningar där koldioxid kan avskiljas, utan för den tänkta gemensamma anläggningen för förvätskning och mellanlagring. Projekten beskrivs i Tabell 6 och Tabell 7 nedan. Till kategorin samverkansprojekt skulle även projektet som leds av Lunds universitet kunna räknas. Detta presenterades dock i avsnitt 2.2 då det även inkluderar testning för forskning och utveckling.

Tabell 6. Samverkansprojekt – Syfte och mål.

	Status	Syfte och mål
CinfraCap I – Infrastruktur för transport och mellanlagring av infångad koldioxid – en effektiv distributionskedja (Preem)	Avslutat	Ta fram ett förslag på gemensam lösning för Preem, St1, Göteborg Energi, Renova och Göteborgs Hamn för att få en betydande kostnadseffektivisering av värdekedjan för CCS. Lösningen ska också möjliggöra tredjepartsanslutning.
CinfraCap II – Infrastruktur för transport och mellanlagring av infångad CO₂ (Nordion Energi)	Pågående	Fördjupning av tidigare studie – Beslutsunderlag för initiering av Basic Design/FEED för CinfraCap:s infrastruktur. – Underlag för ansökan för EU-finansiering (t.ex. Innovation fund, Horizon, Connecting Europe Fund) för en storskalig pilot, dvs fullskalig anläggning i ett nytt koncept. – Ta fram en synkroniserad tidsplan för CinfraCap. – Analysera potentiella lokaliseringar för permanent lagring av infångad koldioxid. – Ta fram förslag på affärsmodell inklusive kontraktsförslag. – Identifiera projektrisker (tekniska, ekonomiska, affärsmässiga, legala) och förslag på riskhanteringsåtgärder. – Sammanställa ramar och innehåll till teknisk beskrivning samt miljökonsekvensbeskrivning (MKB) för miljötillståndsansökan.
Färdplan för BECCS i fjärrvärmesektorn i Sverige + BECCS i fjärrvärmesektorn (Energiforsk)	Avslutat	Ta fram underlag till fjärrvärmeföretagens strategi för bio-CCS – Grundlig genomgång av förutsättningar för bio-CCS inom svenska fjärrvärmesektorn. – Vägledning till fjärrvärmeföretag när det gäller implementering av bio-CCS: robusta utvecklingsvägar, affärsmodeller, samverkan för minskade kostnader och investeringsrisker kring infrastruktur

Tabell 7. Samverkansprojekt – Specifika förutsättningar.

	Del av värdekedjan	Typ av anläggningar	Typ av projekt och andra förutsättningar
CinfraCap Fas I & Fas II Infrastruktur för transport och mellanlagring av infångad CO₂	Transport och mellanlagring	Anläggning för förvätskning och mellanlager samt export till fartyg. CO ₂ från två raffinaderier och två kraftvärmeverk (varav ett eldas med avfall)	Samverkansprojekt, förstudie – Fas I: Teknoekonomisk utvärdering av separat förvätskning (scenario A) och gemensam förvätskning (scenario B). – CO ₂ från Preem Göteborg, St1 och Göteborg Energi som alla ligger vid hamnen, samt från Renova som inte ligger vid hamnen. – Mängden CO ₂ förväntas rampas upp, från initialt 400 000 ton/år 2025 till 1 856 000 ton/år 2040 (en andel av detta kommer vara biogent).
Färdplan för BECCS i fjärrvärmesektorn i Sverige + BECCS i fjärrvärmesektorn (Energiforsk)	Hela värdekedjan	Fjärrvärme-sektorn: biobränsle- och avfallseldade kraft- och värmeverk	Forskning, kunskapssyntes. Tvärvetenskapligt: Ekonomi & styrmedel, Teknik, Infrastruktur och samverkan, Acceptans, Hållbarhet.

3 Kunskapssammanställning

I det här avsnittet presenteras ett urval av resultat och slutsatser från de tio slutrapporter som fanns klara och tillgängliga när kunskapssyntesen genomfördes.

3.1 Resultat och slutsatser från genomförbarhetsstudier

Tabell 8 summerar ett urval av resultat från slutrapporterna för de olika avslutade genomförbarhetsstudierna. Efter tabellen sammanfattas viktiga slutsatser och insikter som har kommit fram i projekten.

Tabell 8. Resultat från avslutade genomförbarhetsstudier. För förklaring av förkortningar hänvisas till listan på sida 4. Referenser App B.x hänvisar till Appendix B som innehåller utdrag i form av tabeller och figurer från projektrapporterna).

Projekt	Huvudsakliga resultat
Genomförbarhetsstudie för Bio-CCS inom Stora Enso svenska sulfatfabriker	– Fullt möjligt att installera en avskiljningsutrustning för att avskilja koldioxid från rökgaser ifrån en sulfatfabrik och förvätska denna koldioxid på samma plats. Att sedan transportera koldioxiden för permanent lagring bedöms också som fullt möjligt. – Uppskattat energibehov för olika avskiljningstekniker och utsläppskällor, och för förvätskning (se App B.1, Tab 9). – Avskiljningsanläggning för ca 1 Mton av CO₂/år från SE Skutskär bedöms kräva en yta på ca 10 000–20 000 m². – Investeringskostnaden för anläggning för avskiljning av CO₂, förvätskning och mellanlagring: 210–350 M€ (inkluderar dock ej eventuell utrustning för att producera kyla och värme). – Totalkostnad för hela kedjan från avskiljning till lagring (exkl värme/kyla): 90–110 €/ton CO₂ (se App B.1, Tab 11). – I totalkostnaden ingår en grov uppskattning – baserat på kostandsspann från lagringsaktörer och litteratur – av kostnaden för transport från SE Skutskär och lagring i Nordsjön på ca 50 €/ton CO₂. Egna uppskattningar pekar mot lägre transportkostnad, men med stora osäkerheter. – Förprojekt för detaljutformning och detaljerade kostnader bedöms ta ca 18 månader. Genomförande av projektet, inklusive produktion av lämpliga transportfartyg, bedöms ta ca 24–36 månader. – Projektet presenterar också en SWOT-analys (se figur i App B.1), och en summering av de största riskerna däribland oförutsägbarhet i tillståndsprocessen och risk för förändringar i politiska beslut.
Energiutvärdering av koldioxidinfångningstekniker i ett svenskt sulfatmassabruk (Stora Enso)	– För modellfabriken finns inga större möjligheter för en bra energi-integration oavsett avskiljningsteknik. – Den huvudsakliga effekten med en koldioxidavskiljningsutrustning är att fabriken elexport minskar (på grund av ökat eget elbehov och/eller minskad elproduktion). Det finns inget behov av extra värmeproduktion. Det är heller inte nödvändigt att köpa in el från nätet. Elexporten minskar med mellan 313 och 512 kWh/tCO₂ (469–768 kWh/ton massa) i modellfabriken beroende på avskiljningsteknik (se App B.2, Tab 3).

Projekt	Huvudsakliga resultat
Genomförandestudie bioCCS på Igelstaverket (Söderenergi)	– Mängden koldioxid som ska avskiljas dimensionerar hela processkedjan där det finns stora skalfördelar. – Post-combustion rekommenderas där aminbaserad absorbent är den vanligaste och mest tekniskt utvecklade. Val av teknik bestäms av avskild mängd CO₂, halt CO₂ i rökgaser samt passande energibalans för anläggningen. – Tre års leveranstid uppskattas för avskiljningsanläggning, 24–30 månader för förvätskningsanläggning från beställning till driftsättning. – Det krävs cirka 2 000 m² för avskiljning, 1 500 m² för förvätskning och 1 000 m² för mellanlager. – En indikativ kostnad bedömdes till 100 €/ton lagrad koldioxid. – De delar av bio-CCS-anläggningen som inte rymms inom befintligt bebyggt område skulle kunna rymmas om ett nytt område exploateras söder om befintligt område. För detta krävs en ny detaljplan eftersom området idag är markerat som mark som inte får bebyggas. – Befintligt miljötillstånd påverkas inte av byggnation av bio-CCS-anläggningen. Men bio-CCS-anläggningen kommer troligtvis kräva ett ändringstillstånd för anläggningarna beroende på hur det integreras med befintlig process.
Rollen av BioCCS för negativa koldioxid- utsläpp i Uppsala kommun (Vattenfall)	– Post-combustion anses vara det enda rimliga före 2030. Däremot kan pre-combustion och oxy-fuel bli mer effektiva och lönsamma och kan därför uppnå högre total avskiljning än post-combustion. – Investeringskostnaden är lägst för aminbaserad absorption (470 MSEK) och högst för ammoniakbaserad (560 MSEK). HPC hamnar i mitten (520 MSEK). Analysen är gjord för en avskiljning på 23 t/h, ca 200 000 ton/år. – Amin- och ammoniakbaserade processer har lägre specifik kostnad (SEK/tCO₂) än HPC (se App. B.3, fig 19). – HPC kräver betydligt mer el än aminer/ammoniak, 28 MW jämfört med 8–9 MW (se App. B.3 fig 21 & 23), vilket kan bli ett hinder i Uppsala. – Mest avgörande faktor är driftstid, därav är koldioxidavskiljning billigast på avfallskraftvärmeverken och dyrast på HVC som bara är i drift en del av året (Se App B.3, fig 19). – En yta på 27 × 60 m (1 620 m²) har identifierats som lämplig för en avskiljningsanläggning. Skulle större avskiljningskapacitet behövas (vilket behövs för att kommunen ska vara klimatpositiv) behöver kommunal mark utanför Vattenfalls område användas. – Uppskattad kostnad: Avskiljning 420–670 SEK/ton, inlandstransport 110–180 SEK/ton, utskeppning & permanent lagring 300–400 SEK/ton.

Projekt	Huvudsakliga resultat
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Mälar-energis Kraftvärmeverk i Västerås	– Halterna av koldioxid bedöms vara tillräckligt höga för god avskiljningsgrad. – Elbehovet är stort i relation till produktionen, men varierar mellan avskiljningstekniker. För samtliga tekniker utom 'Amin utan värmepump' och 'CAP' medför avskiljningsanläggning på block 6 en högre värmeproduktion än i fallet utan avskiljning vilket leder till högre systemverkningsgrad (dvs levererad värme+el delat på tillfört bränsle) i vissa fall jämfört med idag (trots lägre elproduktion) (se App B.4, Tab 4 & 10). Situationen är snarlik för block 7. – HPC FE behöver inte integreras med befintliga system, har en kostnad under 1 000 SEK/ton, en förhöjd systemverkningsgrad och TRL-nivå på 9. För HPC ES är resultatet snarlikt men här behövs ånga från befintliga system och systemverkningsgraden blir lite lägre än idag. För aminer är kostnaden lite högre, ånga behövs från befintliga system och mellankylning kan behövas. CAP innebär en högre kostnad, lite lägre TRL-nivå och något sämre systemverkningsgrad. – Utökad kylkapacitet behövs på block 7 men inte block 6. – Investeringskostnaden är ungefär 3 miljarder SEK för båda blocken (inklusive buffertlager och utrustning för att lasta till fartyg) där block 6 är mer fördelaktigt tack vare längre drifttid. – För Block 6: OPEX (för avskiljning, förvätskning och buffertlager) är lägst för HPC-teknikerna, ca 150–200 SEK/ton CO₂, aminer har en högre kostnad och CAP ligger lite lägre än aminer (se App B.4 diag 3), CAPEX är klart högst för CAP och snarlikt för HPC och aminer kring 250–300 SEK/ton avskild CO₂ (se App B.4 diag 5). – För Block 7: OPEX (för avskiljning, förvätskning och buffertlager) snarlikt för alla tekniker, lägst för HPC ES, ca 150 SEK/ton CO₂ (se App B.4 diag 7), CAPEX är lägst för HPC allmänt och lägst för HPC ES (se App B.4 diag 9). – Investering i buffertlager innebär signifikant kostnad jämförbar med CAPEX för ett av Block 6/7 (se App B.4, diag 13 & 14). – Kostnaden (CAPEX+OPEX) för hela värdekedjan från avskiljning till permanent lagring beräknas till ca 800 SEK/ton CO₂ för HPC för Block 6 (se App B.4 diag 15), vilket är tydligt billigare än övriga avskiljningsmetoder. I Block 7 är det jämnare där kostnaden för HPC ES är lägst, strax under 900 SEK/ton medan den dyraste metoden ligger kring 1 100 SEK/ton för CAP utan VP (se App B.4 diag 16). – Kostnaden för transport och permanent lagring uppskattas till 30 €/ton baserat på egna uppskattningar (vilket är jämförbart med de tariffer som kommunicerats från Northern Lights för transport och lagring "as a service"). – Avskiljning och lagring från Block 6 bedöms mer kostnadseffektivt per infångat ton CO₂ tack vare 3 000 fler drifttimmar per år, men om bioandelen bär hela driftkostnaden blir Block 7 mer kostnadseffektivt per ton biogen CO₂. – För avskiljning bedöms ytbehovet vara 2 000 m² för CAP och 1 500 m² för HPC FE/ES. – Greensand har valts som lämplig lagringsplats som följd av att det inte har en hamnavgift samt för att andra lagringsplatser ligger längre bort. Kostnaden för transport från Västerås till Greensand är lägst för tågtransport via Göteborg och högre för fartygstransport från Västerås Hamn respektive tågtransport via Stockholm/Södertälje.

Projekt	Huvudsakliga resultat
Genomförbarhetsstudie av CCS vid Bodens Energis kraftvärmeverk	– Sammanställning och jämförelse av möjliga intäktsströmmar och hur de kan kombineras (se App B.5, fig 5 & tab 1). Stort spann på möjliga intäkter ca 750–1 600 kr och flera osäkra antaganden. – Alla tekniker ökar nettoproduktionen av fjärrvärme (5–20 MW) förutsatt att värmepumpning används för amin och CAP (se App B.5, tab 2–4). Fjärrvärmesystemets kapacitet är begränsande faktor, speciellt för fall med amin och CAP utan värmepump. Detta leder till att lasten på pannorna måste minskas, och kan innebära ett behov av att investera i nya kylanläggningar. – Alla tekniker minskar nettoelproduktionen med ca 50–70 % (se App B.5, Tab 2–4). I extremfall (avskiljning från båda pannorna med aminbaserad teknik med integrerad värmepump) blir resultatet en nettoimport av el. – Totala kostnaden för CCS för hela värdekedjan: 2 000–3 000 SEK/ton CO₂ (+/-30 %). – CAPEX för avskiljning och förvätskning för båda pannorna: 80–110 M€ (HPC/Amin) resp 160 M€ (CAP). Extra kostnad för värmepump ca 10 M€. OPEX avskiljning 25–35 €/ton (HPC) resp 55–65 €/ton (Amin/CAP utan värmepump). Integration av värmepump minskar OPEX med 50–60 %. OPEX förvätskning 5–10€/ton (Amin, HPC) resp 1–2 €/ton (CAP). Totalkostnader för avskiljning och förvätskning 80–100 €/ton (HPC/amin med värmepump). – Avskiljning från endast en panna ökar kostnaderna med 50–80 €/ton, vilket tydligt visar på skalfördelarna med större CCS-projekt. – Kostnad för tågtransport till hamn uppskattades till 20–40 €/ton, och kostnader för mellanlagring till 5–10 €/ton. Både transport till Narvik och Luleå bedöms möjlig och bör utredas vidare. – Bodens Energi behöver fartyg av betydligt mindre storlek än de som förväntas användas av lagringsaktörerna. Fartyg med mindre dimensioner innebär högre transportkostnader per fraktat ton koldioxid. Detta ger incitament till att samarbeta med andra aktörer.
Sysav – övergripande förstudie avfalls-CCS	– Screeningen resulterade i att aminbaserad teknik (MEA) och HPC (Hot Potassium Carbonate) valdes ut för en djupare analys baserat på teknikernas bedömda tekniska och affärsmässiga mognadsnivå vid den förväntade tidpunkten för ett eventuellt investeringsbeslut. – HPC har en hög elförbrukning medan aminbaserad teknik har en hög ångförbrukning, vilket leder till lägre elproduktion i båda fallen. Baserat på ett antal olika bedömningsfaktorer är det aminbaserad teknik som rekommenderas för Sysav. Aminbaserad teknik ger också en något lägre utvärderad kostnad. Avskiljningskostnaden uppskattas till 480 SEK/tCO₂ för MEA och 600 SEK/tCO₂ för HPC. – Rörtransport från anläggning till kustnära lagring förväntas medföra betydligt lägre kostnad än alternativet lastbil+fartyg till offshorelagring, men är troligtvis inte tillgängligt de närmaste åren. Transportkostnaderna uppskattas till 120 SEK/tCO₂ för transport via pipeline till kustnära lagring och 320 SEK/tCO₂ för transport via lastbil och fartyg till offshore-lagring. Lagringskostnader uppskattas till 140 SEK/tCO₂ för kustnära (onshore) lagring (t.ex. Havnsø, Denmark) och 390 SEK/tCO₂ för offshore-lagring (t.ex. Northern Lights). – Med rörtransport och kustnära lagring uppskattades livscykelkostnaden över 20 år till cirka 750 SEK/ton CO₂ för MEA och cirka 850 SEK/ton koldioxid för HPC. Med lastbils- och fartygsttransport till offshore-lagring uppskattades motsvarande kostnader till 1 200 SEK/ton respektive 1 300 SEK/ton. – Erforderlig yta för en anläggning för koldioxidavskiljning från pannorna P3 och P4 uppskattas till > 9 000 m². – Preliminär övergripande projektplan har tagits fram för genomförande med uppstart av kommersiell drift 2030.

Projektens resultat och slutsatser har lett till ett antal insikter inför en framtida implementering, både vad gäller de specifika anläggningarna och deras förutsättningar, men också mer generellt. I sammanfattningarna nedan har de insikter som framför allt bör vara av lite bredare intresse än för den enskilde aktören färgmarkerats.

Massa- och pappersbruk (Stora Enso)

Stora Ensos första studie visar att det är möjligt att fånga in och förvätska 1 miljon ton biogen koldioxid per år vid Skutskär, men pekar också ut ett antal andra slutsatser:

- Det finns ett behov av att testa avskiljningsteknik på rökgaserna från mesaugnen och sodapannorna innan man går vidare med en fullskalig anläggning, bland annat för att se om det finns behov av ytterligare rökgasrening.
- Initialt var planen att studera både Skutskär och Skoghäll, men på ett tidigt stadium i studien så fokuserades arbetet till Skutskär då Skoghälls geografiska placering inne i landet långt från kustnära hamnar gjorde att transportkostnaderna bedömdes bli klart högre.
- Processernas stora energibehov gör det nödvändigt att finna goda energiintegrationsmöjligheter med befintliga produktionsanläggningar. Förutsättningar kan se mycket olika ut för olika bruk, och anläggningsspecifika integrationsstudier behövs därför och kräver omfattande arbete.

Mer generella insikter för framtida implementering, som även kan gälla andra aktörer lyfts också fram:

- En nyckelaspekt för att realisera bio-CCS är att hitta finansieringslösningar för att täcka kostnaderna.
- En av de större riskerna som pekas ut är kopplat till tillståndprocesser, och framför allt relaterat till långa ledtider och att villkoren för tillstånden därmed riskerar att inte finnas på plats när avtal om finansiering ska tecknas.

I den andra studien gjorde Stora Enso en mer djupgående analys av energiintegrationsmöjligheterna för koldioxidavskiljning på ett bruk. Insikter från detta arbete, och som också kan vara relevant för andra aktörer, framför allt inom massa- och pappersindustrin var bland annat följande:

- Det är svårt att få data från många leverantörer av koldioxidavskiljningsutrustning. Detta berodde dels på att en del processer ansågs konfidentiella och dels på att deras processer saknade detaljerade processdata. Svårigheter att få tillgång till data av likvärdig kvalitet gör det svårt att jämföra alternativ och välja rätt teknik/leverantör.
- För verkliga bruk kan det finnas större möjligheter att använda överskottsvärme för värmeintegration av koldioxidavskiljningsanläggningen, eftersom de inte är energioptimerade på samma sätt som modellfabriken.
- För många existerande fabriker finns inte tillräckligt med värme och elproduktion för att täcka energibehovet för koldioxidavskiljningen, vilket skulle leda till behov att investera i en ny kraftvärmepanna och/eller köpa mer el från nätet. Viktigt att eventuellt tillkommande energianvändning också är fossilfri. Ökad förbränning i kraftvärmepannor leder till mer utsläpp av koldioxid, som också kan fångas in.

- På grund av de stora energibehoven är det **nödvändigt att försöka utveckla teknologier som kräver mindre energi och kan använda värme vid lägre temperaturivåer** (till exempel 70–90 °C varmvatten), vilket kan finnas tillgängligt på anläggningen.

Hamnnära värmeverk och biokraftvärmeverk (Söderenergi)

Söderenergi konstaterar i sin slutrapport från genomförbarhetsstudien på Igelstaverket, att verket skulle kunna börja producera minusutsläpp först vid slutet av 2020-talet, framför allt på grund av **ledtider i planprocess, tillståndprocess och byggnation**. Insikter från studien handlar därför också mycket om vikten av att samordna processer för att hålla nere ledtiderna. Nedan summeras ett urval av slutsatser och insikter från studien, som bör kunna vara relevanta för flera aktörer:

- Det kan finnas **fördelar med att (om möjligt) placera en avskiljningsanläggning mellan två utsläppskällor om koldioxid ska avskiljas från båda** för att minimera avståndet rökgaserna behöver transporteras.
- Det finns **stora skalfördelar ytmässigt när det gäller förvätskningsanläggningar**.
- Det är **viktigt att fördjupa kunskapen och bedriva aktiv omvärldsspaning när det gäller lösningar för transport och lagring** för att kunna göra kloka val affärs-mässigt och för att kunna möta framtida frågor och opinion.
- På grund av alla ledtider är det **viktigt att komma igång så snart som möjligt och utnyttja möjligheter att samköra samrådsprocesser och tillståndprocesser** (till exempel slå ihop framtagande av detaljplan och MKB). Tillståndprocessen förenklas om Mark- och miljödomstolen väljs som tillståndsinstant från början (vilken varit tillståndsinstant för befintlig anläggning) där ett tillägg skulle behövas för en bio-CCS-infrastruktur integrerad med befintlig anläggning. Redan i ett tidigt skede bör fördjupade diskussioner inledas med beslutande myndighet för att klargöra vad som krävs för ett godkännande enligt miljöprövningsförordningen.

Inlandskommun med både avfallskraftvärme och biobaserade anläggningar (Vattenfall)

I genomförbarhetsstudien för Uppsala kommun (Vattenfall) redovisar slutrapporten att det är möjligt att uppnå ett klimatpositivt Uppsala – definierat som att klimatpåverkan från kommunen är lägre än 90 % år 2040 i jämförelse med 1990 och lägre än 100 % år 2050 – om CCS investeras på både avfallsanläggningar och biobaserade anläggningar. En förutsättning är dock att infrastrukturen för transporten måste komma på plats och att ett parallellt klimatarbete sker med bland annat utfasning av fossila bränslen. Några andra intressanta insikter från studier är att:

- **Utveckling av alternativa tekniker (pre-combustion och oxy-fuel) kan spela stor roll**, både gällande storleken på de negativa utsläppen samt elproduktionen. Att implementera dessa tekniker på block 1 och 4 kan bli intressant i framtiden.
- **Produktion av biokol via pyrolys av biomassa kan vara ett attraktivt komplement till koldioxidavskiljning och lagring**, eftersom koldioxidavskiljning framför allt lämpar sig för större koldioxidflöden medan biokolproduktion är lämpliga för mindre system. Vid produktion av biokol produceras värme och kolatomerna lagras i biokolet.

- CCU som alternativ till CCS där koldioxiden används för produktion av elektro-metanol anses inte vara lämpligt i Uppsala pga effektbrist och platsbrist.

Hamnnära biokraftvärmeverk (Mälarenergi)

Genomförbarhetsstudien för Mälarenergis kraftvärmeverk i Västerås visar att implementering av CCS (inklusive anläggning för avskiljning, förvätskning och buffertlager med tillförsel av ånga och el samt energiåtervinning) är fullt möjligt på de KVV-block som har mest drifttid (block 6 och 7). Specifikt för kraftvärmeverket dras bland annat följande slutsatser:

- Aminer och HPC FE (hot potassium carbonate full electric) anses mest lämpliga för koldioxidavskiljning baserat på resurseffektivitet, möjlig integration med befintliga anläggningar, kostnadsanalys och mognadsgrad. HPE FE med värme-pump är det bästa alternativet för block 6 medan för block 7 kan även aminer vara intressant med tanke på den höga systemverkningsgraden. Olika avskiljningstekniker skulle kunna nyttjas för de två blocken även om det finns möjliga skalfördelar med att ha samma teknik för båda anläggningarna.
- Det finns flera återstående frågor om hur villkorsuppfyllnaden för befintliga tillstånd påverkas, till exempel med avseende på bullernivåer och villkor för nyttjande av kylvatten.
- Riskhantering kommer spela en större roll i nästa steg.

Mer generella insikter handlar bland annat om logistik, systemeffektivitet och styrmedel:

- Ändamålsenlig och kostnadseffektiv logistikkedja ses som en större utmaning än själva avskiljningsanläggningen. En samordning med andra aktörer för en kostnadseffektiv logistikkedja är viktigt.
- Det är viktigt att beakta systemverkningsgraden som tar hänsyn till el och värme-flöden totalt sett, inklusive värmefflöden till/från avskiljningen.
- Det behövs styrmedel för att uppnå negativa utsläpp men beroende på hur de utformas finns en risk att avfalls-CCS väljs bort trots att kostnaden per ton är lägre.
- Optimal avskiljningsvolym bör väljas baserat på risker, tillgänglighet och ekonomi.

Mindre avfallsförbränningsanläggningar i inlandet (Bodens energi)

Bodens Energi landar i slutsatsen att för en liten aktör med små utsläpp är det nödvändigt att hitta samarbeten med andra utsläppare för att kunna uppnå en godtagbar lönsamhet för CCS. De konstaterar också att – eftersom kapaciteten i deras fjärrvärmesystem är begränsande – kan kostnader och utrymme för ny kylkapacitet bli en avgörande faktor. I sin slutrapport lyfter dock Bodens Energi upp ett antal möjligheter att minska kostnaden för CCS. Dessa kan också vara relevanta för andra aktörer:

- Värmepumpsintegration minskar OPEX tack vare större intäkter från fjärrvärme.
- Att utnyttja returtransporten från hamn till anläggning för transport av olika typer av bränslen kan minska kostnaden för tågtransport.
- Samarbeten med andra utsläppare kan minska kostnaderna framför allt för lastning av fartyg och fartygsttransport. Samarbeten med andra utsläppare gör det möjligt att använda större fartyg och kan (i Bodens Energis fall) minska transportkostnaderna med ca 10 €/ton infångad koldioxid.

Kustnära avfallskraftvärme (Sysav)

Sysavs övergripande förstudie för avfalls-CCS inkluderar bland annat en screening av ett flertal olika avskiljningstekniker. Förutsättningarna för olika tekniker skiljer sig åt mellan anläggningar, men **screeningen ger en mycket bra översikt som kan vara ett relevant underlag för många aktörer**, till exempel när det gäller egenskaper hos tekniklösningarna kopplat till energiprestanda, komplexitet, teknisk mognadsgrad, och risker. Projektet ger också flera insikter som är mer generellt applicerbara, bland annat:

- **Aminbaserad teknik och HPC bedöms mest relevanta utifrån förväntad teknisk och affärsmässig mognadsnivå för en anläggning som ska tas i drift omkring 2030. Baserat på energiprestanda, hälsa-säkerhet-miljö (HSE), komplexitet, risk, mognadsgrad, tidplan, och tillgängliga leverantörer bedöms amin tekniken vara det konservativa och riskreducerande valet.**
- Både HPC och aminbaserad teknik leder till lägre elproduktion.
- **Rörtransport från anläggning till kustnära lagring kan bli ett kostnadseffektivt alternativ för anläggningar nära sådana lagringsmöjligheter, men det ligger längre fram i tiden.**
- **Avfalls-CCS har speciella förutsättningar när det gäller finansiering då infångad och lagrad koldioxid har både fossilt och biogent ursprung, vilket ger en extra utmaning i att hitta affärsmodell som täcker både den fossila och den biogena delen.**

3.2 Resultat och slutsatser från pilotprojekt

Tester av BECCS genom HPC vid kraftvärmeverk (Stockholm Exergi)

Stockholm Exergi har fått två projekt beviljade inom Industriklivet för tester i sin forskningsanläggning. Det första projektet gav en ökad kunskap för att kunna konstruera en mer avancerad forskningsanläggning och fullskaleanläggning, och lade därmed grunden för det andra projektet. Ett av skälen att gå vidare med ytterligare tester var att användningen av kolonner med låg höjd gör det svårt att optimera kolonnerna för storskaliga anläggningar, och att det därmed fanns ett behov att testa högre kolonnhöjder.

Ett av huvudresultaten från det första projektet var att inga av orosmolnen som fanns före projektet (vilka till stor del kopplade till absorbentens prestanda vid kontinuerlig drift) besannades. Baserat på 1 226 drifttimmar gjordes bland annat följande observationer:

- Viss ackumulering av metallpartiklar och damm men detta kunde åtgärdas.
- Ingen generell nedbrytning av kaliumkarbonat (absorbenten). Mycket låga nivåer observerades av kaliumsulfat och kaliumnitrat (irreversibla reaktioner) som följd av svavel- och kvävedioxid i rökgasen, vilket annars skulle leda till förluster av solvent och utmaningar för kontinuerlig drift. Endast 5-10 % reagerade med karbonaterna.
- Avskiljningsgraden har varit ca 10 % vilket är i linje med förväntningarna då pilotprojektet genomförs med korta kolonner.
- Tillsats av vanadin och bor verkar ge förbättrad avskiljning av koldioxid.

De här resultaten tillsammans med erfarenheter från genomförandet gav flera värdefulla insikter för framtida implementering:

- HPC fungerar väl med låg degradering under långtgående test.
- Det har fungerat att använda en luftkompressor för att komprimera rökgasen till 7 bar.
- Vid för höga koncentrationer av kaliumkarbonat finns alltid en risk för utfällning (salter) av solventen till fast fas vilket inte är önskvärt, men kan undvikas genom att bibehålla hög temperatur (minst 80 °C).
- Vid design av värmeväxlare och annan utrustning ska dessa kunna tömmas till en säker plats.
- Nivåmätning är svårt att genomföra i tunna tuber.
- Användning av demisters är viktiga för att undvika förluster av solvent.

3.3 Resultat och slutsatser från samverkansprojekt

BECCS i fjärrvärmesektorn (Energiforsk)

Energiforsks projekt ”Bio-CCS i fjärrvärmesektorn” var ett samverkansprojekt mellan forskare och bland andra ett flertal av de energiföretag som också fått stöd för genomförbarhetsstudier inom Industriklivet. Slutrapporten från projektet är i sig en kunskapssyntes som i många avseenden överlappar med den kunskapssyntes som presenteras i den här rapporten. Energiforsks rapport i sin helhet är därmed i högsta grad rekommenderad läsning för de som vill bilda sig en uppfattning om kunskapsläget inom bio-CCS i Sverige. Rapporten är dock i första hand en syntes av forskning inom området där syftet har varit att lägga grunden för en gemensam strategi för branschen. Detta till skillnad mot den kunskapssyntes som presenteras i den här rapporten, som bygger på en sammanställning av resultat och slutsatser från genomförbarhetsstudier och pilottester i faktiska tillämpningar, och som syftar till att understödja kunskapsöverföring mellan projekt inom Industriklivet.. Det är också värt att notera att Energiforsks rapport inte inkluderar massa- och pappersindustrin och andra möjliga aktörer utanför fjärrvärmesektorn.

Underlaget som togs fram i projektets forsknings- och syntesarbete låg också till grund för fjärrvärmesektorns strategi för bio-CCS. Strategin utvecklades gemensamt av ett 15-tal företag och organisationer inom fjärrvärmesektorn och presenterar en vision för hur fjärrvärmesektorn kan bidra till att skapa negativa utsläpp. Strategin presenterar ett antal åtaganden och diskuterar centrala förutsättningar som måste vara uppfyllda för att visionen ska kunna bli verklighet.

På grund av slutrapportens höga relevans och den breda samverkan som ligger bakom är det svårt att välja ut enskilda delar av rapporten att lyfta fram för den här syntesen. Istället listas här de elva punkter som projektförfattarna själva lyft fram när de summerar sina huvudresultat. En sammanfattning av resultaten bakom varje punkt presenteras i förkortad form i Appendix C.

1. Potentialen för branschen är minst 10 Mton negativa utsläpp per år.
2. Avskiljning av koldioxid är beprövad teknik, men tillämpningen är ny.
3. Samverkan/”kluster” kan ge fördelar för transport och mellanlagring.
4. Tillgång till lagringsplatser avgörande.

5. Analys av systemkonsekvenserna visar på stora fördelar, trots ökat energibehov m.m.
6. Det största hindret för introduktion av bio-CCS i fjärrvärmesektorn är finansieringen.
7. Flera möjliga sätt att finansiera bio-CCS, men många frågetecken återstår.
8. Osäkerhet angående syftet med omvänd auktion och ägande av de negativa utsläppen.
9. Tillståndsfrågor, barriärer och ”regel-hinder”.
10. Bio-CCS skapar en rad möjligheter.
11. Stort värde av dialog och samverkan inom projektet.

För mer detaljer och bakgrund hänvisas till projektrapporten eller någon av de sju delrapporter som Energiforsk publicerat inom ramen för projektet.

CinfraCap – Infrastruktur för transport och mellanlagring av infångad koldioxid (Preem)

Samverkansprojektet CinfraCap har fått stöd i två omgångar från Industriklivet för förstudier kopplat till en gemensam infrastruktur för förvätskning och mellanlagring i Göteborgs hamn. Fas II är pågående. I Fas I gjordes en teknoekonomisk utvärdering av två alternativa lösningar:

- Separat förvätskning (scenario A)
- Gemensam förvätskning (scenario B)

Utöver teknisk förstudie och kostnadsuppskattningar gjordes också en lokaliseringsstudie, grovriskanalys och diskussioner kring affärsmodeller och ägarförhållanden.

Bland huvudresultaten från Fas I presenteras fördelar och nackdelar med separat respektive gemensam förvätskning, samt uppskattningar av kostnader och energibehov. Koldioxiden är tänkt att transporteras från mellanlagret med fartyg till permanent lagring i form av mättad vätska vid 15 bar g (övertryck), dvs ca $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mellanlagret ska därmed hålla ett tryck som tillåter export för 15 bar g.

Separat förvätskning har fördelen att det ger förutsättningar för integration av värme, kyla, och andra stödsystem mellan värdeprocessen (till exempel ett raffinaderi), avskiljningsprocessen, förbehandling och förvätskning. Transport av koldioxid i vätskefas i rörledning medför dock utmaningar i form av förångning vid värmeläckage, samt risk för bildning av torris vid trycksänkning. Gemensam förvätskning har fördel av lägre investeringskostnad. Nackdelar är att det är viktigt att dimensionera för tryckförluster innan transport till terminalområdet och att möjligheterna till processintegration begränsas.

Tabellen nedan presenterar de rapporterade uppskattningarna av kostnader och energibehov.

	CAPEX ($\pm$ 40 %)	Energibehov
Separat förvätskning	1 210 MSEK för 400 000 ton/år	El: 39–58 kWh/ton
	2 750 MSEK för 1 856 000 ton/år	Kylvatten: 136–169 kWh/ton
Gemensam förvätskning	1 070 MSEK för 400 000 ton/år	El: 54–66 kWh/ton
	2 520 MSEK för 1 856 000 ton/år	Kylvatten: 136–165 kWh/ton

Resultaten visade att det är tekniskt fullt möjligt att förvätska, transportera, mellanagra och exportera koldioxid till fartyg vid hamnen. Slutrapporten påpekar att diverse tillstånd kommer att krävas för den här typen av anläggning, och lyfter fram vikten av ett långsiktigt och pålitligt regelverk. Inget beslut kring separat eller gemensam förvätskning kunde dock tas då båda alternativen ansågs likvärdiga. En slutsats var därför att det behövdes tas fram ett mer detaljerat beslutsunderlag, vilket då är syftet med Fas II av projektet.

4 Analys – Gemensamma nämnare och skillnader

I det här avsnittet presenteras intressanta likheter och olikheter mellan de utvärderade projekten. Resultaten har grupperats utifrån vilken del av värdekedjan de handlar om.

4.1 Avskiljning

Den första delen av värdekedjan för bio-CCS utgörs av avskiljningsdelen. Det finns flertalet viktiga faktorer som påverkar de olika anläggningarnas tekniska och ekonomiska möjligheter att fånga in biogen koldioxid:

- **Koldioxidkoncentration:** Enkelt sagt innebär en högre rökgaskoncentration enklare och billigare avskiljning per ton koldioxid. Koncentrationen av koldioxid beror på hur förbränningsprocessen ser ut, framför allt bränslesammansättning och luftöverskott. Avfallsförbränning innebär generellt mer kväve och syre i rökgasen som följd av att förbränning av avfall kräver ett relativt högt luftöverskott. Både bränslesammansättningen i sig och det högre luftöverskottet bidrar till rökgaser från avfallsförbränning har en lägre koldioxidkoncentration än rökgaser från biokraftvärmeanläggningar. Allra högst presenterad koldioxidkoncentration bland de utvärderade projekten har dock rökgasen från Stora Ensos mesaugn (22 %). Detta då dessa rökgaser innehåller både koldioxid från förbränning och koldioxid från den kemiska reaktion då kalciumkarbonat omvandlas till kalciumoxid. Detta kan jämföras med vissa avfallsförbränningsanläggningar som kan ha så lågt som 7 % koldioxidkoncentration medan biokraftvärmeanläggningar ligger däremellan. Ett exempel på koldioxidavskiljning med väldigt låg koldioxidkoncentration är Direct Air Capture-tekniken (DAC) som innebär väldigt stor energianvändning per avskilt ton koldioxid.
- **Driftprofil över året:** Generellt gynnas en avskiljningsanläggning av att processen körs kontinuerligt året runt vid fullast. Detta bidrar till enklare dimensionering av avskiljningsprocessen och maximerar utnyttjandegraden av utrustningen. Avfallsbaserade kraftvärmeverk tenderar att ha sina pannor i drift kontinuerligt vid fullast i högre utsträckning än biokraftvärmepannor. Det kan även finnas driftmässiga nackdelar kopplat till drift vid dellast där avskiljningsprocessen kan bli mindre energi- och kostnadseffektiv. Det kan också bli svårare att köpa in passande utrustning som kan hantera variabelt flöde (exempel rökgaskompressor).
- **Storlek på utsläpp:** Större punktutsläpp tenderar att leda till lägre kostnader per infångad koldioxid. Detta kan till stor del kopplas till CAPEX där en avskiljningsprocess innebär en ansevärd investering med tydliga skalfördelar (investeringskostnaden per ton blir lägre för stora volymer).
- **Antalet skorstenar:** Generellt dras slutsatsen att få stora punktkällor innebär lägre avskiljningskostnad än flera mindre (detta följer samma logik som punkten ovan). Avskiljning från alla skorstenar leder till störst klimatnytta men ställer samtidigt större krav på exempelvis infrastruktur och utrymme på anläggningen, och adderar därför typiskt en extra kostnad.

- **Rökgasernas renhet:** Beroende på nuvarande rökgassammansättning och befintlig rökgasrening har skillnader i anläggningars förutsättningar att uppnå kravspecifikationer från transport- och lagringsaktörer för den avskilda koldioxiden. Rökgasernas renhet påverkar också effektiviteten för de olika avskiljningslösningarna. Höga halter av föroreningar som kväve- och svaveloxider kan göra det svårare att separera koldioxiden. Det bildas normalt mer sådana föroreningar vid förbränning av mer komplexa bränslen som avfall. Å andra sidan har normalt sett anläggningar som använder sådana bränslen befintlig rökgasrening, vilket gör att de ändå bör ha bra förutsättningar för effektiv koldioxidavskiljning. Rökgasernas renhet kan även påverka valet av avskiljningsteknik. Aminbaserade processer är mer känsliga för syre, och framför allt för svaveldioxid och kvävedioxid, som leder till att den aminbaserade solventen inte regenereras lika effektivt och måste ersättas kontinuerligt. Kaliumkarbonat som används i HPC-tekniken reagerar däremot inte med syre och kväve, och bidrar dessutom till att inkommande kväveoxider minskar med 50 % och alla svaveloxider fångas in. Förutsättningarna påverkas också av om befintlig anläggning har rökgaskondensering eller inte.
- **Avskiljningsgrad:** De flesta aktörer har en målsättning att fånga in 80-90 % av koldioxiden, vilket bygger på en teknoekonomisk analys. Högre avskiljningsgrad än så innebär en betydande ökning av kostnaden för avskiljning både avseende OPEX och CAPEX. Anledningen är att efter en viss gräns blir koldioxidens partialtryck så pass lågt att energibehovet för avskiljning av resterande koldioxid ökar kraftigt (samt att större utrustning behövs).
- **Befintliga miljötillstånd:** Frågan om miljötillstånd framkommer som en viktig faktor för flera aktörer. Det kan exempelvis inkludera tillstånd som relaterar till:
 - Mängden värme som man får kyla mot sjöar/hav eller maxtemperatur på vatten som släpps ut i vattendrag (det är vanligt med ökat behov av kylvatten för koldioxidavskiljningsanläggningar).
 - Höjden som rökgaser ska släppas ut vid (nämns dock inte som ett problem så länge gasen leds tillbaka till befintlig skorsten).
 - Maxnivåer för tungmetaller och andra föroreningar.
 - Maxnivå för buller (bedöms dock inte påverka befintliga anläggningar).
 - pH-nivå i avloppsvatten (om den nya anläggningen planerar ha eget avloppsvatten bör det befintliga tillståndet inte påverkas).
- **Möjlighet till energiintegration (fjärrvärme, ånga, kyla):** Avskiljningsprocesserna har ett stort behov av energi i form av ånga och/eller el för att driva processen. Befintlig tillgång på restånga/restvärme kan därför bidra till en reducerad avskiljningskostnad. Det bör även nämnas att det kan finnas behov att lägga till ytterligare produktion av värme/ånga, vilket i sig kan generera ytterligare utsläpp som bör fångas in för att minska koldioxidavtrycket för processen i stort. Avskiljningsprocessen har dock även ett stort kylbehov. Om det finns möjlighet att utnyttja värmen som kyles bort (med eller utan hjälp av värmepumpning) för att täcka andra värmebehov i anläggningen eller i fjärrvärmenätet kan det också minska kostnaderna samt öka energieffektiviteten.
- **Utrymme för avskiljningsanläggning och nuvarande marktillstånd:** Oavsett val av avskiljningsteknik är det tydligt att det finns ett behov av utrymme för en avskiljningsanläggning. Idealiskt finns utrymme i nära anslutning till en befintlig

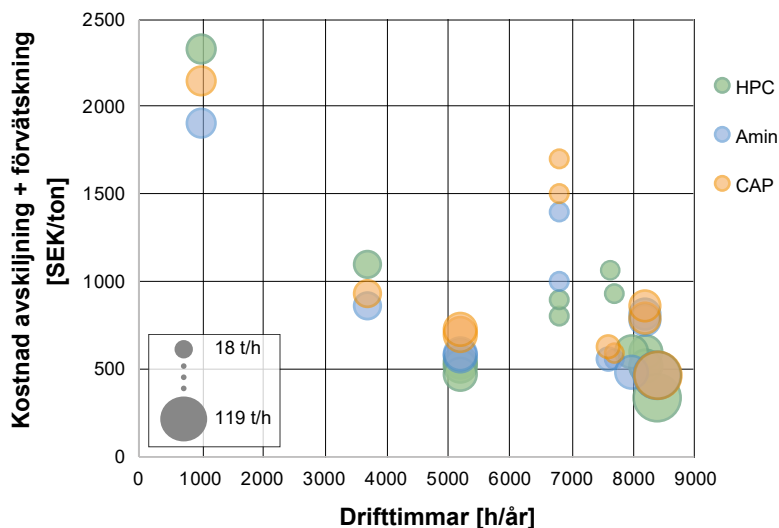
förbränningsanläggning. I detta sammanhang bör även möjligheten att utnyttja byggnader på idag stillastående produktionsanläggningar nämnas, vilket kan minska kostnaden för avskiljningsprocessen.

- **Prioriterade energislag:** Anläggningar skiljer sig åt i hur de prioriterar mellan värme- och elproduktion och i vissa fall (bio-) bränsleanvändning. I många fall prioriteras bibehållen värmeproduktion, till exempel för att kunna fortsätta täcka ett givet värmebehov i ett fjärrvärmenät eller produktionsprocess. Med denna prioritering visar utvärderingarna på en förväntan om mindre nettoelproduktion med en bio-CCS-anläggning. Om det finns goda alternativ för värmeproduktionen i systemet och elpriset är högt kan det istället vara motiverat att acceptera en minskning av värmeproduktionen och istället prioritera elproduktion. Hur prioriteringen mellan el och värme görs påverkar i hög utsträckning valet av avskiljningsmetod. Exempelvis är behovet av elektricitet högre med HPC jämfört med aminer där värmebehovet är större. Ett annat sätt att kompensera för bortfall i värmeproduktion är en integration av värmepump, vilket dock blir på bekostnad av ytterligare elbehov.
- **Biogen andel i bränslet:** De styrmedel som är på gång kommer endast att ge stöd till avskiljning och lagring av biogena utsläpp. För CCS på avfallskraftvärmeverk är dock en del av den infångade koldioxiden av fossilt ursprung (andelen förväntas dock behöva minska i takt med ökade krav på återvinning av till exempel plast). Kostnaden för CCS på den fossila andelen får täckas genom handel med utsläppsrätter motsvarande de fossila utsläpp som undviks. Så länge priset på utsläppsrätter är lägre än kostnaden för CCS kan detta göra att satsningar på CCS från biomassa-förbränning har möjlighet till högre finansiering än avfallsförbränning, trots att avfalls-CCS generellt har lägre kostnader tack vare fler fullasttimmar årligen.

Figur 1 visar en sammanställning över kostnaderna för avskiljning (och förvätskning) som de olika förstudierna presenterar. Figuren visar att antalet drifttimmar per år är av stor betydelse för avskiljningskostnaden. Även koldioxidflödet i rökgaserna spelar en viktig roll, indikerat av storleken på bubblorna i figuren. Lägst kostnad för avskiljning rapporteras för Stora Ensos sodapannor i Skutskär som både har högst drifttid (8 400 timmar per år) och störst koldioxidflöde (119 ton per timme). Högst kostnad har Vattenfalls hetvatten-central i Uppsala (drifttid ca 1 000 timmar per år). Anläggningen med lägst flöde tillhör Bodens Energi (18 ton per timme, drifttid ca 6 800 timmar per år) och kostnaden ligger generellt högre än andra anläggningar med liknande antal drifttimmar ($\pm 1\,500$ h/år).

Vilken teknik som är mest lämpad beror mycket på de specifika förutsättningarna och därmed kan ingen generell slutsats dras enbart utifrån de resultat som presenteras i figuren. Kyld ammoniak (CAP) har dock inte haft lägst kostnad i någon av de avslutade förstudierna.

Det bör poängteras att det finns skillnader i detaljnivå gällande antaganden och beräkningar mellan de olika projekten, och som nämnts i listan ovan finns det fler faktorer än drifttimmar och storlek på utsläpp som spelar roll – exempelvis koldioxidkoncentration (vilken även den är hög för Stora Ensos sodapannor) och avskiljningsgrad. Jämförelse av resultat från olika projekt bör därför göras med försiktighet.



Figur 1. Rapporterad kostnad för avskiljning (y-axel) i relation till antal drifftimmar (x-axel) och koldioxidflöde till avskiljning (storlek på bubblorna proportionerlig mot utsläppen). Figuren är baserad på genomförbarhetsstudierna från Bodens Energi, Mälarenergi, Stora Enso, SYSAV och Vattenfall. I de fall där kostnaden är angiven i €/ton har en växelkurs på 10 SEK/€ antagits. Vissa bearbetningar och antaganden har gjorts.

4.2 Förvätskning, mellanlagring och transport

Baserat på sammanställningen av projektresultat finns även flertalet likheter och skillnader mellan projekten vad gäller förutsättningar kopplat till förvätskning, mellanlagring och transport:

- **Geografisk plats:** Denna faktor spelar en stor roll där det noteras att alla projekt presenterar en huvudlösning som bygger på transport av koldioxid med fartyg till den slutliga lagringsplatsen. För att få ner kostnaden för transporten av koldioxid är det här tydligt att en lägre kostnad kan uppnås för de anläggningar som har nära tillgång till hamn samt idealiskt även inte alltför långt avstånd till den permanenta lagringsplatsen. En annan viktig punkt som bör nämnas är närhet till andra anläggningar som kan ha ambitionen att fånga in koldioxid i framtiden. Det bedöms finnas ett stort mervärde i att samordna logistiklösning och även kunna dela på finansiell risk kopplat till investeringar i logistikkedjan. Det kan även bidra till ökade möjligheter för mindre utsläppskällor att bli kostnadseffektiva om transport till permanent lagring kan göras från en gemensam mellanlagrings- och logistikhub likt idén bakom CinfraCap eller Umeå Energis projekt om hamnnära CCS.
- **Utrymme för förvätskningsanläggning, mellanlager och transporthub:** Detta kopplar i hög grad till punkten ovan) där förvätskningsanläggning och mellanlager kan placeras på befintlig anläggning eller i exempelvis ett hamnområde. I detta avseende finns stora skillnader i förutsättningar för de utvärderade projekten.
- **Driftprofil:** Precis som för avskiljningsprocessen gynnas processer som har en kontinuerligt hög last. Detta för att logistikprocessen kan dimensioneras för en hög utnyttjandegrad. Exempelvis betalar sig en investering i fartyg som ska nyttjas för dedikerad transport av koldioxid tillbaka snabbare om dessa kan användas året runt.

- **Storlek på utsläpp:** Precis som för avskiljningsprocessen gynnas anläggningar med stora utsläpp förutsatt att det finns tillräckligt med markyta och kapacitet i logistikkedjan att hantera dessa volymer. Skalfördelarna kopplas både till förvätskningsanläggningen och transportkedjan i stort där större utsläpp möjliggör ett mer effektivt utnyttjande av utrustningen och av exempelvis fartyg.
- **Tillförlitlighet i transportkedjan:** Ett möjligt haveri i transportkedjan som gör att infångad koldioxid inte hinner transporteras bort skulle kunna resultera i produktionsbortfall vilket bör undvikas. Denna risk bör samtidigt vägas mot storleken på mellanlager av koldioxid, vilka kan fungera som en buffert mot svängningar både på avskiljningssidan och i transportledet. Det kan även sägas att större fartygstransporter och längre omloppstid för dessa ökar risken vid sen fartygsankomst.
- **Behov av att minska eventuella risker vid läckage vid transport/mellanlagring:** Risken för läckage av koldioxid kan potentiellt påverka opinionen negativt till CCS och bio-CCS. Koldioxid är inte giftigt, men eftersom koldioxid är tyngre än luft, finns risk att koldioxid som läcker ut samlas i en lågpunkt och på så sätt orsakar syrebrist. Om läckage sker i ett område där människor vistas finns därmed risk för kvävning. Risker relaterat till läckage blir därmed särskilt viktigt i befolkade områden och det är en fördel om hantering av mellanlager och transport kan ske i miljöer utan människor i närheten.

För kostnadseffektiv transport av koldioxid bör även möjligheten att utnyttja samma fordon för transport av annat gods, som exempelvis bränsle, nämnas.

Alla projekt presenterar lösningar som innebär nyttjande av fartygstransport till siten för permanent lagring. Sysav har dock även utvärderat möjligheten med rörtransport (pipeline) till permanent lagring vid Danmarks kust. Det är fortfarande möjligt att rörtransport kan bli en framtida lösning för att transportera koldioxid från svenska avskiljningsanläggningar på lång sikt, men det är tydligt att fartygstransport väntas dominera helt under de första åren av möjlig drift (åtminstone fram till år 2030).

4.3 Permanent lagring

En tydlig gemensam nämnare är att de flesta av aktörerna har som plan att lagra infångad koldioxid off-shore med hjälp av lagringsbolagen Northern Lights i Norge eller Greensand i Danmark. Möjligheten att lagra infångad koldioxid inom svenskt territorium bedöms än så länge vara begränsad även om detta potentiellt kan utgöra en nationell konkurrensfördel.

4.4 Hela värdekedjan

Flera av resultaten – framför allt de som berör icke-tekniska områden – är mer övergripande för hela värdekedjan och presenteras nedan för ett antal nyckelområden.

Tidplaner

En genomgång av de kommunicerade tidsplanerna i projektens slutrapporter visar att en implementering av en framtida bio-CCS-anläggning kan ske någon gång mellan 2025 och 2030. Det finns exempel på tidsuppskattningar som inkluderar en uppskattning för FEED (detaljerad utformning och detaljerade kostnader för en anläggning) på

18 månader, medan genomförande av logistiklösningar uppskattas ta runt 24-36 månader. Utöver detta behöver det tas höjd för eventuellt långa ledtider för exempelvis tillståndprocesser (se nedan). En generell trend verkar vara att de projekt som är inriktade mot avfallsanläggningar i högre utsträckning placerar en möjlig CCS-anläggning längre fram i tiden jämfört med biokraftvärmeverk.

Tillståndprocesser

Flera olika tillstånd, för alla anläggningar i värdekedjan, måste finnas på plats för att implementera CCS. Detta inkluderar miljötillstånd och bygglov. För anläggningar i hamn behövs också tillstånd för vattenverksamhet. Flera av projekten noterar osäkerheter kring tillståndsfrågor, och inte minst risken att tillståndprocesserna kan dra ut på tiden. När det gäller miljötillstånden finns osäkerheter och möjligen skillnader mellan aktörerna huruvida ett nytt anläggningstillstånd behövs eller om det räcker med ett ändringstillstånd. Vissa aktörer tar också upp oklarheter kring krav kopplade till Industriutsläppsdirektivet (IED).

Beroende på miljöprövningsklass för anläggningen hanteras tillståndsansökan av antingen Länsstyrelsens miljöprövningsdelegation (MPD) eller Mark- och miljödomstolen (MMD). Eftersom flera olika tillstånd krävs för att realisera alla delar av CCS-värdekedjan, och såväl miljötillstånd som detaljplan bygger på en samrådsprocess, skulle det kunna vara fördelaktigt att slå ihop samrådsprocesserna och om möjligt samordna tillståndprocesserna under en gemensam myndighet. Detta kan förenkla hanteringen, men kan också förlänga väntetid och tiden för förberedelser, speciellt som detta är ett nytt område. Totalt uppskattas en sådan process ta åtminstone 18–24 månader.

Samverkan

En intressant fråga för de olika projekten handlar om ansvaret för de olika processstegen där aktörer potentiellt kan äga och driva större delar av värdekedjan eller snarare bara driva vissa delsteg. På denna punkt finns det olika tankar men flera förstudier lyfter fram behovet av att involvera exempelvis leverantörer av koldioxidlagringssystem, hamnar och logistikleverantörer i utvärderingen av möjliga värdekedjor. Det är tydligt att det saknas mycket kunskap hos projekten inom detta område och att det finns behov av extern kompetens.

Några av förstudierna beskriver att även vikten av effektiv kommunikation med olika intressenter som på olika sätt är involverade i, har intresse av, eller påverkas av en satsning på bio-CCS. Det kan till exempel vara andra energibolag, företag i närområdet, politiker, möjliga investerare, men också privatpersoner. I detta sammanhang nämns också vikten att sprida information i branschnätverk för kraft- och värmeproducenter för att ta ett exempel.

Affärsmodeller och finansiering

Kunskapssammanställningen visar att olika typer av aktörer har skilda förutsättningar att hitta väl fungerande och robusta affärsmodeller. Aviserade styrmedel för stöd till bio-CCS genom omvända auktioner kommer att skapa möjligheter för de aktörer som kan lägga lägst bud, medan aktörer med högre kostnader kommer att ha svårt att konkurrera i auktionen. Stödmöjligheter från exempelvis EU Innovation Fund är starkt begränsade till ett fåtal anläggningar, som tydligt måste visa på innovationshöjd genom att vara ”first-of-a-kind”, vilket utesluter aktörer som kommer att vara mogna att implementera

bio-CCS i ett senare skede. Även Industriklivet har möjlighet att ge investeringsstöd, men täcker inte ökade driftkostnader för bio-CCS. Det finns en potential i privata marknader för negativa utsläppskrediter, men här återstår stora osäkerheter. I viss utsträckning kan det också finnas en möjlighet att lägga kostnaden för CCS på konsumenten av anläggningens produkter (exempelvis som en premie på fjärrvärmepriset). Sammanfattningsvis finns det, trots olika stödmöjligheter, många begränsningar som kommer att göra det svårt för flera aktörer att finna finansiering. Detta kan ses som rimligt, då inte alla anläggningar kan genomföra bio-CCS på ett kostnadseffektivt sätt.

När det gäller affärsmodell och finansiering har avfalls-CCS en särställning. Kostnaderna för CCS gynnas generellt av långa drifttider vilket avfallskraftvärmeverk typiskt har. Som nämnt ovan är dock intäkterna för CCS på den fossila andelen av utsläppen kopplade till priset på utsläppsrätter, som än så länge legat för lågt i förhållande till kostnaderna för CCS för att det ska vara möjligt för avfalls-CCS att få ihop en hållbar affärsmodell. Priset på utsläppsrätter har dock legat betydligt högre under 2022 än tidigare, och börjar närma sig priser i nivåer på de uppskattade kostnaderna för CCS.

En annan viktig komponent kopplat till aktörernas förutsättningar att genomföra planer för bio-CCS kan kopplas till ägandeformen, vilken kan påverka incitamenten till att finansiera en större investering. För börsnoterade bolag kan det exempelvis vara lättare att få stöd för att genomföra tillväxtinvesteringar i ny produktionskapacitet (ökad produktion eller nya produkter) snarare än att investera i bio-CCS. För kommunalt ägda energibolag kan kraven på tillväxt vara lägre, och mål om samhällsnytta och hållbarhetsansvar tydligare, vilket eventuellt kan öka möjligheterna att få igenom en satsning på bio-CCS.

Legala förutsättningar

Flera av projekten har undersökt förutsättningar och risker kopplat till legala regelverk. Osäkerheter som tas upp kopplas bland annat till Londonprotokollet (som reglerar transport av koldioxid över nationsgränser) och regler för hur biogen koldioxid ska mätas och rapporteras vid tillämpning av bio-CCS. Men utvecklingen går fort och läget har ändrats jämförts med hur det såg ut när vissa av projekten slutrapporterades. En relativt ny (i skrivande stund) sammanställning presenteras i en rapport³ från projektet "Preem CCS"⁴ där det legala och regulatoriska läget för CCS inklusive bio-CCS i december 2021 beskrivs. En sammanställning av de regelmässiga hinder och utmaningar som kvarstod i början av 2022 presenteras också i Energiforsks slutrapport (här sammanfattat i Appendix C, punkten "Tillståndsfrågor, barriärer och regelhinder").

Frågor kring bland annat mellanstatliga avtal för att möjliggöra export av koldioxid från Sverige till Norge och andra länder, och frågor som rör bokföring och rapportering av koldioxidutsläpp, arbetas vidare med inom Nationellt centrum för CCS.

³ Jordal K m fl (2022). Legal and regulatory framework for Swedish/Norwegian CCS cooperation. https://www.preem.se/globalassets/om-preem/hallbarhet/preemccs---d4.2_legal-and-regulatory_final.pdf

⁴ Preem CCS har också fått stöd inom Industriklivet, men har inte ingått i urvalet av projekt för den här kunskapssynthesen.

Osäkerheter i kostnader

En slutsats som dras vid utvärdering av de förstudier som inkluderar kostnadsuppskattning för värdekedjan i stort är att det verkar finnas en generellt större osäkerhet i kostnadsuppskattningarna för transport och lagring än i kostnaden för koldioxidavskiljning. Detta kan förklaras med att infångningsprocessen är mer mogen och finns etablerad i större skala (om än inte för bio-CCS än så länge) jämfört med logistiklösningar för transport av koldioxid där det saknas storskaliga exempel vilket annars skulle kunna minska osäkerheten. Detta gäller i synnerhet de anläggningar som ligger inåt land. Det bör också sägas att även om avskiljningsmetoder med hög TRL-nivå nyttjas finns det en osäkerhet kopplat till fullskalig implementering av en systemlösning för en specifik anläggning. Sådan osäkerhet avser framför allt avskiljningsgrad och energibehov kopplat till detta vilket i sin tur påverkar kostnadsbilden.

5 Reflektioner

Analysen som presenteras i den här rapporten bygger på en sammanställning av resultat och slutsatser från de slutrapporter som fanns tillgängliga fram till mars 2022. Det är värt att notera att det är fler projekt som pågår än som har avslutats, och att kunskapen på området därför förväntas växa kraftigt inom de närmaste åren.

Generellt noteras att bland projekten finns det få som är kopplade till massa- och pappersindustrin, med undantag av Stora Ensos genomförbarhetsstudie och energiintegrationsstudie. Massa- och pappersindustrin har en stor potential för bio-CCS mätt i totala volymer, men också kostnadsmässigt då det rör sig om stora utsläppskällor, i flera fall med god närhet till hamn och logistiklösningar.

En annan reflektion är att alla genomförbarhetsstudier på biobränsleeldade pannor och kraftvärmeverk utgår ifrån att man ska fortsätta elda samma bränslen som idag. Med en ökad efterfrågan på biomassa från andra sektorer för produktion av exempelvis biodrivmedel eller biobaserade material kan det bli aktuellt för energisektorn att i större utsträckning övergå till andra typer av mer komplexa biobaserade bränslen. Detta skulle exempelvis kunna påverka valet av avskiljningsmetod och den ekonomiska potentialen för bio-CCS på anläggningen i fråga.

Slutligen kan nämnas att Industriklivet har gett stöd till CCS-projekt även för andra typer av industrier (till exempel raffinaderi och cementindustri). Urvalet av projekt för denna kunskapssyntes baserades dock på att det skulle finnas en direkt koppling till bio-CCS. Det gör att kunskapssyntesen (med undantag av CinfraCap-projektet) inte har inkluderat CCS-projekt inom sektorer som idag huvudsakligen har fossila utsläpp. På sikt kan dock anläggningar från dessa sektorer vara intressanta för bio-CCS, vid en eventuell framtida omställning från fossila till biobaserade energibärare och råvaror. Här kan nämnas raffinaderiernas omställning mot biodrivmedelsproduktion eller en övergång till bioeldade cementugnar, där båda kan ge framtida möjligheter till negativa utsläpp.

6 Sammanfattande slutsatser

I det här avsnittet sammanfattas resultaten från analysen i form av nyckelinformation för nya sökande samt en kort beskrivning av vad Industriklivet-stödet bidragit till.

6.1 Nyckelinformation för nya sökande

Det är helt klart att den samlade kunskap som byggts upp i de projekt som redan beviljats stöd i många delar kan korta startsträckan för nya projekt. En generell rekommendation till nya sökanden är därför att ta avstamp i resultat och slutsatser från tidigare projekt, och då framför allt från projekt för anläggningar med liknande förutsättningar. Punkterna som listas i avsnitt 4 kan fungera som en checklista för att se vilka aspekter som är relevanta att tänka på vid utformning av ett nytt projekt.

Nedan presenteras en sammanfattning av de punkter som, baserat på genomgången av de utvärderade projekten, bedömts vara särskilt viktiga för att skapa rätt förutsättningar och underlag för bio-CCS samt accelerera implementeringen.

Förutsättningar och val av teknik för kostnadseffektiv koldioxidavskiljning. Det är tydligt att förutsättningarna för koldioxidavskiljning – samt det bästa valet av avskiljningsteknik – kan skilja sig åt mellan olika anläggningar. Generellt är det fördelaktigt med stora koldioxidvolymerna från få skorstenar, höga koldioxidhalter i rökgaserna och många fullast-timmar. Även rökgasernas renhet, typ av bränsle, energibalanser, tillgängligt utrymme och tillståndssituation är exempel på faktorer som påverkar kostnaderna för avskiljning och den praktiska genomförbarheten. Som nämnts ovan rekommenderas nya projekt att utgå från resultat från liknande anläggningar, men eftersom det är så många faktorer som påverkar bör ändå alla möjligheter ses över utifrån egna förutsättningar. Samtidigt bör det sägas att avskiljning med hjälp av HPC och aminer framstår som de mest intressanta avskiljningsteknikerna inom den närmaste femårsperioden för de flesta anläggningar.

Ytterligare tester i mindre skala (så som pilottester) kan behövas för att validera och utveckla avskiljningsteknik för vissa typer av rökgaser innan fullskalig implementering. Det finns ett möjligt mervärde att se över vilka anläggningar som kan ha en liknande rökgassammansättning och då om möjligt samköra utvärdering av möjliga avskiljningsalternativ och utvecklingsarbete för avskiljningstekniker med dessa aktörer. I detta sammanhang bör bland annat Stockholm Exergis kommunicerade ambition att testa andra anläggningars rökgassammansättning i deras pilotanläggning som baseras på HPC. Genom denna typ av samarbete bör utvecklingskostnaden och i slutändan avskiljningskostnaden kunna reduceras.

Fördjupade utredningar av energiintegrationsmöjligheter med hänsyn till kostnadseffektivitet för olika val av avskiljningsteknik med eller utan värmepumpning. Det här är analyser som behöver göras utifrån varje anläggnings förutsättningar vad gäller prioriterade energislag (el/värme/bränsle), tillgång till överskottsvärme från industriella processer, och inte minst förväntade energipriser.

Förbered för tillståndsprocesser tidigt för att undvika långa ledtider och, om möjligt, slå ihop samrådsprocesser som exempelvis framtagande av detaljplan och MKB. Detta bör även kompletteras med arbete för att säkra den mark som behövs till bio-CCS-värdekedjan.

Utarbeta affärsmodell utifrån olika scenarier om möjliga intäktsströmmar. Även om ett nytt styrmedel för negativa utsläpp är aviserat kan inte alla aktörer räkna med att få stöd, givet att budgeten för de omvända auktionerna är begränsad. Aktörer behöver därför utreda möjlighet till och ta fram underlag för annan finansiering, antingen från andra offentliga stöd, eller genom en utveckling av privata marknader. Här har avfalls-CCS en speciell situation, då de behöver hitta en affärsmodell som täcker både den biogena och den fossila andelen av utsläppen (till exempel baserat på en kombination av stöd för bio-CCS och tillräckligt höga och förutsägbara priser på utsläppsätter).

Samverka om möjligt med andra närliggande aktörer kring infrastruktur och logistik för förvätskning, transport och mellanlagring. Anläggningar som har närhet och tillgång till hamn har en kostnadsmässig fördel när det gäller transportlösningar. Kostnaderna kan troligen reduceras genom samordning av logistiklösning, vilket ger skalfördelar och möjlighet att dela på investering och risker.

Ett allmänt råd till nya sökanden är att följa utvecklingen vad gäller lagar och regelverk. Utvecklingen går snabbt både nationellt och på EU-nivå och flera av de hinder som har funnits tidigare har lösts eller är på väg att lösas. Nationellt centrum för CCS hos Energi-myndigheten har bland annat i uppdrag att samordna insatser för att identifiera och undanröja de tekniska, ekonomiska och juridiska hinder som finns för att svenska aktörer ska kunna tillämpa CCS.

6.2 Resultat av Industriklivet-stödet

Eftersom kunskapssyntesen enbart bygger på en genomgång av slutrapporter från avslutade projekt (och ansökningar för pågående projekt) är det inte möjligt att dra några slutsatser om vad stödet från Industriklivet har lett till för långsiktiga effekter.

Det är dock tydligt, baserat på slutrapporterna, att projekten har lett till ökad kunskap om möjligheten att implementera bio-CCS på de anläggningar som studerats, och att underlag har skapats för fördjupade studier och kommande beslut. Eftersom det inte finns så många andra stöd att söka inom området så fyller Industriklivet en viktig funktion i denna kunskapsuppbyggnad och i att ta nödvändiga steg mot implementering av bio-CCS i de första anläggningarna.

I flera fall har projekten lagt grunden till fortsättningsprojekt, i form av fördjupade förstudier, bland annat för mer detaljerad teknisk analys och ekonomisk utvärdering, validering och utveckling av tekniken genom pilottester, ytterligare arbete på tillståndssidan, eller fördjupade samverkansdiskussioner kring logistiklösningar. I vissa fall finansieras även fortsättningsprojekten inom Industriklivet (till exempel Söderenergi, Stockholm Exergi, CinfraCap).

Det finns också exempel på aktörer som, baserat på resultat och erfarenheter från tidigare Industriklivet-projekt, kunnat ta nästa steg och söka stöd från EU. Ett exempel är Stora Enso som beviljats stöd för att delta i projektet ACCSESS (EU Horizon 2020), som leds av Sintef i Norge. Projektet siktar, bland annat, på utveckling av en ny avskiljningsteknik, och kommer att genomföra pilottester vid fyra olika anläggningar. För Stora Enso kommer pilottesterna ske vid Skutskär i slutet av 2022. Ett annat exempel är Stockholm Exergi som var en av få aktörer som valdes ut för stöd från EU Innovation Fund för sitt projekt att bygga en fullskalig anläggning för bio-CCS. Detta stöd har föregåtts av två Industriklivet-finansierade projekt som inkluderas i denna sammanställning.

Det finns också exempel på projekt som har lett till en insikt om att det är svårt att hitta godtagbar affärsmodell för bio-CCS, och att det därför inte i nuläget är rimligt att gå vidare. Detta gäller Bodens Energi, som konstaterar att de är en för liten aktör med för små utsläpp för att kunna gå vidare på egen hand. Detta kan vara en värdefull insikt eftersom aktörer som drar denna slutsats då kan rikta in sig på andra sätt för att minska sina koldioxidutsläpp.

För flera av projekten har stöden skapat möjlighet till nya och utvecklade samarbeten mellan olika aktörer. Detta gäller bland annat CinfraCap-projektet kring gemensam infrastruktur för mellanlagring och utskeppning i Göteborgs hamn och Vattenfalls projekt för negativa utsläpp i Uppsala kommun. Baserat på de resultat och slutsatser som presenterats i denna rapport finns det goda chanser för fler långsiktigt positiva effekter av Industriklivet, inte minst genom fortsatt utveckling av samarbeten mellan aktörer för en mer kostnadseffektiv CCS-värdekedja.

Appendix A: Mål – pågående genomförbarhetsstudier

Tabell A.1. Pågående genomförbarhetsstudier – Syfte och mål.

	Syfte och mål
Systemstudie bio-CCS Igelsta (Söderenergi)	– Skapa förutsättningar för nästa steg mot negativa utsläpp på Igelstaverket och välja koncept inför detaljprojektering, investering och konstruktion av affärsmodell. – Ta fram underlag för att driva arbetet framåt inom områdena teknik, finansiering, tillstånd och kommunikation. – Finansiell plan inklusive tidslinje för ansökningar om extern medfinansiering, investeringsbeslut etc., samt redovisning av administrativa och bokföringsmässiga hinder och förutsättningar. – Utred och starta de tillståndprocesser som krävs.
Sundsvall som nod för infångning och mellanlagring av koldioxid (SIMCO2) (Sundsvall Energi)	– Ta fram beslutsunderlag för Sundsvalls kommun, Sundsvall Energi, Flogas och Sundsvall Logistikpark för ställningstagande om framtida införande av CCS. – Identifiera behovet av CCS för att uppnå Sundsvalls kommuns målluppfyllelse om klimatneutralitet 2030. – Identifiera den bäst lämpade avskiljningstekniken för koldioxidavskiljning på Korstaverket. – Identifiera förutsättningar för att befintliga berggrum ska kunna användas som mellanlager för koldioxid. – Identifiera kostnaden per avskilt ton koldioxid för hela värdekedjan från avskiljning till lagring. – Ta fram möjlig utformning och kostnad för distributionsinfrastruktur mellan Korstaverket, mellanlager och hamn. – Jämföra kostnaden för CCS med uppskattat värde av koldioxid för syntetisk drivmedelsproduktion. – Etablera en nära dialog med potentiell mottagare för koldioxidlagring. – Identifiera ytterligare relevanta parter i framtida utveckling av Sundsvalls koldioxidmellanlager.
Positiv klimatpåverkan med kraftvärmeintegrerad BECCS – förberedelsefasen (POSCLIMB-prepare) (Växjö Energi)	– Bygga beställarkompetens, ta fram förberedande underlag och inspirera andra aktörer att följa efter. – Ta fram upphandlingsstrategi, och tekniska och ekonomiska kalkyler som behövs som underlag. – Analysera vad BECCS innebär för fjärrvärmesystemet, elsystemet, klimatpåverkan samt affären för Växjö Energi. – Ta fram underlag för miljökonsekvensbeskrivning. – Hitta lösning för lastning och transport av flytande koldioxid från Sandviksverket till utskleppningshamn. – Starta samverkan och ingått avsiktsförklaringar med de mest relevanta aktörerna i leveranskedjan för CCS. – Ta fram en affärsmodell för BECCS-värdekedjan och förberett underlag för investeringsbeslut. – Kommunicera kunskap genom nätverk.
Helsingborgs innovativa Carbon capture and Storage projekt, HICAS (Öresundskraft)	– Fördjupad kunskap för att kunna bygga en riskminimerad och optimerad CCS-kedja för en avfallsförbränningsanläggning. Utvecklat kunskap om HPC-baserad, eller annan ny, fullständig CCS-kedja. – En teknoekonomisk och miljömässig utvärdering av CCS-kedjor för Filbornaverket och lokala förhållanden. – Kunskap om bio-CCS marknad, finansierings- och stödmöjligheter för en fullskaleanläggning där osäkerheter har minimerats med exempelvis intentionsavtal eller garantier. – Kunskap om slutlagringsalternativ där osäkerheter har minimerats med exempelvis intentionsavtal. – Information till allmänheten och kunskap om allmänhetens acceptans för en anläggning i Helsingborg.

	Syfte och mål
Genomförbarhetsstudie av BECCS vid Johannes samt logistikkoncept via Gävle hamn (Gävle Kraftvärme)	– Utredda om fullskalig bio-CCS vid Johannes kraftvärmeverk är tekniskt och ekonomiskt möjligt och hur Gävle Hamn kan bidra till ett logistikkluster för CCS i regionen. – Framtagen mall för avtal om tjänsten att tillvarata och lagra koldioxid. – Uppskattad storlek, placering, investerings-, drifts- och underhållskostnader och HMS-sammanställning för minst en avskiljningsteknik lämpad för kraftvärmeverket. – Alternativ, placering, uppskattad dimensionering och kostnader för hela transport- och lagringskedjan, inkl kartläggning av potential för branschöverskridande samarbete inom regionalt CCS-kluster. – Färdigställda tekniska upphandlingsunderlag och underlag för ansökan om miljötillstånd och bygglov.
Genomförbarhetsstudie och förberedelse för investering av Bio-CCS på Hedensbyn kraftvärmeverk (Skelefteå)	– Säkerställa hur bio-CCS blir tekniskt och praktiskt genomförbart (infångning, logistik, HSE). – Ta fram en första uppskattning av kostnader genom hela värdekedjan. – Bedöma vilka tillståndshandlingar som behöver utarbetas. – Vidare projektutveckling (FEED). – Ta fram upphandlingsdokument. – Underlag för medverkan i omvända auktionen för bio-CCS, och för investeringsbeslut.
Hamnnära Bio-CCS vid Norrlands knutpunkt (Umeå Energi)	– Ta fram underlag och affärsmodell för att i kommande projektsteg kunna starta detaljprojektering för avskiljning och förvätskning av koldioxid i en bio-CCS-anläggning. – Projektera en anläggning för koldioxidavskiljning och förvätskning. – Identifiera nutida samt framtida nödvändiga krav och tillstånd avseende koldioxidinfångning. – Identifiera intressentgrupper och initiera samarbete med partners. – Ta fram logistik- och transportlösningar för transport till hamn. Utredda Umeå Hamn som plats för mellanlagring. – Ta fram affärsmodell för fullskalig bio-CCS-anläggning. Identifiera risker och kostnader längs hela logistikkedjan.
Klimatpositiv fjärrvärme med BECCS (Skövde Energi)	– Skapa underlag och affärsmodell för att i kommande projektsteg kunna starta detaljprojektering för klimatpositiv fjärrvärme vid Skövde kraftvärmeverk. – Bestämma vilken teknik och placering som är bäst lämpad för kraftvärmeverkets förutsättningar. – Utvärdera tillstånden som krävs. – Identifiera och samverka med möjliga samarbetspartner och aktörer. – Få uppfattning om möjliga logistik- och transportlösningar från avskiljning till hamn eller motsvarande. – Ta fram scenarier för en hållbar affärsmodell. Identifiera risker och kostnader längs hela logistikkedjan.
BECCS som största kolsänka i Mariestad (Katrinefors Kraftvärme)	– Utredda möjligheten att kombinera effektutbyggnaden av Katrinefors kraftvärmeverk med fullskalig anläggning för koldioxidavskiljning. Skapa underlag och affärsmodell för att i kommande projektsteg kunna starta detaljprojektering för klimatpositiv fjärrvärme och ånga vid kraftvärmeverket. – Ta fram förslag på tre olika tekniker för koldioxidavskiljning och val av en mest lämpad för Katrinefors kraftvärmeverk. – Utvärdera tillstånden som krävs och hur dessa kan kombineras med effektutbyggnaden. – Identifiera och samverka med möjliga samarbetspartner och aktörer. – Få en uppfattning om möjliga logistik- och transportlösningar från avskiljning till hamn eller motsvarande. – Ta fram scenarier för en realistisk affärsmodell. Identifierat risker och kostnader längs hela logistikkedjan.
Genomförbarhetsstudie för bio-CCS på Åby och Händelö kraftvärmeverk (E.ON Energiinfrastruktur)	– Kartlägga tekniska och ekonomiska förutsättningar för Bio-CCS vid Åbyverket och Händelöverket. – Samla tillräckliga data för att ta beslut för att investera i CCS-teknik för en eller flera av anläggningarna. – Visa vilken anläggning som passar bäst för CCS samt hur andra anläggningar kan följa efter. – Utredda teoretisk potential för negativa utsläpp (och infångning av fossil CO₂ från avfall vid Händelöverket). – CAPEX och OPEX för minst tre olika CO₂-avskiljningstekniker samt förvätskningsanläggning och mellanlager. – Underlag för val av teknik i respektive energisystem; körstrategi, årlig drifttid, energiåtervinning etc. – Utvärdering av geografiska förutsättningar för logistikkedja och lagring. – Jämförelse av genomförbarhetspotential för våra olika anläggningar. – En tydlig bild av behov av partnerskap och samverkan.

Appendix B: Urval av tabeller och figurer från projektrapporter

Tabell- och figurnummer i detta kapitel är hämtade från respektive projekts slutrapport. Slutrapporterna finns tillgängliga i sin helhet via Energimyndighetens projektdatabas på Energimyndighetens hemsida.

B.1 Genomförbarhetsstudie för Bio-CCS inom Stora Enso svenska sulfatfabriker, projektnummer 49897-1

Table 9. A summary of different technologies and the energy installation and consumption in capture and liquefaction. (Material from Attachment 1.) (2).

Flue gas source	Technology	Capture rate (%)	Volume CO ₂ (Mton/y)	Heat energy (MW)	Heat cons. (kWh/t CO ₂)	Electric energy (MW)	Electric cons. (kWh/t CO ₂)	Cooling energy (MW)	Cooling cons. (kWh/t CO ₂)	Cooling liq. (kWh/t CO ₂)
LK	PSA/ CryoCap	94 %	0,25	0	0	13	412	50	1 584	
RB	Amine	90 %	0,90	82	729	34	302	174	1 547	250
RB	HPC Electric	90 %	0,90	0	0	58	516	108	960	250
RB	HPC Steam	80 %	0,80	59	590	58	580	183	1 830	250
RB	Chilled Ammonia	90 %	0,90	74	658	35	311	173	1 538	
RB	PSA/ CryoCap	86 %	0,86	0	0	53	493	137	1 274	
RB+LK	Amine	90 %	1,14	102	714	43	301	215	1 505	250
RB+LK	HPC Electric	90 %	1,14	0	0	71	497	128	896	250
RB+LK	HPC Steam	80 %	1,02	75	591	70	551	228	1 795	250
RB+LK	Chilled Ammonia	90 %	1,14	94	658	70	490	215	1 505	
RB+LK	PSA/ CryoCap	86 %	1,09	0	0	44	322	192	1 406	

Table 11. Summary of different flue gases and the costs connected in SE Skutskär.

Flue gas source	Capture rate (%)	Cap. volume (Mton CO ₂ /y)	Investment (M€)	Capex (€/ton CO ₂)	Opex cap+liq (€/ton CO ₂)	Opex tp+stor.	Total
Lime kiln	93,5	0,25	94	34	33	52	119
Recovery boiler	80–90	0,8–0,9	194–307	22–31	21–36	52	97–110
Lime kiln and recovery boiler	80–90	1,0–1,1	203–347	19–28	20–34	52	92–105

Strengths	Weakness
Have access of large volumes of biogenic CO₂ Good process/technique knowledge Well organized handling of difficult chemicals Well organized safety systems Own harbor with area for intermediate storage (SE Skutskär) Good integration possibilities: – Energy – Logistic – Supervision Good project execution experience	Not a product within our field Can influence the focus on the main products No experience in this process CO₂ collection points in different places More difficult to control emissions in a mixed flue gas
Opportunities	Threats
In line with – Do good for the people and the planet (SE purpose) Good market/product perception Will be a market developer in this area and spread to multiple location All kraft pulp mills are suitable for BECCS	Political risk that terms and conditions for BECCS are changing Other companies are doing this cheaper and more efficient No suitable storage site is immediately available Environmental permitting procedure is not predictable

SWOT-analys (SE = Stora Enso)

B.2 Energiutvärdering av koldioxidinfångningstekniker i ett svenskt sulfatmassabruk (Stora Enso AB), projektnummer 49897-2

Table 3. Summary of impact of energy integration of CO₂ capture with the ÅF model mill.

						Remarks
Process		Amine	HPC Electric	HPC Steam	PSA/Cryo	
Power revenue loss	kWh/tCO ₂ kWt/ADt	313 469	317 476	447 670	512 768	Only valid for modern mills with sufficient condensing power on margin. The model mill has a power export of ca 905 kWh/ADt → the mill is still a power exporter after integration of the processes.
Heat consumption	MW	92	0	82	2	
Power consumption	MW	17	39	37	61	capture + liquefaction
Cooling demand	MW	183	130	179	197	
Lost power generation	MW	22	0	19	1	In relation to the model mill.
Recovered heat to pulp mill	MW	0	0	0	0	

B.3 Rollen av BioCCS för negativa koldioxidutsläpp i Uppsala kommun (Vattenfall AB), projektnummer 49869-1

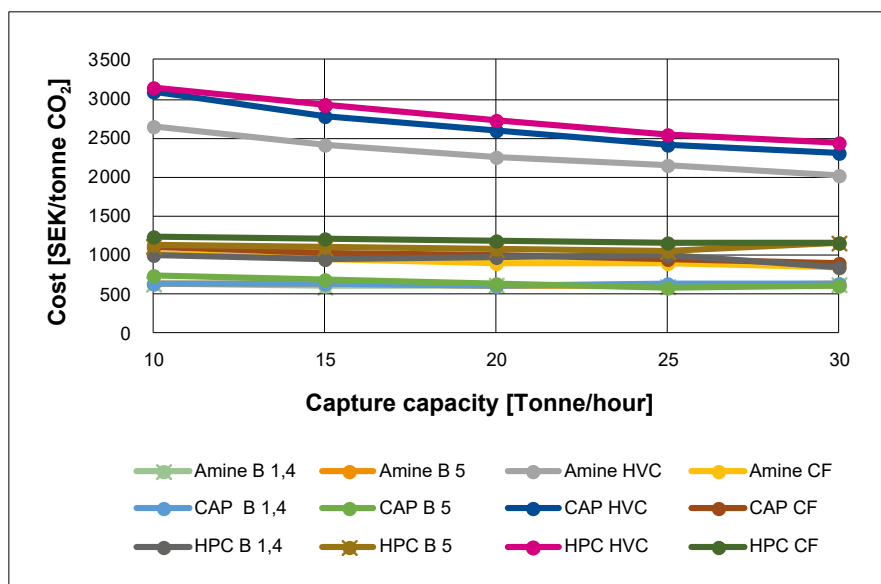


Figure 19. Cost comparison between capture capacities.

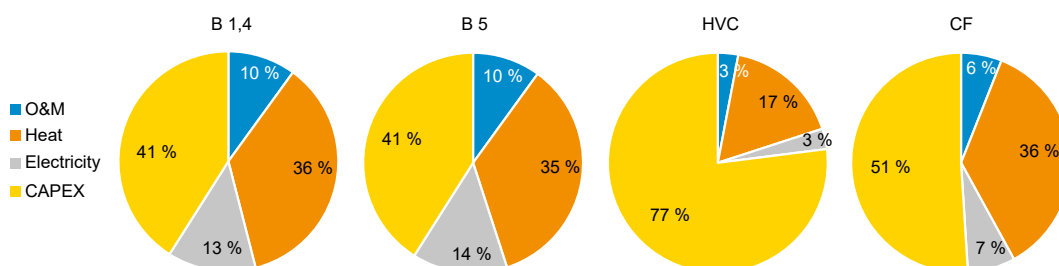


Figure 21. Cost breakdown of the amine process at a capture capacity of 20 tonne per hour.

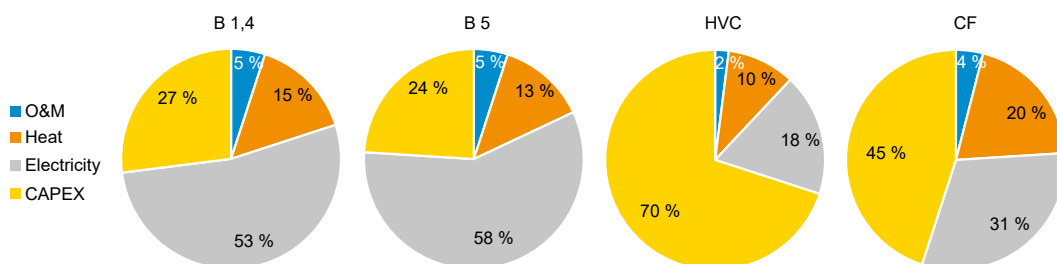


Figure 23. Cost breakdown of HPC at a capture capacity of 20 tonne per hour.

B.4 Genomförbarhetsstudie av CCS vid Mälarenergis Kraftvärmeverk i Västerås (Mälarenergi AB), projektnummer 51478-1

Tabell 4. KPI block 6 för respektive post-combustion teknik med eller utan värmepump.

Block 6 – 100 % last	Utan avskiljning	HPC FE med VP	HPC FE utan VP	HPC ES	Amine utan VP	Amine med VP	CAP utan VP	CAP med VP
Bränsle (MW)	175	175	175	175	175	175	175	175
El netto (MW)	48	24	30	32	27	16	34	19
FJV (MW)	133	164	139	139	119	162	111	159
El behov [MW]								
El brutto	48	48	48	48	48	48	48	48
Förlust (ångavtappning)	0	0	0	–3	–12	–12	–10	–10
Avskiljning	0	–18	–12	–7	–3	–14	–3	–18
Förvätskning	0	–6	–6	–6	–6	–6	–1	–1
NETTO	48	24	30	32	27	16	34	19
Fjärrvärme [MW]								
FJV brutto	133	133	133	133	133	133	133	133
Förlust (ångavtappning)	0	0	0	–30	–28	–28	–23	–23
Avskiljning	0	25	0	30	8	51	0	48
Förvätskning	0	6	6	6	6	6	1	1
SUMMA	133	164	139	139	119	162	111	159
Kylbehov [MW]								
Avskiljning	0	0	19	18	12	12	36	9
Förvätskning	0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	0,4	0,4

Tabell 10. Koldioxidavskiljning på block 6 och 7 systemverkningsgrad, el netto och bränslebehov i jämförelse med normalåret. Negativ siffra innebär lägre än normalåret och positiv högre.

Block 6	System- verknings- grad	El netto	Bränsle- behov	Block 7	System- verknings- grad	El netto	Bränsle- behov
HPC FE med VP	5 %	–36 %	–8 %	HPC FE med VP	–0,8 %	–23 %	–5 %
HPC FE	–5 %	–23 %	–1 %	HPC FE	–2,2 %	–17 %	–1 %
HPC ES	–3 %	–19 %	–1 %	HPC ES	–1,1 %	–12 %	–1 %
Amine med VP	0,3 %	–41 %	–7 %	Amine med VP	6,9 %	–33 %	–14 %
Amine	–6 %	–17 %	–2 %	Amine	–0,03 %	–12 %	–2 %
CAP med VP	–0,2 %	–32 %	–5 %	CAP med VP	5,6 %	–26 %	–10 %
CAP	–5 %	–9 %	–2 %	CAP	–2,6 %	–2 %	3 %

Diagram 3. OPEX block 6 kronor per avskild ton koldioxid capture (avskiljning), liquefaction (förvätskning) och buffertlager samt om enbart bioandelen i avfallet bär hela driftkostnaden.

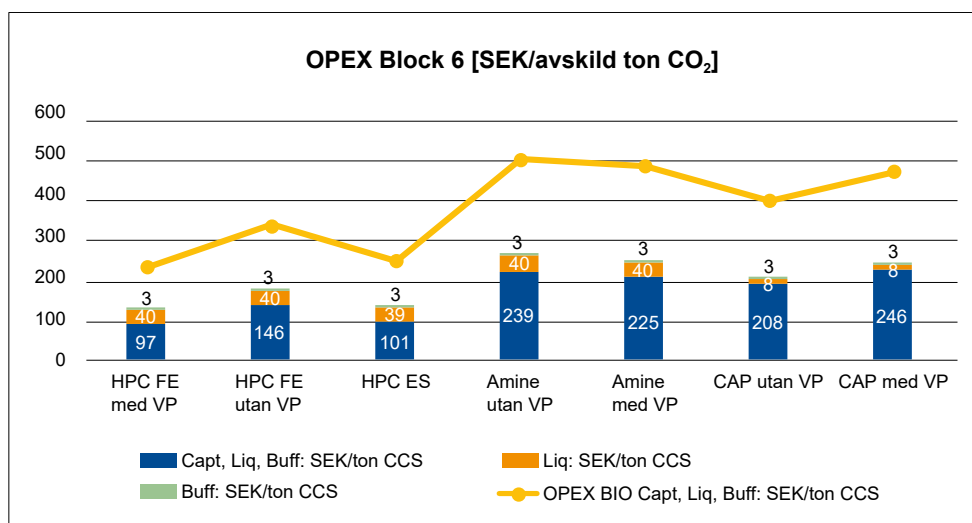


Diagram 5. CAPEX block 6 kronor per ton avskild koldioxid för capture (avskiljning) och liquefaction (förvätskning).

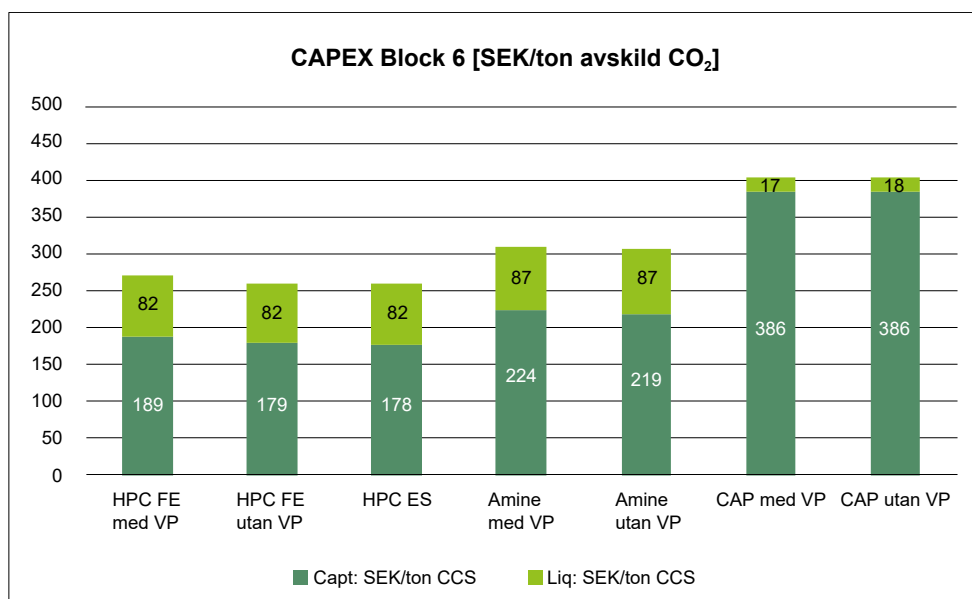


Diagram 7. OPEX block 7 kronor per ton avskild koldioxid för capture (avskiljning), liquefaction (förvätskning) och bufferstore (lager).

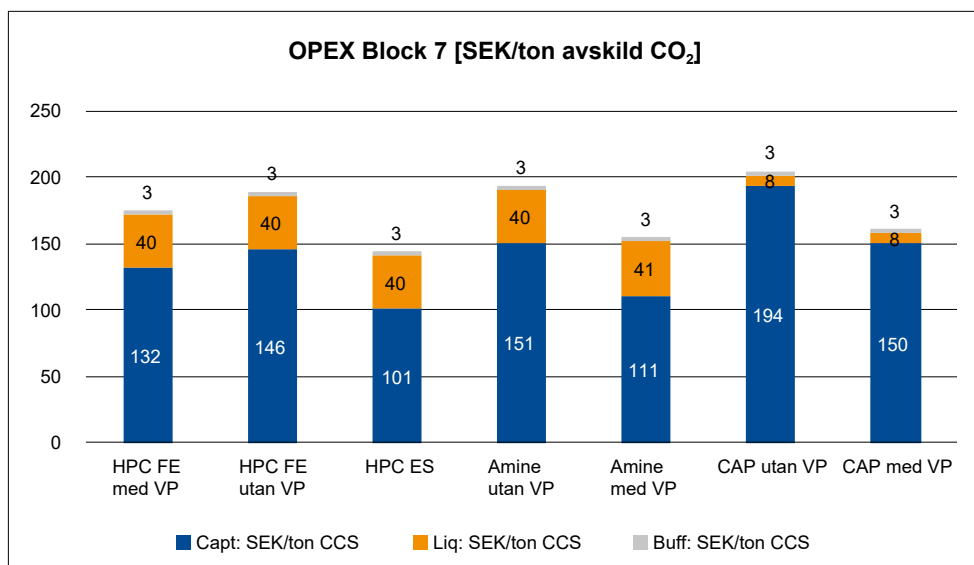


Diagram 9. CAPEX block 7 kronor per ton avskild koldioxid för capture (avskiljning) och liquefaction (förvätskning).

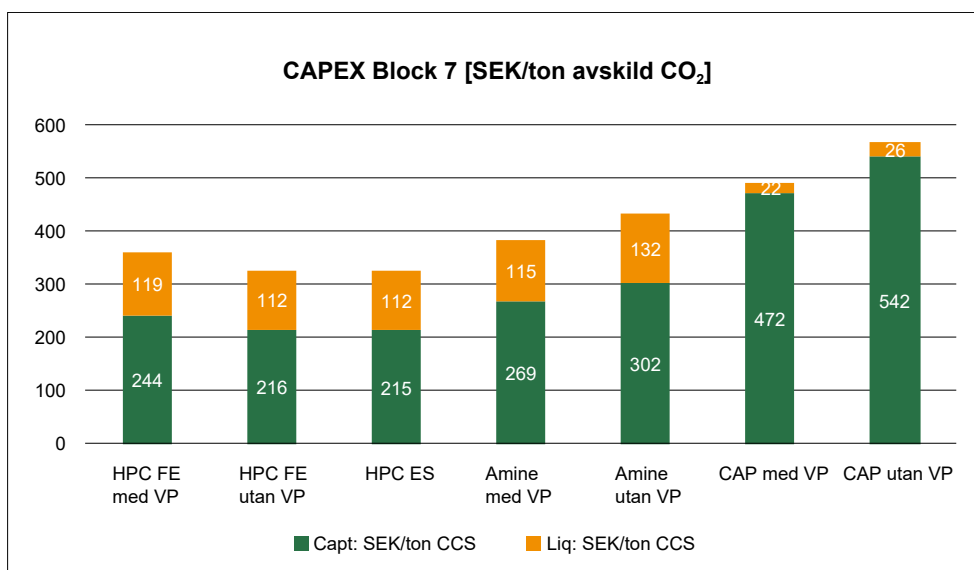


Diagram 13. Investeringsvolym, miljoner kronor, hela kedjan från avskiljning till lagring block 6. Buffertlagring och utlastningsutrustning är beräknade volymer för både block 6 och 7.

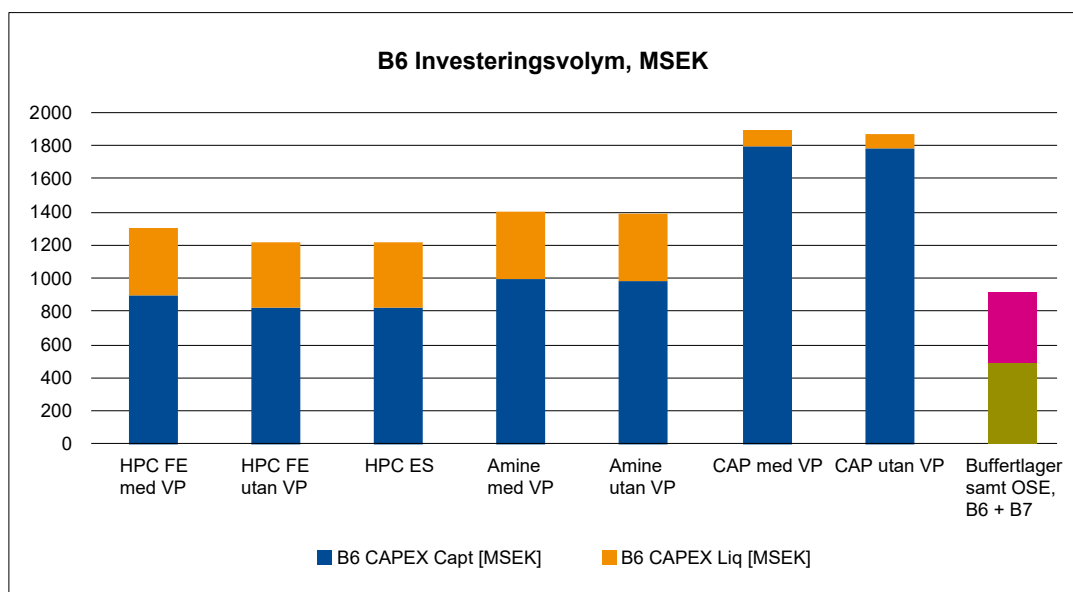


Diagram 14. Investeringsvolym, miljoner kronor, hela kedjan från avskiljning till lagring block 7. Buffertlagring och utlastningsutrustning är beräknade volymer för både block 6 och 7.

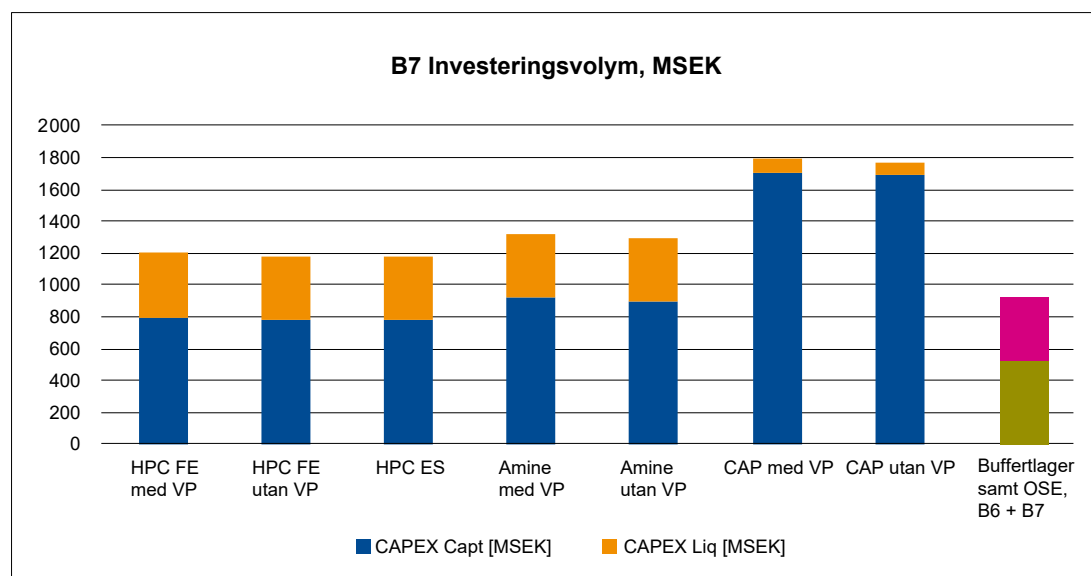


Diagram 15. Kostnad per ton avskild koldioxid block 6 från avskiljning till lagring.

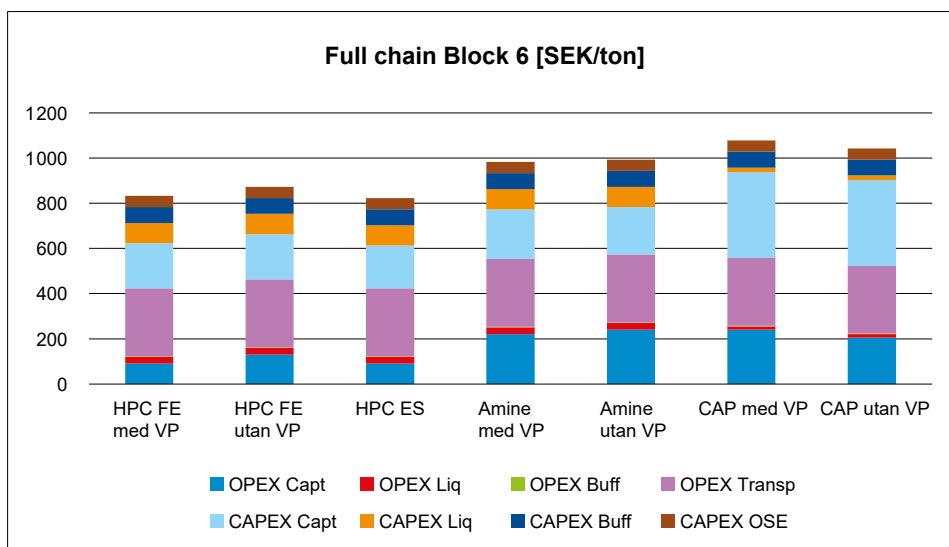
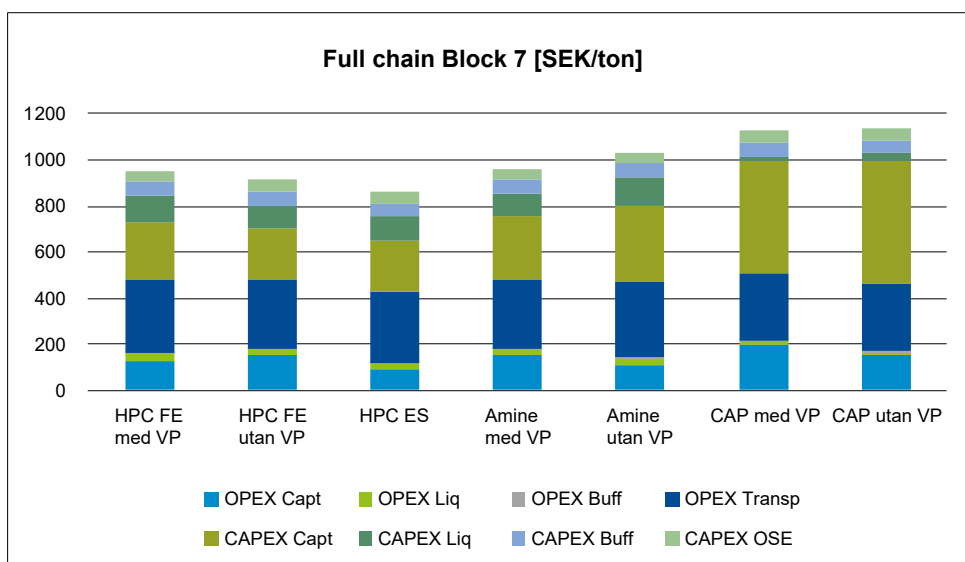


Diagram 16. Kostnad per ton avskild koldioxid block 6 från avskiljning till lagring.



B.5 Genomförbarhetsstudie av CCS vid Bodens Energis kraftvärmeverk, projektnummer 52774-1

Can you utilise both with the same negative emission?	Selling originlabelled district heating	Selling negative emissions on an open market	Revenues from negative tax	Revenues from policy related carbon credits	Revenues from reverse auction
Selling originlabelled district heating	✓	✓	✓	✓	✓
Selling negative emissions on an open market	✓	✓	✗	✗	?
Revenues from negative tax	✓	✗	✓	✗	?
Revenues from policy related carbon credits	✓	✗	✗	✓	?
Revenues from reverse auction	✓	?	?	?	✓

Figure 5. Summary of revenue streams and their effects on each other.

Table 1. Potential revenues for CCS.

	Potential revenue [kr/tonne CO ₂]	Note
Selling lower-emission originlabelled district heating	7–47	The interval is based on the low and high ends of the price estimates (0.3–2 öre/kWh) times the energy per tonne translation (2354 kWh/tonne CO ₂).
Selling negative emissions on an open market	200–1 290	Based on prises on Puro.earth on October 14th, 2021.
Revenues from negative tax or policy related carbon credits	500–1 000	Based on forecasted EUA prices.
Revenues from reverse auction	0–2 000	Based on price predictions and the fact that only some companies will be awarded financial support from the system.

Table 2. Results of heat and mass balance calculations for P17 & P18 without heat pump.

Energy output summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Fuel input	57	57	57	57	57	MW
Net electricity output	12	4	3	4	6	MW
Net district heating output	45	49	49	38	36	MW
Cooling requirements	-	9	7	21	20	MW
Electric summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	12	12	12	12	12	MW
Loss (LP related)	0	-1	0	-3	-3	MW
Capture	0	-4	-6	-1	-3	MW
Liquefaction	0	-3	-3	-3	-1	MW
SUM	12	4	3	4	6	MW
District heat summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	45	45	45	45	45	MW
Loss (LP related)	0	-13	0	-12	-9	MW
Capture	0	15	2	3	0	MW
Liquefaction	0	2	2	2	0.3	MW
SUM	45	49	49	38	36	MW
Cooling summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Capture	0	8	6	20	20	MW
Liquefaction	0	1	1	1	0.2	MW
SUM	0	9	7	21	20	0,4

Table 3. Results of heat and mass balance calculations for P17 & P18 with heat pump.

Energy output summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Fuel input	57	57	57	57	57	MW
Net electricity output	12	1	1	-3	1	MW
Net district heating output	45	61	59	65	57	MW
Cooling requirements	0	1	1	1	4	MW
Electric summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	12	12	12	12	12	MW
Loss (LP related)	0	-1	0	-3	-3	MW
Capture	0	-6	-8	-8	-8	MW
Liquefaction	0	-3	-3	-3	-1	MW
SUM	12	1.2	1.1	-2.6	0.8	MW
District heat summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	45	45	45	45	45	MW
Loss (LP related)	0	-13	0	-12	-9	MW
Capture	0	26	11	29	21	MW
Liquefaction	0	3	3	3	1	MW
SUM	45	61	59	65	57	MW
Cooling	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Capture	0	0	0	0	4	MW
Liquefaction	0	1	1	1	0.2	MW
SUM	0	1	1	1	4	0,4

Table 4. Results of heat and mass balance calculations for overall net energy output from P17 & P18 when integrating a CC plant with heat pump at P18 solely.

Description	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Fuel input	57	57	57	57	57	MW
Net electricity output	12	5	6	3	5	MW
Net district heating output	45	55	53	57	53	MW
Cooling requirements	0	1	1	1	2	MW
Electric summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	12	12	12	12	12	MW
Loss (LP related)	0	-1	0	-2	-2	MW
Capture	0	-4	-5	-5	-5	MW
Liquefaction	0	-2	-2	-2	0	MW
SUM	12	5.4	5.5	3.0	5.0	MW
District heat summary	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Gross	45	45	45	45	45	MW
Loss (LP related)	0	-8	0	-7	-5	MW
Capture	0	16	6	18	13	MW
Liquefaction	0	2	2	2	0	MW
SUM	45	55	53	57	53	MW
Cooling	Without CCS	HPC ES	HPC FE	Amine	CAP	Unit
Capture	0	0	0	0	2	MW
Liquefaction	0	1	1	1	0.1	MW
SUM	0	1	1	1	2	0,4

Appendix C: Huvudresultat från Energiforsks rapport "Bio-CCS i fjärrvärmesektorn"

Den här bilagan presenterar – i förkortad form och med några redaktionella ändringar och kommentarer – de elva punkter som sammanfattar huvudresultaten från Energiforsks syntesrapport om bio-CCS i fjärrvärmesektorn.

Potentialen för branschen är minst 10 Mton negativa utsläpp 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. Samtidigt som de negativa utsläppen skapas så finns en potential för avskiljning och lagring även av koldioxid med fossilt ursprung från avfallsförbränning. Potentialen för avskiljning av fossil koldioxid uppgår till ca 3 miljoner ton per år. Kostnaden för avskiljning och transport till hamn varierar mellan olika anläggningar.

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. Jämfört med MEA-processen förbrukar HPC-processen betydligt mer el men är å andra sidan mindre eller inte alls beroende av ånga från turbinen. Valet av process avgörs av de specifika förutsättningarna för den enskilda anläggningen.

Även transport och lagring av koldioxid är beprövad teknik, men med ny tillämpning. Varje aktör ställs dock inför en mängd valsituationer när det gäller avskiljningsprocess, transport, mellanlagring och permanent lagring. Utmaningen är att finna det mest kostnadseffektiva sättet att åstadkomma den eftersträvade avskiljningen och lagringen av biogen koldioxid för att på så sätt åstadkomma negativa utsläpp.

Samverkan/"kluster" kan ge fördelar för transport och mellanlagring

Projektet har identifierat några huvudsakliga kluster för lokal samverkan kring olika delar av logistikkedjan 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.

- 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.

Samverkan ger skalfördelar för flera delar av kedjan, exempelvis förvätskning, mellanlagring och skeppstransport. Det är större sannolikhet att samverkans-fördelar realiseras

om olika aktörers planer matchar i tid. För de flesta lagringsalternativ förutsätts fartygs-transport. Vid stor volym och kort avstånd skulle dock rörledningsalternativet kunna bli attraktivt.

Tillgång till lagringsplatser avgörande

De lagringsalternativ som förefaller mest rimliga för svensk del är permanent lagring i akvifärer och eventuellt uttömda olje- och gasfält i vår närhet. Det finns ett flertal pågående eller planerade lagringsprojekt i Sveriges geografiska närområde – 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. Det kan dock uppstå konkurrens om tillgången till de lagringsplatser som är först ut. Bedömningen är att lagring i svensk berggrund inte kommer att kunna bli aktuell förrän efter 2030, även om processen inleds omgående.

Analys av systemkonsekvenserna visar på stora fördelar, trots ökat 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. Modellberäkningar visar att det som en följd av introduktion av bio-CCS tillkommer viss el- och värmeproduktion, och koldioxidutsläpp av fossilt ursprung med anledning av dessa, för att täcka den energianvändning som avskiljningsprocessen skapar. Dessa minskar dock endast de totala resulterande negativa utsläppen med 5–10 procent. Bio-CCS och de negativa utsläpp som därmed skapas bidrar direkt till att begränsa halten av koldioxid i atmosfären, vilket är själva drivkraften för investeringen.

Det största hindret för introduktion av bio-CCS i fjärrvärmesektorn är finansieringen

Även om det finns utmaningar när det gäller tekniska lösningar för bio-CCS så bedöms dessa inte vara oöverstigliga. Bio-CCS är dock en relativt dyr teknik. Den totala kostnaden för att åstadkomma negativa utsläpp via bio-CCS, från avskiljning till och med permanent lagring, bedöms ligga på minst 1 000 kr/ton koldioxid. Eftersom intäktsmöjligheterna fortfarande är osäkra konstateras att det största hindret för introduktion av bio-CCS i fjärrvärmesektorn är osäkerheten kring finansieringen.

Flera möjliga sätt att finansiera bio-CCS, men många frågetecken återstår

För att kunna implementera system som skapar incitament för bio-CCS behövs först regelverk för mätning, rapportering och verifiering av bio-CCS-projekt. Detta kan sen ligga till grund för skapandet av en handelsvara, exempelvis ”bio-CCS-krediter”. Inom projektet har fyra modeller för finansiering av bio-CCS studerats:

- Staten som köpare: 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 är att det blir dyrt för staten och skattebetalarna.
- Kvotplikt för förorenare: 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: Utsläppshandelssystem har fördelar och nackdelar som liknar de som kvotpliktssystem skapar.
- Frivillig klimatkompensering: 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.

Vid avfallsförbränning uppstår koldioxid både från biogena och fossila källor. Det innebär att det kan behövas ytterligare styrmedel för att göra avfalls-CCS ekonomiskt konkurrenskraftigt.

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.

Osäkerhet angående syftet med omvänd auktion och ägande av de negativa utsläppen

Auktioner förespråkas av en stor majoritet som huvudalternativ till utformning av ett stödssystem för bio-CCS. Kostnadseffektivitet för att bygga långsiktig acceptans används som huvudmotivering. Under den här rubriken lyfter rapporten ett antal osäkerheter och viktiga avväganden vad gäller ett system med omvända auktioner för negativa utsläpp genom bio-CCS. Sedan rapporten publicerades har arbetet med införande av det nya styrmedlet fortsatt, vilket gör att en del av de frågor som lyfts har blivit besvarade. Principiellt är dock alla punkter viktiga att hantera vid införandet av stödsystemet:

- Är syftet att introducera och demonstrera bio-CCS i olika branscher eller att uppnå högsta möjliga volym negativa utsläpp till lägsta möjliga kostnad?
- Hur hanteras ”ägandet” av de negativa utsläppen? Ska de gå att handla med på en internationell marknad eller kunna bokföras i det svenska utsläppsregistret?
- Finns det en risk att ambitiösa planer om sjösättning av stödsystem redan 2022 gör att alltför få aktörer är redo att lägga bud, och att därmed inte tillräcklig konkurrens skapas för att hålla nere kostnaderna?

Tillståndsfrågor, barriärer och ”regel-hinder”

De regelmässiga förutsättningarna för bio-CCS i Sverige har förbättrats avsevärt det senaste decenniet. 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. Detta kan 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. Avskiljning och lagring av koldioxid från fossila bränslen undantas uttryckligen från moratoriet, men inte bio-CCS. Detta kan därmed kan utgöra ett hinder för svensk bio-CCS.

Bio-CCS skapar en rad möjligheter

- Klimatnyttan av att skapa nödvändiga negativa koldioxidutsläpp.
- Bidrar till stärkt konkurrenskraft på marknader för exempelvis el, värme, massa- och pappersprodukter samt transportbränslen.
- Möjlighet att utveckla marknadssegment som kan vara villiga att betala en premie för produkter som producerats vid anläggningar som installerat bio-CCS.
- Stater eller företag i tredje land kan tänkas vilja köpa svenska minusutsläpp, och på så sätt göra ”negativa utsläpp” till en möjlig framtida svensk exportprodukt.
- Möjlighet att Sverige som föregångsland inom bio-CCS och negativa utsläpp kan exportera teknik och kunskap till resten av världen och därigenom skapa exportintäkter och arbetstillfällen.

Stort värde av dialog och samverkan inom projektet

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

Huvudresultaten baseras på ett flertal delrapporter

Zetterberg, L. Johnsson, F., Möllersten, K. (2022) Incitament för Bio-CCS i fjärrvärmern, Rapport 2022:836.

Beiron, J. m.fl. (2022). Teknik, systemintegration och kostnader, Rapport 2022:837.

Löfblad, E. m.fl (2022). Samverkan kring infrastruktur för transport och lagring av koldioxid, Rapport 2022:838.

Fridahl, M., Lundberg, L. & Nehler, T. (2022). Stödsystem för bio-CCS i Sverige, Rapport 2022:839.

Möllersten, K. & Gustavsson, M. (2022). Hållbarhetsbedömning av bio-CCS i fjärrvärmesektorn, Rapport 2022:840.

Sköldberg, H., Beiron, J., Fridahl, M., Gode, J., Grubbström, C., Gustavsson, M., Holm, J., Johnsson, F., Kjärstad, J., Lundberg, L., Löfblad, E., Möllersten, K., Nehler, T., Romson, Å., Sahlin, J., Solis, M., Steen, L., Svanberg, M., Unger, T., Wolf, J., Zetterberg, L., Bio-CCS i fjärrvärmesektorn – syntes, Rapport 2022:842.



Hållbar energi för alla

Energimyndigheten leder samhällets omställning till ett hållbart energisystem.

Vi bidrar med fakta, kunskap och analyser om tillförsel och användning av energi i samhället, och arbetar för en trygg energiförsörjning.

Forskning om framtidens fordon och bränslen, förnybara energikällor och smarta elnät får stöd av oss. Vi stöttar också affärsutveckling som gör det möjligt att kommersialisera innovationer och ny teknik, och ser till att goda lösningar kan exporteras.

Vi ansvarar för Sveriges officiella statistik på energiområdet, och hanterar elcertifikatsystemet och handeln med utsläppsrätter.

Dessutom deltar vi i internationella klimatsamarbeten, och förmedlar fakta om effektivare energianvändning till hushåll, företag och myndigheter.



Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna
Telefon 016-544 20 00, Fax 016-544 20 99
E-post registrator@energimyndigheten.se
www.energimyndigheten.se