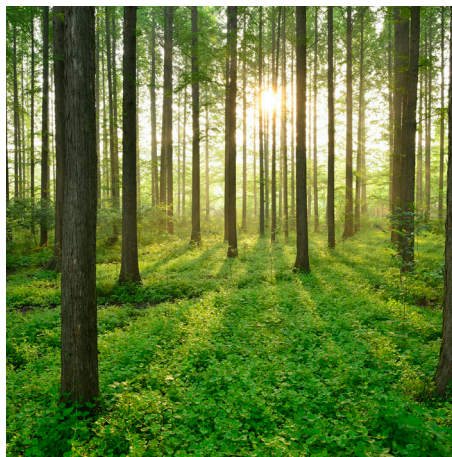
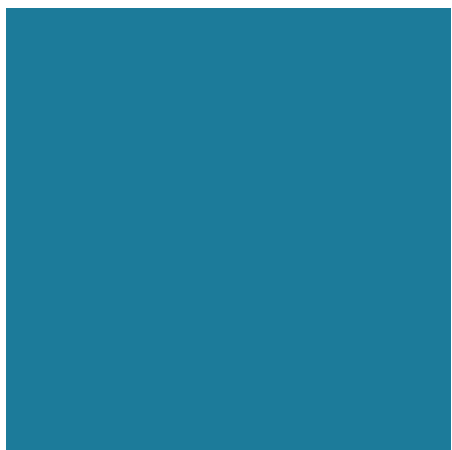


BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN

RAPPORT 2025:1127



BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN



Bio-CCS i fjärrvärmesektorn

Möjligheter och utmaningar för utsläppsminskning
och negativa utsläpp genom CCS

JENNY WESTERBERG PROFU, HÅKAN SKÖLDBERG PROFU, JULIA RENSTRÖM PROFU
EMIL NYHOLM PROFU, JENNY SAHLIN PROFU, CLARA HAAG JOHANSSON PROFU
KENNETH MÖLLERSTEN, IVL, MATHIAS FRIDAHL, LINKÖPINGS UNIVERSITET
ALEXANDER OLSSON LINKÖPINGS UNIVERSITET, GRY MØL MORTENSEN RISE
JAN KJÄRSTAD CHALMERS, KATJA ÅSTRÖM ENERGIFORSK

ISBN 978-91-89918-28-3 | © Energiforsk augusti 2025

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

Förord

Uppvärmningssektorns vision är att vara en kolsänka till 2045 som hjälper hela samhället att klara klimatmålen. Genom att avskilja och lagra biogen koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall har fjärrvärmesektorn stor potential att bidra med negativa utsläpp och utsläppsminskning. För att förverkliga denna potential krävs ett omfattande samspel mellan teknik, infrastruktur, styrmedel och finansiering.

Denna rapport sammanfattar erfarenheter, insikter och slutsatser från forskningsprojektet *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn – etapp 2*. Projektet har bedrivits inom Energiforsks ram och bygger vidare på det arbete som genomfördes inom etapp 1 (2020-2021). Det har genomförts i nära samverkan mellan forskare och representanter från energiföretag, avfallsföretag och industripartners. Analyserna har utförts av forskare och experter från Profu, IVL Svenska Miljöinstitutet, Chalmers Tekniska Högskola, Linköpings Universitet, Energiforsk och RISE. Energiforsk (Stefan Montin) har varit huvudansvarig för projektet och Profu (Jenny Westerberg) har varit projektledare.

Projektet har omfattat analys av CCS-planer, finansieringslösningar, policyfrågor, avskiljningsteknik, infrastruktur och samverkan, lagringsmöjligheter samt systemanalys. Resultaten visar både på potential och hinder, och lyfter fram viktiga rekommendationer för fortsatt utveckling. Genom delrapporter och genomförande av ett 20-tal workshoppar och/eller webinarier har projektets finansiärer både involverats i arbetet och fått del av resultat under projektets gång.

Energiforsk vill tacka alla som har bidragit till projektets genomförande – från forskare, deltagare i workshoppar och intervjuer till referensgrupp och externa experter. Ett särskilt tack riktas till de företag som möjliggjort projektet genom finansiering, engagemang och öppen kunskapsdelning. Resultaten i rapporten är ett viktigt underlag för framtida beslut om investeringar och styrmedel för att förverkliga CCS i Sverige.

Stockholm, augusti 2025

Energiforsk AB

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

Sammanfattning

Fjärrvärmesektorn har stor potential att bidra med negativa utsläpp och utsläppsminskning genom avskiljning och lagring av koldioxid (CCS) från förbränning av biobränslen och avfall. Denna rapport redovisar resultat från ett Energiforskprojekt, som omfattat teknik, infrastruktur, lagring, policy, finansiering och systemanalys. Viktiga slutsatser är att det behövs ett långsiktigt EU-styrmedel för negativa utsläpp, svensk kompletterande finansiering samt en nationell plan för infrastruktur.

Visionen i uppvärmningssektorns färdplan för fossilfrihet är att från 2045 vara en kolsänka för hela samhället. Redan till 2030 finns konkreta planer i fjärrvärmesektorn om att avskilja och lagra ca 3 Mton koldioxid, varav ca 2 Mton utgörs av negativa utsläpp genom avskiljning och lagring av biogen koldioxid (bio-CCS). Viktiga steg har tagits under 2025 då både Stockholm Exergi och Öresundskraft har fattat investeringsbeslut och Stockholm Exergi även vunnit den första omvända auktionen.

De flesta fjärrvärmeanläggningar väljer mellan aminlösning och HPC som teknik för koldioxidavskiljning. Det finns potential till minskade kostnader, men brant lärlkurva kan inte förväntas då relativt få projekt kommer att implementeras på kort sikt. Infrastrukturen för koldioxid är en nyckelfråga då svenska anläggningar under överskådlig tid är hänvisade till slutlagring i andra länder. Storskal fördelar med samverkan kan ge lägre kostnader och bättre förhandlingsmöjligheter med till exempel lagringsaktörer. Samtidigt är incitamenten för samverkan låga och det behövs lokal samordning samt en nationell plan för koldioxidinfrastruktur.

Danmark och Norge har pågående och planerade lagringsprojekt med stor kapacitet för lagring i akvifärer eller uttömda oljefält. Sverige har också tecknat bilaterala avsiktsförklaringar med dessa länder om permanent lagring. Island fokuserar på lagring genom mineralisering i basalt. Sverige har ännu inga operativa lager för koldioxid, men potentialen utreds bland annat inom ett regeringsuppdrag till SGU.

Bio-CCS krävs för att nå EU:s klimatmål, men saknas i de klimatpolitiska pelarna. Det är oklart om bio-CCS bör hanteras i befintlig eller ny pelare. Under 2024 blev EU-ramverket för certifiering av kolsänkor klart. I Sverige har en första omvänd auktion genomförts där Stockholm Exergi beviljades stöd. Kvarvarande medel räcker troligen till få ytterligare projekt. Frivilligmarknaden har stor potential, men det är oklart om den kan stå för hela kostnaden. För CCS vid avfallsförbränning krävs även finansiering av CCS för de fossila utsläppen, då utsläppsrättspriserna idag är för låga. Sammantaget behövs kompletterande styrmedel för att finansiera den fossila andelen, ett långsiktigt EU-ramverk för negativa utsläpp samt troligen en svensk överbryggande lösning.

Systemanalyserna visar att en storskalig utbyggnad av CCS i fjärrvärmesektorn bedöms ha hanterbara konsekvenser på elpriser och biobränslebehov. Dock minskar elproduktionen från kraftvärme något. Resultaten visar vidare att elpriset måste vara mycket högt för att man ska välja att stoppa koldioxidavskiljningen, men däremot kan värmeåtervinning via värmepump stoppas vid höga elpriser.

Nyckelord

Avskiljning och lagring av koldioxid, CCS, bio-CCS, kolsänka, fjärrvärme

Summary

The district heating sector has potential to contribute to negative emissions and emission reductions through carbon capture and storage from the combustion of biomass and waste. This report presents results from an Energiforsk project covering technology, infrastructure, storage, policy, financing, and system analysis. Key conclusions are that a long-term EU policy instrument for negative emissions is needed, along with complementary Swedish financing and a national plan for infrastructure.

The vision outlined in the heating sector's roadmap is to become a carbon sink for the entire society by 2045. By 2030, the district heating sector already has concrete plans to capture and store approximately 3 million tonnes (Mt) of carbon dioxide, of which about 2 Mt negative emissions through the capture and storage of biogenic CO₂. Important steps were taken in 2025 when both Stockholm Exergi and Öresundskraft made investment decisions, and Stockholm Exergi also won the first reversed auction.

Most district heating plants are choosing between amine solution and HPC technology for carbon capture. There is potential for cost reductions, but a steep learning curve cannot be expected since relatively few projects will be implemented in the short term. CO₂ infrastructure is a key issue, as Swedish facilities will rely on storage abroad for the foreseeable future. Economies of scale through collaboration can lead to lower costs. However, incentives for collaboration are currently low, and local coordination as well as a national plan for CO₂ infrastructure is needed.

Denmark and Norway have ongoing and planned storage projects with large capacities in aquifers or depleted oil fields. Sweden has also signed bilateral MoU:s with these countries for permanent storage. Iceland is focusing on storage through mineralization in basalt. Sweden has no operational CO₂ storage sites, but the Geological Survey of Sweden (SGU) is investigating the potentials through a government assignment.

Bio-CCS is required to meet the EU's climate targets but is not yet part of any of the climate policy pillars. It remains unclear whether bio-CCS should be included in an existing or new pillar. In 2024, the EU framework for carbon removal certification was finalized. In Sweden, the first reverse auction was held, with Stockholm Exergi receiving support. Remaining funds are likely only sufficient for a few more projects. The voluntary market has great potential, but it is unclear whether it can cover the full cost. For CCS at waste incineration facilities, financing is also required for the fossil fraction, as today's emission allowance prices are too low. Overall, complementary policy instruments are needed to fund the fossil share, along with a long-term EU framework for negative emissions and likely a bridging solution in Sweden.

System analyses show that a large-scale CCS rollout in the district heating sector would have manageable impacts on electricity prices and biomass demand, although power production from combined heat and power (CHP) decreases slightly. Electricity prices would have to be extremely high for carbon capture to be halted, although heat recovery via heat pumps may be discontinued at high electricity prices.

Keywords

Carbon capture and storage, CCS, bio-CCS, carbon sink, district heating

Innehåll

1	Syntes av samlade resultat	8
1.1	Teknik	9
1.2	Infrastruktur och samverkan	10
1.3	Slutlagring	11
1.4	Policy, regelverk och standardisering	12
1.5	Finansiering	13
1.6	Systemkonsekvenser vid en bio-CCS-utbyggnad	15
2	Inledning	17
2.1	Bakgrund och om projektet	17
2.2	CCS i svenska fjärrvärmesektorn	18
2.3	Förkortningar	20
3	Teknik	21
3.1	Fokus på omvärldsbevakning och kunskapsspridning	21
3.2	Slutsatser från workshoparna	21
4	Infrastruktur och samverkan	29
4.1	Infrastruktur för koldioxidtransport	29
4.2	Samverkan inom och mellan kluster	33
4.3	Insikter och erfarenheter från svenska samverkanskluster	34
4.4	Styrmedel för ökad samverkan kring infrastruktur	37
4.5	Slutsatser infrastruktur och samverkan	38
4.6	Medskick till myndigheter och planeringsaktörer	39
4.7	Förslag till fortsatt forskning	39
5	Slutlagring – koldioxidlagringsprojekt i Sveriges närhet	40
5.1	Inledning	40
5.2	Undersökningslicenser avseende koldioxidlagring	41
5.3	Lagringsprojekt i Danmark	41
5.4	Lagringsprojekt i Norge	46
5.5	Lagringsprojekt i Island	49
5.6	Lagringsmöjligheter i Sverige	50
6	Policy, regelverk och standardisering	52
6.1	CCS i utsläppshandeln	52
6.2	Hantering av negativa utsläpp i EU-regelverken	52
6.3	Allokering av koldioxid vid CCS och CCU	56
6.4	EU-certifiering av kolsänkor (CRCF)	57
6.5	Standardisering	57
6.6	Status för identifierade regelverkshinder från etapp 1	59
7	Finansiering	61
7.1	Omvänd auktion för bio-CCS	62

7.2	Investeringsstöd	63
7.3	Kvotplikt, återtagskrav, utökat producentansvar	63
7.4	Differenskontrakt (Carbon Contracts for Difference)	65
7.5	EU:s utsläppshandel (EU ETS)	66
7.6	Frivilligmarknad	70
7.7	Finansiering via mottagningsavgifter för avfallsförbränning	75
7.8	Internationell utblick	76
7.9	Diskussion kring finansiering av CCS vid förbränning av biobränslen och avfall	79
8	Systemkonsekvenser vid en bio-CCS-utbyggnad	82
8.1	Genomförda systemanalyser, metod och beräkningsförutsättningar	82
8.2	Infångad koldioxid och nettoförändring på systemnivå	83
8.3	Påverkan på fjärrvärmens elbalans	89
8.4	Förändrad biobränsleanvändning	90
8.5	Värmeunderlagets betydelse	91
8.6	Perspektiv på bio-CCS påverkan på CO ₂ -utsläpp och elproduktion	92
8.7	Systemkonsekvenser - resultatsammanfattning	93
9	Diskussion och slutsatser	94
9.1	Diskussion	94
9.2	Slutsatser	96
10	Referenser	97
10.1	Referenser som används i rapporten	97
10.2	Övriga underlag och lästips	100

1 Syntes av samlade resultat

I etapp 1 av Energiforskningsprojektet om bio-CCS inom fjärrvärmesektorn studerades de grundläggande förutsättningarna för att avskilja och permanent lagra biogen koldioxid från svenska fjärrvärme- och elproduktionsanläggningar. Det handlar då om rökgaser från pannor eldade med biobränslen och restavfall. För avfallsförbränning blir det också avskiljning av fossil koldioxid. Mycket kortfattat kan man sammanfatta resultatet från den etappen med att den svenska fjärrvärmesektorn har stor potential att bidra med negativa koldioxidutsläpp genom bio-CCS, minst 10 Mton per år. Den största osäkerheten beträffande möjligheterna för bio-CCS gäller marknadsförutsättningarna.

Eftersom utvecklingen går snabbt på CCS-området, exempelvis när det gäller investeringsplaner, teknik, marknad, styrmedel och regelverk, så startades i januari 2023 en andra etapp av projektet, "Bio-CCS i fjärrvärmesektorn – etapp 2". I denna rapport redovisar vi resultaten från forskningen inom denna andra etapp. Vi inleder redovisningen med en syntes, eller utvidgad sammanfattning, av resultaten. Utöver den resultatredovisning som återfinns i denna slutrapport har resultat också redovisats och diskuterats vid ett 20-tal seminarier och workshops med deltagande av forskare och representanter för de finansierande företagen.

Inledningsvis kan man konstatera att mycket av osäkerheten beträffande ekonomi och regelverk kring CCS kvarstår. Trots detta har det tagits stora steg mot en rejäl utbyggnad av CCS inom svensk fjärrvärme. Två tydliga exempel är Stockholm Exergi (Stockholm Beccs) och Öresundskraft (CCS vid Filbornaverket).

I januari 2025 meddelades att Stockholm Exergi har erhållit ett statligt stöd på 20 miljarder kronor via den omvända auktionen. Stödet betalas ut under 15 år och avser 800 000 ton koldioxid årligen. Enligt uppgift uppgår stödet till 1760 kr/ton CO₂ (eller ca 150 Euro/ton CO₂).

Stockholm Exergi har också tecknat ett avtal med Microsoft om att sälja 3,33 miljoner ton permanenta minusutsläpp under en tioårsperiod, med start 2028. Med hänsyn till affärssekretessen kan Stockholm Exergi inte avslöja det exakta värdet av avtalet, men Anders Egelrud säger att det är "signifikant mycket större" än EU-bidraget på 180 miljoner Euro, nästan 2 miljarder kronor. Den 7:e maj 2025 meddelade Stockholm Exergi att man utökat försäljningen till Microsoft av minusutsläpp till 5,08 miljoner ton.

Den 27:e mars 2025 fattade Stockholm Exergi investeringsbeslutet beträffande "Stockholm Beccs". Investeringsnivån ligger enligt bolaget på 13 miljarder kronor. Stockholm Exergi inleder nu byggfasen omgående och målsättningen är att anläggningen ska tas i drift under 2028.

Den 22:e april röstade Helsingborgs kommunfullmäktige ja till en CCS-anläggning på Öresundskrafts avfallseldade kraftvärmeverk Filbornaverket. CCS-anläggningen på Filbornaverket beräknas kosta cirka 3 miljarder kronor och ska fånga in 200 000 ton koldioxid per år, både från biogena och fossila källor. Målet är att den ska stå klar 2028. Projektet har fått starkt stöd både nationellt och internationellt. Exempelvis har EU:s Innovationsfond tilldelat projektet 620 miljoner kronor. Öresundskraft anger också att man har skrivit avtal om framtida köp av negativa utsläppscertifikat med bland annat Wihlborgs och Helsingborgshem.

I avsnitten nedan lyfter vi kortfattat fram de viktigaste resultaten och insikterna från projektets olika delområden. I rapportens efterföljande kapitel finns en mer omfattande och heltäckande redovisning område för område.

1.1 TEKNIK

Målet med projektets arbetspaket om teknik har varit att öka förståelsen för vilka tekniska möjligheter som finns att minska energiåtgång och optimera integration av koldioxidinfångning i fjärrvärmeanläggningen genom erfarenhetsutbyte kring tekniska aspekter. Erfarenhetsutbytet har skett i form av digitala workshops. Tidigt i projektet valdes ett antal fokusområden för workshoparna ut i samarbete mellan projektledningen och projektdeltagarna. Varje workshop har därefter gästats av inbjudna talare med expertis inom aktuellt ämne.

Vid en av dessa workshops presenterades för- och nackdelar med HPC och aminteknik samt hur koldioxidinfångningen påverkas av kraftvärmeverkens delprocesser. Enligt presentationen finns både fördelar och nackdelar med båda infångningsteknikerna. Exempel på egenskaper som varierar är utsläpp till luft och vatten, lösningsmedlens livslängd, processeffektivitet, arbetsmiljö, processreglering och värmeåtervinning. Effektiviteten i koldioxidinfångning påverkas av flera faktorer som sammanhänger med förbränning, rökgasrening och processintegration

Flera andra processer för koldioxidinfångning studeras för närvarande. I samband med workshops presenterades olika alternativ, exempelvis absorptionssystemet AMP/DMSO som studerats vid Lunds universitet. Tekniken erbjuder flera fördelar jämfört med MEA/vatten, inklusive lägre regenereringstemperatur, högre kokpunkt, lägre specifik värmekapacitet och separationssteg som minskar energibehovet. Tekniken har också vissa nackdelar och är fortfarande relativt oprövad. En annan teknik som presenterats är en enzymkatalyserad teknik som studerats i pilotskala vid Stora Enso Skutskär. Frågor som berördes var hur infångningstekniken kan integreras med befintliga industriella processer och hur överskottsvärme kan utnyttjas effektivt.

Vid en annan workshop redovisades tankar kring bio-CCS inom skogsindustrin. Skogsindustrin förbränner stora mängder biobränslen vid stora anläggningar med kontinuerlig drift, ibland med tillgång till egna hamnar. Detta kan bidra till kostnadseffektiv bio-CCS. Trots dessa fördelar finns det också flera utmaningar för skogsindustrin för att gå vidare med bio-CCS. En av de största är den höga energiförbrukningen, främst elbehovet. En annan nackdel är att spillvärmens från infångningsprocesserna är svår att använda i de egna processerna och att näraliggande fjärrvärmesystem oftast redan är fullt försörjda med restvärme.

En annan sektor där CCS kan bli aktuell är cementindustrin. Vid Heidelberg Materials anläggning i Slite planerar man för storskalig CCS-lösning med målet är att fånga in cirka 1,8 miljoner ton koldioxid per år. Infångningstekniken bygger på en aminbaserad process. Cementindustrin kännetecknas av stora, kontinuerliga punktutsläpp av CO₂, vilket gör tekniken väl lämpad för effektiv infångning. För att möjliggöra omställningen till en klimatanpassad verksamhet krävs en förstärkt elförsörjning till Gotland. Det uppskattade årliga elbehovet för den framtida anläggningen är upp till 1,5 TWh med ett effektbehov på upp till 250 MW. Heidelberg Materials CCS-projekt i Slite går framåt enligt plan, med viktiga steg tagna mot en fullskalig koldioxidinfångningsanläggning, som förväntas vara i drift 2030.

Vid en workshop presenterades Chalmers arbete med den kemcykliska förbränningstekniken (Chemical Looping Combustion, CLC). Tekniken erbjuder flera fördelar för att effektivisera koldioxidinfångning och minska utsläppen. Trots de många fördelarna finns det utmaningar. Tekniken har ännu inte implementerats i kommersiell skala, vilket innebär osäkerheter kring prestanda och risk för konstruktionsfel. Tekniken kräver dessutom ofta en ny panna eller en omfattande ombyggnad av befintlig förbränningsutrustning.

Chalmers har också presenterat arbeten kring lärlkurvor som visar att det är svårt att förvänta sig hög inlärningstakt för CCS, och därigenom sänkta investeringskostnader, eftersom projekten ofta är stora, komplexa och anpassade till platsens förutsättningar. Studier visar också att kostnaderna för CCS kan bli högre än tidigare uppskattningar visat.

1.2 INFRASTRUKTUR OCH SAMVERKAN

Infrastruktur för transport och mellanlagring av koldioxid är en komplex och ofta kapitalkrävande del av värdekedjan för CCS. Projektet redovisar för- och nackdelar med olika transportalternativ – sjöfart, järnväg och pipeline. Behovet för mellanlager för insamlad koldioxid beskrivs också. Särskilt uppmärksammas behovet av samarbete relaterad till transport och lagring. I Sverige finns flera pågående eller avslutade samverkanskluster, exempelvis CinfraCap (Göteborg), NICE (Norvik Stockholm) och CNetSS / Malmö Hub (Sydsverige).

Slutsatserna från arbetspaketet om infrastruktur kan sammanfattas i följande punkter:

- Samverkan kan ge tydliga kostnadsfördelar, exempelvis genom skalfördelar och bättre förhandlingspositioner gentemot transport- och lagringsaktörer. Små aktörer har ofta mest att vinna.
- Asymmetrier i beroende och rådighet är ett centralt hinder. Större aktörer har ofta kapacitet att agera på egen hand och kan välja att gå vidare med egna lösningar om samverkan försenas eller faller. För mindre aktörer kan motsvarande avhopp innebära att hela upplägget kollapsar.
- Tajmingen är avgörande – både för investeringar, samordning av beslut, tillståndprocesser och upphandling av lagring. Om en part är redo före andra finns risk att lösningen faller eller blir onödigt dyr.
- Infrastrukturen är komplex och kapitalkrävande, med många osäkerheter i både teknikval, tillståndprocesser och marknadsförutsättningar vilket kan skapa ett investeringsmässigt "vänteläge" för flera aktörer.
- Val av transportlösning beror på flera sammanvägda faktorer, såsom volym, avstånd, befintlig infrastruktur och möjlighet till samlastning.
- Dagens styrmedel är i huvudsak utformade för individuella aktörer snarare än för gemensamma lösningar. Det saknas i praktiken fungerande stödstrukturer för att hantera de särskilda risker, osäkerheter och investeringströsklar som följer med klustersamarbeten och gemensam infrastruktur.

1.3 SLUTLAGRING

Geologisk lagring är det sista steget i Bio-CCS-kedjan och avgörande för att nå negativa utsläpp. I dagsläget finns inte någon operativ lagringsplats i Sverige, varför internationellt samarbete blir avgörande på kort och medellång sikt. Projektet har kartlagt pågående och planerade projekt för geologisk lagring av koldioxid (CCS) i länder nära Sverige – i Danmark, Norge och Island – samt utvärderat Sveriges egna framtida möjligheter till koldioxidlagring. Analysen ger en översikt över tillgänglig kapacitet, projektstatus, tidsplaner och möjligheter till framtida svensk anslutning.

Danmark visar snabb utveckling inom koldioxidlagring med flera projekt i olika faser. Två havsbaserade projekt – Greensand och Bifrost – planerar start under perioden 2025–2030 med lagring i uttömda olje- och gasfält. Kapaciteten för dessa väntas öka gradvis till ca 10–11 Mt CO₂/år under 2030 till uppemot 23 Mt CO₂/år under 2033–2034. Parallellt har flera landbaserade projekt tilldelats undersökningslicenser, där bland annat Greenstore (vid Gassum) och Kalundborg (vid Havnsø) tillsammans planerar att nå uppemot 17 Mt CO₂ lagringskapacitet årligen till 2029/2030. Ruby förväntas nå kapacitet för 1,5 Mt CO₂/år till 2030 och även Norne (vid Thorning) utreds för lagringsstart före 2030. Ytterligare områden är föremål för licensansökningar, särskilt i kustnära regioner. Danmark har också etablerat Greenport Scandinavia – en CCS-hubb i Hirtshals med planerad exportkapacitet från 2026–2027, inklusive potential att ta emot svensk koldioxid.

Norge har lång erfarenhet av CCS, med drift sedan 1996 i Sleipnerprojektet och sedan 2008 i Snøhvitprojektet. Det stora projektet Langskip med operatören Northern Lights väntas ta emot CO₂ från tredje part från 2025 med en initial kapacitet på 1,5 Mt/år, som byggs ut till 5 Mt/år till 2028. Norge har även tilldelat nio nya lagringslicenser (bl.a. Polaris, Smeaheia, Luna, Trudvang), där flera aktörer utvecklar lagringskomplex med samlad framtida kapacitet över 50 Mt/år till 2030. Equinor planerar dessutom en storskalig CO₂-rörledning – CO₂ Highway Europe – till 2030 som kan binda samman norra Europa med norska lagringsområden.

Island erbjuder lagring i mafiska bergarter där koldioxiden snabbt mineraliseras. Projektet Carbfix har visat att över 95 % av injekterad CO₂ mineraliseras inom två år. En ny anläggning, Coda Terminal i Straumsvík, byggs för import och lagring av koldioxid från Europa, med successiv kapacitetstillväxt till 3 Mt/år till 2032.

I **Sverige** har tidigare studier identifierat åtta potentiella lagringsenheter i salina akviferer i södra Sverige, men för att kunna nyttja dessa krävs omfattande verifiering genom moderna undersökningar. SGU driver ett regeringsuppdrag (2023–2025) med nya seismiska undersökningar och borrhålsanalyser för att utreda lagringsförutsättningarna. Dessa har resulterat i att två av de tidigare identifierade potentiella lagringsenheterna nu har förkastats på grund av nya upptäckter vilket innebär en minskning av den teoretiska lagringskapaciteten på upp till 2,4 Gt CO₂ i svenska salina akviferer. Parallellt undersöker LTU lagring i basaltisk berggrund i Sverige. Även om geologiska förutsättningar skulle säkerställas återstår flera hinder innan lagring i Sverige blir aktuell, t.ex. regulatoriska hinder och oklara juridiska ramar.

Några slutsatser från analysen:

- Danmark och Norge har goda förutsättningar att erbjuda lagringskapacitet även på kort sikt, vilket ger goda möjligheter för export av svensk koldioxid.
- Lagring i basalt på Island kan vara en möjlighet från ca 2028.

- Eventuell lagring i Sverige kräver fortsatt forskning, lagändringar och infrastrukturutveckling.
- Svenska utsläppare är inom överskådlig tid hänvisade till lagring utomlands.

1.4 POLICY, REGELVERK OCH STANDARDISERING

Inom projektet har vi studerat centrala policys, regelverk och standarder med betydelse för implementering av koldioxidavskiljning och lagring (CCS) inom fjärrvärmesektorn, med särskilt fokus på bio-CCS. Här redovisas kortfattat viktiga delar av analyserna.

CCS inom EU:s utsläppshandelssystem (EU ETS): CCS är sedan länge erkänd som en legitim utsläppsminskningsåtgärd inom EU:s handelssystem för utsläppsrätter (EU ETS), men det gäller endast fossil koldioxid. Om en komplett CCS-kedja är på plats (infångning, transport och lagring) kan verksamhetsutövaren undgå att överlämna utsläppsrätter – dock inte för läckage. Även biogen koldioxid som läcker vid transport måste kompenseras inom ETS. En viktig förändring i det reviderade ETS-direktivet är att definitionen av koldioxidtransport har breddats. Tidigare inkluderades endast rörledningstransport, men nu omfattas ett bredare "transportsystem", vilket innebär att fler aktörer blir tillståndspliktiga.

Negativa utsläpp i EU-regelverk: EU:s klimatmål för 2050 kräver negativa utsläpp, men industriella metoder för CO₂-upptag utanför LULUCF-sektorn erkänns ännu inte. Linköpings universitet har analyserat över 390 yttranden från EU-samråd och identifierat fyra centrala frågor:

- Rapportering av CO₂-upptag: En majoritet förespråkar separata mål för utsläppsminskningar och upptag, medan andra vill kombinera dem. Vissa av industriparterna föreslår att negativa utsläpp används för att kompensera kvarstående utsläpp, vilket andra sektorer, som skogsindustrin, är skeptiska till.
- Residualutsläpp: Flera aktörer nämner att utsläppsminskningar måste ha företräde framför upptag och att det någon gång under vägen mot nollutsläpp måste fattas ett beslut om vad som ska betraktas som residualutsläpp. Då vill man ha tydliga definitioner och vetenskapliga modeller för vilka utsläpp som bör betraktas som oundvikliga.
- Integration i klimatpelare: Det råder delade meningar om negativa utsläpp bör integreras i EU ETS, ESR, LULUCF eller som en separat klimatpolitisk pelare. Om upptag ska integreras i utsläppshandeln så bedömer EU-kommissionen att det kommer att krävas ytterligare finansiering eftersom priset på utsläppsrätter inte kommer att vara tillräckligt högt.
- Avskiljning och användning av CO₂ (CCU): Många aktörer, framför allt från industrin, vill att även avskiljning och användning av CO₂ (CCU) inkluderas i EU:s utsläppshandel. Flera aktörer lyfter vikten av att utsläpp redovisas korrekt för att undvika dubbelräkning, speciellt när CO₂ används i produkter med tillfällig lagring.
- Allokering av koldioxid mellan CCS och CCU: Projektet har analyserat möjligheten att själv välja vilken CO₂ (biogen eller fossil) som används för CCS eller CCU. Allokering visar sig inte vara kompatibel med EU ETS (och MRR), trots att klimatnyttan är densamma oavsett om allokering skett eller inte.

Redovisningen ska fortsatt baseras på fysiskt uppmätt biogen och fossil koldioxid. Undantag finns för så kallade "nollräknade bränslen" såsom hållbara biobränslen och vissa RFNBO-bränslen, under förutsättning att strikta hållbarhets- och reduktionskrav uppfylls.

Certifiering av kolsänkor (CRCF): EU:s nya förordning CRCF (2024/3012) sätter upp ett ramverk för certifiering av kolsänkor. De delas upp i permanenta upptag (t.ex. bio-CCS och biokol), carbon farming och lagring i produkter. Eftersom klimatnyttan och permanensen skiljer sig åt mellan dessa aktiviteter ska de certifierade enheterna också vara åtskilda. Certifieringen är frivillig i inledningsskedet, men en gemensam databas ska inrättas till 2028. Certifierade enheter får bara användas inom EU:s klimatområde. Det råder dock osäkerhet kring kopplingen till frivilligmarknader och internationell handel.

Standardisering av CCS: Standardiseringsarbetet sker främst genom ISO (globalt), CEN (europeiskt) och SIS (Sverige). Många relevanta standarder finns redan, t.ex. för transport och lagring av CO₂. SIS/TK 640 arbetar med svenska översättningar. Det finns dock viss överlappning och risk för dubbelreglering, särskilt mellan ISO, Verra och DNV. Inom fjärrvärmesektorn finns ett behov av kontinuerlig uppdatering kring vilka standarder som gäller, för att säkra framtida kompatibilitet med handelssystem och certifiering av negativa utsläpp.

1.5 FINANSIERING

Hur CCS i fjärrvärmesektorn kan finansieras beror i viss mån på om koldioxiden är av fossilt eller biogent ursprung. Vissa finansieringslösningar fungerar för båda, medan vissa är specifikt inriktade. Detta blir särskilt utmanande för CCS vid avfallsförbränning där koldioxiden är av både fossilt och biogent ursprung. Inom projektet har vi beskrivit och analyserat befintliga och tänkbara framtida finansieringsmöjligheter, dels olika typer av offentliga stöd och styrmedel, dels olika frivilligmarknadsalternativ och företagsspecifika finansieringsmöjligheter. De studerade finansieringsexemplen framgår av Tabell 1.

Tabell 1. Sammanfattning av finansieringsmöjligheter som beskrivs i finansieringsavsnittet

Finansieringsexempel	SE/EU	Finns idag (Sverige)	Biogen CO ₂	Fossil CO ₂
OFFENTLIGT STÖD/STYRMEDEL				
Omvänd auktion för bio-CCS	SE	X	X	
Investeringsstöd (Industriklivet, EU:s Innovationsfond)	SE/EU	X	X	X
Kvotplikt	SE/EU		X	
Återtagskrav (Carbon takeback obligations)	SE/EU		X	X
Utökat producentansvar	SE/EU		X	X
Differenskontrakt	SE/EU		(X)	X
Utsläppshandeln (EU ETS) idag	EU	X		X
Integrering av negativa utsläpp i EU ETS	EU		X	
Handelssystem för koldioxidupptag ("EU RTS")	EU		X	
FRIVILLIGMARKNAD/PRIVAT				
Krediter för negativa utsläpp	EU/globalt	X	X	
Sälja premiumprodukter	SE	X	X	X
Finansiering via mottagningsavgifter för avfall	SE			X

Inom projektet har finansieringsfrågan utgjort ett särskilt viktigt område. Resultatredovisningen är därför omfattande och i detta syntesavsnitt väljer vi att

kortfattat redovisa övergripande diskussion och slutsatser. För att få en fullständig bild av finansieringsfrågans många aspekter uppmuntrar vi läsaren att ta del av den fullständiga redovisningen i kapitel 7 nedan.

För att förverkliga fjärrvärmesektorns planer på negativa utsläpp och utsläppsminskning genom CCS, krävs ändamålsenlig och långsiktig finansiering. Finansieringsmöjligheterna beror, som nämnts ovan, i viss mån av koldioxidens ursprung – biogent eller fossilt – vilket resulterar i olika lämpliga styrmedel, incitament och praktiska hinder. Det blir särskilt utmanande vid avfallsförbränning som ger koldioxid av såväl biogent som fossil ursprung. För båda alternativen gäller sannolikt att det behövs en kombination av finansieringslösningar, åtminstone på kort sikt, samt ett eller möjligen flera, långsiktigt stabila finansieringsalternativ. De långsiktiga finansieringslösningarna behöver rimligen utstakas inom de närmsta åren. Annars riskerar ”gapet” mellan befintliga och framtida stabila finansieringsmöjligheter göra att planerna förlorar tempo eller helt läggs ned.

För bio-CCS i Sverige är idag den omvända auktionen den främsta finansieringsmöjlighet som erbjuds via staten. Men avsatta 36 miljarder SEK för 2026–2046 räcker sannolikt inte till mer än lite drygt 1 Mton/år, och då konkurrerar fjärrvärmesektorn dessutom med andra branscher. Stockholm Exergi har redan tilldelats 20 miljarder, varvid det återstår 16 miljarder att fördela i kommande utlysning(ar). Investeringstöd från Industriklivet och EU:s innovationsfond har beviljats för vissa projekt, men omfattningen är liten jämfört med behovet och stöden täcker ofta endast en del av kapitalinvesteringen, inte driftkostnader.

I det svenska stödsystemet för bio-CCS genom omvänd auktion gäller att aktörer som får stöd får sälja negativa utsläpp på en frivilligmarknad och att köparen får göra anspråk på dessa för sina egna frivilliga klimatmål. Krav ställs dock på att de i sin klimatredovisning redogör för att dessa bidrar till Sveriges möjligheter att nå sina klimatmål och EU:s åtaganden.

Frivilligmarknaden erbjuder en väg till finansiering via försäljning av bio-CCS-krediter. Både Stockholm Exergi och Öresundskraft har till exempel sålt krediter till olika företag. Frivilligmarknaden har sannolikt en stor potential. Samtidigt finns stora osäkerheter till exempel om framtida regelverk för olika aspekter av frivilligmarknaden och hur en sådan marknad kan fungera parallellt med ett tänkbart långsiktigt (EU-)styrmedel för negativa utsläpp. Kostnaderna för bio-CCS behöver sannolikt också gå ned om frivilligmarknaden ska stå som enda finansör.

På sikt skulle ett handelssystem för negativa utsläpp, såsom ett EU Removals Trading System (RTS), kunna erbjuda stabila och långsiktiga förutsättningar. Men systemet är fortfarande i diskussionsfas, och även när det implementeras är det oklart om det kan samexistera med frivilligmarknaden. Potentiell risk för dubbelräkning är en central fråga – det är osäkert om samma ton negativa utsläpp kan ingå i RTS och samtidigt säljas som krediter.

Finansiering av CCS vid avfallsförbränning ökar komplexiteten eftersom koldioxidutsläppen har såväl biogent som fossilt ursprung. De fossila utsläppen från avfallsförbränning i Sverige omfattas redan av EU ETS, vilket innebär att CCS kan minska kostnader för utsläppsrätter. Dock är priset på utsläppsrätter för närvarande (ca 70–75 €/t) fortfarande långt ifrån de verkliga kostnaderna för CCS, vilket gör att incitamentet är otillräckligt för investering. Det innebär att CCS på den fossila delen av avfallsutsläppen i praktiken inte är lönsamt idag utan ytterligare styrmedel. Liksom

vid bio-CCS kan investeringsstöd via exempelvis Industrikivet eller EU:s Innovationsfond ge viss finansiering. Det finns även flera andra tänkbara möjligheter. I rapporten diskuteras till exempel differenskontrakt, återtagskrav och utökat producentansvar som potentiella lösningar.

Om fjärrvärmesektorns planer på utsläppsminskning och negativa utsläpp genom CCS ska kunna realiseras och bidra till Sveriges klimatmål är den samlade bilden att det snabbt behövs minst ett kompletterande svenskt finansieringsalternativ. För bio-CCS behövs detta för att brygga gapet mellan dagens styrmedel (huvudsakligen omvänd auktion) och ett förväntat framtida långsiktigt EU-styrmedel. Om ytterligare styrmedel inte kommer på plats är risken stor att utbyggnaden av bio-CCS avstannar då den omvända auktionens stöd är uttömt. För CCS vid avfallsförbränning tillkommer utöver detta även behov av ett kompletterande finansieringsalternativ för den fossila koldioxiden eftersom utsläppsrättspriserna idag inte motiverar CCS.

1.6 SYSTEMKONSEKVENSER VID EN BIO-CCS-UTBYGGNAD

Projektets arbetspaket 8 fokuserar på att redovisa systemkonsekvenser av en introduktion av bio-CCS inom den svenska fjärrvärmesektorn. Här koncentrerar vi oss alltså på de samlade konsekvenserna på systemnivå. Vi tar också upp indirekta konsekvenser av introduktionen, exempelvis att fjärrvärmesektorn producerar mindre el och att den elen måste ersättas av annan elproduktion i Nordeuropa.

CO₂-avskiljningen införs på kraftvärmeanläggningar som eldar biobränslen eller restavfall. Vilka anläggningar som förses med bio-CCS varierar mellan olika beräkningsfall. Vi gör här ingen bedömning av vilken utbyggnad av bio-CCS som är ekonomiskt lönsam utan förutsätter här att utbyggnad av olika omfattning kommit till stånd. Fokus är alltså på hur bio-CCS körs och vilka konsekvenserna av detta blir på systemnivå. I analyserna utgår vi från situationen år 2035. Det gäller både med avseende på el- och fjärrvärmeproduktionens uppbyggnad och för omvärldsförutsättningar som bränslepriser och utsläppsrättspris för koldioxid inom EU ETS. Elpriset är ett av resultaten från optimeringen.

Här sammanfattar vi i punktform de viktigaste resultaten från systemanalyserna:

- Förverkligas företagens bio-CCS-planer (14 anläggningar) avskiljs ca 5 Mton CO₂ per år (varav ca 4 Mton per år är biogena).
- Om alla lämpliga fjärrvärmeanläggningar (33 faktiska anläggningar och 4 typsystem) utrustas med bio-CCS avskiljs ca 12 Mton CO₂ per år (varav ca 10 Mton per år är biogena).
- Valet av avskiljningsprocess (MEA eller HPC) ger liten påverkan på de samlade resultaten.
- Resultaten vid två olika styrmedelsregimer, antingen infångningsåtagande (typ omvänd auktion) eller koldioxidpris (här antar vi 125 Euro/ton CO₂ både för fossila utsläpp och för biogena minusutsläpp) ger likartade resultat. Högre koldioxidpriser ger likartade resultat.
- Biobränsleanvändningen ökar något som en följd av bio-CCS-introduktionen om ekonomin får styra. Utbyggnad i linje med företagens planer ger dock bara en ökning med drygt 1 TWh, vilket kan jämföras med den totala biobränsleanvändningen i fjärrvärmesektorn på 32 TWh i fallet utan bio-CCS.

- Bio-CCS-introduktionen minskar fjärrvärmesektorns eltillförsel till elsystemet något. I fallet med företagens planer minskar eltillförseln från fjärrvärmen år 2035 med 1 TWh, från 9 till 8 TWh.
- Elprispåverkan av bio-CCS blir mycket liten.
- Vissa fossila CO₂-utsläpp från ersättande elproduktion i omvärlden tillkommer, men dessa är endast av marginell storlek.
- Elpriset måste vara mycket högt för att CO₂-avskiljningen ska "backas", men ...
- ... däremot kan elanvändning till infångningsprocessens värmeåtervinning via värmepump stoppas vid höga elpriser.
- Mängden avskild CO₂ påverkas nästa inte alls av en eventuell minskning av fjärrvärmeleveranserna på sikt.

2 Inledning

För att fjärrvärmesektorn ska bli en kolsänka till år 2045, enligt branschens färdplan, krävs utsläppsminskning och negativa utsläpp genom avskiljning och lagring av koldioxid (CCS). Denna rapport redovisar resultaten från ett flerårigt forsknings- och samverkansprojekt som undersökt hur sådan teknik kan implementeras i praktiken. Projektet visar att fjärrvärmesektorn har en betydande potential att leverera negativa utsläpp, men att förverkligandet kräver lösningar för teknik, finansiering, infrastruktur och styrmedel.

2.1 BAKGRUND OCH OM PROJEKTET

Visionen i uppvärmningssektorns färdplan för fossilfri konkurrenskraft är att branschen år 2045 ska vara en kolsänka, vilket kräver negativa utsläpp. Som ett led i att förtydliga hur negativa utsläpp kan förverkligas tog branschen år 2022 fram en gemensam strategi för bio-CCS. Strategin togs fram inom ramen för etapp 1 av ett Energiforskprojekt kring bio-CCS i fjärrvärmesektorn. Etapp 1 följdes upp av ett fortsättningsprojekt (etapp 2), vilket pågått under 2023-2025 och avrapporteras i denna rapport.

Syftet har varit att bidra till att föra CCS i fjärrvärmesektorn närmare implementering genom kunskapsuppbyggnad och fördjupad samverkan. Med fjärrvärmebranschen menas även avfallsförbränningsföretag som levererar värme till fjärrvärmenät. Projektet fokuserar på avskiljning och lagring av koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall i syfte att skapa negativa utsläpp och utsläppsminskning.

Projektet har utförts av Energiforsk, Profu, Chalmers, Linköpings universitet, IVL och RISE. Energiforsk var projektvärd och Profu projektledare. Projektet har omfattat följande arbetspaket:

- Arbetspaket 1. CCS-implementeringen i Sverige
- Arbetspaket 2. Policy och affärsmodell
- Arbetspaket 3. Marknad för CCS-krediter
- Arbetspaket 4. Regelverk och standardisering
- Arbetspaket 5. Infrastruktur och samverkan
- Arbetspaket 6. Lagring
- Arbetspaket 7. Teknik
- Arbetspaket 8. Systemanalys och syntes

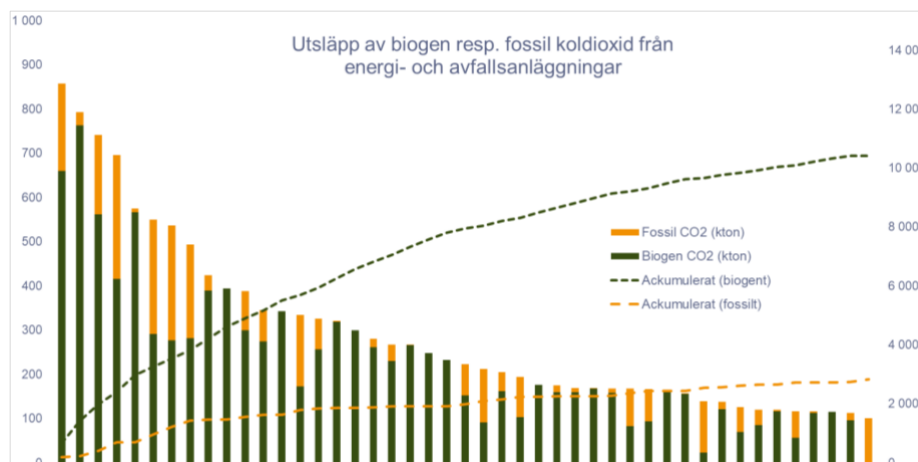
Inom projektet har ca 20 workshops och/eller webinarier på olika teman arrangerats, se sammanfattning i Tabell 2.

Tabell 2. Workshopar och webinarier som arrangerats inom ramen för projektet.

Leverans	Titel	Arbets-paket	Datum
Workshop	Erfarenhetsutbyte kring CCS-teknik, workshop 1	AP7	2023-03-31
Workshop	Status of key EU policy areas affecting CCS	AP2-4	2023-04-04
Workshop	Erfarenhetsutbyte kring CCS-teknik, workshop 2	AP7	2023-06-09
Workshop	Krediter och ägandeskap	AP2-4	2023-10-05
Workshop	Erfarenhetsutbyte kring CCS-teknik, workshop 3	AP7	2023-10-10
Workshop	BECCS News from EU, update	AP2-4	2023-11-06
Workshop	Erfarenhetsutbyte kring klustersamverkan	AP5	2024-03-26
Workshop	Systemkonsekvenser av bio-CCS i svensk fjärrvärme	AP8	2024-05-15
Workshop	Finansiering av CCS vid avfallsförbränning	AP2-4	2024-05-17
Workshop	Statusuppdatering EU-policies, standarder, vägledningar kring hur krediter för negativa utsläpp får användas	AP2-4	2024-06-11
Workshop	Carbon dioxide removal in the EU: state of play	AP2-4	2025-01-08
Workshop	Finansiering av bio-/avfalls-CCS	AP 2-4	2025-01-11
Workshop	Norrlandskluster, workshop 1	AP5	2025-02-11
Webbinarium	Storskalig pipelinelösning för koldioxidtransport	AP5	2025-03-10
Workshop	CCU med Gröna kolatomer	AP7	2025-03-20
Workshop	Norrlandskluster, workshop 2	AP5	2025-03-28
Workshop	Digitalt studiebesök Stora Enso + Chalmers	AP7	2025-03-28
Workshop	Norrlandskluster, workshop 3	AP5	2025-04-28
Workshop	Systemkonsekvenser av bio-CCS i svensk fjärrvärme	AP8	2025-04-29
Webbinarium	Tågtransport av koldioxid	AP5	2025-05-21
Workshop	Norrlandskluster, workshop 4	AP5	2025-06-24

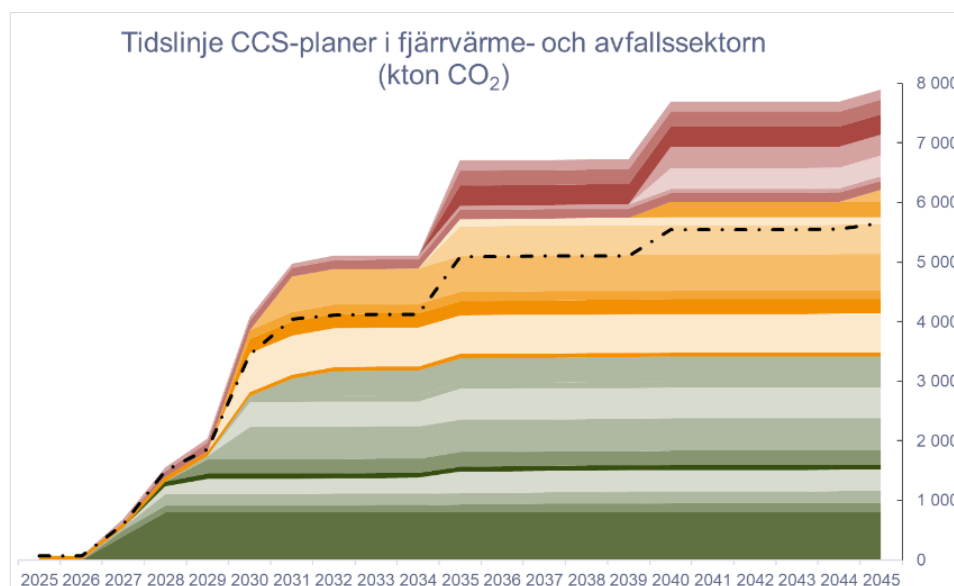
2.2 CCS I SVENSKA FJÄRRVÄRMESEKTORN

Fjärrvärmesektorn har stor potential att bidra med negativa utsläpp och utsläppsminskning genom avskiljning och lagring (CCS) av koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall. Implementering av CCS på alla anläggningar (inom fjärrvärme- och avfallssektorn) med över 100 kton koldioxidutsläpp skulle ge ca 10 Mton negativa utsläpp och 3 Mton utsläppsminskning, se Figur 1. De negativa utsläppen uppnås genom att avskilja och lagra biogen koldioxid och utsläppsminskning uppnås genom avskiljning och lagring av den fossila koldioxid som främst härrör från fossilt innehåll i avfall. Den teoretiska potentialen är således stor i branschen. Den realistiska potentialen är dock lägre eftersom alla anläggningar inte kommer att vara lämpade för CCS, t.ex. för att kostnaden blir för hög.



Figur 1. Punktsläpp (vänster axel) i kton av biogen koldioxid (gröna staplar) och fossil koldioxid (orange staplar) från svenska fjärrvärme- och avfallsanläggningar. Streckade linjer (höger axel) visar ackumulerad mängd koldioxid. Källa: Nationell utsläppsstatistik för år 2023 (Naturvårdsverket).

Om man räknar in andra sektorer så är potentialen betydligt större. Exempelvis har pappers- och massaindustrin potential till stora mängder negativa utsläpp. Fjärrvärmebranschen ligger dock mycket långt fram när det gäller planer. Figur 2 visar en tidslinje över CCS-planer i fjärrvärmebranschen. Tidslinjen bygger på underlag som insamlats under hösten 2024 och början av 2025. Förändringar som skett därefter inkluderas inte. Av tidslinjen kan man till exempel utläsa branschen har konkreta planer på att avskilja och lagra nästan 3 Mton till år 2030, varav ca 2 Mton är negativa utsläpp. Ju längre fram i tiden desto mer ökar planerna, men de är också mer på planerings- eller visionsstadium. Planer på mycket lång sikt är förstås osäkra till sin natur.



Figur 2. Tidslinje över CCS-planer i svenska fjärrvärme- och avfallsanläggningar i total mängd avskild och lagrad koldioxid (biogen + fossil). Uppgifterna är insamlade under 2024-2025. Varje fält avser en anläggning. Gröna fält avser konkreta planer, gula fält avser planeringsstadium och röda fält avser visionsstadium. Den streckade linjen visar hur mycket av totala planer som utgörs av negativa utsläpp. Källa: Profus kartläggning.

2.3 FÖRKORTNINGAR

Nedan presenteras exempel på förkortningar som förekommer i rapporten:

Avfalls-CCS	Avskiljning och lagring av koldioxid från avfallsförbränning, dvs från koldioxidströmmar av blandat fossil och biogent ursprung
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage, se bio-CCS
Bio-CCS	Avskiljning och lagring av biogen koldioxid
CCfD	Carbon contracts for difference, differenskontrakt, klimatkontrakt
CCS	Carbon capture and storage
CCU	Carbon capture and utilization
CCUS	Carbon capture, utilization and storage
CfD	Contracts for difference, differenskontrakt
CTBO	Carbon takeback obligation
DACCS	Direct air carbon capture and storage
EU ETS	European emission trading scheme, EU:s utsläppshandelssystem
RTS	Removal trading system, ett tänkbart handelssystem för negativa utsläpp

3 Teknik

Teknikspåret i projektet har fokuserat på att identifiera och sprida kunskap om energieffektiva lösningar för koldioxidinfångning i fjärrvärmesystem. Genom ett omfattande erfarenhetsutbyte har flera lovande tekniker, processintegrationer och lärdomar från pågående pilotprojekt lyfts fram – med målet att minska kostnader och underlätta framtida implementering.

3.1 FOKUS PÅ OMVÄRLDSBEVAKNING OCH KUNSKAPSSPRIDNING

Målet med arbetspaket 7 (Teknik) har varit att öka förståelsen för vilka tekniska möjligheter som finns att minska energiåtgång och optimera integration av koldioxidinfångning i fjärrvärmeanläggningen genom erfarenhetsutbyte kring tekniska aspekter.

Erfarenhetsutbytet har skett i form av digitala workshops. Tidigt i projektet valdes ett antal fokusområden för workshoparna ut i samarbete mellan projektledningen och projektdeltagarna. Varje workshop har därefter gästats av inbjudna talare med expertis inom aktuellt ämne.

Workshoparna har haft följande teman:

- 2023-03-31: Val av fokusområden.
- 2023-06-09: För- och nackdelar med olika post-combustion-koldioxidinfångningstekniker. Inbjudna talare: Helena Svensson, Lunds universitet och Jens Wolf, Captimise.
- 2023-10-10: Stora projekts lärdomar och tankar. Inbjudna talare: Conny Johansson, Stora Enso, Mikael Gidstedt, Vattenfall och Johan Götvall, Ramböll.
- 2024-08-20: Kemcyklisk förbränning. Inbjuden talare: Anders Lyngfelt, Chalmers.
- 2025-03-28: Lärdomar från Stora Ensos pilotförsök och från norska CC-projekt. Inbjudna talare: Conny Johansson, Stora Enso och Johanna Beiron, Chalmers

3.2 SLUTSATSER FRÅN WORKSHOPARNA

Detta avsnitt sammanfattar innehållet från de genomförda workshoparna och lyfter fram centrala slutsatser från presentationerna. Presentationerna från 2023 har i vissa fall kompletterats med nyare uppgifter för att säkerställa att informationen är aktuell och relevant.

3.2.1 Lovande resultat för AMP/DMSO-teknik efter pilotförsök vid Lunds universitet

Helena Svensson, Lunds universitet, presenterade i juni 2023 ett forskningsprojekt inriktat på energieffektiv koldioxidinfångning med absorptionssystemet AMP/DMSO.

Inom projektet har olika tekniska parametrar utvärderats på pilotskala, med olika rökgaser, och energibehovet har analyserats i förhållande till traditionell teknik.

De resultat som framkommit vid tidpunkten för workshopen, i mars 2023, visade att AMP/DMSO-tekniken erbjuder flera fördelar jämfört med MEA/vatten, inklusive lägre regenereringstemperatur, högre kokpunkt, lägre specifik värmekapacitet och separationssteg som minskar energibehovet. Å andra sidan har viss ackumulering av vatten återfunnits i aminlösningen, vilket dock inte bedömdes påverka utfällningen. Efter regenerering kan det också finnas en låg halt av koldioxid kvar i vätskan och utfällning kan kvarstå i lösningen, vilket kan kräva modifiering av driftsparametrar.

3.2.2 Jämförelse av HPC- och aminteknik: effektivitet, miljö och driftsaspekter

I juni 2023 presenterade Jens Wolf för- och nackdelar med Hot Potassium Carbonate (HPC)-teknik och aminteknik, samt hur koldioxidinfångningen påverkas av kraftvärmeverkens delprocesser. Presentationen sammanfattas nedan.

HPC-teknik (Hot Potassium Carbonate) erbjuder flera fördelar jämfört med aminteknik, såsom lägre emissioner till luft och vatten (t.ex. NO_x , N_2O , NH_3 , Hg), samt lägre oxidativ och termisk degradering av lösningsmedlet, vilket förlänger dess livslängd. HPC möjliggör även högre tryck i absorbern, hantering av högre rökgastemperatur och fukthalt samt lägre elförbrukning, vilket kan förbättra processens effektivitet vid vissa driftförhållanden.

Men HPC innebär också vissa utmaningar, särskilt i arbetsmiljö och hantering av förbrukat lösningsmedel, som är mer komplexa än med aminlösningar. Det finns också en ökad risk för panntripp och mer komplex processreglering. Dessutom medför HPC-system ofta högre spillvärmetemperatur, vilket gör värmeåtervinningen mindre effektiv än med aminteknik.

Aminteknik är enklare att hantera, vilket medför en bättre arbetsmiljö och lägre risk för driftstörningar. Det är också lättare att återvinna och hantera förbrukade lösningsmedel. Dessutom ger aminteknik bättre förutsättningar för effektiv värmeåtervinning på lägre temperaturer, vilket gör den mer energieffektiv i vissa anläggningar.

Effektiviteten i kraftvärmeverk

Effektiviteten i koldioxidinfångning påverkas av flera faktorer som förbränning, rökgasrening och processintegration. Förbränningens påverkan på CO_2 -nivåerna styrs genom åtgärder som luftöverskott och katalysatoranvändning. Rökgasreningen är också avgörande, särskilt för avskiljning av partiklar och metaller samt NO_x -reduktion. En hög rökgaskondensation kan dock minska tillgången på kall retur för kylning, vilket påverkar effektiviteten.

Att integrera infångningsteknik i rökgaskanalen kräver stabil processkontroll för att undvika driftstörningar, och ökad komplexitet i reglering ställer högre krav på systemdesign. Elförbrukningen i infångningsprocessen minskar nettoelproduktionen, och hanteringen av förbrukat lösningsmedel är en viktig driftsfråga.

3.2.3 Bio-CCS i skogsindustrin: stor klimatpotential, men hög komplexitet och tveksam kostnadseffektivitet

I oktober 2023 delade Conny Johansson från Stora Enso med sig av de utmaningar och avvägningar som skogsindustrin står inför när det gäller bio-CCS, samt förväntningarna inför företagets kommande pilotprojekt.¹ Presentationen sammanfattas nedan.

Skogsindustrins strategiska avvägningar

Bio-CCS kan ge en stor klimatnytta för skogsindustrin, som redan har minskat sina fossila utsläpp med över 70 % under de senaste 20 åren. I dagsläget utgör fossila bränslen endast 2–3 % av industrins energianvändning, och dessa används främst i processer som kräver mycket höga temperaturer. Detta innebär att bio-CCS skulle kunna ha en särskilt stor klimatnytta per enhet infångad CO₂, då industrins fossilberoende redan är lågt.

En ytterligare fördel med bio-CCS är industrins struktur och geografiska läge. Många av bruken har tillgång till egna hamnar eller ligger nära kustnära infrastruktur, vilket kan leda till mer kostnadseffektiva logistiklösningar för transport och lagring av den infångade koldioxiden. Detta gör också att det finns möjlighet att genomföra storskaliga investeringar i färre, men större anläggningar, vilket kan ge bättre ekonomi i skala.

Trots dessa fördelar finns det också flera utmaningar för skogsindustrin att gå vidare med bio-CCS. En av de största är den höga energiförbrukningen. För att infånga CO₂ krävs stora mängder el eller lågtrycksånga – uppskattningsvis 0,5–1 MWh per ton infångad CO₂. Om branschen skulle fånga de mest lämpade 6 miljoner ton CO₂ per år skulle detta innebära ett elbehov på minst 3 TWh, vilket är en betydande belastning för elsystemet.

En annan nackdel är att spillvärmens från infångningsprocesserna inte tillför något värde för skogsindustrin, eftersom bruken redan utnyttjar sin överskottsvärme för att leverera fjärrvärme till de omkringliggande samhällena. Detta innebär att möjligheterna till värmeåtervinning inom befintliga system är begränsade.

Slutligen finns alternativa investeringar som skulle kunna ge lika stor eller större klimatnytta. Istället för att satsa på bio-CCS kan skogsindustrin använda samma investeringsmedel för exempelvis nya sågverk för produktion av byggmoduler i trä eller för att ersätta fossila material med biobaserade produkter. Dessa alternativ kan både vara mer kostnadseffektiva och ge större klimatavkastning per investerad krona.

Stora Ensos pilotförsök

Stora Enso ska genomföra en pilotstudie för att undersöka enzymkatalyserade tekniker och värmeintegration inom ramen för bio-CCS. Studien kommer att fokusera på både tekniska och regulatoriska aspekter av teknologin. Med företagets omfattande erfarenhet inom storskalig logistik och avancerade industriella processer har Stora Enso goda förutsättningar att genomföra pilotprojektet effektivt och med hög teknisk kvalitet.

¹ Stora Ensos pilotprojekt är nu avslutat. Erfarenheter av pilotprojektet presenterades på en workshop 28 mars 2025 och sammanfattas längre fram.

Pilotprojektet genomförs i samarbete med Hafslund Oslo Celsio, Technology Centre Mongstad (TCM), Stora Enso Skutskär och Heidelberg Cement Goradze. Detta breda partnerskap säkerställer tillgång till spetskompetens och operativ erfarenhet från flera olika sektorer, vilket minskar risken för vanliga fallgropar och kan påskynda utvecklingen.

En viktig del av studien är värmeintegrationsstudierna, som ska undersöka hur den enzymkatalyserade tekniken kan integreras med befintliga processer och hur överskottsvärme kan utnyttjas effektivt. Detta är avgörande för att skapa en energieffektiv och praktiskt genomförbar lösning.

Projektet kommer även att omfatta analyser av logistiska lösningar och hantering av regulatoriska utmaningar. Målet är att skapa en helhetsbild av hur tekniken kan implementeras på ett hållbart och kostnadseffektivt sätt i större skala. Ambitionen är också att utveckla logistiklösningar som är både miljömässigt och ekonomiskt hållbara, samt att tidigt identifiera och adressera relevanta regulatoriska frågor.

3.2.4 Systemlösningar och integreringsstrategier för Vattenfalls CCUS-projekt

I oktober 2023 medverkade även Mikael Gidstedt, Vattenfall, som berättade om företagets planer för CCUS. Presentationen sammanfattas nedan, kompletterat med aktuell information.

Företaget utreder förutsättningarna för både koldioxidinfångning för återanvändning (CCU) och för permanent lagring (CCS), med ambitionen att integrera dessa lösningar effektivt i befintliga anläggningar. Detta omfattar kopplingar till rökgasflöden och återvinning av spillvärme, samt hantering av tekniska gränssnitt som kylvatten, ånga från turbinen och rögaskondensat från DCC (Direct Contact Cooler). Särskilt fokus var att förbättra den termiska verkningsgraden genom optimerad körordning och systemintegration, för att på så sätt kunna minska den totala energiförbrukningen i infångningsprocessen och samtidigt maximera klimatnyttan av de planerade anläggningarna.

CCU-projekt i Uppsala

I Uppsala undersökte Vattenfall förutsättningarna för ett CCU-projekt med en infångningskapacitet på cirka 200 000 ton koldioxid per år. Projektet byggde på aminbaserad teknik, anpassat för rökgas med låg koncentration av koldioxid. Det finns dock ingen kombinerad kraft- och värmeproduktion (CHP) i detta system. Den infångade koldioxiden var tänkt att transporteras med lastbil till en tomt norr om Forsmark, där den skulle användas i produktionen av Sustainable Aviation Fuel (SAF). Driftsättningen var planerad till 2030. I december 2024 meddelade Vattenfall att det planerade CCU-projektet har avbrutits på grund av att marknaden bedöms vara för omogen och den ekonomiska hållbarheten för projektet saknas.²

CCS-projekt i Jordbro

Det andra större projektet är ett CCS-initiativ i Jordbro. Här är kapaciteten något lägre 150 000 ton koldioxid per år. Även detta projekt använder aminbaserad teknik, men i kombination med HPC i konfigurationerna ES (Electricity-Steam)/FE (Full Electricity). Den infångade koldioxiden är tänkt att transporteras med tåg till hamn och därefter

² Vattenfall avbyter satsning på bio-ccs | Bioenergitidningen (hämtat 2025-05-02)

vidare till Northern Lights-projektet för permanent lagring. Anläggningen planerades att tas i drift under fjärde kvartalet 2028, men i december 2024 meddelade Vattenfall att projektet har pausats till dess att marknadsförhållandena förbättras. Miljötillståndsansökan har lämnats in.³

3.2.5 Aminbaserad koldioxidinfångning vid Heidelberg Materials cementanläggning: Hög avskiljningsgrad och energieffektivisering möjlig trots utmaningar

I oktober 2023 berättade Johan Götvall från Ramböll om Heidelberg Materials CCS-projekt. Projektet är ett viktigt steg mot att minska koldioxidutsläppen inom cementindustrin. Heidelberg Materials planerar att implementera en storskalig CCS-lösning vid sin cementfabrik i Slite. Målet är att fånga in cirka 1,8 miljoner ton koldioxid per år – motsvarande omkring tre procent av Sveriges årliga utsläpp – vilket gör det till ett av de största infångningsprojekten i landet. Den infångade koldioxiden ska transporteras med fartyg för vidare lagring eller användning.

Infångningstekniken bygger på en aminbaserad process. För att minska den höga energiförbrukning som är typisk för aminprocesser, planerar Heidelberg att använda flera energieffektiviserande tekniker. Absorber Intercooling (AIC) förbättrar absorptionsförhållandena och sänker ångbehovet. Lean Vapor Compression (LVC) återanvänder energi från aminlösningen för att förstärka strippers ånggenerering, medan Mechanical Vapor Recompression (MVR) tar vara på komprimeringsenergin från koldioxidströmmar för att ytterligare sänka processens energibehov.⁴

Trots detta erbjuder projektet betydande möjligheter. Cementindustrin kännetecknas av stora, kontinuerliga punktutsläpp av CO₂, vilket gör tekniken väl lämpad för effektiv infångning. Tester visar att aminbaserad teknik kan ge hög avskiljningsgrad, och med rätt aminblandningar och optimerade processer kan energibehovet reduceras med 10–20 %.

Slite-fabriken är en central del av Sveriges cementproduktion och står för cirka tre fjärdedelar av landets behov. För att möjliggöra omställningen till en klimatanpassad verksamhet krävs en förstärkt elförsörjning till Gotland. Det uppskattade årliga elbehovet för den framtida anläggningen är upp till 1,5 TWh med ett effektbehov på upp till 250 MW.

Heidelberg Materials CCS-projekt i Slite går framåt enligt plan, med viktiga steg tagna mot en fullskalig koldioxidinfångningsanläggning, som förväntas vara i drift 2030. I november 2024 meddelade företaget att de nyligen gått vidare till Front-End Engineering Design (FEED)-fasen. Denna fas stöds av Industriklivet och projektet har också fått stöd från Fonden för en rättvis omställning, med cirka 70 miljoner kronor för projektförberedande insatser mellan 2024 och 2026.^{5,6}

³ Skulle fånga in koldioxid – nu stoppas projektet | nu.se (hämtat 2025-05-02)

⁴ Uppgifterna baseras på en presentation den 10 oktober 2023. Teknikvalen har inte kunnat bekräftas genom offentligt tillgängliga källor.

⁵ CCS i Slite ska nå beslut 2026 - Byggindustrin (hämtat 2025-05-02).

⁶ Nu startar samråd för CCS-anläggningen i Slite på Gotland | Heidelberg Materials Sverige (hämtat 2025-05-02).

3.2.6 Kemcyklisk förbränning: En lovande teknik för effektiv koldioxidinfångning

I augusti 2024 presenterade Anders Lyngfelt från Chalmers den kemcykliska förbränningstekniken (Chemical Looping Combustion, CLC) och dess potential att effektivisera koldioxidinfångning och minska utsläppen. CLC är en förbränningsmetod med flera fördelar jämfört med konventionella tekniker. Den kännetecknas av låg energiförlust och väsentligt lägre kostnader för koldioxidinfångning. Tekniken minskar eller eliminerar utsläppen av kväveoxider (NO_x) och minimerar problem med aggressiva askkomponenter som alkali och klorid, vilket förbättrar värmeåtervinning och driftssäkerhet. CLC möjliggör även högre ångtemperaturer och därmed högre verkningsgrad. Dess strukturella likheter med cirkulerande fluidiserad bäddförbränning (CFB) gör att den är enklare att implementera och ger lägre finansiell risk. CLC kan också köras som en CFB, vilket ökar driftflexibiliteten. En annan viktig fördel är teknikens potential att integreras med metanreforming (SMR), vilket gör det möjligt att producera koldioxidfri vätgas.

Trots de många fördelarna finns det utmaningar. Tekniken har ännu inte implementerats i kommersiell skala, vilket innebär osäkerheter kring prestanda och risk för konstruktionsfel. Tidiga anläggningar kräver omfattande ingenjörsarbete och stor flexibilitet. Därtill kan det vara svårt att hitta både leverantörer och slutanvändare. Tekniken kräver ofta en ny panna eller en omfattande ombyggnad av befintlig utrustning, vilket ökar kostnaderna. Ett större pannhus kan också krävas, liksom torkning av bränslet. Dessutom är bäddmaterialet dyrare än den sand som används i CFB, och systemet ställer högre krav på drift. För att uppnå ren koldioxid för transport och lagring krävs efterbehandling med oxypolishing samt destillation, vilket innebär ytterligare behov av syre och ökad teknisk komplexitet.

CLC- tekniken har dock testats i flera pilotanläggningar med lovande resultat. Chalmers har drivit sina pilotförsök under mer än 4 200 timmar och genomfört omfattande forskning inom området, med över 450 publikationer, 260 vetenskapligt granskade artiklar och 25 doktorsavhandlingar. Bland annat har gasomvandling testats med olika bränslen som träkol och petcoke, där träkol och petcoke 1 visat högst omvandlingsgrad. Över 500 olika syrebärare har undersökts i labb, varav mer än 70 testats i pilotdrift. Särskilt naturliga malmer som mangan, järn och ilmenit har visat sig lämpliga för fasta bränslen. Driftstemperaturerna i CLC-processen ligger mellan 900 och 1100 °C.

Efter oxypolishing innehåller koldioxidströmmen låga halter av gaser som syre, väte, kolmonoxid, metan, kväveoxider och kvävgas, vilka avlägsnas genom destillation för att nå kraven för lagring.

Globalt har tekniken testats under cirka 12 000 timmar i 50 olika pilotanläggningar, både med gas och fasta bränslen. En 80 kW pilot i Wien nådde en gasomvandling på 91–92 % med ilmenit och kalksten som syrebärare vid temperaturer kring 1080–1060 °C. En 150 kW-pilot hos Sintef visade 80–81 % gasomvandling, och ännu högre nivåer har uppnåtts med manganmalm. I Kina har en 5 MW-pilot körts i 45 timmar med lignit och lignit/petcoke-blandningar, med 90–94 % koldioxidinfångning, 2,5–3 % syrebehov för oxypolishing och gasomvandling på 97–97,5 % vid 865–905 °C i bränslereaktorn.

3.2.7 Stora Ensos pilotprojekt – Erfarenheter, teknik och framtidsutsikter

I mars 2025 medverkade Conny Johansson från Stora Enso på nytt, och berättade om erfarenheterna från pilotförsöket som nu är avslutat. Stora Ensos pilotprojekt var en del av det EU-finansierade ACCSESS-projektet.

Stora Ensos pilot för koldioxidinfångning var en mobil enhet som ursprungligen utvecklats för aminbaserade processer. Den har tidigare testats i Oslo, på Mongstad i Norge, i Skutskär och är nu placerad vid Heidelberg Cement i Góraźdźe, Polen. När piloten togs till Skutskär konverterades den för att fånga in koldioxid från en sodapanna – vilket gör projektet till det första i sitt slag i världen.

Teknik och processförutsättningar

Pilotanläggningen använde en teknik från Saipem (Kanada), där infångad CO₂ tidigare använts i växthus. I Stora Ensos tester används ett enzym, karboanhydras, som ökar absorptionshastigheten och möjliggör drift vid atmosfärstryck – utan att behöva trycksätta rökgasen. Enda tillsats utöver lösningsmedlet är skumdämpare, eftersom processen genererar mycket bubblor.

Stora Ensos anläggning i Skutskär är en av Sveriges största punktutsläppskällor och har en termisk effekt på 250–300 MW per panna. Sodapannor fungerar som reaktionskärn för återvinning av kokkemikalier som natriumkarbonat. Driftoptimeringen fokuserar därför på kemikalieåtervinning, snarare än t.ex. NO_x-reduktion.

Utmaningar och lösningar

Pilotdriften har stött på flera problem – bland annat med fläktar, sensorer och ett kyltorn som frös vid -10 °C. För att minska beläggningar i systemet ledde man om rökgasen till en annan panna med bättre rening (skrubber och våtelfilter), vilket förbättrade processen.

I ACCSESS-projektet har man även testat *rotary packed bed*-teknik (RPB) i stället för höga absorptionstorn. Dessa roterande skivor skapar stor kontaktyta och möjliggör kompaktare design, men har gett vissa problem med beläggningar.

Framtid och finansiering

Enzymernas livslängd är ännu oklar, och vissa problem med agglomerering har observerats. Det är ovisst om framtiden för CCS kommer att bygga på traditionella absorptionstorn – nya koncept som RPB eller förbättrade aminblandningar kan bli mer kostnadseffektiva, men behöver utvecklas vidare.

Trots det tekniska intresset finns en viss skepsis inför stora CCS-investeringar. Det finns därför behov av nya affärsmodeller, ägarskap eller partnerskap för att CCS ska bli aktuellt.

3.2.8 Lärkurvor för koldioxidinfångning – från FOAK till NOAK

I mars 2025 presenterade Johanna Beiron från Chalmers en forskningsstudie om hur kostnader för koldioxidinfångning utvecklas från "First-of-a-kind" (FOAK) till "Nth-of-

a-kind" (NOAK) genom lärande och erfarenhet. Presentationen sammanfattas nedan, för kompletta resultat hänvisas till den publicerade studien i fråga.⁷

Studien visar att det är svårt att förvänta sig hög inlärningstakt för CCS, eftersom projekten ofta är stora, komplexa och anpassade till platsens förutsättningar. Det begränsade antalet anläggningar som byggs minskar möjligheten till snabb kostnadsreduktion.

En hög inlärningstakt (12 %) kan minska fångstkostnaderna till NOAK-nivåer efter cirka 30 projekt, medan en lägre takt (3 %) ger en reduktion på 10–20 %. Vid ett FOAK-påslag på 100 % bedöms 90 av 176 anläggningar⁸ kunna fånga CO₂ för under 300 €/t, medan endast 17 når samma nivå vid 200 % påslag. En projektbaserad marginalkostnadskurva (MAC) föreslås för att uppskatta kostnader för svenska anläggningar, där pionjärprojekt placeras i början och övriga enligt lägsta NOAK-kostnad. Studien analyserar även när BECCS-projekt blir ekonomiskt genomförbara i relation till stigande ETS-priser, med antagandet att biogen CO₂ värderas som fossil CO₂. En viktig slutsats är att kostnaderna kan bli högre än tidigare uppskattningar, vilket kan leda till att stödbudgeten i den omvända auktionen för bio-CCS förbrukas snabbare än planerat.

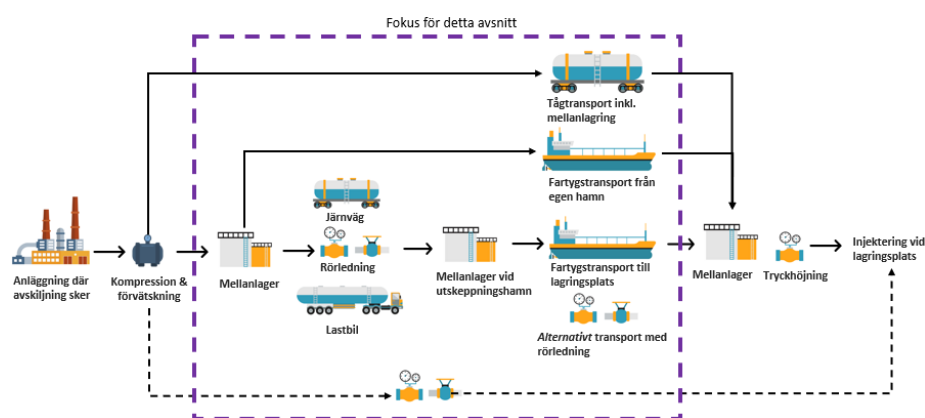
⁷ (Beiron & Johnsson, 2024)

⁸ Dvs. alla kraftvärmeverk och industrianläggningar i Sverige med årliga biogena utsläpp över 200 kton.

4 Infrastruktur och samverkan

Infrastruktur för transport av koldioxid från anläggning till slutlagring är en komplex och ofta kapitalkrävande del av värdekedjan för CCS. För fjärrvärmeaktörer med förhållandevis små och varierande koldioxidflöden kan samverkan med andra utsläppare, hamnar och transportörer vara en förutsättning för att kunna ta investeringsbeslut.

Detta avsnitt sammanställer insikter från arbetspaket 5 om samverkan och infrastruktur för koldioxidtransport från infångningsanläggning till ankomst vid slutlig lagringsplats. Transportkedjan kan omfatta många olika delar, se exempel i Figur 3.



Figur 3. Exempel på steg i CCS-kedjan. Den streckade lila linjen illustrerar huvudfokus för analysen i detta avsnitt. Transport med lastbil har dock inte studerats.

Syftet med avsnittet är att fördjupa befintlig kunskap om hur samverkan kring infrastruktur för transport av koldioxid kan leda till kostnadsminskningar och möjliggöra investeringar. Hinder och möjligheter för sådan samverkan belyses utifrån såväl tekniska, organisatoriska och ekonomiska som policyrelaterade perspektiv. Slutligen ges även rekommendationer till myndighet och politik, inklusive inspel till en möjlig nationell plan för koldioxidinfrastruktur i linje med fjärrvärmebranschens bio-CCS-strategi från 2022.

Projektet har omfattat intervjuer med fjärrvärmebolag, hamnar och logistikaktörer, två större workshops med bred branschrepresentation samt litteraturstudier och fallstudier från påtänkta klustersamarbeten. Ett särskilt fokus har legat på att undersöka möjligheterna för ett nytt samverkanskluster i norra Sverige, där ett flertal workshops har arrangerats.

4.1 INFRASTRUKTUR FÖR KOLDIOXIDTRANSPORT

Att transportera infångad koldioxid är tekniskt möjligt, men fortfarande komplext och ofta kostsamt – särskilt för små och medelstora utsläppare. Val av transportlösning påverkas av volymer, avstånd, lokalisering, tillgänglig infrastruktur, tillståndsprövar och möjliga samverkansstrukturer. Många fjärrvärmeaktörer har relativt små och säsongsväxande koldioxidflöden samt långa avstånd till närmaste slutlager. För dessa aktörer är samverkan ofta en förutsättning för att transportlösningen ska bli genomförbar, tekniskt som ekonomiskt.

4.1.1 Sjöfartstransport

Fartygstransport är särskilt lämpad för små volymer (i en europeisk kontext) och långa avstånd till offshore-lager. Det finns tre huvudsakliga trycknivåer som diskuteras för koldioxidtransport med fartyg:

- **Lågtryck (LP)** (~7 bar, -50 till -55 °C): Har teoretiska fördelar i form av hög densitet och låg energiförbrukning⁹. Ett mindre antal lågtrycksfartyg har börjat beställas – bland annat har Capital Maritime rapporterat beställa fyra 22 000 m³ kombinationsfartyg från Hyundai (för CO₂, ammoniak eller LPG). Det finns dock begränsad information om dessa fartyg och hur nära i tid de ligger till leverans.
- **Mellantryck (MP)** (~15 bar, -28 °C): Det idag mest mogna alternativet. Northern Lights har beställt fyra fartyg med 7 500 m³ kapacitet i denna trycknivå – två av dessa är levererade. Fartygen byggs utifrån erfarenheter från CO₂-hantering i livsmedelsindustrin, där MP-nivå använts i decennier.
- **Högt eller förhöjt tryck (HP/EP)** (> 40 bar): Möjliggör komprimerad transport i mindre volymer, men kräver mer avancerad materialteknik och är fortfarande på konceptstadiet. Knutsen NYK Carbon Carriers AS fick i mars 2025 ett "Approval in Principle" från ClassNK för sin HP-design, men inga sådana fartyg har ännu börjat byggas.

I Tabell 3 sammanfattas tryck, temperatur och densitet för de olika fartygstyperna.

Tabell 3. Typiska egenskaper för fartygstransport vid olika trycknivåer. Källa: (CCSA / Zep, 2024)

	Lågtryck (LP)	Mellantryck (MP)	Högtryck (HP)
Temperatur (°C)	-55 till -40	-30 till -20	0 till 15
Tryck (barg)	5 – 10	15 – 20	35 - 50
Densitet (kg/m³)	1170 – 1120	1080 – 1030	930 - 820

Transportkostnaden påverkas starkt av fartygsstorlek – större fartyg ger betydligt lägre kostnad per ton fraktkapacitet, förutsatt att de kan fyllas. Detta skapar tydliga skalfördelar som förstärker behovet av samverkan, särskilt för fjärrvärmeaktörer med mindre volymer. För dessa aktörer är befintliga fartyg ofta för stora för att utnyttjas effektivt på egen hand, vilket gör samlastning i hamnar eller logistiknoder avgörande för att få till kostnadseffektiva lösningar. I Figur 4 visas hur specifik investeringskostnad för fartyg som fraktar koldioxid beror av fartygsstorleken.

Trots skalfördelarna som uppskattas för fartygstransport finns tveksamheter kring vad som faktiskt kommer vara möjligt att bygga. Exempelvis finns strukturella utmaningar som kan innebära att maximal storlek för MP-fartyg blir 10 kton CO₂/fartyg.^{10,11}

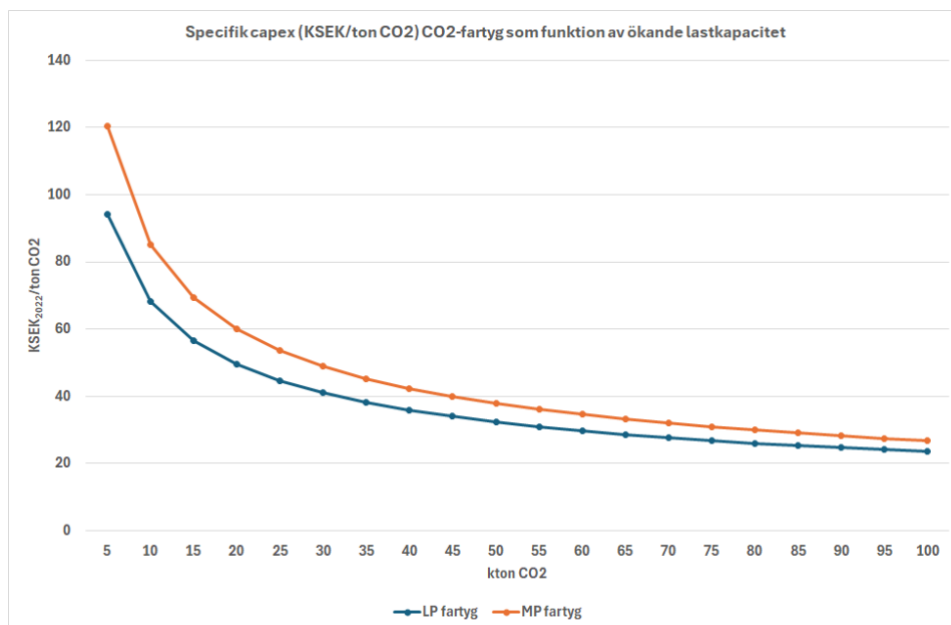
Utöver fartygsstorlek påverkas kostnaden även av avstånd till slutlagring, trycknivå, storlek och säsongsvariation på koldioxidflöden samt hur många aktörer som samlar. Även kostnader för mellanlagring tillkommer för fartygstransport, då detta

⁹ (DNV, 2024)

¹⁰ (CCSA / Zep, 2024)

¹¹ (Røe, Oeuvray, Mazzotti, & Roussanaly, 2024)

alltid behövs vid batchvis transport. Om samma volym koldioxid transporteras med större fartyg krävs också större mellanlager. Kostnaden för mellanlagring har minskat kraftigt bara de senaste åren. Tidigare kostnadsberäkningar kunde visa att det var mer kostnadseffektivt att transportera samma volym koldioxid med två fartyg än ett, just eftersom mellanlagringen blev så dyr vid ett stort fartyg.



Figur 4. Förhållande mellan specifik investeringskostnad (specifik CAPEX, kSEK/ton CO2) och fartygsstorlek (fraktad vikt koldioxid, kton CO2) för två trycknivåer: låg- (LP) resp. mellantryck (MP). Det är viktigt att notera att det idag råder tveksamheter om ifall exempelvis MP-fartyg större än 10kton/fartyg är möjliga att bygga.

4.1.2 Järnväg

Järnväg kan vara konkurrenskraftigt för transport av koldioxid vid medelstora volymer, särskilt där fartygslösningar saknas eller är logistiskt ogynnsamma. Ett tydligt exempel är inlandsområden som Väneren, där Göta kanal är den enda tillgängliga vattenvägen, men inte möjlig att nyttja för fartygstransport av koldioxid i större skala.

Järnväg kan också vara tidsmässigt mer effektivt än fartyg på vissa sträckor. Exempelvis kan en tågtransport mellan ost- och västkusten – eller från Norrland till tex Trondheim eller Narvik – ofta genomföras tur och retur på mindre än ett dygn. Motsvarande fartygstransport från Norrland till Northern Lights terminal tar ca 8-9 dygn, medan tiden mellan Göteborg – Northern Lights tar ca 3-4 dygn. Omloppstiden kan halveras vid varje dubbling av antalet fartyg.

Transportkostnaden för järnväg påverkas av flera faktorer och kan delas in i fem huvudsakliga kostnadselement:

- **Vagnhyra** (SEK/år och vagn)
- **Transportkostnad** (SEK/ton och km)
- **Hanteringskostnad** för lastning, lossning och koppling (SEK/ton)
- **Terminalkostnad** (SEK/ton)
- **Övriga kostnader**, såsom rör, pumpar och lastarmar

En central parameter är **omloppstiden** – det vill säga den totala tid en vagn är bunden i transportcykeln. Ju längre omloppstid, desto fler vagnar behövs för att upprätthålla ett givet flöde, vilket driver kostnaden per ton. Direkt tillgång till industrispår vid anläggningen minskar både investeringstid och terminalkostnader, medan behov av nya stickspår eller lastterminaler ökar kostnaderna.

Green Cargo har uppskattat att transporter på upp till 800 kton/år kan hanteras med ett tåg om 16 vagnar per dag, förutsatt att distans och omloppstid möjliggör detta. Mellanlagring kan ske direkt i tågagnar istället för i separata mellanlagringstankar. För att detta ska vara kostnadseffektivt får dock inte lagringen i vagnar innebära att fler vagnar behövs. Hyran för tågagnarna skulle då bli mer kostsam än mellanlagring i separata tankar.

Hinder för järnvägstransport inkluderar kapacitetsbrist i tågnätet¹², brist på anpassade vagnar och behov av investeringar i ny infrastruktur. Green Cargo uppskattar att särskilt anpassade vagnar för koldioxidtransport kan finnas tillgängliga inom cirka två år. Samlastning längs en gemensam rutt kan skapa effektivitet, men kräver samordning i både tid och volym mellan flera aktörer.

4.1.3 Pipeline (rörledning)

Pipelines lämpar sig bäst i områden där stora och stabila volymer kan samlas längs korta till medellånga sträckor, och används idag framför allt inom industrisiter för gastransport. Tekniken blir också successivt mer konkurrenskraftig över längre avstånd i takt med att de transporterade volymerna ökar. Nya studier visar även att storskaliga så kallade backbone-lösningar, där flera utsläppskällor kopplas till en gemensam ledning, kan ge låg kostnad per ton-km (Lindeberg, 2023)¹³

Tekniken är mogen men kräver stora initiala investeringar och god samordning mellan aktörer. Det är svårt att skala upp ett rörsystem i efterhand. Viss volymökning är ofta möjlig genom att höja trycket i rörsystemet, men när maxvolymen väl är uppnådd är det inte möjligt att öka genomströmningen mer. Då behöver nya rör byggas, vilket ofta är mycket kostsamt. Viss överdimensionering vid byggnationen – till exempel i form av större rördiameter – kan möjliggöra framtida kapacitetsökning till relativt låg merkostnad. Materialet utgör nämligen ofta en liten del av investeringskostnaden jämfört med själva rörläggningen.

4.1.4 Mellanlager

Mellanlager krävs för att jämna ut flöden mellan infångning och transport, särskilt vid batchbaserade transportsätt som fartyg och tåg. Tekniska lösningar inkluderar kryogena system med ovanjordstankar respektive bergrum. Investeringskostnaden är starkt volymberoende – mindre tankar är dyra per lagrad volymkapacitet, vilket innebär att delade lösningar i hubbar kan bli kostnadseffektiva.

Markbrist och tillståndsfrågor i hamnmiljöer lyfts som praktiska hinder som behöver hanteras tidigt i en potentiell samverkansprocess. Ovanjordstankar kan vara cylindriska eller sfäriska. De sfäriska är generellt inte så höga vilket kan vara fördelaktigt i en tillståndsansökan. Det finns också exempel på lyckad användning av

¹² Se t.ex. (Carlsson, Edberg, Gullberg, & Nieswand, 2022)

¹³ (Lindeberg, 2023). Notera att kostnaderna i studien ej inkluderar kompressionskostnad till >100bar.

befintlig infrastruktur, såsom Sundsvall Energis planer på att nyttja ett befintligt bergrum som mellanlager.

4.1.5 Jämförelse av transportslag

Pipeline är ekonomiskt för stora volymer och korta avstånd, medan fartyg blir mer ekonomiskt för längre avstånd och små till relativt stora volymer (fartyg upp till 30 kton diskuteras). Ju större koldioxidvolym desto mer konkurrenskraftigt blir pipeline även på längre avstånd¹⁴. Tåg kan vara ett konkurrenskraftigt alternativ för anläggningar med koldioxidflöden på mellan 100 – 800 kton/år, och upp till ca 2 Mton/år för samverkanskluster.

Vilken eller vilka transportlösningar som passar bäst, tekniskt och ekonomiskt, för ett visst projekt beror sammanfattningsvis av:

- **volym och variation på koldioxidflöde** (för en enskild anläggning respektive andra, närliggande anläggningar som är möjliga att samverka med)
- **avstånd** till slutgiltig lagringsplats
- tillgång till **befintlig närliggande infrastruktur** som hamn eller tågterminal
- **tajming** för när koldioxidinfångningen kan påbörjas jämfört med status för andra närliggande anläggningar, tillgång till transportlösningar samt tillgång till lagringsplats.

4.2 SAMVERKAN INOM OCH MELLAN KLUSTER

Gemensam infrastruktur för transport och mellanlagring av koldioxid är i många fall avgörande för att fjärrvärmeaktörer ska kunna realisera CCS. Såväl tekniska som ekonomiska skalfördelar kan uppnås om flera aktörer samverkar kring exempelvis mellanlager, transport och terminaler. Eventuellt kan även gemensam förvätskning vara gynnsamt, men då krävs det att infångningsanläggningarna är lokaliserade mycket nära varandra. Samverkan kan också förbättra enskilda aktörers förhandlingsläge gentemot transport- och lagringsaktörer – något som är särskilt viktigt för mindre punktkällor.

För att gemensamma lösningar ska bli verklighet krävs dock att alla deltagande parter ser en tydlig ekonomisk nytta. Samverkan medför ofta högre komplexitet och kräver affärsmodeller som fördelar kostnader och risker på ett sätt som upplevs rättvist. Det är särskilt viktigt eftersom små aktörer, trots att de ofta är mest beroende av samverkan, tenderar att bidra med små och ojämna volymer som kan driva upp de specifika kostnaderna i ett samverkansupplägg.

I arbetspaketet har flera hinder identifierats, bland annat skillnader i tidplan och projektmognad, skillnad i renhet på koldioxidströmmar, skillnad i nyttor och behov mellan stora och små aktörer samt avsaknad av tydliga strukturer för risk- och kostnadsfördelning. Små aktörer är särskilt sårbara om en större part drar sig ur, medan större aktörer ofta har rådighet att gå vidare på egen hand. Detta skapar behov av robusta och transparenta avtal och affärsmodeller.

¹⁴ (Lindeberg, 2023)

Förtroende, transparens och professionalitet i processledning lyfts som avgörande för att etablera långsiktiga samarbeten. Flera initiativ har inletts med gemensamma förstudier eller tillståndprocesser i mindre skala, innan investeringar tas. I detta arbete betonas vikten av en samordnande aktör – ofta en hamn, terminalaktör eller kommunal part – som kan driva processen framåt och accepteras av samtliga parter. En annan möjlighet är att de involverade företagen bildar ett gemensamt bolag eller en ekonomisk förening, som också kan sköta upphandling av transport och slutlagring.

Utöver intern samverkan inom kluster pekar projektet också på möjligheter med ökad samverkan *mellan* kluster. Kopplingar mellan inlandskällor och kustterminaler, gemensam logistik, standardiserade gränssnitt och koordinerade investeringar kan öka effektiviteten och minska kostnaderna i ett framtida svenskt CCS-nätverk. För att detta ska bli praktiskt genomförbart krävs gemensamma tekniska specifikationer, affärsmodeller över klustergränser och tydligare institutionell struktur för samordning. För att förverkliga en bredare nationell samordning behövs sannolikt även någon form av statlig strategi. Staten skulle till exempel kunna upphandla slutlagring gemensamt för svenska aktörer, vilket skulle kunna sänka kostnaderna.

4.3 INSIKTER OCH ERFARENHETER FRÅN SVENSKA SAMVERKANSKLUSTER

Flera regionala kluster har under de senaste åren bildats eller utretts för att gemensamt utveckla infrastruktur för transport och mellanlagring av koldioxid. Dessa initiativ har olika bakgrund, struktur och mognadsgrad, men gemensamt är att de adresserar behovet av samverkan för att möjliggöra bio-CCS och andra koldioxidrelaterade lösningar.

Nedan följer korta beskrivningar av fyra svenska kluster eller klusterinitiativ – tre i södra Sverige och ett i mellersta – samt en reflektion kring det pågående arbetet med ett potentiellt kluster i norra Sverige.

4.3.1 CinfraCap och kluster i Göteborgs hamn

CinfraCap var det första klusterinitiativet för koldioxidtransport i Sverige och bildades 2020 som ett förprojekt för att undersöka möjligheten till gemensam CO₂-infrastruktur i Göteborgs hamn. Deltagande aktörer inkluderade Göteborg Energi, Göteborgs Hamn, Nordion Energi, Preem, Renova och St1. Fokus låg på gemensam pipeline, förvätskningsanläggning och mellanlager i anslutning till hamnen.

Projektet avslutades som separat initiativ 2022, men flera av de medverkande aktörerna samt några nya driver idag vidare arbetet med att utveckla en liknande infrastruktur, delvis i nya konstellationer. Göteborgs Hamn fortsätter att ha en samordnande roll. Erfarenheter från CinfraCap visar bl.a. vikten av:

- Tidig samordning mellan tillståndprocesser och tekniska val
- Behov av förtroende och neutral samordning
- Klara definitioner av ansvar och nyttor i värdekedjan
- Att inte gå ut med information om projektet för tidigt, innan frågor om plats, process och tillstånd är tillräckligt genomarbetade – för att undvika onödigt oro eller motstånd.

4.3.2 NICE- Norviks hamn, Stockholm

NICE (Norvik Infrastructure CCS East Sweden) är ett klusterinitiativ för gemensam koldioxidinfrastruktur i Stockholmsregionen, med Stockholms Hamnar som samordnande part. Syftet är att möjliggöra förvätskning och sjötransport av CO₂ via Norviks hamn, i samverkan mellan regionala utsläppare.

En fördjupad förstudie genomfördes 2023–2024, där teknisk genomförbarhet, kostnadsbild, möjliga affärsmodeller och tillståndsfrågor analyserades. Deltagande aktörer inkluderade Stockholm Exergi¹⁵, Mälarenergi, Söderenergi, Vattenfall, Heidelberg Materials, Nordkalk, Plagazi och Stockholms Hamnar.

Förstudien visade att:

- Norviks hamn är tekniskt väl lämpad som CCS-nod med möjlighet att erbjuda flera transportsätt in till hamnen (fartyg, pråm, tåg, lastbil).
- Stordriftsfördelar kan uppnås genom gemensam infrastruktur, vilket gör CCS mer tillgängligt även för mindre aktörer.
- Ett öppet system med tredjepartstillträde och samordnade tillståndsprocesser rekommenderas.

Efter den fördjupade förstudien pågår nu arbete i Stockholms Hamnars regi att ta fram detaljerad utformning av noden i nära dialog med leverantörer och tänkbara utsläppare (exempelvis de som deltog i den fördjupade förstudien).

4.3.3 CNetSS- Sydsverige samt Malmö CO2 Hub

CNetSS (Carbon Network South Sweden) är ett samarbetsnätverk för att utveckla ett regionalt logistiksystem för koldioxid i södra Sverige. Projektet startade 2022 med aktörerna Växjö Energi, Copenhagen Malmö Port (CMP), E.ON, Höganäs, Kemira, Krafringen, Nordion Energi, Stora Enso, Sysav och Öresundskraft¹⁶. Arbetet under 2022-2023 fokuserade bland annat på:

- Analys av möjliga transportkedjor (tåg, lastbil, fartyg)
- Teknikval och systemintegration
- Förankring med lokala och regionala beslutsfattare

Projektet, som delfinansierades av Energimyndigheten via Industriklivet, visade bland annat att Malmö är en lämplig plats för gemensam mellanlagring för vidare transport till slutlagring.

Några lärdomar från projektet hittills har varit att:

- Det behövs en gemensam målbild – men också acceptans för att deltagarnas väg dit kan se olika ut

¹⁵ Stockholm Exergi har gått vidare med en egen lösning där Northern Lights är tjänsteleverantör. Det är således osäkert om och i så fall när de kan ha behov av att nyttja en gemensam hubb i Norvik.

¹⁶ Öresundskraft har tecknat avtal med INEOS om lagring av koldioxid i Danmark. Transportlösning ska upphandlas. Det är således osäkert om och i så fall hur de kan ha behov av att nyttja en gemensam hubb i Sydsverige.

- Tidig involvering av regioner, kommuner och hamnaktörer ökar legitimitet och förankring
- Förstudier som fokuserar både på teknik och affärslogik ökar sannolikheten för fortsatt engagemang

Som fortsättning på CNetSS har initiativet Malmö CO2 Hub startats, i vilket E.ON, Sysav, CMP, Nordion Energi och Uniper samarbetar för att utveckla en hubb för koldioxidsamverkan i Malmö. Hubben är tänkt att byggas ut i olika etapper till 2030 och ska omfatta mellanlager, mottagningsterminal för koldioxid, rörtransport från utsläppare till hamn, förvätskning, samt utlastning för fartygstransport till slutlagring.

4.3.4 Gävle – Gemensam CCS-lösning med industrianknytning

I Gävle pågår ett klusterliknande arbete där Gävle Energi samverkar med Billerud och Bomhus Energi kring möjligheten att samla in, mellanlagra och transportera koldioxid för lagring. Projektet omfattar både kommunalt kraftvärmeverk och industriella utsläppare. Gävle Hamn är involverad som konsult i utredningsarbetet.

Aktörerna har beviljats medel från Industriklivet för en förstudie, där kostnadsberäkningar, logistiklösningar och möjlig placering av mellanlager i hamnen analyseras. Arbetet är ännu i ett tidigt skede men visar på potentialen i att kombinera kommunala och industriella utsläppskällor i ett gemensamt kluster.

Några lärdomar så här långt:

- Hamnen bör involveras tidigt, inte enbart som operativ part utan även i planering och analys
- Frågor om terminalkapacitet, lossningsplatser och säkerhetszoner är ofta avgörande flaskhalsar
- Att utgå från existerande samarbeten (ex. fjärrvärme + industri) skapar en starkare bas för förtroende och projektstyrka.

4.3.5 Pågående arbete med potentiella kluster i norra Sverige

Inom ramen för detta Energiforskningsprojekt pågår en utforskning av möjligheterna till samverkan i norra Sverige, där fjärrvärmeaktörer som Umeå Energi, Bodens Energi, Gävle Energi och Sundsvall Energi har deltagit i gemensamma workshops och diskussioner. Andra aktörer har också bjudits in till workshopar, t.ex. industriföretag, hamnar och transportaktörer.

Gemensamma utmaningar i regionen inkluderar:

- Långt avstånd mellan infångningsaktörer och befintliga lagringsplatser
- Små utsläppsvolymer från respektive energianläggning
- Begränsad tillgång till tåg- och fartygskapacitet för CO₂
- Tidplaner för infångningsanläggningar som inte matchar i tid

Samtidigt finns även möjligheter, t.ex. befintliga berggrum (ex. Sundsvall), närhet till järnväg (ex. Umeå), lokalisering vid hamn (Sundsvall och Gävle) samt potentiella

samarbetspartners med stora koldioxidvolymmer inom industri och massa/papper (t.ex. Billerud i Kalix och Gävle, SCA i Obbola och Sundsvall och Holmen Iggesund).

Syftet med arbetet är att identifiera gemensamma behov, undersöka förutsättningar för ett samlat logistikupplägg, och analysera vad som skulle krävas för att realisera ett eller flera samverkanskluster i norra Sverige.

4.4 STYRMEDEL FÖR ÖKAD SAMVERKAN KRING INFRASTRUKTUR

Ett återkommande resultat i arbetet med AP5 är att dagens styrmedel i stor utsträckning är utformade för att stötta enskilda aktörer, snarare än samverkan mellan flera. Det riskerar att hämma utvecklingen av gemensam infrastruktur för transport och mellanlagring av koldioxid – trots att just sådan samverkan ofta är en förutsättning för att fjärrvärmebolag och andra mindre aktörer ska kunna genomföra CCS-projekt.

Följande behov och förslag till utvecklade styrmedel har identifierats:

Investeringsstöd för gemensamma lösningar

Stöd behövs särskilt för den typ av delad infrastruktur som ofta saknar tydlig huvudägare eller där investeringar måste göras innan full kostnadstäckning finns. Exempel inkluderar:

- Gemensamma mellanlager (särskilt i hamnmiljö)
- Gemensam last- och lossningsinfrastruktur
- Eventuella förvätskningsanläggningar för flera aktörer under förutsättning att aktörerna är lokaliserade mycket nära varandra

Styrmodeller som premierar samverkan och systemnytta

Nuvarande stödmodeller, inklusive klimatpremier och omvända auktioner, kan med fördel utvecklas för att:

- Möjliggöra ansökningar från konsortier eller kluster snarare än enskilda bolag
- Premiera lösningar som innebär samlastning, gemensamma flöden eller sektorsövergripande samverkan
- Inkludera förberedande faser såsom gemensamma förstudier, tillståndsansökningar och konceptutveckling
- Möjliggöra samverkan kring koldioxidinfrastruktur oavsett om koldioxiden är tänkt att lagras (CCS) eller användas (CCU)

Anpassade tillståndprocesser

Flera aktörer upplever att tillståndprocesserna inte är utformade för den typ av samlastning och multimodal transport som nu diskuteras. Förbättringsförslag inkluderar:

- Tydligare regler för tillståndsprövning av gemensam infrastruktur
- Riktlinjer för miljöprövning av mellanlager och transportkedjor för CO₂
- Möjlighet till samordnade samråd och tidig dialog med berörda myndigheter

CO₂-kvalitet som samverkanshinder

Utöver regelverk och tillståndsfrågor finns också tekniska faktorer som försvårar samverkan, särskilt kopplade till hur olika anläggningar hanterar och specificerar sin

infångade koldioxid. Olika anläggningar kan ha varierande krav och specifikationer på CO₂-kvalitet. Det försvårar gemensam användning av infrastruktur som rörledningar, mellanlager och fartyg.^{17,18}

Inom EU och initiativ som ZEP (Zero Emissions Platform) pågår arbete med att ta fram gemensamma kvalitetsstandarder för olika delar av värdekedjan. Tydliga och harmoniserade specifikationer är en förutsättning för fungerande samlastning och sektorsövergripande logistik. Förslag för att skapa mer harmoniserade förutsättningar:

- Utveckla styrmedel som stödjer harmonisering och implementering av kvalitetsstandarder – t.ex. genom krav i bidragsgivning eller förtydliganden i tillståndprocesser.
- Säkerställ att svenska myndigheter och projekt är aktiva i standardiseringsprocessen på EU-nivå, för att påverka utformningen utifrån svenska behov och förutsättningar.

Stöd till samordning och neutral aktör

Många intervjuade pekar på behovet av en neutral och samordnande aktör som kan:

- Stötta i samverkan mellan flera parter
- Driva frågor om kostnadsfördelning, tidplaner och affärsupplägg
- Agera processledare i kluster där ingen enskild aktör naturligt tar den rollen

Kunskapsspridning och transparens

Tillgång till kunskap från tidigare projekt, offentligt finansierade utredningar och teknisk dokumentation är avgörande för att fler ska kunna initiera egna initiativ. Ett konkret förslag är att:

- Skapa en nationell, sökbar databas med tekniska specifikationer, kalkylförutsättningar, lärdomar och kontaktpersoner från tidigare eller pågående projekt

4.5 SLUTSATSER INFRASTRUKTUR OCH SAMVERKAN

- **Samverkan kan ge tydliga kostnadsfördelar**, exempelvis genom skalfördelar och bättre förhandlingspositioner gentemot transport- och lagringsaktörer. Men nyttorna fördelas ojämnt. Små aktörer har ofta mest att vinna, men bidrar i regel mindre till helheten – både i volym, finansiering och stabilitet. Fjärrvärmebolags ofta ojämna och säsongsväxande koldioxidflöden riskerar dessutom att **öka de specifika kostnaderna** i gemensamma lösningar, jämfört med om en större aktör ensam driver projektet. Denna dynamik behöver få synas i affärsmodeller och fördelning av investerings- och driftskostnader.
- **Asymmetrier i beroende och rådighet är ett centralt hinder.** Större aktörer har ofta kapacitet att agera på egen hand och kan välja att gå vidare med egna lösningar om samverkan försenas eller faller. För mindre aktörer kan samma avhopp innebära att hela upplägget kollapsar. Det kräver tydliga strukturer för riskfördelning och avtal som beaktar dessa obalanser.

¹⁷ (CCSA / Zep, 2024)

¹⁸ (Northen Lights, 2024)

- **Tajningen är avgörande** – både för investeringar, samordning av beslut, tillståndprocesser och upphandling av lagring. Om en part är redo före andra finns risk att lösningen faller eller blir onödigt dyr.
- **Infrastrukturen är komplex och kapitalkrävande**, med många osäkerheter i både teknikval, tillståndprocesser och marknadsförutsättningar. Osäkerheter kring exempelvis tillgänglig fartygskapacitet, hamnavgifter och tillgänglighet till lagring skapar ett investeringsmässigt "vänteläge" för flera aktörer. Oro för politisk långsiktighet i klimatambitioner bidrar till ytterligare osäkerhet.
- **Val av transportlösning beror på flera sammanvägda faktorer**, såsom volym, avstånd, befintlig infrastruktur och möjlighet till samlastning. Pipeline är ofta ekonomiskt gynnsamt vid stora och jämna volymer över korta avstånd, medan fartyg är kostnadseffektiva för små volymer över långa avstånd samt erbjuder flexibilitet vid varierande volymer. Ju större volymen är desto mer konkurrenskraftigt blir pipeline även över längre sträckor. Järnväg kan ofta vara ett konkurrenskraftigt alternativ vid medelstora volymer och där det finns dåliga möjligheter för fartygslösningar.
- **Dagens styrmedel är i huvudsak utformade för individuella aktörer snarare än för gemensamma lösningar.** Det saknas i praktiken fungerande stödstrukturer för att hantera de särskilda risker, osäkerheter och investeringströsklar som följer med klustersamarbeten och gemensam infrastruktur. Trots flera aktiva planeringsinitiativ har inga fullskaliga samarbeten ännu nått investeringsbeslut. För att möjliggöra verklig samverkan kring t.ex. mellanlager, förvätskning eller gemensam logistik krävs styrmedel som explicit premierar och underlättar delade lösningar.

4.6 MEDSKICK TILL MYNDIGHETER OCH PLANERINGSAKTÖRER

- Inför investeringsstöd för delad infrastruktur, t.ex. mellanlager och terminaler.
- Utforma styrmedel som premierar samverkan och systemnytta snarare än punktvisa lösningar.
- Initiera en nationell plan för koldioxidinfrastruktur, med identifierade hubbar och transportvägar.
- Anpassa tillståndprocesser till samlastning och ny teknik – både i hamn och på land.
- Skapa en öppen databas för tekniska specifikationer, lärdomar och rapporter från offentligfinansierade CCS-projekt.

4.7 FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNING

Fortsatt forskning behövs kring affärsmodeller, kostnadsfördelning och kontraktsvillkor i klustersamarbeten – särskilt för att hantera asymmetrier mellan stora och små aktörer. Även former för samverkan mellan kluster, till exempel mellan inlandsställor och kustterminaler, bör studeras vidare.

5 Slutlagring – koldioxidlagringsprojekt i Sveriges närhet

5.1 INLEDNING

Sista steget i Bio-CCS värdekedjan utgörs av permanent slutförvar av den infångade koldioxiden, i form av geologisk lagring. Vid geologisk lagring av koldioxid injekteras koldioxiden djupt under markytan, oftast i så kallade salina akviferer som utgörs av porösa sandstenar, alternativt i så kallade mafiska bergarter, exempelvis basalt.

Lagring i salina akviferer är primärt en fysisk process där koldioxiden lagras i små hålrum mellan sandstenens sandkorn samt bindas genom upplösning i formationsvätskan. Med tiden, hundra- till tusentals år, kommer en del av den injekterade koldioxiden att reagera kemiskt med reservoarbergarten och mineraliseras. Lagring i mafiska bergarter (t.ex. basalt) är primärt en kemisk process där koldioxiden först upplöses i vatten och sedan efter injektering börjar reagera kemiskt med reservoarbergarten (Mg, Ca, Fe) och mineraliseras. Denna process är väldigt snabb och merparten av den injekterade koldioxiden har mineraliserats redan efter två år.

Merparten av de lagringsmöjligheter, och projekt, som finns i Sveriges närhet avser lagring i salina akviferer. För att säkerställa en permanent, effektiv och säker lagring i salina akviferer behöver en lagringsplats mognas vilket även inkluderar en bedömning av tillgänglig lagringskapacitet^{19,20}. Omfattande platsspecifika data behöver hämtas in och analyseras, för att sedan användas i olika simuleringar och modelleringar, för att uppnå en så precis bild (modell) som möjligt av det framtida lagret, avseende både reservoar och takbergart. I ett lagringskomplex är takbergarten minst lika viktigt som själva reservoaren som ska lagra koldioxiden, detta för att säkerställa att den injekterade koldioxiden stannar i reservoaren och inte migrerar upp till ytan. Mognad och utveckling till ett funktionellt koldioxidlager är en omfattande process som tar tid. Beroende av mängden av befintliga och tillgängliga data, exempelvis från tidigare prospekteringar efter olja eller gas, tar mognaden av ett lager från identifiering till att det på ett säkert sätt kan ta emot koldioxid typiskt minst 3–10 år²¹.

Möjligheter för lagring i salina akviferer finns över hela världen och tekniken har genomförts sedan 1970-talet. På våra breddgrader finns det särskilt bra förutsättningar under havsbotten i Nordsjön, men potentiella möjligheter finns även i södra Sverige. I Sverige har det sedan tidigare identifierats och undersökts potentiella lagringsmöjligheter²² som visar på en teoretiskt betydande potential för inhemsk geologisk lagring av koldioxid. Dock återstår en betydande mognad av de svenska lagringseenheterna innan koldioxidlagring i full skala kan genomföras, och till dess blir lagring utomlands en nödvändighet.

De senare åren har ett relativt stort antal lagringsprojekt utvecklats inom norra Europa. Avseende transport och lagring av svensk koldioxid ligger huvudsakliga fokus just nu på samarbete med Danmark och Norge, men även Island kan visa sig bli relevant.

¹⁹ (Bradshaw, o.a., 2007)

²⁰ (Aagaard, Anthonsen, Mortensen, Bergmo, & Snæbjörnsdóttir, 2014)

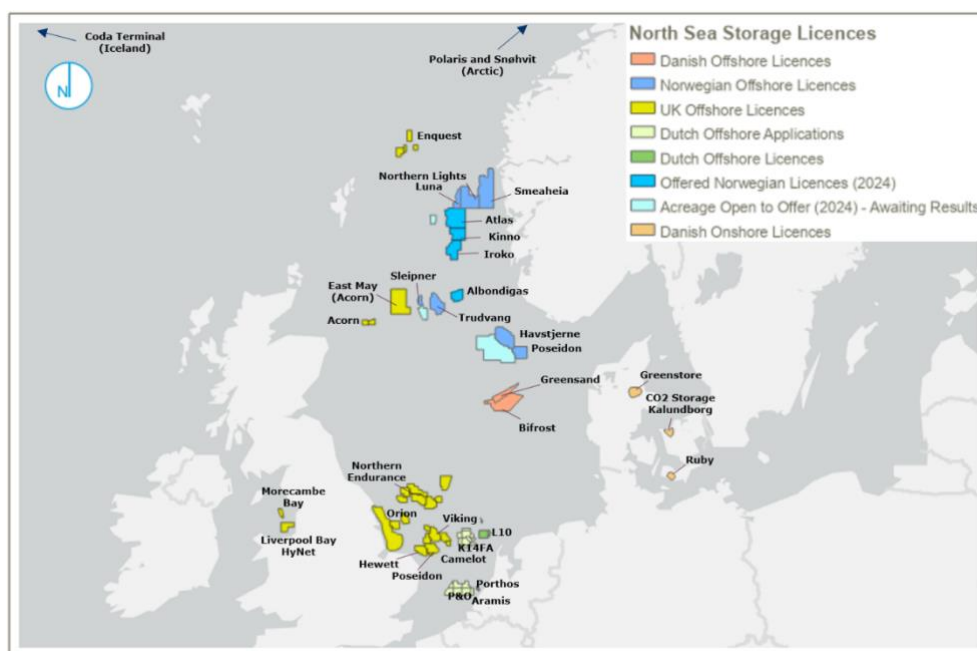
²¹ (IEA, 2023)

²² (Mortensen, 2014)

I följande text ges en sammanställning av pågående och planerade lagringsprojekt i Sveriges närhet, med fokus på Danmark och Norge, avseende utveckling, tillgång, och kapacitet. Sammanställningen kommer även ge en kort beskrivning av pågående lagringsprojekt i Island samt befintlig kunskap kring lagringsmöjligheter i Sverige, både i salina akviferer och i mafiska bergarter.

5.2 UNDERSÖKNINGSLICENSER AVSEENDE KOLDIOXIDLAGRING

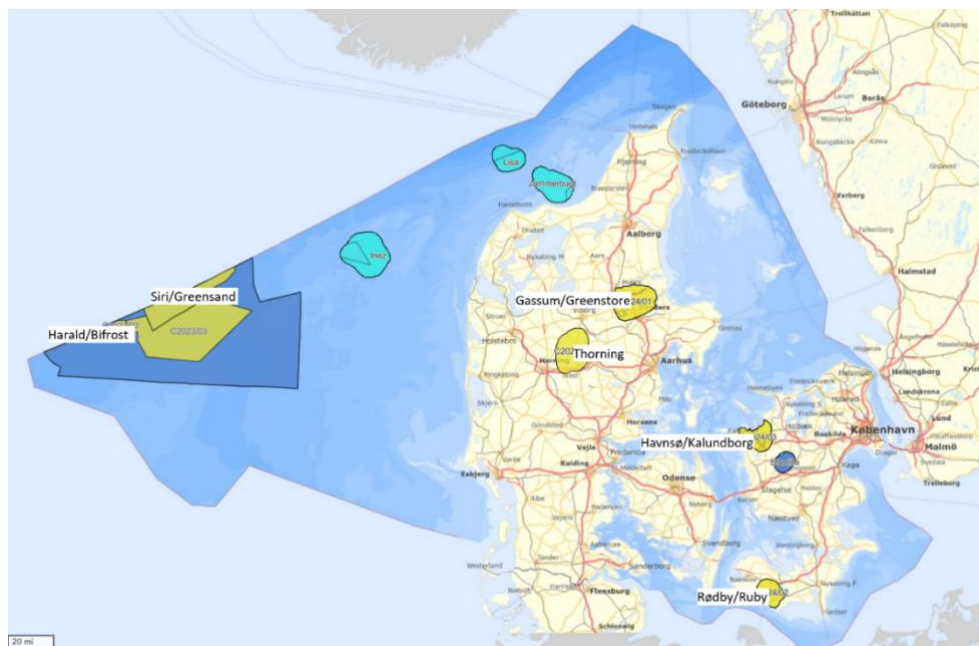
För att kunna bedöma om berggrunden är lämplig för geologisk lagring av koldioxid föreligger det ett stort och komplext arbete. Ofta görs det inledande undersökningar av respektive lands geologiska undersökning för sedan att lämnas ut för anbud till intresserade bolag att vinna undersökningslicens för att genomföra, och investera i, nödvändiga undersökningar för att mogna en lagringsplats för framtida injektering och lagring av koldioxid. I både Norge och Danmark är en tilldelad undersökningslicens för lagring av koldioxid exklusiv för den eller de bolag som har vunnit denna, och den eller dessa har sedan också preferens till att få lagringslicens om detta bedöms lämpligt. I Figur 5 nedan har undersökningslicenser inom Nordsjön kartlagts, och kan användas för lokalisering av de nedan beskrivna lagringsprojekten.



Figur 5. Karta över tilldelade undersökningslicenser inom Nordsjöområdet i 2024 (karta tillhandahållit av David Pickering, Rambøll 2024).

5.3 LAGRINGSPROJEKT I DANMARK

I Danmark pågår det en intensiv utveckling avseende undersökning och beredning för lagringsplatser för koldioxid. Lämpliga lagringsplatser har identifierats både på land och till havs, varav några kustnära. Ett antal undersökningslicenser har redan tilldelats av danska Energistyrelsen, och ytterligare ett antal licenser håller just nu på att tilldelas, se Figur 6. Nordsøfonden som ägs av danska staten äger 20 % av alla licenser och lagringsprojekt i Danmark. Om samtliga aktiva undersökningslicenser i Danmark realiserar, kommer Danmark till 2030 att ha en samlad injekteringskapacitet på minst 30 Mt CO₂ årligen.



Figur 6. Karta över danska CO₂-licenser samt planerade områden för CO₂-lagring. Gula områden avser tilldelade undersökningslicenser, turkosa avser stängda men ännu ej tilldelade licenser, blå avser planerade områden där enbart miljöbeskrivning finns (modifierat från Energistyrelsen 2025).

5.3.1 Pågående projekt med snarligt tillträde

I Danmark har två pågående CCS-projekt numera flera års undersökningsarbete och planering bakom sig. Dessa är projekten Greensand med planerat nära förestående tillträde i slutet på 2025 till början av 2026, samt Bifrost med planerat tillträde under 2030. Bägge projekten och lagringsplatserna finns till havs väster om Jylland och båda avser lagring i uttömda olje- och gaslager.

Greensand

Greensand-projektet utgör en transport- och lagringslösning för CO₂ med planerad lagring i det uttömda Sirifältet till havs väster om Jylland, Danmark, se Figur 6. Initiala injekteringar kommer ske i reservoaren Nini West med inledningsvis 400 000 ton CO₂ årligen. Det var även i denna reservoar som lagringsoperatören Ineos genomförde pilotinjekteringar och tillhörande monitorering under 2023. Unikt för Greensand-projektet är att det har certifierats av DNV med Certificate of Conformity – Site Endorsement and Storage Site i överenskommelse med ISO 279 14. Eftersom lagring i Greensandprojektet kommer ske i uttömda olje- och gaslager finns det redan ett solitt dataset vilket har underlättat efterföljande undersökningar förutom mer än 20 års erfarenhet från produktion vilket bidrar till en säker och effektiv lagring av den injekterade koldioxiden.

Greensand-projektet leds av Ineos, med Harbour Energy och Nordsøfonden som partners, och FID togs i slutet på 2024. Enligt plan kommer första utskoppning ske i början av 2026 med ett skepp med kapacitet för ca 5 500 ton CO₂ per skepp och avgång, motsvarande ca 400 000 ton CO₂ per år. Ett andra skepp planeras bli klart till 2028 och ha kapacitet för ca 7 000 ton CO₂ per skepp och avgång, med möjlighet till upphämtning i bl.a. södra Sverige. I ett första skede kommer Esbjerg, lokaliserat på

Jyllands västkust, att fungera som mottagningsterminal för den infångade koldioxiden och med vidare utskeppning till Nini-plattformen i danska Nordsjön.

Vid en uppskalning av projektet kommer den resterande delen av Siri-fältet att nyttjas med planerade första injekteringar under 2028 och en förväntad potentiell kapacitet på 8 Mtpa i 2030.

Bifrost

Bifrost-projektet planerar erbjuda en full transport- och lagringslösning för CO₂ med lagring i det uttömnda gasfältet Harald, lokaliserat till havs 250 km från den danska västkusten, se Figur 6. Projektet genomförde under 2022–2024 omfattande undersökningar för att kunna säkerställa lagring av CO₂ på ett säkert sätt. Likt i Greensandprojektet, finns det på grund av tidigare gasutvinning i Harald fältet en solid kännedom och erfarenhet av lagringskomplexet och likaså ett solitt dataset för området.

Första fas av projektet har en förväntad kapacitet på 2–3 Mtpa till 2030. För ytterligare att kunna skala upp kapaciteten tittar man även på möjligheten att komplettera sandreservoaren med delar av en kalkreservoar, vilket i så fall blir ett nytt sätt att lagra koldioxid på inom Norden.

Bifrost-projektet planerar för mottagningsterminal på Esbjerg hamn och därifrån tittar de på två olika lösningar för vidare transport till lagringsplatsen, genom rörledning och med skepp. Transport av infångad CO₂ genom rörledning kommer sannolikt kunna vara tillgänglig i projektets första skede, då detta kommer kunna ske i befintlig rörledning som tidigare använts för transport av naturgas.

I en senare fas av Bifrostprojektet planerar man för att ta emot och lagra uppemot 15 Mt koldioxid årligen från 2033/2034.

Bifrostprojektet leds av det Danska Undergrunds Konsortium (DUC) som utgörs av TotalEnergies, Nordsøfonden, och BlueNord, men har även Ørsted och DTU (Danmarks Teknologiske Universitet) som partners i projektet.

5.3.2 Projekt under utveckling, med licens

Under vintern 2023–2024 genomfördes en andra licensrond för tillstånd till undersökning och nyttjande av undermarken för geologisk lagring av koldioxid avseende fem avgränsade områden på land i Danmark. Tre av dessa tilldelades licens, se gula områden på land i Figur 6, och dessa tre projekt beskrivs i det följande.

Greenstore

Greenstore-projektet leds av Harbour Energy, med Ineos och Nordsøfonden som partners. Projektet kommer under kommande tre åren att genomföra ett omfattande undersökningsprogram i Gassum-strukturen lokaliserad norr om Århus i Jylland (se fig. 2) för att säkerställa att tidigare bedömningar kring lagringspotential och säkerhet stämmer överens med pågående planering. Gassum-strukturen har bedömts ha en total kapacitet på uppemot 250 Mt koldioxid, och om de pågående undersökningar kommer ha ett positivt utfall förväntas projektet kunna påbörja första injekteringar av koldioxid i slutet på 2029 med en injekteringskapacitet på ca 5 Mtpa.

Kalundborg

Kalundborg-projektet leds och ägs av Ørsted och Equinor, med Nordsøfonden som partner, vilka har inlett ett fyraårigt undersökningsprogram i Havnsø-strukturen lokaliserat på nordvästra Själland, se Figur 6. Havnsø-strukturen bedöms ha en total lagringskapacitet på minst 250 Mt koldioxid och potential att kunna ta emot och lagra uppemot 12 Mt koldioxid årligen, med uppstart under 2029/2030.

Som en del av Ørsted Kalundborg CO₂ Hub, finansierat av statsstöd (motsvarande de svenska omvända auktioner) och CDR krediter, har byggandet av en CO₂ terminal i Kalundborg påbörjats och kommer stå klar till att ta emot koldioxid under 2026. Transport av koldioxid till terminalen i Kalundborg planeras kunna ske med tåg, lastbil, båt, och präm, och man tittar även på möjlighet för etablering av rörledning mellan Köpenhamn och mottagningsterminalen i Kalundborg.

Ruby

I Ruby-projektet planeras lagring ske i Rødby-strukturen lokaliserad på Lolland söder om Själland, se Figur 6, med förväntat FID i 2027 och uppstart innan 2030. Projektet leds och ägs av CarbonCuts, med Nordsøfonden och BlueNord som partners, och det pågår just nu ett omfattande två till tre-årigt undersökningsprogram med 3D-seismiska undersökningar och undersökningar av borrhål i syfte att kartlägga strukturen i detalj samt säkerställa lagringspotentialen. Projektet har inledningsvis en förväntad potential på 1,5 Mtpa, och transport av koldioxid till lagringsplatsen planeras ske med tåg, lastbil och båt.

Norne

Under hösten 2024 genomfördes en tredje licensrond för tillstånd till undersökning och nyttjande av undermarken för geologisk lagring av koldioxid avseende ett avgränsat område på land centralt i Jylland, se Figur 6. Bolaget Norne Thorning Storage ApS, ett dotterbolag till Fidelis New Energy, vann efterforskningslicensen och kommer nu kunna genomföra undersökningar, inklusive insamling av seismiska data och borrhningar, i syfte att utreda berggrundens lämplighet för geologisk lagring av koldioxid. Förlöper alla undersökningar väl och enligt förväntningar kommer lagring av koldioxid sannolikt kunna ske innan 2030, med ambitionen att nå en kapacitet för minst 15 Mtpa till mitten av 2030-talet.

5.3.3 Planerade områden för koldioxidlagring

Jammerbugt, Lisa, och Inez

I mars 2025 avslutades en fjärde licensrond för tillstånd till undersökning och nyttjande av undermarken för geologisk lagring av koldioxid avseende de tre avgränsade kustnära områdena Jammerbugt, Lisa och Inez lokaliserade nordväst om Jylland, se turkosa områden till havs i Figur 6. Bolagen som har lämnat anbud och efterföljande tilldelas licens kommer kunna genomföra undersökningar, inklusive insamling av seismiska data och borrhningar, i syfte att utreda berggrundens lämplighet för geologisk lagring av koldioxid.

Stenlille

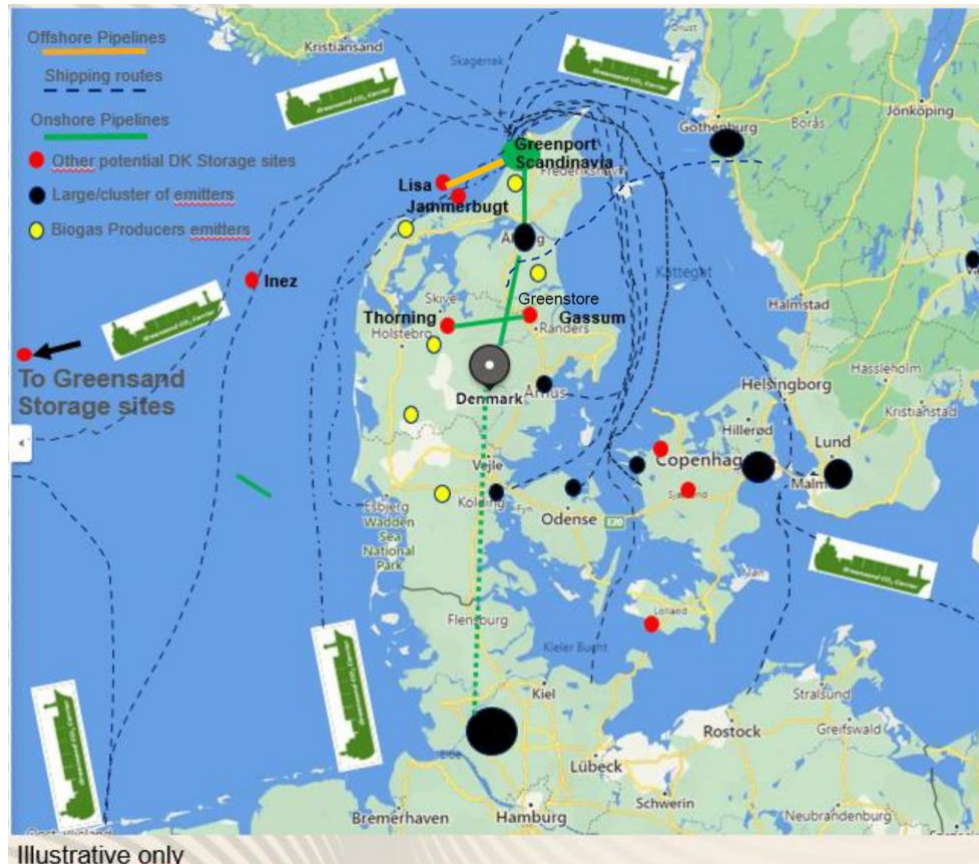
Området Stenlille, blått område på Själland i Figur 6, fungerar i dag som lager för naturgas och befintlig operatör lämnade under andra licensronden under vintern 2023–

2024 anbud för tillstånd till undersökning och nyttjande av undermarken för geologisk lagring av koldioxid. Anbudet antogs dock inte och lagringsutrymmet i Stenlille diskuteras i dag avseende framtida planer för lagring av naturgas, koldioxid eller andra alternativ.

5.3.4 Greenport Scandinavia

Greenport Scandinavia är ett samarbete mellan Port of Hirtshals, Greenport North, Ineos, Harbour Energy, Evida, Aalborg Portland, Biocarb Solution, Energy Cluster Denmark, Hydrogen Valley, och EUC Nord i etableringen av en CCUS-hubb i Hirtshals hamn lokaliserad i Nordjylland i Danmark. Målet med hubben är att skapa kommersiella värdekedjor från CO₂-utsläppare till permanent lagring i Danmark. Med partners som Ineos och Harbour Energy har Greenport Scandinavia ett redan etablerat samarbete med lagringsoperatörerna från två av de danska lagringsprojekten: Greensand, med lagring till havs väster om Jylland, och Greenstore, med lagring på land i Jylland, se lokalisering i Figur 6. På sikt kommer Greenport Scandinavia även ha bra närhet till de kustnära lagringsplatser som just nu ligger ute på licens (turkosa områden i Figur 6).

I Greenport Scandinavias affärsplan planerar man för första utskeppningar från Hirtshals redan under 2026, med möjlighet till potentiell CO₂-transport och lagringskontrakt från 2027. Målet är att till 2030 transportera och lagra 8 Mt CO₂ årligen. Förutom danska aktörer, kommer Greensand Scandinavia även fokusera på tyska, svenska och norska utsläppsaktörer, se Figur 7.



Figur 7. Illustration av sannolika transportvägar till Greenport Scandinavia (bild från Ineos presentation, 2025).

5.4 LAGRINGSPROJEKT I NORGE

I Norge har man sedan 1996 lagrad koldioxid geologiskt i samband med gasutvinning i Sleipner fältet, och efterföljande också i Snøhvit i 2008, även det i samband med utvinning och produktion av gas. Ingen av dessa två projekt tar emot koldioxid från andra aktörer.

Som en del av Norges långsiktiga klimatmål startades projektet Langskip med målet att uppnå en kostnadseffektiv lösning för CCS i full skala med öppen tillgång till transport- och lagringsinfrastruktur. På grund av det stora behovet och intresset av CCS, och inte minst möjligheter till lagring, har Norge sedan dess planerat för och tilldelat ett antal nya undersökningslicenser och arbetar samtidigt på ett omfattande infrastrukturprojekt, *CO₂ Highway Europe*, som ska förbinda Europa med tilltänkta lagringsplatser under havsbotten i norska Nordsjön. Om samtliga aktiva undersökningslicenser i Norge realiserar, kommer Norge till 2030 att ha en samlad injekteringskapacitet på uppemot 57 Mt CO₂ årligen.

5.4.1 Pågående projekt med snarligt tillträde

Lagringsprojekt i Norge med snarligt tillträde för utländska aktörer utgörs just nu av Langskip-projektet. I maj 2025 mottog Northern Lights som ansvarar för transport och lagring i projektet alla slutliga tillstånd som rör injektering och lagring av CO₂ i Aurora-licensen i norska Nordsjön. Tillstånden avser injektering och lagring av totalt 37,5 Mt CO₂ from 2025 och 25 år framåt, vilket täcker väl upp för första fasen i Langskip-projektet med injektering av 1,5 Mt CO₂ årligen.

Langskip

Langskip är det första fullskaliga CCS projekt i Norge och ska demonstrera den fulla CCS-värdekedjan från infångning, över transport, till lagring, och med öppen tillgång till transport- och lagringsinfrastrukturen. Lagringskomplexet som i första hand är aktuellt för Langskip projektet kallas Aurora och finns i norska Nordsjön väster om Bergen. Lagringskomplexet är väl undersökt och transport- och lagringsdelen av projektet kommer genomföras under två faser, där bara första fas är inom Langskip projektet. I första fas kommer injekteringar av CO₂ påbörjas under sommaren 2025 med en förväntad initial injekteringskapacitet på 1,5 miljoner ton CO₂ årligen. I mars 2025 tog Northern Lights FID för andra fas av projektet vilket kommer innebära en uppskalning till en injekteringskapacitet på minst 5 Mtpa till 2028. Mottagningsterminalen för koldioxiden finns på Kollsnes i Øygarden, och kommer i första hand ta emot koldioxid med båt, men lösningar för transport med lastbil utreds.

Langskip projektet koordineras av Gassnova, den norska CCS-myndigheten. Eftersom Langskip projektet ska bidra till de långsiktiga klimatmålen i Norge behöver Northern Lights säkerställa att en del av den lagrade koldioxiden i projektet tillgodoser de norska klimatmålen. Det har i projektet därför reserverats en total kapacitet på 0,8 Mtpa för Heidelberg Materials cementfabrik i Brevik och Hafslund Oslo Celsio avfallsförbränningsanläggning.

5.4.2 Projekt under utveckling, med licens

Under 2021–2023 genomfördes det två licensronder för tillstånd till undersökning av norska kontinentalsockeln för geologisk lagring av koldioxid, och sex licenser

tilldelades, se blå områden till havs i Figur 5²³. Under 2024 tilldelades ytterligare tre licenser, se turkosa områden till havs i Figur 5. En kort genomgång ges härunder för de nio licensierade områdena (projekt), samtliga med lagring i salina akviferer och med tillgång för utländsk CO₂.

Polaris

Polaris-licensen blev under 2022 tilldelad Equinor (40 %), Horisont Energi (30 %), och Vår Energi (30 %), men ändrades under 2024 där PGNiG Upstream Norway gick in som operatör med 50 % ägarskap och även Horisont Energi fick 50 %. Polaris är lokaliserad i Barentshavet 100 km från Finnmarkskusten i norra Norge, och har en förväntad uppstart under 2028 med en injekteringskapacitet på minst 3 Mtpa. Polaris-projektet är främst avsett lagra CO₂ från planerad ammoniakstillverkning i Hammerfest, men kommer även kunna ta emot CO₂ från tredje part.

Smeaheia

Licens för Smeaheia blev tilldelad Equinor under 2022 och projektet planeras genomföras i två faser, där första fasen har en förväntad injekteringskapacitet på minst 5 Mtpa till 2030, och för efterföljande andra fas finns det en ambition om en injekteringskapacitet på uppemot 20 Mtpa innan 2035.

För transport av CO₂ till Smeaheia planerar Equinor för två scenarier, en 1000 km lång rörledning kallad *CO₂ Highway Europe* (se mer nedan under avsnittet Northern Lights), samt transport med skepp.

Luna

Licens för Luna blev under 2022 tilldelad Wintershall Dea som operatör (60 %) samt CapeOmega (40 %), som sedan sålde sin andel till TotalEnergies under 2023. Luna är lokaliserad 120 km väst för Bergen och projektet förväntas bli operativt till 2030 med injekteringskapacitet på 5 Mtpa.

Poseidon

Aker BP (operatör) och OMV (Norge) vann med varsin 50 % ägarskap under 2023 licensen på Poseidon lokaliserad i södra delen av norsk Nordsjön. Projektet förväntas bli klart till 2030 med en injekteringskapacitet på minst 5 Mtpa.

Havstjerne

Licensen för Havstjerne blev tilldelad Wintershall Dea (operatör med 60 %) och Stella Maris (40 %) i 2023. Havstjerne är lokaliserad i södra Nordsjön där den gränsar upp till Poseidon och inkluderar Altera Infrastructure med projektet STARFISH. Projektet planeras bli klart till 2030 med en förväntad injekteringskapacitet på 7 Mtpa.

Trudvang

Trudvang blev under 2023 tilldelad Sval Energi (operatör med 40 %), Neptune Energy Norge (30 %), och Storegga Norge (30 %). Då Neptune Energy i 2024 såldes till Vår Energi övergår deras andel då till dessa. Trudvang är lokaliserad i södra delen av norska Nordsjön strax öster om Sleipner med goda erfarenheter av koldioxidlagring sedan 1996. Lagring i Trudvang kommer ske i samma geologiska formation som

²³ (Bellona, 2024)

Sleipner och kommer därmed kunna ta del av de nästan 30 års erfarenheter från detta projekt. Trudvang-projektet planeras bli klart för första injekteringar under 2029 och med en kapacitet på minst 10 Mtpa.

Iroko

Iroko-licensen tilldelades under 2024 Vår Energi (operatör med 40 %), OMV (30 %), och Lime Petroleum (30 %). Iroko är lokaliserad i centrala delen av norska Nordsjön och har en förväntat injekteringskapacitet på minst 7,5 Mtpa.

Albondigas

Under 2024 tilldelades Equinor licens för Albondigas som operatör med fullt ägarskap. Området kommer nu utforskas och förväntas ha en injekteringskapacitet på 5 Mtpa till 2030.

Kinno

Licens för Kinno tilldelades under 2024 till Equinor som operatör och enda ägare, vilka förväntar att området blir operativt till 2030 med en injekteringskapacitet på 5 Mtpa.

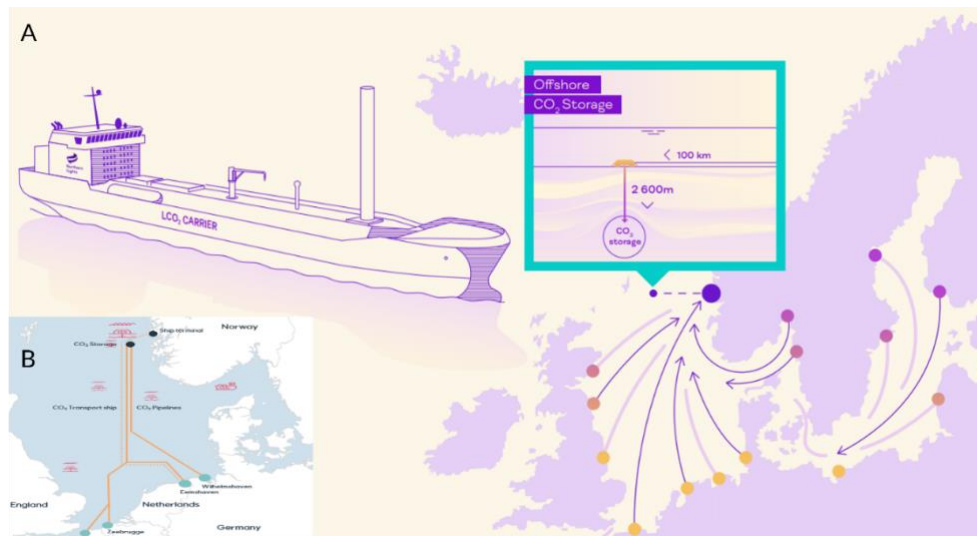
5.4.3 Planerade områden för koldioxidlagring

Undergrunden inom den norska Nordsjön har bra förutsättningar för geologisk lagring av koldioxid och Norge har lång tradition och rika erfarenheter från pågående lagringsprojekt i olika stadier. Tillsammans med ett stort behov av lagringsplatser till Europas CO₂ fortsätter sökandet efter lämpliga platser för framtida lagring i norsk kontinentalsockel.

5.4.4 Northern Lights

Northern Lights bildades under 2021 som ett samarbete mellan Equinor, Shell och TotalEnergies som tillsammans ansvarar för transport och lagring i Langskip-projektet. Med första fas av Langskip-projektet förberedd och klar till att ta emot CO₂ under sommaren 2025, har Northern Lights inlett en andra fas med FID i mars 2025. Andra fasen av Langskip-projektet kommer innebära en expansion av injekteringskapaciteten till 5 Mtpa, samt flera skepp för CO₂-transport, extra lagringstankar och en ny kajplats i Øygarden. Fas 2 förväntas bli operationell i slutet på 2028.

Northern Lights har sedan våren 2025 de första två skeppen på plats och ytterligare två skepp är under konstruktion. Utöver CO₂-transport med skepp planerar Equinor, partner i Northern Lights, även för en "CO₂ Highway Europe" till 2029/2030 som ska bestå av en så kallad *trunkline* rörledning gående från den nordväst-europeiska Nordsjökust rakt genom Nordsjön och upp till injektering i norska kontinentalsockeln (Smeaheia, Luna, och ev. Kinno och Albondigas), se Figur 8.



Figur 8. A. Northern Lights CO₂ infrastruktur via skepp (bild från Northern Lights brochure, 2021). B. Equinors CO₂ Highway Europa (bild från Equinor presentation, 2024).

5.5 LAGRINGSPROJEKT I ISLAND

Koldioxidlagring i mafiska och ultramafiska bergarter, exempelvis i basalt, är i huvudsak en kemisk process där den injekterade koldioxiden reagerar med element (Ca, Mg, Fe) i reservoarbergarten och bildar stabila mineral. Denna typ av koldioxidlagring har genomförts i Island sedan 2012 där de första testinjekteringarna inleddes.

5.5.1 Carbfix

Carbfix-projektet startades upp under 2007 i ett samarbete mellan industri och akademi. Första åren genomfördes metodutveckling och karaktärisering av den basaltiska berggrunden vartefter de första testinjekteringar inleddes under 2012. I projektet tas koldioxiden direkt från den intilliggande kraftanläggning Hellisheiði där man sedan upplöser koldioxiden i färskvatten, som på så sätt redan i detta skede binder koldioxiden, innan den injekteras i den basaltiska berggrunden. Redan inom två år har mer än 95 % av den injekterade koldioxiden mineraliserats²⁴. Den snabba mineraliseringen begränsar därmed behovet av långvarig monitorering och man samlar i stället in monitoreringsdata direkt från reservoarvätskorna²⁵.

Utöver det minskade behovet av monitorering har Carbfix-projektet ytterligare den fördel att kunna infånga och lagra andra lösliga gaser såsom svavelväte (H₂S) som också reagerar med reservoarbergarten och bildar stabila mineral under samma process som koldioxiden.

Coda

CODA-terminalen är en landbaserad lagringsanläggning i Straumsvík i sydvästra Island som planerar ta emot koldioxid med båt från norra Europa för därefter att injektera koldioxiden på plats i områdets basaltiska berggrund. Terminalen förväntas

²⁴ (Matter, o.a., 2016)

²⁵ (Ratouis, o.a., 2022)

bli klar för första fas 2028 med kapacitet för 0,7 Mt koldioxid årligen, följd av nästa fas 2030 med kapacitet för 1,4 Mtpa, och efterföljande fas 2031 med kapacitet för 2,1 Mtpa, och därefter uppnå full skala 2032 där anläggningen planeras ha kapacitet att ta emot och lagra 3 miljoner ton koldioxid årligen.

5.6 LAGRINGSMÖJLIGHETER I SVERIGE

Geologisk lagring av koldioxid är än så länge inte möjligt i Sverige. Åtta potentiella lagringsplatser har dock identifierats och analyserats sedan tidigare^{26,27,28} men för att säkerställa en effektiv och säker lagring behöver de identifierade lagringsenheternas lämplighet verifieras genom moderna undersökningar förutom att en rad regulatoriska hinder måste undanröjas. Det är alltså en del arbete som återstår innan svenska lagringsmöjligheter eventuellt kan utnyttjas²⁹.

I SGU:s (Sveriges geologiska undersökning) pågående regeringsuppdrag (2023–2025) undersöks tidigare identifierade lagringsområden genom nya seismiska undersökningar och borrhål. Dessa undersökningar ska verifiera tidigare resultat genom moderna data (seismik och borrhålsundersökningar) avseende geologiska förutsättningar och lagringsparametrar i identifierade reservoarer och takbergarter, samt tektonik och förkastningsaktivitet för potentiella risker avseende läckagevägar, och på bakgrund av detta ge rekommendationer till regeringen kring potentiell lagring av koldioxid i Sverige.

Geologiska lagringsmöjligheter i Sverige undersöks för två typer av reservoarbergarter, porösa sandstenar representerad av salina akviferer, och porösa mafiska bergarter, exempelvis basalt. Nedan redogörs för de resultat man hittills har uppnått gällande potentiella lagringsmöjligheter i Sverige. Undersökningar av salina akviferer har i huvudsak genomförts av SGU, och undersökningar i mafiska bergarter har i huvudsak genomförts av LTU, Luleå tekniska universitet.

5.6.1 Salina akviferer

Tidigare studier har identifierat, kartlagt och analyserat åtta potentiella lagringsenheter i salina akviferer i södra Sverige^{30,31}, se Figur 9. Två geografiska områden är intressanta avseende geologisk lagring i salina akviferer i Sverige, sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne med intilliggande havsområde. I sydöstra Östersjön har tre potentiella lagringsenheter identifierats (Viklau, När, och Faludden), men i senare undersökningar pekar nya borrhålsundersökningar på att de två nedra (Viklau och När) enheterna inte har tillräcklig hög porositet och permeabilitet för att kunna vara lämpliga som framtida lagringsenheter för koldioxid³².

Det återstår då sex potentiella lagringsenheter i södra Sverige som sannolikt kan vara lämpliga för geologisk lagring av koldioxid, och som tillsammans bedöms ha en teoretisk lagringskapacitet för uppemot 2,4 Gt CO₂.³³ Dessa behöver dock fortsatt

²⁶ (Mortensen, 2014)

²⁷ (Mortensen, 2016)

²⁸ (Mortensen, 2017)

²⁹ (Mortensen & Sopher, 2021)

³⁰ (Mortensen G. , 2014)

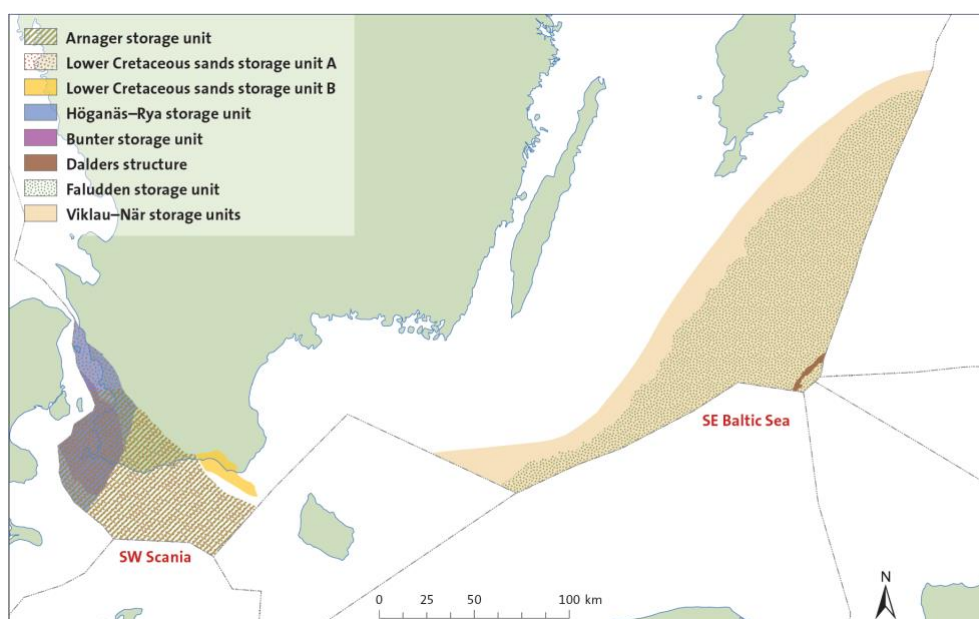
³¹ (Mortensen G. , 2016)

³² (SGU, 2025)

³³ (Mortensen G. , 2014)

undersökas avseende deras lämplighet som koldioxidlager samtidigt som ett antal regulatoriska hinder behöver undanröjas innan dessa kan nyttjas.

När i tiden de svenska akvifererna eventuellt kommer kunna användas som inhemska koldioxidlager beror på flera saker, bl.a. om de bedömda geologiska förutsättningarna visar sig hålla, en ändring av Helsingforskonventionen som tillåter geologisk lagring av koldioxid, att koldioxidlager inte står i konflikt med andra intresseområden såsom Natura 2000, internationell dialog och samarbete gällande bl.a. gränsöverskridande lagringsformationer, och att lagring på land kan tillåtas och därmed både förenkla och minska kostnader för injektering och monitorering av koldioxid. Avseende sydöstra Östersjön behövs tillika förtydligande i offshore-direktivet gällande hantering av eventuella olje- och gasfyndigheter, samt ett tillägg i CCS-direktivet som hanterar CO₂-injektering i geologisk formation som har sin utbredning till ett icke-EU land³⁴.



Figur 9. Identifierade potentiella lagringsenheter i Sverige (Mortensen 2014).

5.6.2 Mafiska bergarter

Lagring i mafiska bergarter (exempelvis basaltisk berggrund) genomförs numera i Island, och liknande metoder och förutsättningar undersöks av Luleå tekniska universitet (LTU) i projektet INSURANCE. Inom INSURANCE-projektet ligger fokus på infångningen av koldioxid och hur denna kan göras mer energieffektiv och därmed till en lägre kostnad. Ytterligare fokus är på undersökning av potentialen för landbaserad geologisk lagring av koldioxid i basaltisk berggrund i Sverige och där man bland annat har undersökt ett tiotal basaltiska bergarters lämplighet för lagring av koldioxid. Resultaten från projektet kommer publiceras i början av 2026.

³⁴ (Mortensen & Sopher, 2021)

6 Policy, regelverk och standardisering

För att bio-CCS ska kunna implementeras i fjärrvärmesektorn krävs tydliga och fungerande regelverk. Projektet har analyserat centrala delar av EU:s klimatpolitik, utsläppshandel, certifiering, standardisering och möjligheterna att allokera koldioxid. Avsnittet är inte tänkt att ge en heltäckande analys utan är fokuserat på några särskilda studier som gjorts inom projektet.

6.1 CCS I UTSLÄPPSHANDELN

CCS är en integrerad och erkänd del av EU ETS men omfattar endast fossil koldioxid. Systemet gör det möjligt att slippa överlämna utsläppsrätter om vissa villkor är uppfyllda, såsom en fullständig CCS-kedja (infångning, transport och lagring), att lagringen uppfyller EU:s CCS-direktiv och att utsläppsrätter överlämnas för eventuellt koldioxidläckage under transporten. Notera att utsläppsrätter ska överlämnas även för biogen koldioxid som läcker ut vid transport.

En viktig uppdatering sedan etapp 1 av Energiforsks projekt Bio-CCS i fjärrvärmesektorn är att definitionen av transport av koldioxid har utvidgats. Det då gällande utsläppshandelsdirektivet inkluderade endast rörledningstransport. I det uppdaterade direktivet har den nya termen koldioxidtransportsystem introducerats. Det innebär att transportörer av koldioxid blir tillståndspliktiga inom ETS och som ovan nämnts att alla koldioxidutsläpp under transporten räknas som fossila, oavsett ursprung.

En ytterligare nyhet i det reviderade ETS-direktivet, som visserligen snarast berör CCU, gäller permanent inlagring av koldioxid i produkter. I det uppdaterade direktivet behöver inte utsläppsrätter överlämnas för fossil koldioxid som aktivt bundits in permanent i vissa godkända slutprodukter. De godkända slutprodukterna är vissa mineralkarbonater som används i byggindustrin.

6.2 HANTERING AV NEGATIVA UTSLÄPP I EU-REGELVERKEN

För att uppnå EU:s klimatmål om nettonollutsläpp senast år 2050 kommer det sannolikt krävas stora mängder nya industriella metoder för att ta upp CO₂ från atmosfären. Trots att det endast är 25 år kvar är det dock fortfarande inte möjligt att tillgodoräkna sig industriella CO₂-upptag som inte omfattas av sektorerna för markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (LULUCF)³⁵. Den enda EU-policy som hittills ger direkt stöd till införandet av nya industriella kolsänkor är EU:s innovationsfond.

Detta avsnitt sammanfattar en analys som Linköpings Universitet gjort av olika EU-aktörers policyförslag och ståndpunkter kring integrering av nya industriella metoder för upptag och lagring av CO₂ i EU:s klimatpolitiska ramverk. För att belysa aktörernas ståndpunkter och föreslagna lösningar analyseras material från två offentliga samråd som genomförts av EU-kommissionen: ett om klimatmålet för 2040³⁶ och ett om

³⁵ (Europeiska kommissionen, 2024a)

³⁶ (Europeiska kommissionen, 2024b)

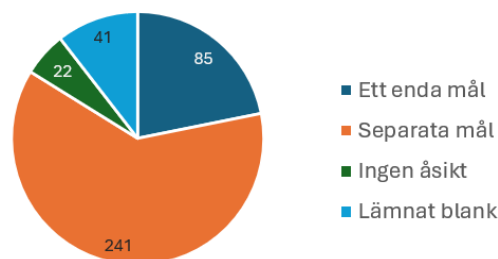
förordningen CRCF (certifiering av CO₂-upptag). Totalt ingick över 390 yttranden från icke-privatpersoner i analysen, varav 64 bedömdes som särskilt relevanta. Dessutom ingick enkätsvar från samtliga aktörer rörande frågor som är relevanta för stöd till bio-CCS inom EU:s klimatpolitik.

Fyra centrala frågeområden som alla har inverkan på stödet till bio-CCS i policy identifieras och analyseras;

- Rapportering av CO₂-upptag i förhållande till EU:s klimatpolitiska mål
- Residualutsläpp
- Integrering av EU ETS med andra klimatpolitiska pelare och handelssystem
- Avskiljning och användning av CO₂ (CCU) i EU:s klimatpolitiska ramverk

6.2.1 Rapportering av CO₂-upptag i förhållande till EU:s klimatpolitiska mål

Det råder delade meningar om hur negativa utsläpp ska föras in i EU:s klimatomål, se Figur 10. De flesta av aktörerna (62%) förespråkar separata mål för utsläppsminskning, naturbaserade upptag och industriella upptag. Andra aktörer (22%) vill se ett enda mål där CO₂-upptag betraktas tillsammans med faktiska utsläpp.



Figur 10. Hur ska klimatomålen rapporteras? Aktörernas svar på frågan "Hur anser du att koldioxidupptag bör betraktas för att EU ska nå sitt klimatomål för 2040?" De fullständiga svarsalternativen på frågan var: Ett enda mål = "Koldioxidupptag bör betraktas tillsammans med faktiska utsläpp av växthusgaser. Det räcker därför att bara ha ett enda "nettoutsläppsmål" för 2040 för att fastställa växthusgasernas bana mot klimatneutralitet senast 2050 på ett kostnadseffektivt sätt. Separata mål = "Det är bättre att ha ett mål för att minska utsläppen av växthusgaser, ett mål för naturbaserade koldioxidupptag och ett mål för industriella upptag med permanent lagring." Ingen åsikt = "Ingen åsikt / Jag har inte tillräckligt med information för att göra en bedömning." Observera att det totala antalet svar på enkäten var N = 903 och att denna representation visar de icke-privatpersoner som svarade (N = 389).

Aktörer från alla sektorer förespråkar i allmänhet någon form av integrering av kolupptag i EU:s klimatpolitiska ram. Hur detta ska ske råder det dock delade meningar om. En del aktörer från industrin vill ofta säkra möjligheten att kompensera kvarvarande utsläpp med negativa utsläpp, särskilt när det gäller processer där utsläppen är svåra att undvika. Det gäller t.ex. inom cementindustrin. Energibolagen är mindre direkta med sina åsikter. Vattenfall och Stockholm Exergi föreslår dock att alla pelare hålls separata, men att deras respektive bidrag till nettonollmålet summeras. Skogsindustrin vill undvika att bio-CCS används för att kompensera fossila utsläpp, då det riskerar att snedvrider konkurrensen gentemot biomaterial. De förespråkar att bio-CCS redovisas inom LULUCF-sektorn.

Flera lyfter att ett alltför lågt pris på utsläppsrätter inom EU ETS talar emot att integrera negativa utsläpp, då priserna inte kommer att räcka för att skapa incitament för bio-CCS. Därför kommer ändå någon form av ytterligare stöd att krävas.

6.2.2 Residualutsläpp

Flera aktörer nämner att utsläppsminskningar måste ha företräde framför upptag och att det någon gång under vägen mot nollutsläpp måste fattas ett beslut om vad som ska betraktas som residualutsläpp. Flera aktörer efterlyser modeller för hur residualutsläpp ska fastställas vetenskapligt.

Två aspekter av aktörernas syn på residualutsläpp är anmärkningsvärda: Den oundvikliga karaktären hos dessa utsläpp och tron på förmågan att korrekt modellera svåråtgärdade utsläpp. Vad gäller den första verkar industrins aktörer överens om att processrelaterade utsläpp som inte är möjliga att få bort genom att byta bränsle ingår där. Det nämns dock sällan att dessa i många fall skulle kunna hanteras med CCS. När det gäller modellering av vilka svåra utsläpp som får finnas kvar ett visst målår finns få rekommendationer från aktörerna. Ett förslag är dock att fastställa utsläppsutrymmet som återstår efter införandet av bästa tillgängliga teknik (BAT).

6.2.3 Integrering av negativa utsläpp i klimatpolitiska pelare och handelssystem

Aktörer framför olika åsikter kring om och hur negativa utsläpp bör kopplas till andra EU-pelare och handelssystem. Vissa ser fördelar med starkare integration, såsom ökad flexibilitet och kostnadseffektivitet. Andra är mer försiktiga och lyfter att åtgärdskostnaderna kan variera mycket mellan olika sektorer, t.ex. mellan de som ingår i ETS1 och ETS2. Ingen aktör motsätter sig koppling till handelssystem utanför EU, t.ex. UK ETS.

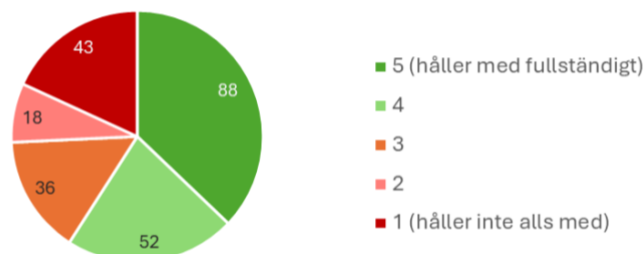
Om upptag ska integreras i utsläppshandeln så bedömer EU-kommissionen att det kommer att krävas ytterligare finansiering eftersom priset på utsläppsrätter inte kommer att vara tillräckligt högt. Samtidigt kvarstår frågan om hur negativa utsläpp ska redovisas mot klimatmålen. En annan lösning är att inkludera dem i ESR-sektorn med fördelning baserat på t.ex. BNP, historiska utsläpp eller upptagspotential. Negativa utsläpp skulle även kunna integreras i LULUCF-sektorn, vilket skulle ge skogsägare flexibilitet att prioritera starkt naturligt kolupptag eller bio-CCS med potentiellt ökad avverkning. En annan möjlighet är att skapa en separat fjärde pelare med egna mål och styrmedel.

6.2.4 Avskiljning och användning av CO₂ (CCU)

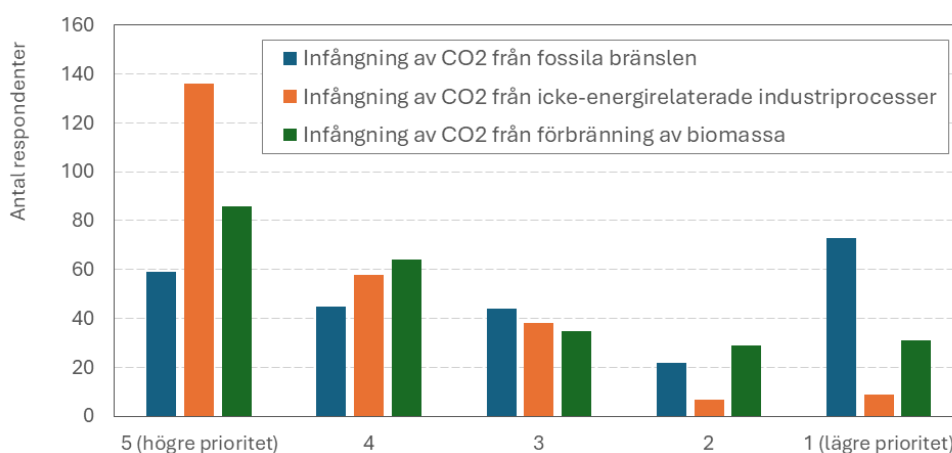
Många aktörer, framför allt från industrin, vill att även avskiljning och användning av CO₂ (CCU) inkluderas i EU:s utsläppshandel, se Figur 11. Detta bör särskilt gälla CO₂ från sektorer med svårminskade utsläpp, såsom cement- och kemikalieindustrin. CO₂ från förbränning av fossila bränslen ges däremot lägre vikt (Figur 12). Flera aktörer lyfter vikten av att utsläpp redovisas korrekt för att undvika dubbelräkning, speciellt när CO₂ används i produkter med tillfällig lagring.

Studien visar att det finns några högljudda CCU-förespråkare som vill ändra redovisningsreglerna så att även inbindning av fossil CO₂ i kortlivade produkter godkänns (t.ex. bränslen och plastprodukter). De främjar CO₂-hantering istället för utfasning av fossila bränslen. En annan grupp är mer selektiva och förespråkar användning av CCU främst för att ta itu med processrelaterade utsläpp. I översynen av EU ETS år 2026 ska Kommissionen bland annat bedöma om redovisningssystemet behöver ändras avseende CCU, för att undvika dubbelräkning. Översynen skulle kunna resultera i att ansvaret överförs från den som släpper ut inom ETS till den som

släpper ut inom ESR eller ETS2. Detta skulle troligen minska efterfrågan på negativa utsläpp för att motverka residualutsläpp inom ETS.



Figur 11. Aktörernas åsikter om ifall CCU som omfattar CO₂ från sektorer där det är svårt att minska utsläppen bör ingå i handeln med utsläppsrätter. Svar på frågan: "I EU:s handel med utsläppsrätter bibehålls skyldigheten att överlämna utsläppsrätter för utsläpp som avskiljs och används (avskiljning och användning av koldioxid) i icke-permanenta produkter. Denna aspekt av handeln med utsläppsrätter bör anpassas för sektorer med kvarstående utsläpp som är svåra att minska och för sektorer som kräver en kolrävara (till exempel kemikalier, massa och papper) för att främja koldioxidcirkularitet." Notera: N = 408 men "lämnat tom" och "jag vet inte" visas inte.



Figur 12. Hur aktörer prioriterar infångning av CO₂-utsläpp från olika källor. Den ursprungliga frågan innehöll sju källor, de tre mest relevanta källorna för den här rapporten visas här. Notera: N (blå) = 243; N (orange) = 248; N (grön) = 245, men "lämnas tom" och "jag vet inte" visas inte.

6.2.5 Diskussion och vägval

Analysen av aktörspreferenser pekar på att en ny klimatpolitisk arkitektur kan behöva övervägas. Antingen genom att skapa en fjärde pelare med eget mål för negativa utsläpp, eller genom att tillåta att negativa utsläpp räknas inom EU ETS – men på ett sätt som inte underminerar utsläppsminskningarna. Möjligheten att använda CRCF-certifiering som ett filter för kvalitet och transparens lyfts av flera aktörer, men även här finns kritik mot dubbelräkning och oklarheter kring hur indirekta utsläpp hanteras.

Slutligen visar analysen att det finns stor enighet om att negativa utsläppstekniker kommer att vara avgörande för att nå klimatmålen, men stor oenighet om hur dessa ska integreras. Positionerna sträcker sig från full utbytbarhet (fungibilitet) mellan utsläpp och upptag, till strikt åtskillnad, med olika grader av villkorlighet. Det saknas i dagsläget ett gemensamt ramverk som hanterar dessa konflikter.

6.3 ALLOKERING AV KOLDIOXID VID CCS OCH CCU

En fråga som lyfts under projektet är huruvida det är regelmässigt möjligt att välja vilken typ av koldioxid – biogen eller fossil – som ska avskiljas och antingen lagras (CCS) eller användas (CCU). Två delrapporter har tagits fram och under projektets gång levererats till finansörerna. Detta avsnitt är en sammanfattning av delrapporterna och bygger på analys och tolkning av regelverk samt intervjuer och mailkorrespondens med Naturvårdsverket och andra intressenter. De regelverk som är mest relevanta är EU-direktivet om förnybar energi (RED), utsläppshandeln (EU ETS) samt förordningen om mätning och rapportering (MRR).

6.3.1 Varför är allokering relevant?

För avfallsförbränning med blandade koldioxidströmmar är frågan om allokering relevant till exempel vid:

1. Avskiljning och lagring eller användning av en delmängd av koldioxid, medan resten släpps ut (detta kommer att gälla även när man planerar att maximera infångningen eftersom det är realistiskt att uppnå 100%).
2. Avskiljning av koldioxid för att sälja till flera kunder för CCU
3. En kombination av CCS och CCU

Det tredje exemplet har flera fjärrvärmeföretag lyft som intressant för dem. De skulle då vilja avskilja och använda den biogena koldioxiden till CCU medan koldioxiden av fossilt ursprung avskiljs och lagras (CCS). Viktiga skäl till att man i detta fall skulle vilja allokera är dels att ge en CCU-aktör tillgång till biogen koldioxid för produktion av förnybart elektrobränsle, dels att slippa hantering av utsläppsätter vid överföring av koldioxid till en CCU-aktör. Genom allokeringen vill fjärrvärmeföretaget också slippa lösa finansiering av negativa utsläpp vid lagring av den blandade koldioxiden.

6.3.2 Allokering är inte tillåtet enligt utsläppshandeln

Allokering visar sig inte vara kompatibel med EU ETS (och MRR), trots att klimatnyttan är densamma oavsett om allokering skett eller inte. Redovisningen ska fortsatt baseras på fysiskt uppmätt biogen och fossil koldioxid. Däremot tillåts nu vissa specifika undantag och avdrag, framför allt kopplade till så kallade "nollräknade bränslen". Nollräknade bränslen uppfyller särskilda kriterier och räknas då som nollutsläpp vid förbränning, varför utsläppsätter ej behöver överlämnas. Hållbara biobränslen (enligt RED) är nollräknade bränslen, men det gäller även så kallade RFNBO (förnybara bränslen av icke-biologiskt ursprung).

RFNBO är en bränslekategori som bland annat omfattar CCU-bränslen som uppfyller särskilda krav på förnybar el³⁷ samt koldioxid. Biogen koldioxid från hållbara biobränslen är godkänd. Även fossil koldioxid godkänns under en övergångsperiod³⁸ om det resulterande CCU-bränslet minskar växthusgasutsläppen med minst 70% och att den sista anläggning som ingår i utsläppshandeln överlämnar utsläppsätter. De

³⁷ Elområdet behöver ha >90% förnybar el eller låg utsläppsintensitet + uppfylla krav på additionalitet & tidsmässig korrelation. Alternativt godkänns direktanslutning eller PPA med ny förnybar el.

³⁸ Till 2036 är fossil koldioxid från elproduktionsanläggningar godkänd, medan fossil koldioxid från industriella anläggningar är godkänd fram till 2041. I samtliga fall måste användning av det resulterande CCU-bränslet bidra till att utsläppen minskar med minst 70%.

flesta anläggningar för produktion av CCU-bränslen kommer att ingå i utsläppshandeln, varvid de kommer att överlämna utsläppsrätter. Om ett RFNBO inte lever upp till kraven (bl.a. på utsläppsminskning) så räknas **hela** bränslet som fossilt, även om det alltså innehåller en liten eller stor andel biogena kolatomer.

Ovan innebär alltså att koldioxid av såväl biogent som fossilt ursprung, till exempel från avfallsförbränning, kan ingå i förnybara CCU-bränslen (RFNBO). Detta gäller under en övergångsperiod (2036/2041) och förutsatt att den sista ETS-anläggningen överlämnar utsläppsrätter för den fossila andelen och att krav på el, biobränslens hållbarhet samt utsläppsminskning vid användning av CCU-bränslet uppfylls.

6.4 EU-CERTIFIERING AV KOLSÄNKOR (CRCF)

I slutet av 2022 publicerade EU-kommissionen ett förslag till ramverk för certifiering av kolsänkor (CRCF, Carbon Removal Certification Framework). Projektet levererade då en sammanfattning och analys av förslaget. 27 november 2024 publicerades så den slutliga förordningen (2024/3012), vars innehåll sammanfattas i detta avsnitt.

Certifieringen ska underlätta för EU att uppnå sitt klimatmål till 2050. Kolsänkor som certifieras enligt förordningen får därför endast bidra till EU:s klimatmål och ej överföras till länder utanför EU. Certifieringen ska vara frivillig åtminstone inledningsvis, men kan bli styrande på sikt. Certifieringen inkluderar följande aktiviteter:

- Permanenta upptag (t.ex. bio-CCS eller biokol)
- Carbon farming (t.ex. förbättrad jordbruks- och skogsförvaltning)
- Lagring i produkter (t.ex. träbyggmaterial)

Eftersom klimatnyttan och permanensen skiljer sig åt mellan dessa aktiviteter ska de certifierade enheterna också vara åtskilda. Kolsänkor måste leva upp till ett antal kriterier (förkortas QU.A.L.ITY), vilket för bio-CCS bland annat innebär krav på kvantifiering av kolsänkans klimatnytta, additionalitet, långsiktighet/ permanens samt hållbarhet. EU-kommissionen har också möjlighet att ta fram delegerade akter kring exempelvis mer detaljerade kriterier och metodik. Senast 2028 ska ett EU-gemensamt register etableras för att registrera, spåra och säkerställa transparens i hanteringen av certifierade enheter.

CRCF fastställer alltså krav för att certifiera olika kolsänkor, men går inte in i detalj på hur de certifierade enheterna kan användas på kort och lång sikt. Möjliga framtida användningsområden skulle potentiellt kunna vara inom utsläppshandeln, för frivilliga klimatåtaganden, i hållbarhetsrapportering och i internationell handel enligt Parisavtalets artikel 6. Hur de certifierade enheterna eventuellt kan användas för klimatpåståenden bör förtydligas när det slutliga direktivet om miljöpåståenden (Green Claims Directive) är klart. Det är också osäkert hur befintliga frivilligmarknader för negativa utsläpp kan påverkas, särskilt de som tillåter handel med länder utanför EU.

6.5 STANDARDISERING

Utvecklingen inom standardisering för CCS är snabb och dynamisk. I takt med att intresset för negativa utsläpp växer och tekniker som bio-CCS får allt större relevans, etableras nya tekniska kommittéer och standardiseringsinitiativ på både global,

europaisk och nationell nivå. I projektet har en analys gjorts av en mängd standarder av direkt och indirekt relevans för CCS i fjärrvärmesektorn. En kort sammanfattning presenteras i detta avsnitt. Med direkta standarder avses standarder som utvecklats specifikt för CCS, medan indirekta standarder avser standarder som har påverkan på CCS men annat sätt, t.ex. genom att ställa krav på rördesign eller energieffektiv sjötransport. Informationen har hämtats från internationella standardiseringsorgan, svenska SIS-kommittéer samt öppen informationssökning.

6.5.1 Standardisering inom ISO, CEN och SIS

På global nivå finns ISO/TC 265, som sedan 2016 tagit fram ett antal grundläggande standarder för CCS. Trots detta är det globala engagemanget relativt svagt, med endast 27 aktiva medlemsländer. För att tillgodose europeiska behov bildades CEN/TC 474 under våren 2024, där Nederländerna haft en ledande roll. Parallellt inrättades SIS/TK 640 i Sverige för att spegla och påverka arbetet på europeisk nivå.

ISO har publicerat ett stort antal relevanta standarder, bland annat ISO 27913 (transport i rörledning) och ISO 27914 (geologisk lagring). Till dessa tillkommer ett antal tekniska rapporter som behandlar övergripande frågor, t.ex. ISO/TR 27921 om koldioxidströmmars sammansättning och ISO/TR 27925 om flödessäkring. Dessa dokument kompletteras med utgåvor under utarbetande, där nya versioner av befintliga standarder planeras.

SIS har parallellt publicerat svenska översättningar av flera ISO-standarder, bl.a. SS-ISO 27919-1 och -2 som behandlar prestandautvärdering av post-combustion-teknik i kraftverk. Det rör sig sammanlagt om ett dussintal dokument, inklusive både standarder och tekniska rapporter, som återspeglar det pågående arbetet inom ISO/TC 265.

Utöver dessa finns även andra ISO-standarder med direkt koppling till CCS, såsom ISO 14064-serien för växthusgaser och ISO 17349 för hantering av koldioxid i offshoremiljöer. CEN/TC 474 har ännu inga publicerade standarder men arbetar för närvarande med prEN ISO 27914 för geologisk lagring av koldioxid.

6.5.2 Tredjepartsstandarder och certifieringssystem

Amerikanska Verra utvecklar och administrerar standarder för frivillig klimatkompensation och hållbar utveckling. De är bland annat initiativtagare till "Verified Carbon Standard" (VCS), vilket är världens mest använda standard för frivilliga kolkrediter. De har tagit fram en rad moduler för CCS, där olika processer för infångning, transport och lagring av koldioxid behandlas. I april 2025 släpptes en modul för bio-CCS (VMD0059 CO₂ Capture from Bioenergy), som bör göra det möjligt att utfärda krediter för negativa utsläpp via Verra.

DNV har utvecklat riktlinjer för teknisk kvalificering, pipelines och certifiering av geologiska lagringsplatser, samt publicerat flera rapporter om riskhantering och HSE-frågor.

6.5.3 EU-reglering och internationella ramverk

EU-förordningen CRCE, som beskrivs i separat avsnitt, kan på sätt och vis också liknas vid en standard då den ställer krav på hur kolsänkor kan certifieras. Hur det kommer att påverka befintliga marknader, såsom Verra, är ännu oklart.

6.5.4 Diskussion och slutsatser

Flera standarder från olika organisationer tangerar varandra i innehåll. En visuell analys visar överlapp mellan ISO, Verra och DNV. SIS-standarder betraktas här som identiska med ISO:s och har därför uteslutits i kartan. Överlappet rör främst terminologi, transport, lagring samt kvantifiering och verifiering av utsläpp. Viss risk för dubbelreglering och konkurrens mellan system kan inte uteslutas.

Svenska fjärrvärmeaktörer befinner sig i ett skede där investeringar i bio-CCS planeras eller påbörjas, men det råder fortfarande osäkerhet om vilka standarder som bör följas. De senaste svenska standarderna inom SIS/TK 640 släpptes i juni 2024, men standarder från CEN/TC 474 saknas fortfarande. Det går inte att identifiera enskilda nyckelstandarder som "viktigast"; varje verksamhet måste göra en egen bedömning baserat på teknisk inriktning och tillämpningsområde.

Det är avgörande att fjärrvärmesektorn kontinuerligt följer utvecklingen och håller sig uppdaterad om nya standarder och riktlinjer, för att säkerställa att investeringar i CCS blir kompatibla med framtida certifieringskrav och handelssystem för negativa utsläpp.

6.6 STATUS FÖR IDENTIFIERADE REGELVERKSHINDER FRÅN ETAPP 1

I etapp 1 av Energiforskprojektet "Bio-CCS i fjärrvärmesektorn" identifierades ett antal regelverkshinder som då påverkade möjligheten att implementera bio-CCS. I tabellen nedan sammanfattas dessa samt bedömd status idag (2025).

Tabell 4. Status kring regelverkshinder som identifierades i etapp 1 av projektet^{39,40}

Regelverk	Hinder identifierat 2021-2022	Status 2025
Utsläppshandeln (EU ETS och MRR)	Rapportering och tillgodoräknande av bio-CCS	EU ETS omfattar fortsatt endast fossil koldioxid, men MRR innehåller separata redovisningskrav för biogen CO ₂ . Negativa utsläpp omfattas ännu inte i varken EU ETS eller andra EU-pelare, men EU-kommissionen utreder frågan.
Utsläppshandeln (EU ETS)	Läckagekrav för biogen CO ₂ (ETS)	Läckage av biogen CO ₂ i samband med CCS omfattas av utsläppsrapportering, vilket alltså ger likabehandling med fossil CO ₂ . Detta gäller även läckage vid transport.
Londonprotokollet	Gränsöverskridande CO ₂ -transport	Londonprotokollets ändring har ännu inte trätt i kraft; bilaterala avtal krävs fortsatt. Sverige har tecknat bilaterala överenskommelser med Norge och Danmark. Energimyndigheten har också fått uppdrag att ta fram liknande avtal med andra länder (t.ex. UK och NL).
Helsingforskonventionen (HELCOM)	Lagring i Östersjön	HELCOM har tidigare tolkats som att den förbjuder CO ₂ -lagring i Östersjön; ingen resolution eller ändring har här antagits. Då ändringar kräver godkännande från samtliga medlemsländer i konventionen och Ryssland uteslutits från medverkan är det just nu inte möjligt att göra några förändringar. Enligt uppgift ser Energimyndigheten nu över tolkningen av konventionen för att klargöra om det föreligger förbud eller inte mot lagring.
CCS-direktivet	Lagring utanför EU:s territorium	Direktivet förbjuder geologisk lagring utanför unionens territorium. Lagring i t.ex. Norge är dock möjligt då de infört CCS-direktivet i nationell lagstiftning.

³⁹ (Fridahl, Lundblad, & Nehler, 2022)

⁴⁰ (Sköldberg, o.a., 2022)

Offshoredirektivet	Offshoredirektivet och fossilfynd	Olje- och gasfynd regleras i Offshoredirektivet. Direktivet omfattar alltså potentiella fossilfynd vid koldioxidlagring, vilket behöver beaktas vid eventuell undersökning och anläggande av svenska lagringsplatser.
Miljöbalken, Minerallagen	Fossilförbud och CCS	År 2022 infördes ett förbud mot fossilutvinning i Miljöbalken respektive Minerallagen. Vid CCS-relaterad borrhning kan man potentiellt stöta på fossila bränslen och om inte undantag ges för CCS-relaterade aktiviteter kan det hindra utveckling av svenska koldioxidlager.
Konventionen om biologisk mångfald (CBD)	CBD-moratorium för bio-CCS	Bio-CCS är inte uttryckligen undantaget från geoengineering-moratoriet enligt CBD. Energimyndighetens tolkning är att bio-CCS omfattas av moratoriet om det används i stor skala och bedöms kunna påverka biologisk mångfald, t.ex. genom ökad biobränsleanvändning. Det är ett skäl till att hållbarhetsbesked för biobränslen krävs i den omvända auktionen.

7 Finansiering

Finansieringen av CCS i fjärrvärmesektorn är avgörande för att realisera utsläppsminskning och negativa utsläpp i stor skala. Avsnittet beskriver befintliga och möjliga framtida finansieringslösningar för CCS vid förbränning av biobränslen respektive avfall. Både offentliga och privata möjligheter beskrivs samt svenska respektive på EU-nivå. Slutsatsen är tydlig: det behövs kompletterande och långsiktiga finansieringsmöjligheter/styrmedel.

Hur CCS i fjärrvärmesektorn kan finansieras beror i viss mån på om koldioxiden är av fossilt eller biogent ursprung. Vissa finansieringslösningar fungerar för båda, medan vissa är specifikt inriktade. Detta blir särskilt utmanande för CCS vid avfallsförbränning där koldioxiden är av både fossilt och biogent ursprung. I detta avsnitt beskrivs befintliga och tänkbara framtida finansieringsmöjligheter, dels olika typer av styrmedel, dels olika riktade finansieringslösningar. Avsnittet inleds med en beskrivning av olika typer av finansieringslösningar och avslutas med en diskussion. De finansieringsmöjligheter som omfattas sammanfattas i Tabell 5.

Tabell 5. Sammanfattning av finansieringsmöjligheter som beskrivs i avsnittet

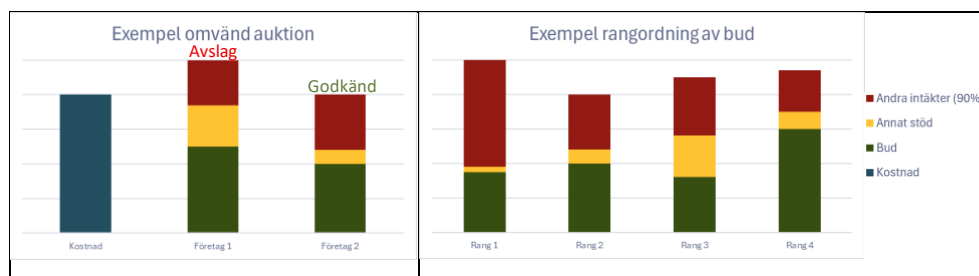
Finansieringsexempel	SE/EU	Finns idag (Sverige)	Biogen CO ₂	Fossil CO ₂
OFFENTLIGT STÖD/STYRMEDEL				
Omvänd auktion för bio-CCS	SE	X	X	
Investeringsstöd (Industrikivet, EU:s Innovationsfond)	SE/EU	X	X	X
Kvotplikt	SE/EU		X	
Återtagskrav (Carbon takeback obligations)	SE/EU		X	X
Utökat producentansvar	SE/EU		X	X
Differenskontrakt	SE/EU		(X)	X
Utsläppshandeln (EU ETS) idag	EU	X		X
Integrering av negativa utsläpp i EU ETS	EU		X	
Handelssystem för koldioxidupptag ("EU RTS")	EU		X	
FRIVILLIGMARKNAD/PRIVAT				
Krediter för negativa utsläpp	EU/globalt	X	X	
Sälja premiumprodukter	SE	X	X	X
Finansiering via mottagningsavgifter för avfall	SE			X

7.1 OMVÄND AUKTION FÖR BIO-CCS

Sveriges regering har valt att stödja bio-CCS genom omvänd auktionering. Stödet hanteras av Energimyndigheten som kan utdela 36 miljarder 2026-2046⁴¹. Syftet med omvänd auktion är att hitta aktörer som kan samla in, transportera och geologiskt lagra biogen koldioxid till lägst pris. Den första omvända auktionen utlystes i slutet av 2024⁴². Sex anbud inkom och i början av 2025 offentliggjordes att en aktör (Stockholm Exergi) vunnit auktionen och beviljats 20 miljarder för avskiljning och lagring av totalt drygt 11 miljoner ton under 15 år.

Förordningen om statligt stöd till avskiljning, transport och geologisk lagring av koldioxid med biogent ursprung fastställer krav för omvända auktionen⁴³. Bland annat fastställs att bud tillsammans med annat offentligt stöd och 90 procent av andra intäkter inte får överstiga kostnaden för projektet, se exempel i Figur 13. Anbud måste vidare utlova lagring av minst 50 000 ton biogen koldioxid per år och projektet får inte ha påbörjats innan ansökan skickats in och godkänts⁴⁴. Däremot måste lagring påbörjas inom tre år efter godkänt bud⁴⁵ och vikt läggs vid en realistisk genomförandeplan. Projekt med lägst anbudspris summerat med annat stöd rankas högst. Även projekt som erhållit stora mängder annat stöd kan alltså få en låg rangordning om deras kostnad är mycket hög.

Enligt Konkurrensverket ger omvänd auktion staten kontroll över volymer och kostnader, fungerar väl där säljaren vet mer om koldioxidpriset än köparen, och gynnar de mest kostnadseffektiva lösningarna⁴⁶. Samtidigt finns risker med svag konkurrens, strategisk budgivning, höga deltagarkrav för företag samt att vissa aktörer kan uteslutas beroende på urvalskriterier.



Figur 13. Till vänster: Exempel där två företag har samma kostnad och söker stöd genom omvänd auktion. Företag 1 får avslag eftersom total intäkt (bud + annat stöd + andra intäkter) överstiger totalkostnaden. Företag 2 godkänns och får även behålla 10% av intäkt från försäljning av krediter. Till höger: Exempel på rangordning av bud. Företaget märkt "Rang 1" rangordnas högst då bud + annat stöd är lägst. Detta trots att totala kostnaden är högre än för övriga. Företaget märkt "Rang 3" har både lägre totalkostnad och skulle innebära lägre kostnad för staten i den omvända auktionen, men får ändå en sämre ranking.

Synpunkter som fjärrvärmebranschen haft på systemet för omvänd auktion har till exempel avsett kravet att lagring ska kunna påbörjas inom 3 år från lagt bud⁴¹, 90%-regeln kring andra intäkter, att det sätt som kostnader ska beräknas gör det svårt för anläggningar med blandade strömmar att delta samt att tidplan och krav för

⁴¹ (Energimyndigheten, 2024)

⁴² (Energimyndigheten, 2024)

⁴³ (Regeringen, 2024)

⁴⁴ (Energimyndigheten, 2024)

⁴⁵ Med viss möjlighet att få förlängning upp till två år.

⁴⁶ (Konkurrensverket, 2022)

genomförandet av utlysningen annonseras i god tid (1-2 år) så att aktörerna får tid och vågar satsa på att utveckla sina projekt till en hög mognadsgrad.

7.2 INVESTERINGSSTÖD

7.2.1 Industriklivet

Industriklivet syftar till att stötta omställningen av svensk industri och är del av EU-initiativet Next Generation EU⁴⁷. Inom Industriklivet är det möjligt att söka investeringsstöd för innovativa projekt med mål att minska utsläpp eller bidra till negativa utsläpp. Omfattningen av Industriklivet kan variera mellan olika år och utlysningar, men har senaste åren haft stort fokus på att minska processindustrins utsläpp och på negativa utsläpp. Företag har kunnat söka stöd för uppskalning och kommersialisering⁴⁸, men inte drift av bio-CCS⁴⁹. Industriklivet har bland annat finansierat en mängd förstudier och genomförandeprojekt kring CCS för utsläppsminskning och negativa utsläpp i fjärrvärmesektorn.

7.2.2 EU:s innovationsfond

EU:s innovationsfond är en av världens största finansieringsprogram för att demonstrera innovativa teknologier med syfte att minska klimatpåverkan, uppnå nettonollutsläpp och skapa god konkurrens. Fonden finansieras genom intäkter från auktionering av utsläppsrätter inom utsläppshandelssystemet (EU ETS). Innovationsfondens storlek är därför beroende av EU ETS-priset och med ett utsläppspris på 75 euro/tCO₂ blir budgeten 40 miljarder euro från 2020 till 2030. Fonden utlyser vart fjärde kvartal mellan 2020 och 2030 nya projektförslag. Projekt väljs ut baserat på klimateffektivitet, innovationsgrad, mognadsgrad, replikerbarhet och kostnadseffektivitet. Två svenska CCS-projekt i fjärrvärmesektorn har hittills beviljats medel från innovationsfonden (Stockholm Exergi och Öresundskraft).

7.3 KVOTPLIKT, ÅTERTAGSKRAV, UTÖKAT PRODUCENTANSVAR

Kvotplikt, återtagskrav och utökat producentansvar liknar varandra och innebär att kostnaden för avskiljning och lagring överförs längre upp i värdekedjan. Ingen av dessa tillämpas idag, men många bedömer de som attraktiva styrmedel eftersom de utgår från principen att förorenaren betalar och därmed att statens kostnad hålls ned.

7.3.1 Kvotplikt

Kvotplikt innebär att företag med koldioxidutsläpp (fossilt ursprung) åläggs att köpa bio-CCS-krediter motsvarande en andel av utsläppen⁵⁰. Denna andel kan ökas över tid. Styrmedlet kan exempelvis appliceras på sektorer som har svårt att minska sina utsläpp eller kommer ha kvarvarande utsläpp långt i framtiden såsom transportsektorn, jordbruk, viss industri och avfallsförbränning. På så sätt finansierar utsläpparna utsläppsminskning i andra sektorer.

⁴⁷ (Energimyndigheten, 2024)

⁴⁸ (Energimyndigheten, 2024)

⁴⁹ (Regeringen, 2023)

⁵⁰ (Johansson, Zetterberg, & Möllersten, 2023), (Energimyndigheten, 2024)

Vid applicering på avfallsbranschen skulle styrmedlet kunna åläggas anläggningar som förbränner avfall som sedan överför kostnaden för krediter högre upp i värdekedjan till de som orsakar att utsläppen sker vid förbränning. Om kostnaden för kvotplikten överförs till de som har rådighet över att plast går till förbränning kan kvotplikt ge incitament för uppströms åtgärder som minskar plastförbränning. Allteftersom plastförbränningen minskar så kommer dock även finansieringsunderlaget för bio-CCS minska. Styrmedlet kan därför åläggas fler sektorer med kvarvarande utsläpp.

Kvotplikt är en mer kostnadseffektiv lösning för staten än omvänd auktion eftersom utsläpparna betalar för bio-CCS. Kvotplikt kan även införas efter en auktion för att öka investeringsunderlaget. Samtidigt når styrmedlet bara nettonollutsläpp om lika mycket biogen koldioxid avskiljs och lagras som den fossila koldioxid som släpps ut. Det kräver alltså särskild utformning för att uppnå nettonegativa utsläpp, t.ex. att de som åläggs med kvotplikt måste bekosta mer bio-CCS än deras motsvarande fossila utsläpp.

7.3.2 Återtagskrav (Carbon takeback Obligations, CTBO)

Vid återtagskrav är det utvinnaren eller importören av fossil råvara (olja, gas, kalksten och kol) som åläggs ansvar att avskilja och lagra koldioxid motsvarande vad fossilråvaran kan ge upphov till. Likt kvotplikt följer återtagskrav principen att förorenaren betalar. Det skulle i praktiken innebära att utvinnaren eller importören åläggs att finansiera CCS, DACCS och/eller bio-CCS-projekt. Till skillnad från många styrmedel som riktar sig mot utsläpp eller efterfrågan, fokuserar återtagskrav på utbudet och introduktionen av fossila produkter på marknaden. Systemet tillåter fortsatt användning av fossila råvaror, men minskar efterfrågan på jungfruliga fossila produkter eftersom priset ökar⁵¹.

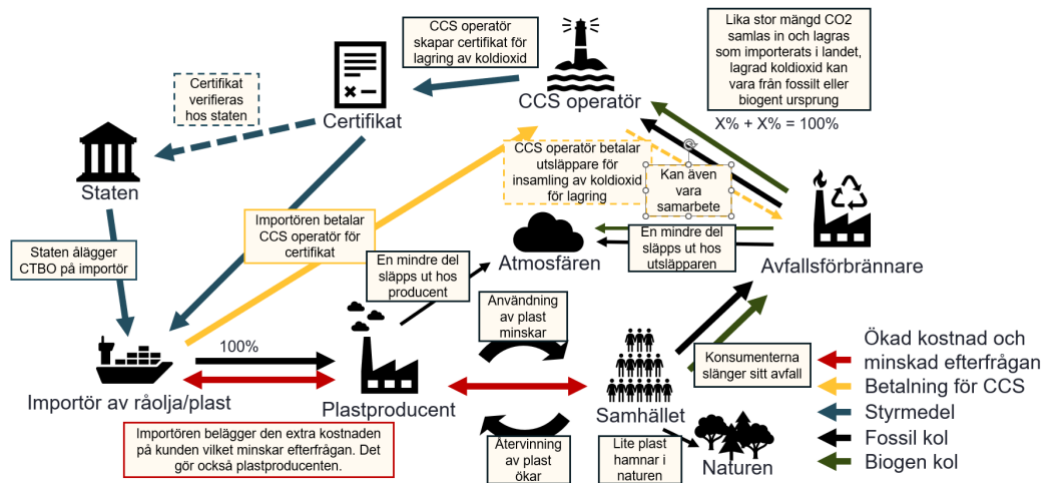
Återtagskrav kan börja på en låg nivå för att successivt öka. Om kravet sätts till att samtliga potentiella utsläpp ska samlas in ett visst år, kan nettonollutsläpp uppnås. Systemet kan utformas på olika sätt. Ålagda företag kan t.ex. uppfylla kravet genom att köpa certifikat, själva lagra utsläpp eller finansiera andra anläggningars CCS. När kravet närmar sig 100 % blir det dock svårt att täcka utsläpp från diffusa källor, varför DACCS eller bio-CCS krävs som komplement. Figur 14 exemplifierar hur återtagskrav teoretiskt skulle kunna appliceras på importören av råolja eller plast i Sverige.

Återtagskrav har fördelar att erbjuda en förutsägbar väg mot nettonollutsläpp med låga administrativa kostnader, där alla aktörer behandlas lika och fossilindustrin integreras i lösningen. Det är enkelt att förstå och kan kombineras med andra styrmedel såsom utsläppshandeln. Genom att tillämpa principen att förorenaren betalar skapas incitament för koldioxidavskiljning och lagring utan att kräva statliga subventioner. Det har stor potential att särskilt driva på utvecklingen av bio-CCS och DACCS om systemet utformas med högt krav på återtag.

En nackdel med återtagskrav är att det inte är tillräckligt som ensamt styrmedel, eftersom det kräver enorma mängder koldioxidlagring och riskerar att låsa in fossilberoende, vilket kan hämma snabba utsläppsminskningar. Det medför också höga kostnader för företagen som åläggs med krav och bör därför kombineras med andra styrmedel för att bli effektivt. Återtagskrav lämpar sig bättre att införas på EU-nivå och inte enbart i Sverige. Ett nationellt system skulle ha för små volymer för att bli effektivt.

⁵¹ (Bollen, van Cappellen, Duijn, & Rooijers, 2022), (Kuijper, Holleman, & van Soest, 2021)

Det skulle också riskera att snedvrider konkurrensen då få aktörer skulle bära relativt höga kostnader per enhet jämfört med ett större system på EU-nivå.



Figur 14. Exempel på hur ett system för återtagskrav (carbon takeback obligations, CTBO) skulle kunna upprättas där importören åläggs med att finansiera insamlandet av all koldioxid som importerade varan kan ge upphov till. Exemplet illustrerar en avfallsförbrännare som utför CCS åt en importör där bio-CCS används för att täcka de sista utsläppen. Modifierad bild från Jenkins m. fl. (2021).

7.3.3 Utökat producentansvar

Utökat producentansvar innebär att den som sätter fossilt kol på marknaden också ansvarar för utsläppen i produktens slutskede. Syftet är att säkerställa att fortsatt användning av fossilt kol inte bidrar till ökade växthusgasutsläpp. Därmed kan ytterligare styrmedel som minskar efterfrågan direkt implementeras parallellt. Återtagskrav, som beskrivs ovan, är en typ av utökat producentansvar.⁵²

Såväl Energimyndigheten som Energiföretagen Sverige föreslår ett utvidgat producentansvar för plast, där producenter av jungfrulig plast får ansvar för att produkternas slutbehandling inte orsakar koldioxidutsläpp⁵³. Förslaget kan exempelvis ta formen av en plastskatt som finansierar CCS/CCU eller en fond för utsläppsminskande åtgärder genom plastens värdekedja⁵⁴. Det behöver dock utredas om ansvaret ska ligga på råvaruproducenter eller tillverkare av plastprodukter⁵⁵. En nackdel med en skatt är att den ger mindre incitament för innovation, eftersom producenterna inte själva styr hur utsläppen minskas, vilket riskerar att gå miste om deras expertis.

7.4 DIFFERENSKONTRAKT (CARBON CONTRACTS FOR DIFFERENCE)

Ett system för differenskontrakt för koldioxid (Carbon Contracts for Difference, CCfD) skulle innebära att staten garanterar ett koldioxidpris genom att ersätta skillnaden

⁵² (Jenkins, Kuijper, Helferty, Girardin, & Allen, 2023)

⁵³ (Energimyndigheten, 2024), (Energiföretagen Sverige, 2024)

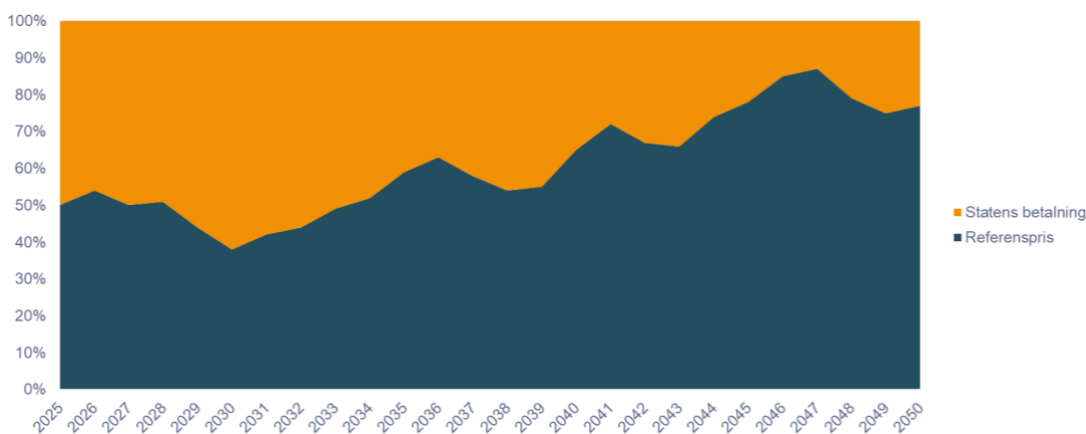
⁵⁴ (Energimyndigheten, Styrmedel för CCS och CCU - Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid, 2024), (Energiföretagen Sverige, 2024), (Østby Stub, Svendsen Skriung, Post-Melbye, & Holm, 2019)

⁵⁵ (Energiföretagen Sverige, 2024)

mellan ett avtalat pris och marknadspriset. Det minskar osäkerheten för investerande företag samt underlättar finansiering och främjar ny teknik. Om marknadspriset skulle överstiga kontraktspriset kan systemet upphöra eller aktören åläggas att betala tillbaka mellanskillnaden. Differenskontrakt finns även i andra sektorer. Storbritannien har till exempel differenskontrakt för att främja investering i förnybar el och i den svenska Elmarknadsutredningens slutbetänkande från april 2025 föreslås det för att främja investeringar i ny kärnkraft och havsbaserad vindkraft⁵⁶.

CCfD anses särskilt lämpligt för långsiktiga, transformativa investeringar, men riskerar att främja billigare, etablerade tekniker framför mer långsiktiga alternativ med bättre klimatnytta om regelverket inte utformas noggrant. Differenskontrakt skulle vara särskilt intressant för att finansiera avskiljning och lagring av den fossila koldioxiden från avfallsförbränning. Systemet skulle då kunna utformas så att det avtalade priset fastställs genom en anbudsprocess, t.ex. en omvänd auktion, medan referenspriset lämpligen utgörs av priset på utsläppsrätter, se illustration i Figur 15. Energiföretagen (2024) ser positivt på detta och föreslår att en lämplig myndighet får uppdrag att utreda styrmedlets potential⁵⁷.

Naturvårdsverket och Statens Energimyndighet (2022) har föreslagit att ett 10-20 årigt CCfD kan användas som styrmedel i svenska marknadsintroduktionsfasen av ny teknik där det idag saknas styrmedel, i väntan på att styrmedel ska införas på EU-nivå. Det skulle då gälla flera åtgärder och inte enbart CCS. I Regeringens klimathandlingsplan från 2024, beskrivs differenskontrakt som ett verktyg som kan användas som alternativ till rena investeringsstöd. Vidare undersöker EU-kommissionen om CCfD kan införas inom innovationsfonden⁵⁸. Se även Danmarks system för differenskontrakt (avsnitt 7.8.1).



Figur 15. Exempel på utformning av ett system för differenskontrakt där blå fält illustrerar marknadens pris för koldioxid över tid (t.ex. ETS-priset) och gult vad staten behöver täcka upp för att nå det kontrakterade priset.

7.5 EU:S UTSLÄPPSHANDEL (EU ETS)

Idag omfattar EU ETS endast fossil koldioxid. Eftersom utsläpp från avfallsförbränning i Sverige ingår i utsläppshandeln så ger EU ETS visst incitament för CCS vid avfallsförbränning, då man undviker kostnader för utsläppsrätter. Priserna på utsläppsrätter ligger dock långt ifrån kostnaderna för CCS, så i dagsläget finns inte

⁵⁶ (SOU, 2025)

⁵⁷ (Energiföretagen Sverige, 2024)

⁵⁸ (Naturvårdsverket och Energimyndigheten, 2022)

incitament för investering. Marknadsutvecklingen inom EU:s utsläppshandel är svår att förutsäga, men flera prognoser pekar på stabila priser kring 70–75 EUR till 2030, följt av en gradvis ökning till under 130 EUR fram till 2040, och eventuellt upp mot 500 EUR därefter⁵⁹. EU ETS2 tros utvecklas snabbare med priser på 100–145 EUR till 2030, men väntas därefter sjunka på grund av kostnadseffektiva åtgärder⁶⁰. Om priset på utsläppsrätter stiger kraftigt först efter 2040, riskerar många av de CCS-planer som finns bland annat i fjärrvärmesektorn att fördröjas eller utebli.

7.5.1 Tänkbar utveckling av EU ETS och koppling till negativa utsläpp

Under 2026 ska EU-kommissionen rapportera om hur negativa utsläpp skulle kunna omfattas av utsläppshandel. Linköpings Universitet har undersökt möjligheten att använda utsläppshandel som ett incitament för att utveckla och skala upp bio-CCS, i syfte att uppnå negativa utsläpp. Här presenteras en sammanfattning av arbetet.

Utvecklingen av EU ETS efter 2030 beror till stor del på EU:s förhandlingar kring ett 2040-mål och utformningen av klimatpolitiska instrument för att uppnå detta. Stödet för EU ETS är dock starkt och inte mycket tyder på att det politiska stödet för en fortsättning av EU ETS kommer att avta. Flera reformfrågor är dock aktuella, varav två är särskilt framträdande. För det första, hur kommer den linjära reduktionsfaktorn (LRF) för att definiera utsläppstaket att utformas? För det andra, bör systemet för handel med utsläppsrätter omvandlas till ett system för handel med nettoutsläppsrätter? Nedan följer fem scenarion för att illustrera potentiella utvecklingsbanor för EU ETS avseende LRF och (netto)utsläpp:

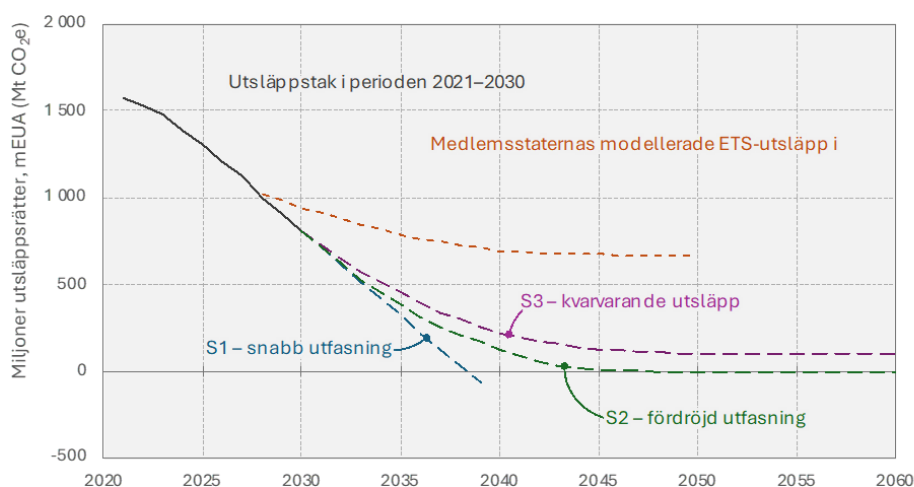
S1. extrapolering av nuvarande minskningstakt (snabb utfasning), genom att förlänga LRF i slutet av den fjärde handelsperioden (2028–2030) till den femte handelsperioden. Detta anses dock orealistiskt politiskt, ekonomiskt och tekniskt på grund av risk för likviditetsproblem och volatilitet på marknaden. En sådan instabil marknad skulle troligtvis undergräva det framtida politiska stödet för EU ETS. S1-S3 illustreras i Figur 16.

S2. gradvis minskning till nollutsläpp 2050 (fördröjd utfasning), som i princip bygger på en växthusgasbudget för EU ETS i linje med 1,5-gradersmålet. Scenariot skulle innebära en måttlig LRF och lägre kostnader än scenario 1 eftersom utfasningen fördröjs. Det skulle också skjuta upp och sannolikt minska, men inte eliminera, de förväntade likviditetsproblemen på marknaden som följd av en snabb utfasning. S1-S3 illustreras i Figur 16.

S3. gradvis sänkning till låga bruttoutsläpp (kvarvarande bruttoutsläpp), där vissa utsläpp tillåts kvarstå även till 2050, då dessa annars skulle bli mycket dyra att åtgärda. Detta scenario förväntas minska likviditetsproblemen, men om EU ETS inte uppnår nollutsläpp skulle det istället öka trycket på andra pelare i EU:s klimatpolitiska struktur att uppnå nettoupptag av växthusgaser för att balansera kvarvarande ETS-utsläpp, utöver den stora mängd kvarstående utsläpp som förväntas i sektorer som inte omfattas av EU ETS. S1-S3 illustreras i Figur 16.

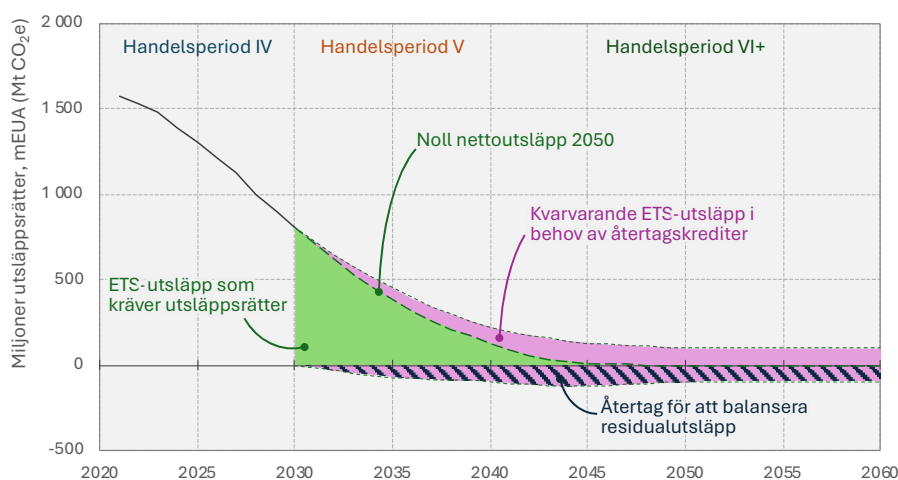
⁵⁹ Se t.ex. (Mantulet, Peffen, & Cail, 2023)

⁶⁰ (Melakh, 2025), (Bloomberg, 2025)



Figur 16. Den nuvarande linjära minskningsfaktorn, modellerade utsläpp inom EU ETS med befintliga politik, och illustrativa scenarier (S1-S3) för utsläppstaket i EU ETS från och med 2031.

S4. ovillkorlig integrering (Figur 17) av upptagskrediter i EU ETS, vilket innebär att upptag och utsläpp blir fullt utbytbara inom ett gemensamt marknadssystem. Här fastställs ett oelastiskt tak för nettoutsläpp i linje med taket i S2 (fördröjd utfasning) samtidigt som ett effektivt elastiskt tak för bruttorestutsläpp fastställs, som kompenseras av upptag. Upptagen och utsläppen måste återspeglas korrekt i nationella växthusgasinventeringar men utsläppsrätter behöver inte särskiljas från upptagskrediter på ETS-marknaden. Kostnaden för upptag respektive att åtgärda residualutsläpp kommer att avgöra vad som prioriteras. Tillgången på utsläppsrätter efter det att det oelastiska taket når noll skulle enbart komma från återstående lager i marknadsstabilitetsreserven, eventuella sparade utsläppsrätter och från certifierade återtag.



Figur 17. Illustrativt scenario för att omvandla EU ETS från handel med utsläpp till handel med nettoutsläpp från och med 2031, genom att kombinera S2 (fördröjd utfasning) och S3 (kvarvarande bruttoutsläpp) i ett nytt effektivt nettonollutsläppstak senast 2050 (det vill säga, S4, villkorslös integration).

S5. villkorad integrering, där en central myndighet (exempelvis en politiskt oberoende "centralbank" för koldioxid) upphandlar upptag tidigt och placerar dessa i en kreditreserv som används strategiskt för att stabilisera marknaden och

kompensera för kvarstående utsläpp. Scenariot bygger alltså vidare på S4 (ovillkorlig integrering) men villkorar när upptagskrediter tillhandahålls på marknaden för utsläppsrätter. Till skillnad från S1-S4 kan en tillräckligt stor kreditreserv i S5 hantera problem förknippade med bristande likviditet och ge en tillräckligt stark och stabil prissignal för att ge incitament till bio-CCS i ett tidigt skede, för att bygga kapacitet för användning i framtiden när den behövs för att kompensera för kvarstående utsläpp. Scenariot undviker också att upptag används för att motverka utsläpp för vilka det finns rimligt genomförbara minskningsalternativ.

7.5.2 Fristående EU-system för handel med CO₂-upptag (EU RTS)

Ett alternativ till att integrera upptag av CO₂ i befintliga handelssystem är att utveckla ett fristående EU-system för handel med upptag (EU Removals Trading System, RTS). I stället för att sätta ett tak för utsläppen skulle systemet definiera ett golv för en minsta mängd upptag inom verksamheter som måste uppfylla en skyldighet att överlämna upptagskrediter. Till vem detta ansvar skulle fördelas är fortfarande en öppen fråga.

Meyer-Ohlendorf (2023)⁶¹ föreställer sig att en tillsynsmyndighet inom EU skulle tvinga utsläppskällor som omfattas av EU ETS att inte bara överlämna utsläppsrätter motsvarande verksamheternas årliga utsläpp, utan också att överlämna upptagskrediter inom RTS. Enligt Meyer-Ohlendorf skulle detta motiveras av ETS-verksamheternas historiska ansvar för att klimatförändringarna.

Ett EU RTS utformat enligt Meyer-Ohlendorfs (2023) förslag kommer sannolikt att fungera mycket mer som en marknadsplats för leverantörer av upptagskrediter – för att erbjuda certifierade krediter till aktörer som är skyldiga att överlämna krediter – snarare än ett traditionellt utsläppshandelssystem. Inom EU ETS kan en verksamhet som lyckas minska sina utsläpp minska kostnaderna för ETS-efterlevnad. Det är också möjligt att sådana verksamheter kan få intäkter från att sälja överskott av utsläppsrätter som de har sparat för framtida användning. EU ETS skapar på så vis en koppling mellan utsläpp och en skyldighet att överlämna utsläppsrätter. I ett EU RTS finns inget givet samband mellan en teknisk potential för upptag och en skyldighet att överlämna upptagskrediter, ett problem som Meyer-Ohlendorf (2023) endast noterar i förbigående.

Utan att koppla skyldigheter till en teknisk potential upptag finns det inget tydligt incitament för leverantörer upptagskrediter att handla sinsemellan. Handeln skulle till största delen gå från aktörer som kan tillhandahålla krediter, men som inte har några skyldigheter, till aktörer som har liten kapacitet att själva generera krediter och därför måste köpa sådana för att uppfylla sina skyldigheter. En sådan design skulle utgöra är en traditionell marknadsplats snarare än ett utsläppshandelssystem. Om efterfrågan på upptagskrediter i EU RTS skulle komma från återtagsskyldigheter fördelade till verksamheter i EU ETS, då finns ingen större poäng med att inte istället integrera upptag direkt i ETS-marknaden.

Om EU RTS istället skulle tilldela återtagsskyldigheter till anläggningar med stora utsläpp av biogen CO₂, skulle utformningen stå i strid med EU:s övergripande ambition att minska utsläppen av fossil CO₂ eftersom ett EU RTS då riskerar att straffa anläggningar som använder biomassa och istället för fossil kol, gas och olja.

⁶¹ (Meyer-Ohlendorf, 2023)

Ett tredje alternativ skulle kunna vara att fastställa skyldigheter för EU:s medlemsstater och låta medlemsstaterna ge incitament till upptag med hjälp av nationella politiska instrument för att uppfylla skyldigheterna. Det skulle avlasta EU men istället ställa stora krav på nationell politik.

7.5.3 Slutsatser

Utvecklingen av befintliga och eventuellt nya utsläppshandelssystem har stor betydelse för finansieringen av CCS vid såväl avfallsförbränning som bioenergi. Dagens utsläppsrättspriser ger inte tillräckliga incitament för CCS vid avfallsförbränning och för bio-CCS finns inga incitament inom utsläppshandeln då den endast omfattar fossil koldioxid.

Fem scenarier (S1-S5) har analyserats för hur utsläppshandeln kan komma att utvecklas. Utöver detta har ett helt nytt system för handel med negativa utsläpp analyserats. S1-S3 bortser från flexibilitet mellan EU:s klimatpolitiska pelare och tar antingen inte itu med problemet med de sannolika kvarstående utsläppen i EU ETS eller tvingar andra EU-pelare att balansera utsläppen. S4 och S5 beskriver scenarier där upptagskrediter integreras i EU ETS antingen ovillkorat (S4) eller villkorat (S5). Ett annat alternativ är en helt ny handel med koldioxidupptag ("EU RTS"), där specifika aktörer skulle ha skyldighet att överlämna upptagskrediter. Aktörerna skulle kunna vara befintliga ETS-aktörer, nya aktörer med potential att skapa negativa utsläpp eller medlemsstater.

Sammantaget bedöms en villkorad integrering i EU ETS (S5) ha fördelarna att möjliggöra uppbyggnad av kapacitet för bio-CCS och samtidigt hantera marknadsinstabilitet och bristande prissignaler. Genom att "centralbanken" endast skulle släppa ut upptagskrediter vid behov (t.ex. vid priser som är för låga för att stimulera investeringar) kan systemet stödja en stabil och långsiktig utbyggnad av negativa utsläpp. En sådan lösning erbjuder möjligheter att upphandla negativa utsläpp i tid, skapa långsiktig efterfrågan, stabilisera prisbildningen och säkerställa att bio-CCS finns på plats för att möta EU:s klimatmål för 2040 och 2050.

7.6 FRIVILLIGMARKNAD

Marknader för växthusgaskrediter är ett sätt att mobilisera offentlig och privat finansiering för att stödja bio-CCS. Försäljning av bio-CCS-krediter utgör ett sätt att skapa intäkter för bio-CCS-projekt. Detta avsnitt diskuterar vad relevanta standarder och framväxande lagstiftning innebär för frivilligmarknaden. Vidare diskuteras frågor om kombinationer av statligt stöd och intäkter från försäljning av bio-CCS-krediter. Diskussionen baserar sig delvis på resultat från intervjuer med potentiella producenter respektive köpare av bio-CCS-krediter på den svenska frivilligmarknaden, som har genomförts inom ramen för detta projekt och närliggande forskningsprojekt.

Växthusgaskrediter utfärdas av krediteringsprogram för utsläppsminskningar eller förstärkta kolsänkor ("negativa utsläpp") som uppfyller programmets kriterier och som tillämpar metoder som godkänts av programmet. Enligt internationellt etablerade kriterier för växthusgaskrediter representerar en kolkredit en ton koldioxidekvivalent av utsläppsminskningar eller negativa utsläpp som är additionella, dvs går utöver vad som skulle hända utan incitamentet från växthusgaskrediter.

Efterfrågan på krediter på frivilligmarknader kommer från företag och andra organisationer som arbetar för att uppnå en minskad klimatpåverkan från verksamheten och som ofta avser att kommunicera detta externt. En annan möjlig kategori av köpare, bortom frivilligmarknader, är länder som väljer att använda krediter för att klara sina nationella mål.

Ett antal internationella standarder, vägledningar och verktyg har utvecklats för att ge stöd åt företagets frivilliga klimatarbete och bidra med ökad transparens. Inom EU sker en snabb utveckling av lagstiftning som är relevant för området.

Regelverken påverkar både möjligheterna att skapa bio-CCS-krediter och drivkrafter och möjligheter att använda växthusgaskrediter för klimatkompensation och därmed även efterfrågan. För länders användning av krediter som bidrag till nationella klimatmål under Parisavtalet gäller särskilda regler.

Frivilligmarknader har hittills haft en avgörande roll för att stimulera investeringar i negativa utsläpp med hög beständighet. Marknaden befinner sig i ett avgörande skede där projekt med hög beständighet har stora expansionsplaner men är beroende av långsiktiga förvärsavtal för att kunna säkra sin finansiering.

Över 80 procent av ingångna förvärsavtal kommer från ett fåtal stora företag, vilket påverkar marknadens stabilitet. Frivilligmarknader ger viktiga bidrag till efterfrågan på permanenta negativa utsläpp. Samtidigt kräver en stabil uppskalning som är i linje med vad klimatmålen kräver samordnade insatser mellan både privat och offentlig sektor, där fler företag och institutioner engagerar sig, standarder stärks och politiken samspelar med marknadens utveckling.

7.6.1 Att generera bio-CCS-krediter

Växthusgaskrediter utfärdas av krediteringsprogram, vars funktion är att säkerställa krediternas integritet genom kvalitetskriterier, metodiker för referensbanor och övervakning samt genom tredjepartsverifiering. Sådana program kan omfatta olika jurisdiktioner, från hela världen till subnationella enheter. Paris Agreement Crediting Mechanism (PACM) sätter det internationella riktmärket för växthusgaskrediter som är anpassade till Parisavtalet. På det frivilliga området har Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM) bedömt krediteringsprogram och deras registrerade metodiker mot sina Core Carbon Principles sedan 2024 med syftet att ge beslutsstöd åt köpare på frivilligmarknader.

Bio-CCS-krediter kan utfärdas inom ramen för program som har godkända metodiker för bio-CCS. Den första bio-CCS-metodiken lanserades i juni 2024 av Puro.Earth, ett privat krediteringsprogram. Metodiker anpassade för användning under Parisavtalet, inklusive specifika krav för negativa utsläpp, utvecklas inom ramen för PACM, och de första metoderna förväntas godkännas 2025. Europeiska kommissionen utarbetar metodiker för certifiering av negativa utsläpp inom EU:s carbon removals and carbon farming-ramverket (CRCF).

Växthusgaskrediter kan godkännas av länder som Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs), i enlighet med internationell vägledning enligt artikel 6.2 i Parisavtalet. En ITMO representerar en additionell utsläppsminskning eller ett negativt utsläpp som inte räknas mot värdlandets NDC (dvs. det land där minskningen sker) och är således tillgänglig för att tas i anspråk unikt av köparen (utan någon dubbelräkning). Detta gör ITMOs tillåtna för internationell efterlevnadsanvändning

gentemot Nationally Determined Contributions (NDC) under Parisavtalet. ITMOs kan också användas för frivilliga ändamål, inklusive frivillig kompensation.

7.6.2 Standarder och ramverk för klimatpåståenden får konsekvenser för efterfrågan

Förenklade klimatpåståenden som bygger på klimatkompensation, exempelvis "klimatneutral" har kritiserats för att kunna vilseleda budskapens mottagare. Detta har motiverat framkomsten av frivilliga standarder för klimatrelaterade påståenden liksom att EU har inlett ett arbete för att stärka lagstiftningen som ska försvåra för att aktörer att göra vilseledande klimatpåståenden.

Den dominerande grupp av standarder som bidrar med efterfrågan på krediter som motsvarar permanenta negativa utsläpp utförs av standarder för organisationers påståenden om nettonollutsläpp. Sådana standarder, såsom Science-Based Targets initiatives Corporate Net-Zero Standard⁶², ISO Net-Zero Guidelines⁶³, principerna för FN:s Race-to-Zero⁶⁴ och EU:s European Sustainability Reporting Standards⁶⁵, ESRS anger att en organisation först måste minska sina utsläpp med 90–95 procent jämfört med en referensnivå vid ett basår för utsläppsberäkningarna. När endast "residuala utsläpp" återstår (5–10 procent av basårsutsläppen) så kan organisationen årligen kompensera (i det sammanhanget ofta kallat "neutralisera") utsläppen med krediter som motsvarar permanenta negativa utsläpp för att få rätten att hävda nettonollutsläpp. De flesta företag med nettonollmål förväntar sig nå nettonollåret först kring 2050 så efterfrågan på de negativa utsläppen ligger ganska långt fram i tiden. En del företag väljer att köpa varaktiga negativa utsläpp redan idag, för att bygga upp ett innehav som kan användas för ett nettonollanspråk längre fram eller för att bidra till en marknadsuppbyggnad.

En ISO-standard som på flera sätt skiljer sig från ovan nämnda är ISO 14068⁶⁶ (Greenhouse gas management and climate change management and related activities – Carbon neutrality). Enligt denna standard måste mål och åtgärder för att uppnå minskade nettoutsläpp i den egna värdekedjan prioriteras. När framsteg mot ett minskat klimatavtryck kan påvisas blir det tillåtet att klimatkompensera med externa växthusgaskrediter. För ett år som klimatkompensationen balanserar det återstående klimatavtrycket kan begreppet "klimatneutral" användas i klimatrapporteringen. ISO-standardens godkänner endast växthusgaskrediter som inte är baserade på klimatåtgärder som räknas in i nationella utsläppsminskningsmål.

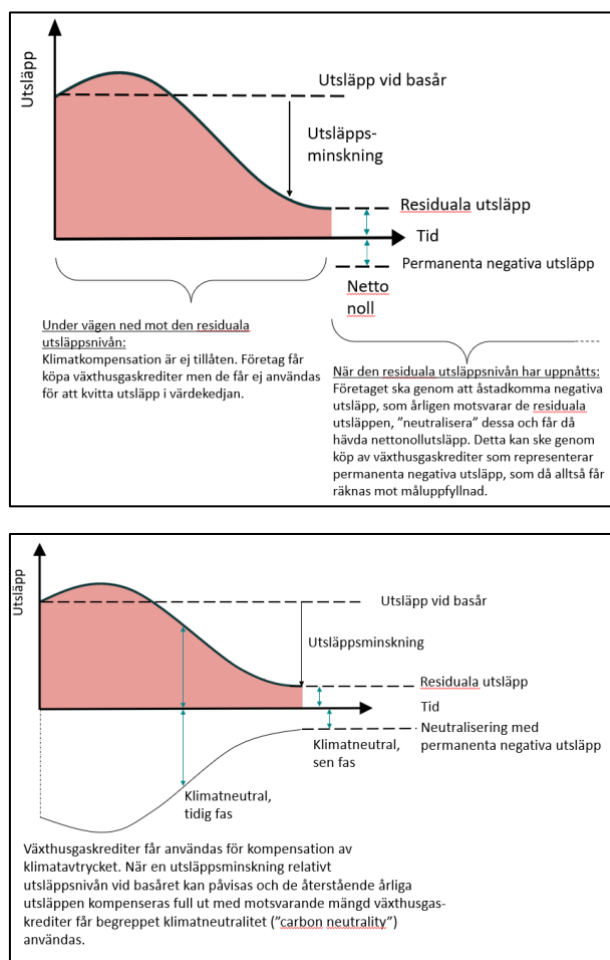
⁶² (Science-based targets, 2022)

⁶³ (ISO, 2022)

⁶⁴ (Race to Zero, 2022a), (Race to Zero, 2022b)

⁶⁵ (EU-kommissionen, 2023)

⁶⁶ (ISO, 2023)



Figur 18. Principskiss för användning av växthusgaskrediter i olika standarder. Den övre figuren avser standarder för nettonollmål, medan den nedre avser ISO-standard 14068 om klimatneutralitet.

7.6.3 EU-lagstiftning med påverkan på användning av växthusgaskrediter

EU har inlett ett arbete för att utveckla en starkt lagstiftning som förhindrar att aktörer använder vilseledande klimatpåståenden. Det så kallade Konsumentsmaktsdirektivet innebär ett slut för efterfrågan på växthusgaskrediter för att klimatkompensera produkter. Från 2026 blir påståenden om klimatneutralitet för produkter nämligen tillåtna endast när produkters livscykelutsläpp är lika med noll.

För klimatpåståenden på organisationsnivå är lagstiftningen ännu inte på plats men några relativt säkra slutsatser kan dras på liggande förslag, där det råder bred enighet. För att en organisation ska kunna använda påståenden om klimatneutralitet kommer det som minst krävas att:

- Organisationen har satt ambitiösa mål om på sikt mycket kraftigt reducerade utsläpp
- Organisationen kan påvisa framsteg mot satta utsläppsminskningmål.
- Återstående utsläpp kommer att behöva klimatkompenseras med externa växthusgaskrediter som motsvarar kvalitetskriterier som preciseras på EU-nivå.

Det återstår osäkerheter kring exakt hur stränga kraven kommer att bli, dels eftersom den slutliga versionen av det centrala Green Claims Directive inte ännu har antagits, dels för att viktiga detaljer sannolikt kommer att lämnas över till kommissionen att besluta om. Om Europaparlamentets linje antas så kommer företag inte kunna använda krediter (som måste vara certifierade genom CRCF, se avsnitt 6.4) för kompensation förrän de har minskat sina utsläpp till en residual nivå såsom i tex SBTi Corporate Net-Zero Standard, vilket då kan förväntas dämpa efterfrågan i närtid. Om istället ministerrådets förslag antas kommer klimatkompensation att tillåtas för organisationer som dels har satt upp nettonollmål, dels kan påvisa att de har påbörjat en minskning av utsläppen. I skrivande stund (slutet av juni 2025) är det fortfarande osäkert om direktivet överhuvudtaget kommer att klubbas igenom efter att EU-kommissionen just annonserat att de ämnar dra tillbaka sitt förslag.

7.6.4 Blandad finansiering genom statligt stöd och frivilligmarknader

I frånvaro av skyldigheter att använda negativa utsläpp från bio-CCS, eller att på annat sätt stödja utbyggnad av bio-CCS, är statligt stöd och frivilligmarknader de två huvudsakliga finansieringskällorna för bio-CCS. Verksamheten kan finansieras helt med statligt stöd, helt med frivilligmarknaden eller genom en kombination av dessa två.

När det bara finns en finansieringskälla behöver denna ensamt täcka åtgärdskostnaden och den totala volymen negativa utsläpp begränsas av den enda källans budget. Vid kombinationer av statligt stöd och frivilligmarknader finns potential att finansiera större volymer. Den teoretiskt maximala mängden negativa utsläpp från bio-CCS skulle då kunna uppnås om båda källorna (med bibehållna budgetar) betalar hela åtgärdskostnaden för bio-CCS. Om dubbla anspråk tillåts, dvs om staten och köpare av krediter båda får tillgodoräkna sig samma ton, så kan staten och kreditköpare dela på kostnaden för ett ton och de korssubventionerar i praktiken varandra. Konsekvensen blir att statens kostnad per ton minskar (genom samfinansiering med frivilligmarknaden) och att kreditpriset minskar (genom statlig subventionering).

I det svenska stödsystemet för bio-CCS genom omvänd auktion (se vidare i avsnitt 7.1) gäller att aktörer som får stöd får sälja negativa utsläpp på en frivilligmarknad och att köparen får göra anspråk på dessa för sina egna frivilliga klimatmål. Krav ställs dock på att de i sin klimatredovisning redogör för att dessa bidrar till Sveriges möjligheter att nå sina klimatmål och EU:s åtaganden.

I intervjuer med frivilligmarknadsaktörer framhålls både för- och nackdelar med statlig subventionering av bio-CCS-krediter. Många potentiella köpare har inte en tillräckligt stark betalningsvilja för att betala de höga priser som måste till om kreditpriset ensamt ska kunna bidra till att göra investeringar i bio-CCS lönsamma. Därför anser många att statlig finansiering behövs för att tillräckligt många köpare ska vara beredda att ingå förvärvsavtal. Samtidigt menar flera bio-CCS-utvecklare att subventionering av priset på bio-CCS-krediter som bara kommer några få bio-CCS-producenter till del riskerar att snedvrider marknaden. Det försvårar för övriga projektutvecklare, som inte får tillgång till statligt stöd, att sälja krediter till priser som gör att de kan ta investeringsbeslut.

Ytterligare aspekter att beakta vid blandad finansiering är dels att det potentiellt kan resultera i att bio-CCS-verksamheter kan ta ut omotiverat höga vinster, dels att subventionerade kreditpriser kan reducera kreditköparnas incitament att minska de

egna utsläppen när det blir ekonomiskt attraktivare att istället kompensera med bio-CCS-krediter.

7.7 FINANSIERING VIA MOTTAGNINGSAVGIFTER FÖR AVFALLSFÖRBRÄNNING

Ytterligare ett bidrag till finansieringen av CCS på avfallsförbränning kan vara att överföra en del av kostnaden på avfallslämnaren genom att höja mottagnings-avgiften och nyttja den ökade intäkten för finansieringen. Kostnaden skulle i så fall adderas på mottagningsavgiften som avfallslämnaren betalar för tjänsten avfallsförbränning, och i nästa steg föras vidare på dem som genererat avfallet.

7.7.1 Avfallsförbränning och CCS

Anläggningarna för avfallsförbränning drivs oftast av kommunala bolag som arbetar utifrån ett kommunalt renhållningsansvar för restavfall/kommunalt avfall. Man behandlar avfall som är rester från samhället samt rester från återvinning som inte längre kan återvinnas. För avfallsbehandlingen tar anläggningen en mottagningsavgift, och får också intäkter från genererad energi.

Energiåtervinningsanläggningar har långa drifttider och är en bra kandidat för bio-CCS, då stora mängder biogen koldioxid släpps ut. Genom CCS avskiljs samtidigt fossil koldioxid, vilket minskar kostnaderna för utsläppsrätter inom EU ETS. Flera anläggningar är stora och ligger ofta lokaliserade i närheten av kustnära industrikluster, vilket skulle hjälpa till i att skapa skalfördelar i anläggning av gemensam infrastruktur för avskiljning och transport.

I rapporten har vi tidigare konstaterat att det är svårt för avfallsförbränning att vinna omvända auktioner av det slag som Sverige har. När stöd enbart ges för avskiljning av biogen koldioxid, kan energiåtervinningsanläggning inte leverera kompletterande negativa utsläpp lika kostnadseffektivt som en anläggning med utsläpp av enbart biogent ursprung, då avskiljning av den fossila delen av koldioxiden i rökgaserna (30–40 procent) inte är berättigad till stöd.

7.7.2 Mottagningsavgifter, avfallslämnare och praktisk tillämpning

Avfall uppkommer i samhället, hos oss invånare i en kommun eller vid en verksamhet. Den som genererar avfallet kan finnas i Sverige eller i ett land varifrån avfallet exporteras för behandling i Sverige. Avfallslämnaren anlitar ett avfallsbolag/avfallsentreprenör eller transportbolag för att hämta, transportera och lämna avfallet. Det förekommer att enskilda byggentreprenörer lämnar avfall direkt vid förbränningsanläggningen.

Avfallsförbränningsaktören verkar som en leverantör av tjänsten avfallsbehandling på en europeisk marknad, där villkor och prisnivå sätts av offentliga upphandlingar. Prismekanismer påverkas av styrmedel och ambition i EU:s avfallspolitik, tillgänglig avfallsbehandling och drifttillgänglighet, transportkostnader, mängden lager samt konjunktur, för att nämna några faktorer.

Profus årliga marknadskartläggning⁶⁷ visar att svenska aktörer inte kan sätta mottagningsavgifter och diktera villkor, utan man är beroende av behovet av

⁶⁷ (Profu, 2025)

avfallsbehandling genom energiåtervinning, styrmedel och marknadsmekanismer. Det är idag svårt att överföra kostnader för utsläppsrätter på avfallslämnaren, då avfallsförbränning i flertalet andra länder inte ingår i EU:s system för utsläppsrätter (ETS).

För en finansiering av CCS via mottagningsavgifter, är det viktigt att avfallslämnaren är beredd att betala för det extra värde som CCS utgör, för att inte riskera att avfallet skickas till annan anläggning för avfallsförbränning utan CCS.

7.7.3 Bidrag till ökat avfallsförebyggande och materialåtervinning

Förebyggande av avfall, återbruk och materialåtervinning är vanligen miljömässigt att föredra framför avfallsförbränning med energiåtervinning. Det vore önskvärt att betydligt mer avfall förebyggdes, återbrukades och återvanns än idag.

Redan idag är det svårt att via mottagningsavgifter styra mot att "förorenaren betalar". Uttrycket skulle i det här sammanhanget innebära att den som sätter icke-återvinningsbara produkter på marknaden eller den som underlåter att sortera avfallet, skulle tvingas betala för en bättre avfallsbehandling och CCS.

Avfallsförbränningsaktören kan endast indirekt med information påverka upphandlingskriterier för avfallsbehandling, en viktig mekanism i prissättningen. Röster brukar lyftas om att kraven därför bör ställas tidigare i kedjan, exempelvis mot den aktör som sätter produkten på marknaden eller upphandlar avfallsbehandling, så att endast det material som inte ska materialåtervinnas behandlas genom avfallsförbränning. CCS ses ibland som en end-of-pipe-lösning, när man fångar in koldioxiden efter förbränning, snarare än göra förebyggande insatser eller materialåtervinna, vilka bidrar till större resurshushållning.

Energiåtervinningsanläggningar har även en begränsad rådighet att påverka innehållet i mottaget avfall. Problemet har komplexa orsaker, men beror ytterst på att stora och ökande mängder produkter sätts på marknaden utan att de samlas in adekvat, återanvänds, sorteras eller återvinns i tillräcklig omfattning av producenterna. Enligt regeringens handlingsplan för plast materialåtervinns ungefär 10 procent av plastavfallet idag, medan ungefär 80 procent förbränns. Naturvårdsverkets senaste kartläggning av plastanvändningen i Sverige visar också på en stor ökning av mängden plastavfall under 2010-talet.

7.8 INTERNATIONELL UTBLICK

Sveriges främsta styrmedel för bio-CCS, den omvända auktionen, har fått en del kritik för att inte tillräckligt stödja marknaden i uppstartsstadiet av värdekedjan och att enbart infångning och lagring av biogen koldioxid omfattas. Det kan riskera att CCS vid avfallsförbränning, måste senarelägga sin implementering. Nedan görs en internationell utblick och beskrivs hur Danmark, Storbritannien och Nederländerna valt att finansiera CCS.

7.8.1 Danmark

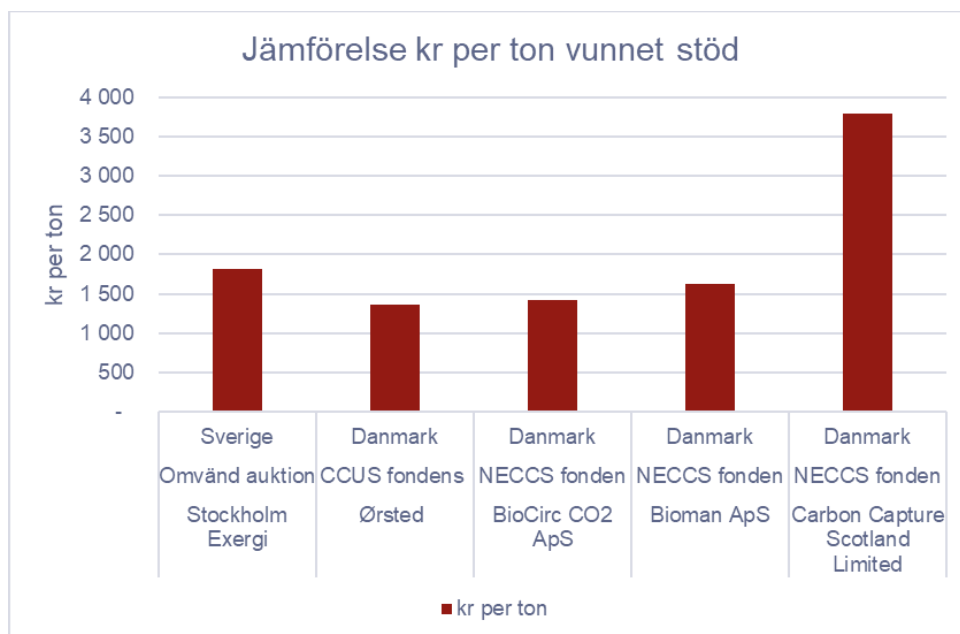
Danmark har flera styrmedel för att främja CCS, däribland de tre bidragsfonderna CCUS-fonden, NECCS-fonden, och CCS-fonden (Tabell 6). CCUS- och CCS-fonden stöttar infångandet av både fossil och biogen koldioxid medan NECCS-fonden bara stöttar bio-CCS i syfte att skapa negativa utsläpp. Företagen får bidragen genom att

lämna anbud på tjänsten minskning av växthusgasutsläpp. Företaget som erbjuder det mest kostnadseffektiva leveransen får kontraktet om statligt stöd som levereras via ett differenskontrakt. Ca 38 miljarder DKK⁶⁸ har öronmärkts för CCS i Danmark vilket beräknas minska utsläpp med 3,2 miljoner ton år⁶⁹.

Tabell 6. Danmarks tre stödfonder för CCS aktivitet⁷⁰.

Fond	Koldioxid	Stödperiod	Stödmängd	Väntad insamlingsmängd
CCS	Fossil och biogen	2029 till 2044	DKK 28 miljarder tot	2,3 miljoner ton CO ₂ per år från 2030
CCUS	Fossil och biogen	Över 20 år	Max DKK 815 miljoner per år	0,9 miljoner ton CO ₂ minskningar per år från 2030
NECCS	Enbart biogen	8 år	DKK 2,5 miljarder	0,5 miljoner ton per år från 2025

26 mars 2025 meddelade Energistyrelsen att 16 företag ansökt om bidrag från CCS fonden, men bara 10 kan få bidrag så minst sex kommer sällas bort. Kontrakt väntas delas ut i april 2026. Ørsted blev CCUS-fondens första bidragstagare vilket meddelades av Energistyrelsen 15 maj 2023. 430,000 ton koldioxid ska fångas in årligen från 2026 till 2046 för 8 miljarder DKK. Upphandlingen för NECCS-fonden färdigställdes i maj 2024 där tre företag fick i uppdrag att fånga och lagra 160,350 ton biogent kol mellan 2026 och 2032⁷¹. Figur 19 illustrerar statliga kostnader (SEK/ton) för olika vinnande företag i Sveriges respektive Danmarks stödsystem för CCS.



Figur 19. Ungefärliga statliga kostnader per ton i den svenska omvända auktionen samt i exempel på vinnande företag i Danmarks statliga CCS-satsningar.

⁶⁸ Idag motsvarande ca 55 miljarder SEK.

⁶⁹ (Energimyndigheten, 2024)

⁷⁰ (Energistyrelsen, u.å.)

⁷¹ (Energistyrelsen, 2025)

7.8.2 Storbritannien

Storbritannien har valt att stödja CCUS-branschen genom kluster av industrier. Storbritannien har sju större industriella kluster som tillsammans står för 50% av alla utsläpp i landet. Två av dessa kluster i Teesside och Merseyside valdes ut i en process som startade 2021 för att bli de första som ska få stöd så kallat, "Track-1". I juli 2023 utpekades ytterligare två kluster som lämpar sig för koldioxidinfångning och därmed vara nästa som får stöd i "Track-2". I oktober 2024 meddelade regeringen att de möjliggjort 21,7 miljarder pund som bidrag till de två första projekten för CCUS och vätgas över en period på 25 år⁷². Koldioxidinfångningen och vätgasprojekten som möjliggörs av CCUS väntas minska utsläppen med 8,5 miljoner ton varje år⁷³.

Klustren ansökte om stöd genom varsin klusterledare ("cluster lead") som skickar in alla nödvändiga dokument som myndigheten använder i sin bedömning. De två första klustren valdes ut baserat på hur redo de är för införande av CCUS och kan bytas ut om ett tekniskt fel upptäcks så att de inte längre kan implementera CCUS⁷⁴.

7.8.3 Nederländerna

Nederländerna baserar sitt stöd genom en mängd planer som riktas till producenter av förnybar energi och CDR-tekniker där CCS ingår. Dessa är:

SDE++ (Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition)

- Bidrag till projekt för förnybar energi eller minskning av koldioxidutsläpp.
- Bidragen ges ut via ett differenskontrakt, skillnaden i kostnaden för att reducera 1 ton utsläpp och intäkten för det ton utsläppet. Kostnaden för att reducera är konstant men intäkten bestäms på årsbasis. Ju högre marknadspris, desto lägre bidrag.
- Tillåter bidrag upp till 400 euro per ton koldioxid, och ges ut i en 12 eller 15 årsperiod⁷⁵.
- Ej åtskillnad mellan fossil och biogen koldioxid. Däremot finns skillnad om det är ETS-berättigad industri eller ej.

DEI+ (Demonstration Energy and Climate Innovation)

- CCUS-projekt kan få bidrag för pilot- eller demonstrationsprojekt
- Lager för CCS och infångning av koldioxid från kraftverk (förutom avfallsförbränning) kan inte få bidrag här.
- Man får bidrag i upp till 4 år.
- Budget: 175 miljoner euro⁷⁶.

MIA (Environmental Investment Deduction) och Vamil (Random Depreciation of Environmental Investments)

⁷² (UK Government, 2025)

⁷³ (UK Government, 2024)

⁷⁴ (Department for Business, Energy & Industrial strategy, 2021)

⁷⁵ (RVO, 2024)

⁷⁶ (RVO, 2025a)

- Investeringsstöd, skattelättnader på investeringskostnader samt lägre skatt på projektets vinster. Kan sökas för CCUS-projekt⁷⁷.
- Budget: 189 miljoner euro (MIA), 20 miljoner euro (Vamil).

TSE (Top Sector Energy Scheme)

- Stöd till pilot- och demonstrationsprojekt för CCUS (befintlig teknologi).
- Stöd ges inte för geologisk lagring på land, infångning av koldioxid från fossila bränslen, eller investering i maskiner som bränner fossila bränslen.
- Ett större företag kan få upp till 50% av kostnaderna täckta medan ett litet företag kan få upp till 70%
- Budget: 18 miljoner euro. Som mest kan man få 4 miljoner euro för ett projekt.

EIA (Energy Investment Deduction)

- Kan ge skattereduktioner till koldioxidinfångning och lagring.
- Budget: 431 miljoner euro.
- 40% av investeringskostnaderna kan dras bort från vinsten när vinstskatt beräknas.

7.9 DISKUSSION KRING FINANSIERING AV CCS VID FÖRBRÄNNING AV BIOBRÄNSLEN OCH AVFALL

För att förverkliga fjärrvärmesektorns planer på negativa utsläpp och utsläppsminskning genom CCS, krävs ändamålsenlig och långsiktig finansiering. Finansieringsmöjligheterna beror i viss mån av koldioxidens ursprung – biogent eller fossilt – vilket resulterar i olika lämpliga styrmedel, incitament och praktiska hinder. Det blir särskilt utmanande vid avfallsförbränning som ger koldioxid av såväl biogent som fossil ursprung. För båda alternativen gäller sannolikt att det behövs en kombination av finansieringslösningar, åtminstone på kort sikt, samt ett eller möjligen flera, långsiktigt stabila finansieringsalternativ. De långsiktiga finansieringslösningarna behöver rimligen utstakas inom de närmsta åren. Annars riskerar ”gapet” mellan befintliga och framtida stabila finansieringsmöjligheter göra att planerna förlorar tempo eller helt läggs ned.

Bio-CCS: Kan frivilligmarknaden täcka ”gapet” eller krävs ett kompletterande statligt styrmedel när budgeten för omvända auktionen är slut?

För bio-CCS i Sverige är idag den omvända auktionen den främsta finansieringsmöjlighet som erbjuds via staten. Men avsatta 36 miljarder SEK för 2026–2046 räcker sannolikt inte till mer än lite drygt 1 Mton/år, och då konkurrerar fjärrvärmesektorn dessutom med andra branscher. Stockholm Exergi har redan tilldelats 20 miljarder, varvid det återstår 16 miljarder att fördela i kommande utlysning(ar). Investeringsstöd från Industriklivet och EU:s innovationsfond har

⁷⁷ (RVO, 2025b)

beviljats för vissa projekt, men omfattningen är liten jämfört med behovet och stöden täcker ofta endast en del av kapitalinvesteringen, inte driftkostnader.

Frivilligmarknaden erbjuder en väg till finansiering via försäljning av bio-CCS-krediter. Både Stockholm Exergi och Öresundskraft har till exempel sålt krediter till olika företag. Frivilligmarknaden har sannolikt en mycket stor potential. Samtidigt finns stora osäkerheter till exempel om framtida regelverk för olika aspekter av frivilligmarknaden och hur en sådan marknad kan fungera parallellt med ett tänkbart långsiktigt (EU-)styrmedel för negativa utsläpp. Kostnaderna för bio-CCS behöver sannolikt också gå ned om frivilligmarknaden ska stå som enda finansiär.

På sikt skulle ett handelssystem för negativa utsläpp, såsom ett EU Removals Trading System (RTS), kunna erbjuda stabila och långsiktiga förutsättningar. Men systemet är fortfarande i diskussionsfas, och även när det implementeras är det oklart om och hur det kan samexistera med frivilligmarknaden.

CCS vid avfallsförbränning: Utsläppsrättspriserna inte tillräckligt höga och komplexiteten ökar när finansiering behövs för avskiljning och lagring av både fossil och biogen koldioxid

Finansiering av CCS vid avfallsförbränning ökar komplexiteten eftersom koldioxidutsläppen har såväl biogent som fossilt ursprung. Förutom att man behöver hitta lösningar för att finansiera båda strömmarna så tillkommer att detta kan behöva ske "samtidigt". Som exempel kan nämnas att vid inlämnande av bud till omvända auktionen så måste hela finansieringslösningen vara löst, även för de fossila utsläppen.

De fossila utsläppen från avfallsförbränning i Sverige omfattas redan av EU ETS, vilket innebär att CCS kan minska kostnader för utsläppsrätter. Dock är priset på utsläppsrätter för närvarande (ca 70–75 €/t) fortfarande långt ifrån de verkliga kostnaderna för CCS⁷⁸, vilket gör att incitamentet är otillräckligt för investering. Det innebär att CCS på den fossila delen av avfallsutsläppen i praktiken inte är lönsamt idag utan ytterligare styrmedel. Liksom vid bio-CCS kan investeringsstöd via exempelvis Industriklivet eller EU:s Innovationsfond ge viss finansiering. Det finns även flera andra tänkbara möjligheter. I rapporten diskuteras till exempel differenskontrakt, återtagskrav och utökat producentansvar som potentiella lösningar. I Danmark har man till exempel valt ett system med differenskontrakt och olika fonder som möjliggör finansiering av CCS från såväl biogen som fossil koldioxid.

Tänkvärt är också att CCS vid avfallsförbränning av vissa ses som en end-of-pipe-lösning, när man fångar in koldioxiden efter förbränning, snarare än att verka för förebyggande insatser eller materialåtervinna, vilka bidrar till större resurshushållning. Det är därför viktigt att kombinera CCS med ett incitamentsystem som på sikt styr mot resurseffektivitet och cirkulära system för en hållbar resurs- och avfallshantering.

⁷⁸ Kostnaderna för hela CCS-kedjan varierar mellan olika anläggningar beroende på bland annat mängd och flödesvariationer av koldioxid, lokalisering och avstånd till lagringsplats samt möjligheten att samarbeta med andra för att sänka kostnaderna. Anläggningar som är tidiga att investera i CCS kommer också ha högre kostnader på grund av lärandekostnader, läs vidare i avsnitt 3.2.8.

Slutsats: Få projekt kommer sannolikt förverkligas – utan långsiktiga styrmedel

Om fjärrvärmesektorns planer på utsläppsminskning och negativa utsläpp genom CCS ska kunna realiseras och bidra till Sveriges klimatmål är den samlade bilden att det snabbt behövs minst ett kompletterande svenskt finansieringsalternativ. För bio-CCS behövs detta för att brygga gapet mellan dagens styrmedel (huvudsakligen omvänd auktion) och ett förväntat framtida långsiktigt EU-styrmedel. Om ytterligare styrmedel inte kommer på plats är risken stor att utbyggnaden av bio-CCS avstannar då den omvända auktionens stöd är uttömt. För CCS vid avfallsförbränning tillkommer utöver detta även behov av ett kompletterande finansieringsalternativ för den fossila koldioxiden eftersom utsläppsrättspriserna idag inte motiverar CCS. Detta skulle kunna vara ett system liknande det i Danmark, dvs ett system för differenskontrakt och som möjliggör finansiering av CCS från fossil som biogen koldioxid.

8 Systemkonsekvenser vid en bio-CCS-utbyggnad

I detta kapitel redovisas resultaten från beräkningar av de samlade konsekvenserna av en introduktion av bio-CCS inom svensk fjärrvärme-produktion. Ett resultatexempel är att om fjärrvärmeföretagens bio-CCS-planer genomförs så leder de till en årlig CO₂-avskiljning på ca 5 Mton koldioxid, varav ca 4 Mton utgörs av biogen koldioxid. Vi redovisar också systemkonsekvenser på fjärrvärmens elproduktion och biobränsle-användning. Parametrar som studeras är omfattningen på introduktionen av bio-CCS, styrmedel som ger incitament för bio-CCS, val av avskiljningsprocess och det framtida fjärrvärmeunderlagets storlek.

8.1 GENOMFÖRDA SYSTEMANALYSER, METOD OCH BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Projektets arbetspaket 8 fokuserar på att redovisa systemkonsekvenser av en introduktion av bio-CCS inom den svenska fjärrvärmesektorn. Här koncentrerar vi oss alltså på de samlade konsekvenserna på systemnivån. Vi tar också upp indirekta konsekvenser av introduktionen, exempelvis att fjärrvärmesektorn producerar mindre el och att den elen måste ersättas av annan elproduktion i Nordeuropa.

Vi analyserar alltså konsekvenser av en tänkt utbyggnad av bio-CCS i den svenska fjärrvärmesektorn. CO₂-avskiljningen införs på kraftvärmeanläggningar som eldar biobränslen eller restavfall. Vilka anläggningar som förses med bio-CCS varierar mellan olika beräkningsfall. Vi gör här ingen bedömning av vilken utbyggnad av bio-CCS som är ekonomiskt lönsam utan förutsätter att utbyggnad av olika omfattning kommit till stånd. Fokus är alltså på hur bio-CCS körs och vilka konsekvenserna av detta blir på systemnivån.

Exempel på resultat som tagits fram är:

- Avskild mängd koldioxid
- Resulterande elproduktionsförändring
- Förändrad biobränsleanvändning

Konsekvenserna av bio-CCS-introduktionen påverkas av många parametrar. Exempel på sådana parametrar som studerats är:

- Storleken på utbyggnaden av bio-CCS
- Olika styrmedel för att stödja introduktionen
- Olika avskiljningsprocesser (MEA eller HPC)
- Kapaciteten för avskiljningsanläggningen
- Fjärrvärmeunderlagets storlek

Beräkningarna har genomförts med energisystemoptimeringsmodellen EPOD som innehåller beskrivningar av svensk fjärrvärmeproduktion och nordeuropeisk elproduktion. I EPOD beskrivs den svenska fjärrvärmeproduktionen på ett detaljerat sätt. 30 verkliga fjärrvärmeproduktionssystem beskrivs i detalj. Dessa motsvarar ca 70 % energimässigt av svensk fjärrvärmeproduktion. Övrig fjärrvärme delas in i ett antal typsystem som karaktäriseras av likartad produktionsuppbyggnad. I modellen finns också en detaljerad beskrivning av nordeuropeisk elproduktion där enskilda kraftverk och grupper av elproduktionsanläggningar beskrivs. Elproduktionen och elanvändningen kopplas till olika elområden i de olika länderna. I modellen ingår också alternativ för efterfrågefleksibilitet och energilagring. Produktionsoptimeringen görs med detaljerad tidsupplösning (timme för timme). Beskrivningen av CCS-processernas påverkan på kraftvärmeverken bygger på det arbete som gjordes i den första etappen av Bio-CCS i fjärrvärmesektorn.⁷⁹

I analyserna utgår vi från situationen år 2035. Det gäller både med avseende på el- och fjärrvärmeproduktionens uppbyggnad och för omvärldsförutsättningar som bränslepriser och utsläppsriktpris för koldioxid inom EU ETS. Elpriset är ett av resultaten från optimeringen.

I avsnitten nedan redovisar vi resultaten från beräkningarna. Vi inleder med redovisningar av infångningen av koldioxid för olika beräkningsfall.

8.2 INFÅNGAD KOLDIOXID OCH NETTOFÖRÄNDRING PÅ SYSTEMNIVÅ

8.2.1 Fjärrvärmeföretagens bio-CCS-planer

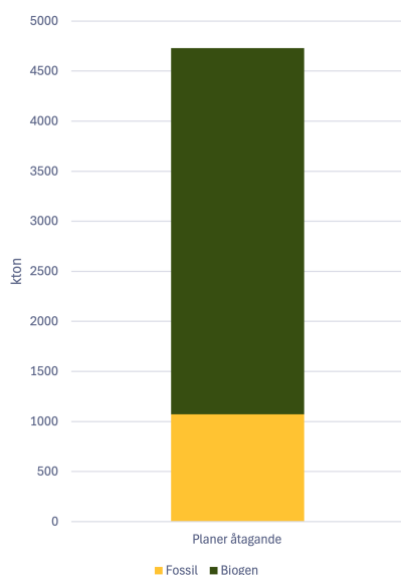
Inom projektet genomfördes en enkät under första kvartalet 2025. Där fick de tillfrågade fjärrvärme- och avfallsförbränningsföretagen bland annat svara på hur deras planer för bio-CCS ser ut. Från enkäten visade att det finns bio-CCS-planer för 14 av de kraftvärmeverk som beskrivs i modellen (CCS-planer på kraftvärmeverk i fjärrvärménät som inte beskrivs enskilt och nya kraftvärmeverk där information om utformning saknas inkluderas inte). Bland dessa återfinns anläggningar för både biobränsle och restavfall. Med utgångspunkt från de svaren har vi i modellen beskrivit var bio-CCS införs och vilka kvantiteter av koldioxid man siktar på att avskilja. I modellen har detta i utgångsläget beskrivits som ett åtagande, det vi säga att anläggningarna körs på ett sätt så att de uppfyller ett åtagande om avskiljning av en viss mängd koldioxid. För de planer där man inte uttryckligen specificerat hur mycket koldioxid man avser att avskilja har vi gjort antagandet att de avskiljer koldioxid motsvarande 90 % av de utsläpp man skulle haft från de aktuella pannorna utan bio-CCS.

I de fall som företagens planer pekar ut vilken avskiljningsprocess man avser att utnyttja så tillämpar vi den i modellbeskrivningen. För de fall då vi inte har någon information om val av avskiljningsprocess gör vi här antagandet att man väljer MEA-processen. I senare avsnitt visar vi att valet av avskiljningsprocess, MEA eller HPC, inte påverkar de samlade resultaten på systemnivån särskilt mycket.

I Figur 20 redovisas den resulterande samlade infångningen av koldioxid. Totalt avskild koldioxid uppgår till 4,8 Mton/år, varav 3,7 Mton utgörs av biogen koldioxid. Det restavfall som går till avfallsförbränning antas till 40 % utgöras av material med

⁷⁹ (Beiron, o.a., 2022)

fossilt ursprung. Det är alltså detta som ger upphov till den fossila koldioxid som avskiljs. Om företagens bio-CCS-planer genomförs skapas alltså 3,7 Mton negativa utsläpp samtidigt som utsläppen av fossil koldioxid minskar med 1,1 Mton.



Figur 20 Infångad koldioxid genom bio-CCS i svensk fjärrvärmeproduktion förutsatt företagens planer [kton/år]

I de ovan redovisade beräkningarna har vi alltså infört bio-CCS på de pannor som företagens planer anger. I beräkningarna har vi sedan lagt in villkor om att en viss mängd koldioxid per anläggning ska avskiljas under året. Det kan översättas till ett styrmedel av typen omvänd auktion som införts i Sverige och där Stockholm Exergi som första bolag nu fått stöd beviljat. Där lovar man, enkelt uttryckt, att årligen avskilja och lagra en viss mängd koldioxid. Uppfylls det villkoret erhåller man det utlovade stödet.

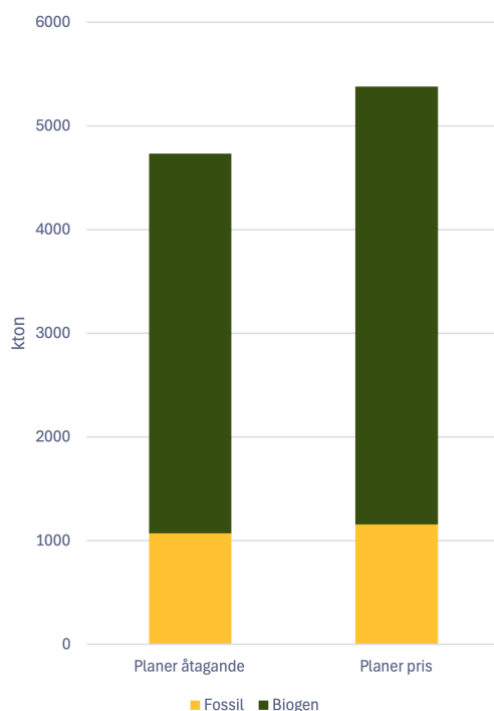
På sikt är det dock sannolikt att en bredare satsning på bio-CCS måste finansieras på annat sätt än direkt statligt stöd (som i den omvända auktionen). Då kan man tänka sig marknadsbaserade system av typen EU ETS som etablerar ett pris på negativa utsläpp. Olika stödsystem diskuteras mer ingående i rapportens avsnitt 7. Vi har här gjort beräkningar för att illustrera konsekvenserna av bio-CCS om man i stället för ett åtagande sätter ett pris på negativa utsläpp av koldioxid. Här har vi valt nivån 125 EURO per ton koldioxid. Det är samma nivå som det antagna priset på utsläpp av koldioxid inom EU ETS år 2035.⁸⁰ Det betyder att avskiljning och permanent lagring både biogen och fossil koldioxid värderas på samma sätt.

Som vi nämnde tidigare gör vi i dessa beräkningar inga bedömningar av hur lönsam utbyggnaden av bio-CCS skulle vara, utan förutsätter att utbyggnaden skett. I tidigare beräkningar har vi konstaterat att högre priser på koldioxid i princip inte förändrar hur driften av koldioxidavskiljningen ser ut. Hade vi förutsatt högre pris på koldioxid hade resultaten därmed varit i princip desamma som de som redovisas här.

I Figur 21 redovisas avskild koldioxid vid två styrmedelsregimer – åtagande respektive pris på koldioxid. Avskiljningen blir något större då vi ansätter ett pris på koldioxid,

⁸⁰ (Energimyndigheten, 2025)

men skillnaden är liten. Det kan tolkas som att företagens planer och tänkta koldioxidavskiljning är rätt dimensionerade och att det inte finns möjlighet till särskilt mycket ytterligare infångning. Det kan förklaras med att de anläggningar där bio-CCS införs redan körs som baslastproduktion och att värmeunderlaget inte ger utrymme för särskilt mycket längre drifttid. Den lilla ökning som kan ses för "pris-fallet" kan i huvudsak förklaras med ökad elproduktion under perioder med låga elpriser, då man i utgångsläget avstod från elproduktionen och körde kraftvärmeverken endast för värmeproduktion. Skälet till den ökade elproduktionen är att man i fallet med en koldioxidpris erhåller ytterligare en intäkt vid drift. Vi återkommer till påverkan på elproduktionen i avsnitt nedan. För anläggningar där vi inte har någon information om storleken på planerad mängd infångad koldioxid – där vi gör ett antagande kring planerad infångad koldioxid baserat på drift utan CCS – kan en ökning i större system också ske på grund av förändrad körordning mellan anläggningar när CCS implementeras. Som vi konstaterat ovan skulle ett högre koldioxidpris knappast ge någon skillnad mot det som visas i figuren.



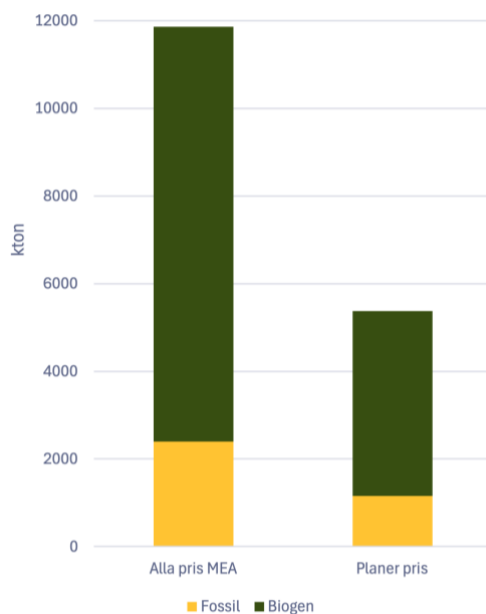
Figur 21 Infångad koldioxid genom bio-CCS i svensk fjärrvärmeproduktion vid olika styrmedelsregim [kton/år]

8.2.2 Brett införande av bio-CCS i svensk fjärrvärme

I avsnittet ovan utgick vi från en utbyggnad av bio-CCS enligt företagens planer. I princip finns dock betydligt fler svenska kraftvärmeverk där bio-CCS skulle kunna införas. I ett beräkningsfall har vi infört bio-CCS på alla de pannor där drifttiden är tillräckligt lång för att kapacitetsutnyttjandet för avskiljningsutrustningen ska bli rimligt, minst 5250 driftstimmar. För biobränsleeldade är ett krav också att den enskilda anläggningen finns beskriven i modellen. Med detta som utgångspunkt har vi infört bio-CCS på alla kraftvärmeverk med avfallsförbränning och på biobränsleeldade kraftvärmeverk motsvarande 50 % av den totala svenska biokraftvärmekapaciteten. Det innebär att bio-CCS införts på 33 faktiska anläggningar och 4 typsystem med avfallskraftvärme. Eftersom en stor del av dessa anläggningar saknar konkreta planer

väljer vi här att göra beräkningarna med styrmedelsvarianten som sätter ett pris på utsläpp och motsvarande värde på infångning av koldioxid.

Figur 22 visar infångad koldioxid för de båda fallen "Planer" (motsvarande företagens planer, 14 anläggningar) och "Alla" (alla kraftvärmeverk där det är rimligt att tänka sig bio-CCS, 33+4 anläggningar). I det senare fallet med brett införande ("Alla") uppgår den totala koldioxidinfångningen till nästan 12 Mton/år, att jämföra med drygt 5 Mton/år i "Plan-fallet". Av de 12 Mton/år utgörs nästan 10 Mton/år av biogen koldioxid som vid permanent lagring skapar negativa utsläpp.

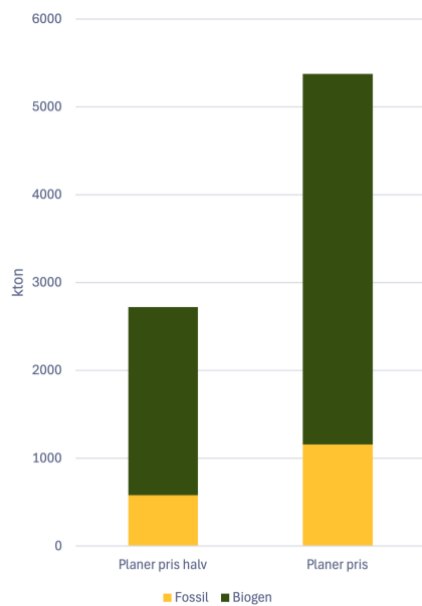


Figur 22 Infångad koldioxid genom bio-CCS i svensk fjärrvärmeproduktion vid brett införande [kton/år]

8.2.3 Storlek på infångningsanläggningen

Som bekant är avskiljning och lagring av koldioxid dyr teknik med stora investeringsbehov. Det är då viktigt med högt kapacitetsutnyttjande för utrustningen. Av det skälet ställde vi oss frågan om det kan vara klokt att dimensionera infångningsutrustning inte för hela det maximala rökgasflödet utan endast för en andel av flödet. Tanken var då att avskiljningsanläggningen skulle kunna köras på full kapacitet även då kraftvärmeverket går ned på dellast.

För att studera detta utgick vi från företagens bio-CCS-planer, men dimensionerade i modellen infångningsanläggningen för halva det maximala rökgasflödet. Figur 23 visar utfallet i form av årlig infångning av koldioxid. Det visar sig att även infångad koldioxid halveras. Därmed fanns det inte någon märkbar kapacitetsutnyttjningsvinst med att halvera infångningsanläggningens storlek. Halva kapaciteten ger halva avskiljningen. Det visar att företagens planer är väl dimensionerade och att de berörda kraftvärmeverken sällan går på dellast. Samma slutsats kan dras om motsvarande ändring görs i fallet med en bredare utbyggnad av bio-CCS ("Alla"). Där leder urvalet av anläggningar till att det inte heller där blir särskilt mycket dellastkörning och att minskad kapacitet för infångningsutrustningen knappast ökar kapacitetsutnyttjandet.



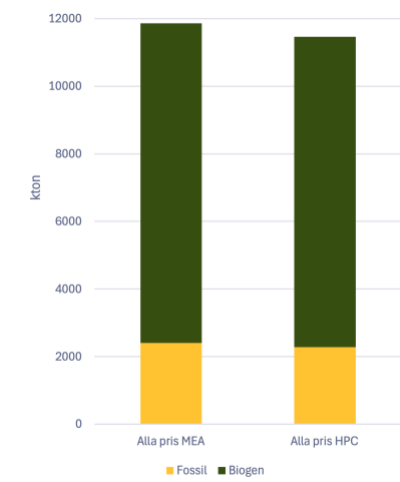
Figur 23 Infångad koldioxid genom bio-CCS i svensk fjärrvärmeproduktion vid olika kapacitet på avskiljningsanläggningen [kton/år]

8.2.4 Systemkonsekvenser av olika avskiljningsprocesser

Det finns en mängd olika processer som kan utnyttjas för att fånga in koldioxid för rökgaser. De två vanligaste är MEA och HPC. Även inom huvudutformningen MEA eller HPC kan processens konfiguration variera. Vi har i beräkningarna valt det som vi i kommunikation med företagen och forskare identifierat som det typiska. Exempelvis har i, jämfört med tidigare beräkningar ökat värmeåtervinningen vid MEA-processen genom att utnyttja värmepump och därmed nyttiggöra lågtemperaturrestvärme från infångningsprocessen.

För att studera hur processvalet påverkar koldioxidinfångningen har vi gjort beräkningar där bio-CCS-introduktionen främst baseras på MEA- respektive HPC-tekniken. I båda beräkningsfallen har vi dock för de planer där företagen offentliggjort ett specifikt teknikval tillämpat den avskiljningsprocess som företagen valt. I viss omfattning betyder det alltså att MEA-fallet innehåller ett litet inslag av HPC och omvänt, att HPC-fallet innehåller ett litet inslag av MEA. Beräkningarna har gjorts för fallet med den breda introduktionen av bio-CCS (33+4 anläggningar).

Som framgår av Figur 24 så har valet av koldioxidinfångningsprocess mycket liten påverkan på den resulterande samlade infångningen av koldioxid genom bio-CCS. Även om processvalet för den enskilda anläggningen är av stor betydelse och påverkas av en mängd överväganden så ger valet liten påverkan på den infångade mängden koldioxid på systemnivå.

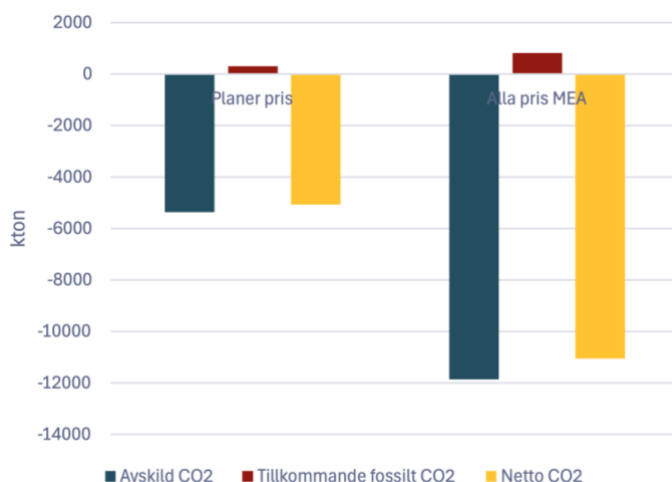


Figur 24 Infångad koldioxid genom bio-CCS i svensk fjärrvärmeproduktion vid olika avskiljningsprocesser [kton/år]

8.2.5 Nettoförändringar på systemnivå

Infångning av koldioxid är en energikrävande process. Det innebär att den uppofrade energin måste ersättas av annan värme- och elproduktion för att tillfredsställa energibehoven. Tydligast är kanske att fjärrvärmens bidrag till elförsörjningen minskar något genom intern elförbrukning kopplad till bio-CCS. Den tillkommande, ersättande energiproduktionen kan delvis vara baserad på fossila energikällor. Frågan blir då om minskningen av koldioxidutsläpp som bio-CCS åstadkommer äts upp av tillkommande utsläpp relaterade till ersättande energiproduktion. Det tydliga svaret är nej. Som framgår av Figur 25 blir det i och för sig vissa tillkommande fossila utsläpp som en följd av den energiproduktion som ersätter energi som avskiljningsprocessen medför, men dessa är nästa försumbara i förhållande till den utsläppsminskning som bio-CCS möjliggör.

Att de tillkommande utsläppen är så små är en konsekvens av att den uppofrade energin för bio-CCS är måttlig, samtidigt som utsläppen från det nordeuropeiska elsystemet minskar tydligt över tid, i takt med att inslaget av förnybar elproduktion antas öka kraftigt till 2035.



Figur 25 Nettokonsekvenser på negativa utsläpp av koldioxid i Nordeuropa av en introduktion av bio-CCS i svensk fjärrvärme [kton/år]

8.3 PÅVERKAN PÅ FJÄRRVÄRMENS ELBALANS

Som noterats i föregående avsnitt är bio-CCS energikrävande och den förbrukar delar av den elproduktion som fjärrvärmerna, genom kraftvärme, annars bidrar med.

Elanvändningen kan kopplas till följande tre områden som ingår i beräkningarna:

- Elbehov/elbortfall från själva koldioxidinfångningsprocessen
- El för drift av värmepump för återvinning av restvärme från infångningsprocessen
- Komprimering av CO₂

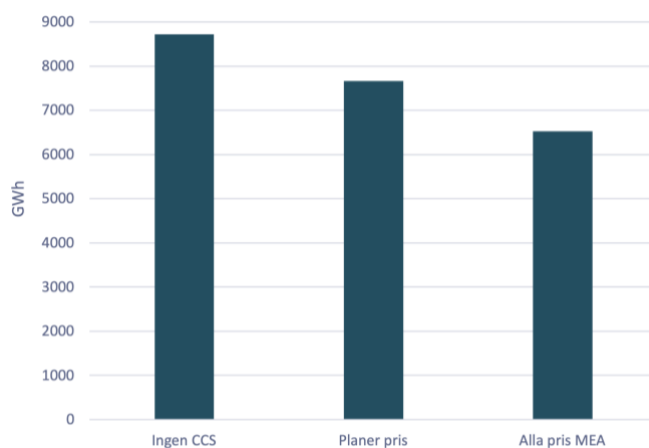
I avsnitten nedan redovisar vi hur storleken på eltillförseln till elsystemet från fjärrvärmesektorn påverkas, hur påverkan på eltillförseln fördelar sig över året samt ger exempel på viss bio-CCS-relaterad elanvändningsanpassning som sker vid höga elpriser.

8.3.1 Nettopåverkan på eltillförseln från kraftvärmerna

I Figur 26 redovisas nettoeltillförseln – dvs. inklusive drift av CCS-processen, förändringar i användning av el i fjärrvärmeproduktionen och kompression av CO₂ – från den svenska fjärrvärmesektorn vid tre beräkningsfall:

- Utan introduktion av bio-CCS
- Utbyggnad av bio-CCS enligt företagens planer (14 anläggningar), ett pris på koldioxid förutsätts
- Utbyggnad av bio-CCS vid alla lämpliga kraftvärmeverk (33 anläggningar), ett pris på koldioxid förutsätts

Om företagens bio-CCS-planer genomförs minskar den svenska fjärrvärmesektorns bidrag till eltillförseln med ca 1 TWh/år. Vid den bredare bio-CCS-introduktionen minskar eltillförseln ännu mer, drygt 2 TWh/år. I båda fallen kommer dock fjärrvärmens kraftvärmeverk även fortsättningsvis att ge viktiga bidrag till elförsörjningen. I det större elförsörjningsperspektivet är det bortfall av el som bio-CCS medför förhållandevis litet. Den elprispåverkan som blir följden av utbyggnad av bio-CCS är också liten, som årsgenomsnitt ca 5 kr/MWh i alla elområden i fallet med företagens planer för bio-CCS.



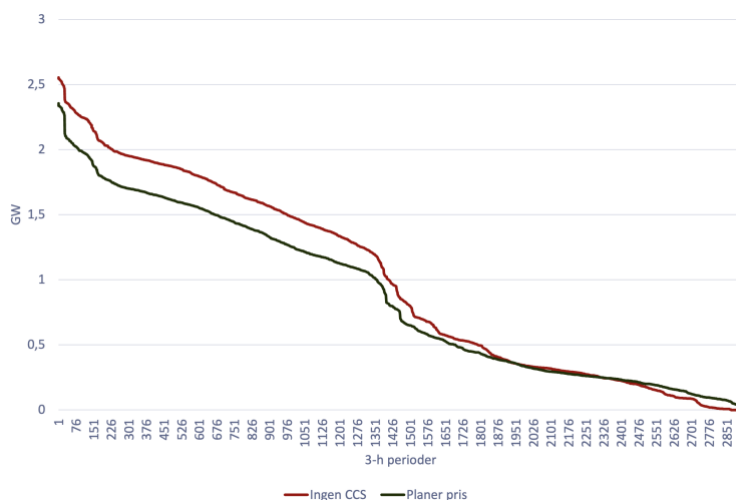
Figur 26 Eltillförsel från svensk fjärrvärme vid olika omfattande introduktion av bio-CCS [GWh/år]

8.3.2 Elproduktionens påverkan över året

I föregående avsnitt redovisades den årliga minskningen av fjärrvärmesektorns eltillförsel till elsystemet vid en utbyggnad av bio-CCS. I Figur 27 visas hur eltillförseln (kraftvärmeverkens elproduktion minus elanvändningen kopplad till bio-CCS) påverkas över året av en utbyggnad av bio-CCS enligt företagets planer. Vi utgår här från styrmedelsfallet med ett pris på koldioxid. I figuren har elproduktionen från fjärrvärmesektorn rangordnats från högsta produktion till lägsta. Av figuren framgår att en utbyggnad av bio-CCS minskar eltillförseln under huvuddelen av året. Minskningen är typiskt av storleksordningen 270 MW.

Under delar av året ser man dock i stället en liten ökning av eltillförseln från fjärrvärmesektorn jämfört med fallet utan bio-CCS. Förklaringen till detta är att den intäkt som skapas för infångad koldioxid motiverar drift av elproduktion även vid tider då det låga elpriset annars skulle medfört att kraftvärmeverkens elproduktion stoppats.

Vid den största elproduktionen, då vi har de allra högsta elpriserna, är bortfallet av el vid bio-CCS något mindre än under huvuddelen av året. Då bidrar bio-CCS med viss flexibilitet genom att stoppa driften av den värmepump som används för värmeåtervinning av restvärme från koldioxidinfångningsprocessen. Man uppoffrar alltså viss totalverkningsgrad för att ytterligare bidra till elförsörjningen. Vid de elpriser som uppträder under det studerade året är dock elpriset i princip aldrig så högt så att man väljer att helt stoppa koldioxidinfångningen för att på det sättet minska elanvändningen och därigenom stötta elsystemet.

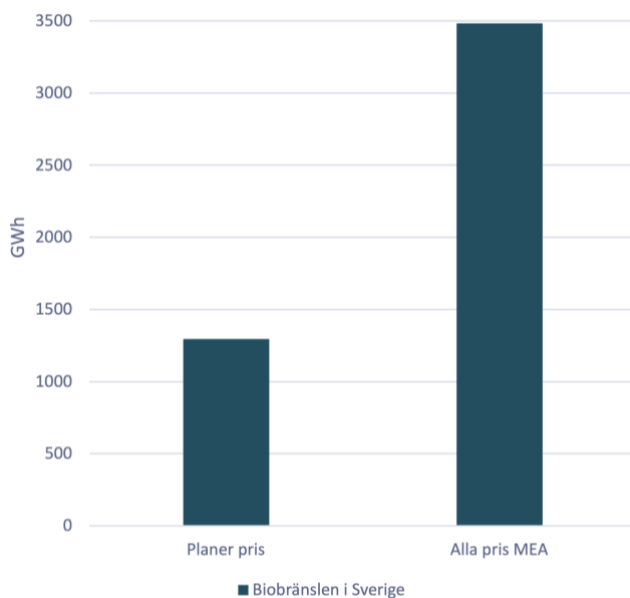


Figur 27 Elproduktionens varaktighet och fördelning över året med och utan bio-CCS, rangordnad från högsta till lägsta produktion [GW]

8.4 FÖRÄNDRAD BIOBRÄNSLEANVÄNDNING

En utbyggnad av bio-CCS medför en viss ökning av den svenska fjärrvärmesektorns biobränsleanvändning, Figur 28. Ökningen förklaras av att infångningsprocessen kräver energi, ökad drifttid för de kraftvärmeverk som utrustats med koldioxidinfångning samt att elproduktion i kraftvärmeverken med bio-CCS sker under större del av året, som beskrivits ovan. Värmeåtervinningen av restvärme från

infångningsprocessen ökar totalverkningsgraden och begränsar ökningen av biobränsleanvändningen.



Figur 28 Förändrad biobriensleanvändning vid olika omfattande introduktion av bio-CCS [GWh/år]

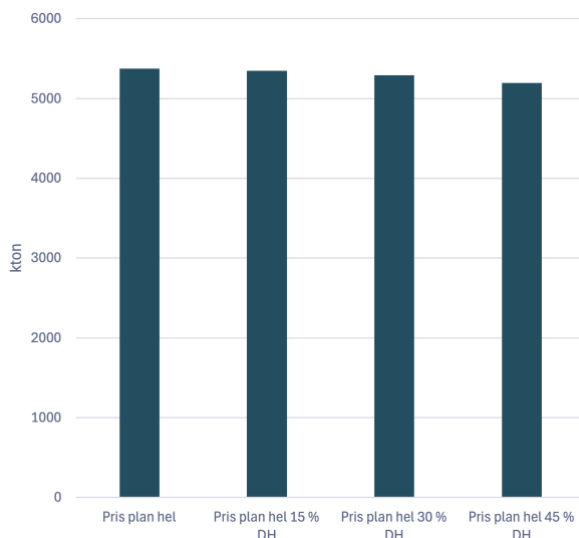
I fallet med en bio-CCS-utbyggnad i linje med företagens planer så ökar biobriensleanvändningen med drygt 1 TWh/år. För att ge perspektiv på detta kan man konstatera att fjärrvärmesektorn i fallet utan bio-CCS använder 32 TWh biobrienslen (grot, bark, spån, energived, pellets och RT-flis). Ökningen av biobriensleanvändningen stannar alltså vid 4 %. I fallet med den bredare introduktionen av bio-CCS ("Alla", 33+4 anläggningar) blir ökningen av biobriensleanvändningen av naturliga skäl större, ca + 3,5 TWh/år jämfört med fallet utan bio-CCS

Dessa resultat erhålls om ekonomin får styra driften. Naturligtvis kan fjärrvärmeföretagen, om de så vill, välja att inte öka sin biobriensleanvändning. Då blir dock koldioxidinfångningen något mindre.

En mycket liten ökning av biobriensleanvändningen uppträder också utanför Sveriges gränser, som en följd av viss ökad elproduktion för att ersätta det bortfall av el som bio-CCS orsakar. Den utländska biobriensleanvändningsökning är dock nästan försumbar.

8.5 VÄRMEUNDERLAGETS BETYDELSE

Det råder viss osäkerhet om hur stora de framtida fjärrvärmeleveranserna kommer att bli. Exempel på sådant som påverkar är energieffektiviseringstakten i bebyggelsen och hur fjärrvärmens konkurrenskraft på uppvärmningsmarknaden utvecklas. Kopplat till osäkerheten om storleken på de framtida fjärrvärmeleveranserna finns då frågan om hur olika storlek på fjärrvärmeunderlaget skulle påverka konsekvenserna av bio-CCS-satsningarna. För att studera detta har vi gjort beräkningar där vi varierat hur stora de framtida fjärrvärmeleveranserna blir. Vi utgår då från en utbyggnad av bio-CCS i linje med företagens planer. I Figur 29 visas mängden infångad koldioxid vid olika tänkt minskning av fjärrvärmeleveranserna jämfört med utgångsläget. Som framgår av figuren påverkas koldioxidinfångningen endast marginellt av minskade fjärrvärmeleveranser. Det gäller även vid kraftiga minskningar.



Figur 29 Värmeunderlagets påverkan på avskild koldioxid vid en introduktion av bio-CCS enligt företagens planer [kton/år]

Orsaken till att konsekvenserna för koldioxidinfångningen blir så små är att de kraftvärmeanläggningar som utrustas med bio-CCS är utpräglade baslastanläggningar som i huvudsak kommer att köras på samma sätt även vid mindre fjärrvärmeleveranser. Konsekvenserna blir större för andra värmeproduktionsanläggningar. Självklart skulle stora minskningar av fjärrvärmeleveranserna leda till andra dramatiska konsekvenser för de drabbade fjärrvärmeföretagen, men det är inte temat för analyserna i detta projekt.

8.6 PERSPEKTIV PÅ BIO-CCS PÅVERKAN PÅ CO₂-UTSLÄPP OCH ELPRODUKTION

I avsnitten ovan redovisar vi konsekvenserna av en utbyggnad av bio-CCS i den svenska fjärrvärmesektorn. Det kan vara intressant att ge perspektiv på dessa konsekvenser genom att sätta dessa i relation till utvecklingen inom andra områden.

Om företagens bio-CCS-planer genomförs så skulle man år 2035 fånga in 5 Mton koldioxid. Det kan jämföras med Sveriges samlade territoriella koldioxidutsläpp år 2023 som enligt SCBs statistikdatabas uppgick till 44,4 Mton (exklusive LULUCF och utrikes transporter).⁸¹ Den koldioxidinfångning som fjärrvärmeföretagens planerade bio-CCS-satsningar skulle ge är alltså ganska stor även i relation till Sveriges totala utsläpp.

Den uppoffrade elen vid en bio-CCS-utbyggnad enligt företagens planer leder till ett minskat eltillskott från fjärrvärmesektorn med ca 1 TWh/år. Detta sammanhänger alltså med en infångning av ca 5 Mton koldioxid per år. Den ökade elanvändningen på 1 TWh kan jämföras med förväntningarna på ett ökat svenskt elbehov på 45 – 75 TWh till 2035.⁸²

⁸¹ (Naturvårdsverket, 2024)

⁸² (Energimyndigheten, 2025)

Ett annat exempel är att jämföra med elektrifieringen av transportsektorn. Där förutser man en ökning av elanvändningen för inrikes transporter med 11 – 14 TWh till år 2035.⁸³ Den elanvändningsökningen förväntas resultera i en kraftig minskning av transportsektorns koldioxidutsläpp som i nuläget (2023) uppgår till ca 14 Mton.⁸⁴

8.7 SYSTEMKONSEKVENSER - RESULTATSAMMANFATTNING

I avsnitten ovan har vi redovisat resultat som beskriver konsekvenser av en utbyggnad av bio-CCS inom fjärrvärmesektorn. Vi intresserar oss då för resultaten på "total-nivån" och beaktar systemkonsekvenser. Analyserna har gjorts för situationen kring år 2035. Analyserna undersöker endast driftsfasen och förutsätter alltså att bio-CCS-planerna har förverkligats. Vi analyserar alltså inte själva lönsamheten i de enskilda bio-CCS-satsningarna. Här sammanfattar vi de viktigaste resultaten från systemanalyserna:

- Förverkligas företagets bio-CCS-planer (14 anläggningar) avskiljs ca 5 Mton CO₂ per år (varav ca 4 Mton per år är biogena)
- Om alla lämpliga fjärrvärmeanläggningar (33 anläggningar) utrustas med bio-CCS avskiljs ca 12 Mton CO₂ per år (varav ca 10 Mton per år är biogena)
- Valet av avskiljningsprocess (MEA eller HPC) ger liten påverkan på resultaten
- Resultaten vid två olika styrmedelsregimer (infångningsåtagande eller koldioxidpris) ger likartade resultat
- Biobränsleanvändningen ökar något som en följd av bio-CCS-introduktionen om ekonomin får styra
- Bio-CCS-introduktionen minskar fjärrvärmesektorns eltillförsel till elsystemet något
- Elprispåverkan av bio-CCS blir mycket liten
- Vissa fossila CO₂-utsläpp från ersättande elproduktion i omvärlden tillkommer, men dessa är endast av marginell storlek
- Elpriset måste vara mycket högt för att CO₂-avskiljningen ska "backas", men ...
- ... däremot kan elanvändning till infångningsprocessens värmeåtervinning via värmepump stoppas vid höga elpriser
- Mängden avskild CO₂ påverkas nästan inte alls av en eventuell minskning av fjärrvärmeleveranserna på sikt

⁸³ (Energimyndigheten, 2025)

⁸⁴ (Naturvårdsverket, 2024)

9 Diskussion och slutsatser

Fjärrvärmesektorn har stora möjligheter och en vilja att bidra med utsläppsminskning och negativa utsläpp genom att avskilja och lagra koldioxid från förbränning av biobränslen och avfall. Mycket har hänt sedan projektet startade 2023. Bland annat har Stockholm Exergi och Öresundskraft tagit investeringsbeslut om CCS och den första omvända auktionen har genomförts, med Stockholm Exergi som vinnare. Samtidigt kvarstår flera centrala hinder som måste hanteras om fjärrvärmesektorn ska kunna bli en väsentlig kolsänka. Det gäller exempelvis kring långsiktiga styrmedel, infrastruktur och finansiering.

9.1 DISKUSSION

Teknikutvecklingens möjligheter och begränsningar

Val av avskiljningsteknik är situationsberoende – det finns inte ett "bästa val", utan varje anläggning behöver bedömas utifrån lokala förutsättningar. För många står valet mellan aminlösningar och HPC. Projektets workshopar har även lyft upp andra tekniker, såsom AMP/DMSO och kemcyklisk förbränning (CLC).

Resultat från Chalmers analys av lärlkurvor för CCS visar att man inte kan förvänta sig hög inlärningstakt för CCS, eftersom projekten ofta är stora, komplexa och anpassade till platsens förutsättningar. Det begränsade antalet anläggningar som byggs minskar möjligheten till snabb kostnadsreduktion.

Samverkan kring infrastruktur kan vara kostnadseffektivt – men det saknas samordnande parter

Så länge som det inte finns möjlighet att lagra koldioxid i Sverige måste den avskilda koldioxiden transporteras till exempel till Danmark eller Norge. Logistiken innebär relativt stora kostnader och särskilt för mindre aktörer kan samverkan i kluster vara nödvändigt för att få ned kostnaderna. Samtidigt är samverkan förenad med betydande utmaningar såsom asymmetrier i kapacitet och risktolighet mellan stora och små aktörer, beroenden mellan projekt med olika tidslinjer, samt avsaknad av stödstrukturer för gemensamma investeringar.

Det behövs incitament för gemensamma lösningar, till exempel investeringsstöd riktat till delad infrastruktur eller en nationell samordning kring infrastrukturen för koldioxid. Dessutom behövs aktörer med mandat och resurser att samordna och driva lokala klustersamarbeten.

Stor lagringspotential och hög mognadsgrad – i våra grannländer

Under överskådlig tid är svenska anläggningar hänvisade till slutlagring i andra länder. Danmark och Norge ligger långt fram och har pågående och planerade lagringsprojekt med stor kapacitet för lagring i närtid. Sverige har också tecknat bilaterala avsiktsförklaringar med dessa länder om permanent lagring. Island fokuserar på lagring genom mineralisering i basalt. Sverige har ännu inga operativa lager för koldioxid, men potentialen utreds bland annat inom ett regeringsuppdrag till SGU.

Policy och regelverk i omvandling – men ännu ofullständiga

Negativa utsläpp genom bio-CCS är en nödvändighet för att uppnå klimatmål – såväl inom Sverige som EU. Trots det släpar den regulatoriska utvecklingen inom EU efter. Bio-CCS ingår till exempel fortfarande inte i EU ETS eller andra "EU-pelare". Även om EU:s certifieringssystem för kolsänkor (CRCF) skapar en struktur för kvalitetssäkring, finns oklarheter kring hur certifikat får användas på kort och lång sikt, exempelvis i frivilligmarknader och för internationell handel.

Även om vissa regelverkshinder från etapp 1 har lösts kvarstår fortfarande vissa och nya har identifierats, till exempel kring allokering av fossil och biogen koldioxid vid CCU/CCS. Många fjärrvärmeföretag skulle vilja se en flexibilitet kring allokering, men särskilt utsläppshandeln hindrar detta trots att klimatnyttan är densamma med eller utan allokering.

Finansieringsgapet – en flaskhals för att uppnå fjärrvärmesektorns potential?

Finansieringsfrågan är avgörande för hur många CCS-planer som kommer att realiseras. Den genomförda, omvända auktionen har visat sig fungera, men de ekonomiska resurserna som erbjuds via auktionen är begränsade. Det finns en stor potential till finansiering via frivilligmarknaden för krediter, men det är osäkert om företag vågar förlita sig på frivilligmarknaden som enda finansiering. För CCS vid avfallsförbränning, där fossil andel omfattas av EU ETS, är det undvikna utsläppsprättspriset fortfarande otillräckligt.

Det skulle behövas ett svenskt styrmedel för finansiering av CCS på den fossila andelen av koldioxiden, t.ex. via differenskontrakt, samt ett stabilt, långsiktigt EU-ramverk för negativa utsläpp. Beroende på hur frivilligmarknaden utvecklas kan det också behövas en svensk överbryggande lösning mellan omvända auktionen och ett långsiktigt EU-styrmedel för att undvika ett "finansieringsgap".

Systempåverkan – hanterbara effekter men påverkan på elbalansen

Systemanalyserna visar att en storskalig utbyggnad av CCS i fjärrvärmesektorn bedöms ha hanterbara konsekvenser på elpriser och biobränslebehov.

Beräkningarna visar att elproduktionen från kraftvärme minskar något, från 9 TWh till 8 TWh i ett fall där konkreta CCS-planer i branschen realiseras. Resultaten visar vidare att elpriset måste vara mycket högt för att man ska välja att stoppa koldioxidavskiljningen, men däremot kan värmeåtervinning via värmepump stoppas vid höga elpriser. Slutsatsen är att CCS i fjärrvärmesektorn är genomförbart utan större systemstörningar.

9.2 SLUTSATSER

- **Bio-CCS i fjärrvärmesektorn har hög klimatnytta och teknisk potential**, med upp till 10 Mton negativa utsläpp per år – men realisering kräver rätt förutsättningar.
- **Avskiljningsteknik måste anpassas lokalt – ingen "one size fits all"**, och teknikutveckling behövs för att minska kostnader och öka robusthet.
- **Samverkan kring infrastruktur kan sänka kostnader**, men dagens styrmedel och tillståndprocesser försvårar klustersamarbeten. Det behövs även nationell samordning, koordinerande parter och affärsmodeller som hanterar olika förutsättningar mellan aktörer.
- Etablering av en **nationell infrastrukturplan** för koldioxid behövs, inklusive noder, transportvägar och klusterkoordinering.
- Under överskådlig tid är svenska företag hänvisade till **lagring i andra länder**. Danmark och Norge har pågående och planerade lagringsprojekt med stor lagringskapacitet. Island fokuserar på lagring genom mineralisering i basalt.
- **Det är ännu oklart hur negativa utsläpp ska hanteras inom EU:s klimatpolitiska system**, och det råder olika åsikter om de ska integreras i någon av de befintliga pelarna eller som en egen.
- Vissa av tidigare identifierade **regelverkshinder** är lösta, men andra kvarstår, såsom hinder att lagra koldioxid i Östersjön om det skulle bli aktuellt.
- **Finansieringsstödet via omvänd auktion är otillräckligt på sikt och hanterar inte fossil koldioxid från avfallsförbränning**. För att undvika ett "finansieringsgap" krävs kompletterande stöd för fossil CCS (vid avfallsförbränning), ett långsiktigt styrmedel för negativa utsläpp samt en svensk brygglösning däremellan.
- **Frivilligmarknaden erbjuder stor potential för finansiering**, men kräver tydlighet för hur den kan samverka med framtidens styrmedel och finansiering.
- **Bio-CCS kan införas utan större påverkan på energisystemet**, men kommer att ge viss minskad elproduktion från kraftvärme.

10 Referenser

10.1 REFERENSER SOM ANVÄNDS I RAPPORTEN

- Aagaard, P., Anthonsen, K., Mortensen, G., Bergmo, P., & Snæbjörnsdóttir, S. (2014). *Screening and ranking of aquifer formations, storage units and traps*. NORDICCS Technical report D.6.2.1301, NORDICCS, 44 s.
- Beiron, J., & Johnsson, F. (2024). Progressing from first-of-a-kind to Nth-of-a-kind: Applying learning rates to carbon capture deployment in Sweden. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 137, 104226. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104226>
- Beiron, J., Svanberg Frisinger, M.-S., Holm, J., Johnsson, F., Unger, T., & Wolf, J. (2022). Teknik, systemintegration och kostnader. . Energiforsk rapport 2022:837.
- Bellona. (2024). *Status på CO₂-lagringslisenser i Norge*. Notat Bellona, Cathrine Ringstad, 2024, 12 s. .
- Bloomberg. (2025). EU ETS II Market Outloo. BloombergNEF.
- Bollen, J., van Cappellen, L., Duijn, D., & Rooijers, F. (2022). Carbon Take Back Obligation an Economic Evaluation. CE Delft. Hämtat från https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/06/CE_Delft_210317_Carbon_Take_Back_Obligation_Def.pdf
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N., & Mathiassen, O. (2007). *CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards*. . International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007:1, 62–68.
- Carlsson, J., Edberg, M., Gullberg, V., & Nieswand, N. (2022). *Increasing freight transport capacity*. Chalmers Tekniska Högskola .
- CCSA / Zep. (2024). *Achieving a European market for CO₂ transport by ship*.
- Department for Business, Energy & Industrial strategy. (maj 2021). *Cluster Sequencing for Carbon Capture Usage and Storage Deployment: Phase-1 - Background and guidance for submissions*.
- DNV. (2024). CETO: Technology Qualification of Low-pressure CO₂ Ship Transportation- Summary Report. . Equinor Energy AS, Gassco AS, TotalEnergies EP Norge, Shell Global Solutions International.
- Energiföretagen Sverige. (2024). *Remissvar av Energimyndighetens rapport Styrmedel för CCS och CCU Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid* .
- Energimyndigheten. (2024). Fullständig utlysningstext - Investerings- och driftstöd för bio-CCS. Hämtat från <https://www.energimyndigheten.se/utlysningar/investerings-och-driftstod-for-bio-ccs/>
- Energimyndigheten. (2024). Industriklivet. Hämtat från <https://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/forskning/industri/industriklivet/>
- Energimyndigheten. (2024). Styrmedel för CCS och CCU - Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid. Energimyndigheten rapport ER 2023:26.
- Energimyndigheten. (2024). Stöd för bio-CCS genom omvänd auktion. Hämtat från <https://www.energimyndigheten.se/klimat/ccs/statligt-stod-for-bio-ccs/>
- Energimyndigheten. (2025). Scenarier över Sveriges energisystem: Vägar till ett energisystem med nettonollutsläpp 2050. Energimyndigheten rapport ER 2025:13.

- Energistyrelsen. (mars 2025). Great interest in Denmark's CCS fund: 16 companies want to apply. Hämtat från <https://ens.dk/en/press/great-interest-denmarks-ccs-fund-16-companies-want-apply>
- Energistyrelsen. (u.å.). CCS tenders and other funding for CCS development.
- EU-kommissionen. (2023). *Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards.*
- Europeiska kommissionen . (2024b). Retrieved from: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en, accessed 2025-03-18.
- Europeiska kommissionen. (2024a). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. *Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU.* . Retried from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52024DC0062> accessed 2025-02-03.
- Fridahl, M., Lundblad, L., & Nehler, T. (2022). *Stödsystem för bio-CCS i Sverige.* Energiforsk rapport 2022:839.
- IEA. (2023). *Energy Technology Perspective 2023.* International Energy Agency, 2023, 464 s. .
- ISO. (2022). Net zero guidelines. Geneva: International Organisation of Standardization (ISO). Hämtat från <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:iwa:42:ed-1:v1:en>.
- ISO. (2023). Greenhouse gas management and climate change management and related activities — Carbon neutrality. . International Organization of Standardization.
- Jenkins, S., Kuijper, M., Helferty, H., Girardin, C., & Allen, M. (januari 2023). Extended producer responsibility for fossil fuels. 18(1). Environmental Research Letters. Hämtat från <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aca4e8/pdf>
- Johnsson, F., Zetterberg, L., & Möllersten, K. (november 2023). Mot nettonollutsläpp – hur kan koldioxidavskiljning bidra? . SNS Analys 98.
- Konkurrensverket. (2022). Yttrande Energimyndighetens rapport "Första, andra, tredje... Förslag på utformning av ett stödsystem för bio-CCS" (ER 2021:31).
- Kuijper, M., Holleman, E., & van Soest, J. (januari 2021). Carbon Takeback Obligation A Producers Responsibility Scheme on the Way to a Climate Neutral Energy System. Hämtat från https://uploads-ssl.webflow.com/5f3afd763fbfb08ae798fbd7/60336e65ccc97506f7fc4036_CTBO_Final_Report_Jan_2021_Complete.pdf
- Lindeberg, E. (2023). *CO₂ pipeline transport as a competitive alternative to ship transport in Nordic CCS Scenarios.* CO2 Technology AS.
- Mantulet, G., Peffen, A., & Cail, S. (2023). Is the current design of the EU ETS suited for post-2030 deep decarbonisation? . *Enerdata.*
- Matter, J., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S., Oelkers, E., Gislason, S., Aradottir, E., . . . al, e. (2016). *Rapid carbon mineralisation for permanent and safe disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions.* Science, 352 (2016), s. 1312–1314.
- Melakh, Y. (2025). Making Carbon Removals a Real Climate Solution: How to integrate carbon removals into EU Climate Policies. E. Institute.
- Meyer-Ohlendorf, N. (2023). Making Carbon Removals a Real Climate Solution: How to integrate carbon removals into EU Climate Policies. E. Institute.
- Mortensen, G. (2014). *CO₂ Storage Atlas for Sweden – a contribution to the Nordic Competence Centre for CCS, NORDICCS.* Sveriges geologiska undersökning, Poster vid Geologiska vintermötet 2014..

- Mortensen, G. (2016). *Koldioxidlagring i Sverige – sammanställning och resultat från NORDICCS*. Sveriges geologiska undersökning, SGU-rapport 2016:20, 2016, 52 s.
- Mortensen, G. (2017). *Geologisk lagring av koldioxid i Sverige – Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen*. . Sveriges geologiska undersökning, Rapporter och meddelanden 142, 2017, 119 s.
- Mortensen, G., & Sopher, D. (2021). *Geologisk lagring av koldioxid i Sverige och i grannländer – status och utveckling*. Sveriges geologiska undersökning, Rapportering av regeringsuppdrag RR 2021:04, 2021, 50 s.
- Naturvårdsverket. (den 17 december 2024). Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser. Hämtat från <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/>
- Naturvårdsverket och Energimyndigheten. (april 2022). *Industrins klimatomställning - Underlagsrapport till regeringsuppdraget om Näringslivets klimatomställning*. Naturvårdsverket rapport 7045.
- Northern Lights. (2024). *Annual report 2024*.
- Profu. (2025). *Avfallsbränslemarknaden 2025*.
- Race to Zero. (2022a). *Race to Zero Lexicon*. UNFCCC/Climate Champions. Hämtat från <https://climatechampions.unfccc.int/wp-content/uploads/2022/06/R2Z-Lexicon-2.0.pdf>.
- Race to Zero. (2022b). *Interpretation Guide, Race to Zero Expert Peer Review Group*. .
- Ratouis, T., Snæbjörnsdóttir, S., Voigt, M., Sigfússon, B., Gunnarsson, G., Aradóttir, E., & Hjörleifsdóttir, V. (2022). *Carbfix 2: A transport model of long-term CO₂ and H₂S injection into basaltic rocks at Hellisheidi, SW_Iceland*. International Journal of Greenhouse Gas Control 114 (2022), 20 p.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103586>.
- Regeringen. (2023). Regeringens budget - Utgiftsområde 20 Klimat, miljö och natur. Prop. 2023/24:1 Utgiftsområde 20.
- Regeringen. (2024). SFS 2024:626 Förordning om statligt stöd till avskiljning, transport och geologisk lagring av koldioxid med biogent ursprung.
- RVO. (den 6 augusti 2024). SDE++ Features. Netherlands Enterprise Agency.
- RVO. (den 16 april 2025a). Energy and climate innovations. . Netherlands Enterprise Agency.
- RVO. (den 24 april 2025b). MIA and Vamil for entrepreneurs. Netherlands Enterprise Agency .
- Røe, I., Oeuvray, P., Mazzotti, M., & Roussanaly, S. (2024). Comparative Assessments of At-Sea and Inland Low- and Medium-Pressure CO₂ Transport. *Energies*, 17(6171).
- Science-based targets. (2022). *FAQs*. Hämtat från *Science Based Targets*: <https://sciencebasedtargets.org/faqs#what-are-the-emissions-scopes-which-scopes-do-targets-have-to-cover> den 26 10 2024.
- SGU. (2025). *Geologisk lagring av koldioxid, delrapport 2. Sveriges geologiska undersökning*. Rapportering av regeringsuppdrag RR 2025:02, 2025, 54 s.
- Sköldberg, H., Beiron, J., Fridahl, M., Gode, J., Grubbström, C., Gustavsson, M., . . . Zetterberg, L. (2022). *Bio-CCS i fjärrvärmesektorn – Syntes*. Energiforsk rapport 2022:842. Hämtat februari 2022
- SOU. (2023). *Förnybart i tanken - Ett styrmedelsförslag för en stärkt bioekonomi. Delbetänkande från Bioekonomiutredningen*. Statens offentliga utredningar SOU 2023:15.

- SOU. (2025). Spänning i tillvaron - hur säkrar vi vår framtida elförsörjning? *Betänkade av Elmarknadsutredningen*. Stockholm: SOU 2025:47.
- UK Government. (den 4 oktober 2024). *Government reignites industrial heartlands 10 days out from the International Investment Summit*.
- UK Government. (den 8 april 2025). *UK carbon capture, usage and storage (CCUS)*.
- Vattenfall avbryter satsning på bio-CCS. (den 10 december 2024). *Bioenergitidningen*.
- Østby Stub, S., Svendsen Skriung, C., Post-Melbye, A., & Holm, M. (2019). New business models for carbon capture and storage. *Publicerad av Zero Emission Resource Organisation*.

10.2 ÖVRIGA UNDERLAG OCH LÄSTIPS

Nedan följer exempel på andra underlag som använts i vissa specifika avsnitt i rapporten. Dessa kan ses som lästips för den som önskar förkovra sig ytterligare kring vissa frågor.

10.2.1 Hantering av negativa utsläpp i EU-regelverken (avsnitt 6.2)

- Brad, A., & Schneider, E. (2023). Carbon dioxide removal and mitigation deterrence in EU climate policy: towards a research approach. *Environ. Sci. Policy*, 150, 103591.
- Brad, A., Schneider, E., Maneka, D., Hirt, C., & Gingrich, S. (2024). The politics of carbon management in Austria: Emerging fault lines on carbon capture, storage, utilization and removal. *Energy Res. Soc. Sci.* 116, 103697.
- Buck, H. J., Carton, W., Lund, J. F., & Markusson, N. (2023). Why residual emissions matter right now. *Nat. Clim. Change*, 13(4), 351–358.
- Europeiska kommissionen (2021). *Allocation to industrial installations*. Retrieved from: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/allocation-industrial-installations_en, accessed 2025-03-25.
- Europeiska kommissionen (2024a). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU*. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52024DC0062> accessed 2025-02-03.
- Europeiska kommissionen (2024b). Retrieved from: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en, accessed 2025-03-18.
- Europeiska kommissionen (2024c). *The Draghi report on EU competitiveness*. Available from: https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en, accessed on 2025-03-27.
- Elkerbout, M., & Bryhn, J. (2022). *Carbon removals on the road to net zero*. CEPS Policy Insights No 2022-08. Retrieved from: <https://www.ceps.eu/ceps-publications/carbon-removals-on-the-road-to-net-zero/>, accessed 2025-04-07.
- EP – Europaparlamentet (2025). *Energy-intensive industries*. Retrieved from: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA\(2025\)769550](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2025)769550), accessed 2025-03-27.
- Errichiello, G., Falcone, P. M., & Popoyan, L. (2025). Navigating climate policy: The influence of lobbying trends and narratives in Europe. *Environ. Sci. Policy*, 163, 103974.

- ESABCC – European Scientific Advisory Board on Climate Change (2025). Scaling up carbon dioxide removals. Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU. Retrieved from: <https://climate-advisory-board.europa.eu/news/new-report-from-the-eus-climate-advisory-board-outlines-recommendations-to-scale-up-carbon-dioxide-removals-while-addressing-opportunities-and-risks>, accessed 2025-03-25.
- Heidelberg Material (2025). *Välkommen till Slite CCS och ett av Sveriges största klimatomställningsprojekt någonsin*. [Webbsida]. Hämtad från: <https://www.sliteccs.se/sv>, hämtad 2025-04-08.
- Lefvert, A., & Grönkvist, S. (2024). Lost in the scenarios of negative emissions: The role of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). *Energy Policy*, 184, 113882.
- Lund, J. F., Markusson, N., Carton, W., & Buck, H. J. (2023). Net zero and the unexplored politics of residual emissions. *Energy Res. Soc. Sci.* 98, 103035.
- Markusson, N., Buck, H. J., Carton, W., Hougaard, I. M., Dooley, K., & Lund, J. F. (2024). Carbon removal and the empirics of climate delay. *Environ. Sci. Policy*, 103884.
- Meissner, L. P. (2024). A case for promoting negative emission technologies: learning from renewable energy support. *Carbon Manage.* 15:1, 2319787, DOI: 10.1080/17583004.2024.2319787
- Oberthür, S., & Von Homeyer, I. (2023). From emissions trading to the European Green Deal: the evolution of the climate policy mix and climate policy integration in the EU. *J. Eur. Public Policy*, 30(3), 445–468.
- OJEU (2023). COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1185 of 10 February 2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1185>, accessed 2025-04-08.
- Palm, E., Tilsted, J. P., Vogl, V., & Nikoleris, A. (2024). Imagining circular carbon: A mitigation (deterrence) strategy for the petrochemical industry. *Environ. Sci. Policy*, 151, 103640.
- Rodriguez, E., Lefvert, A., Fridahl, M., Grönkvist, S., Haikola, S., & Hansson, A. (2021). Tensions in the energy transition: Swedish and Finnish company perspectives on bioenergy with carbon capture and storage. *J. Clean. Prod.*, 280, 124527.

10.2.2 Finansiering – omvänd auktion, investeringsstöd, kvotplikt, återtagskrav, utökat producentansvar, differenskontrakt (avsnitt 7.1-7.4)

- Bollen, J., van Cappellen, L., Duijn, D., Rooijers, F. (2022) *Carbon Take Back Obligation an Economic Evaluation* https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/06/CE_Delft_210317_Carbon_Take_Back_Obligation_Def.pdf
- Climate Action (u.å) *What is the Innovation Fund? What is the Innovation Fund?* - European Commission (europa.eu)
- Energiföretagen (2024) *Remissvar av Energimyndighetens rapport Styrmedel för CCS och CCU Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid* <https://www.energiforetagen.se/49ea08/globalassets/energiforetagen/sa-tycker->

- vi/remisser/remissvar-av-energimyndighetens-rapport-styrmedel-for-ccs-och-ccu-avskiljning-och-lagring-respektive-anvandning-av-koldioxid.pdf
- Energimyndigheten (2023) *Styrmedel för CCS och CCU - Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid* ER 2023:26 Styrmedel för CCS och CCU – Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid (regeringen.se)
- Energimyndigheten (2024a) *Industriklivet* Industriklivet (energimyndigheten.se)
- Energimyndigheten (2024b) *Industriklivet – uppskalning och kommersialisering* Utlysningstext mot implementering 2024 (energimyndigheten.se)
- Energimyndigheten (2024c) *Stöd för bio-CCS genom omvänd auktion* Stöd för bio-CCS genom omvänd auktion (energimyndigheten.se)
- Energimyndigheten (2024d) *Fullständig utlysningstext - Investerings- och driftstöd för bio-CCS*. Investerings- och driftstöd för bio-CCS (energimyndigheten.se)
- Energimyndigheten (u.åa) *EU:s innovationsfond* EU:s innovationsfond (energimyndigheten.se)
- Energimyndigheten (u.åb) *Vägledning gällande investering- och driftstöd för bio-CCS: Version 1 – utkast* Vägledning gällande investering- och driftstöd för bio-CCS (energimyndigheten.se)
- Europeiska revisionssrätten (2024) *EU:s industripolitik för förnybar vätgas - Den rättsliga ramen är nästan på plats – nu är det dags att undersöka hur den fungerar i praktiken. Särskild rapport 11/2024: EU:s industripolitik för förnybar vätgas* (europa.eu)
- Fridahl, M. Lundberg, L. (2022). *The missing piece in policy for carbon dioxide removal: reverse auctions as an interim solution* <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1652988/FULLTEXT01.pdf>
- Industriklivet.se (u.å) Industriklivet
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R. Slade, R. Fradera, M. Pathak, A. Al Khouradje, M. Belkacemi, R. van Diemen, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, D. McCollum, S. Some, P. Vyas, (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradje, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- Jenkins et.al. (2023) *Extended producer responsibility for fossil fuels* <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aca4e8/pdf>
- Jenkins, S., Mitchell-Larson, E., Ives, M. C., Haszeldine, S., & Allen, M. (2021). Upstream decarbonization through a carbon takeback obligation: An affordable backstop climate policy. *Joule*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243512100489X#sec2>.
- Johnsson, F., Zetterberg, L., Möllersten, K. (2023) *Mot nettonollutsläpp – hur kan koldioxidavskiljning bidra?* SNS Analys 98, november 2023. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1814284/FULLTEXT01.pdf>
- Kuijper, M., Holleman, E., och van Soest, J.P. (2021) *Carbon Takeback Obligation A Producers Responsibility Scheme on the Way to a Climate Neutral Energy System* https://uploads-ssl.webflow.com/5f3afd763fbfb08ae798fbd7/60336e65ccc97506f7fc4036_CTBO_Final_Report_Jan_2021_Complete.pdf
- Naturvårdsverket och Statens Energimyndighet (2022). *Industrins klimatomställning - Underlagsrapport till regeringsuppdraget om Näringslivets klimatomställning*. RAPPORT 7045 | APRIL 2022.

- <https://www.naturvardsverket.se/497de7/globalassets/media/publikationer-pdf/7000/978-91-620-7045-8.pdf>
- Näringslivets producentansvar (juni 2024) *Synpunkter på Energimyndighetens rapport "Styrmedel för CCS och CCU Avskiljning och lagring respektive användning av koldioxid"* NPA-remissvar_Styrmedel-for-CCS-och-CCU_KN2024_00693.pdf
- Regeringen (2023) *Regeringens budget - Utgiftsområde 20 Klimat, miljö och natur* Utgiftsområde 20 Klimat, miljö och natur (regeringen.se)
- Regeringen (2024) *SFS 2024:626 Förordning om statligt stöd till avskiljning, transport och geologisk lagring av koldioxid med biogent ursprung* SFS2024-626.pdf (svensksforfattningssamling.se)
- Rikard Jermsten och Mark Bernard (2022) *Yttrande Energimyndighetens rapport "Första, andra, tredje... Förslag på utformning av ett stödsystem för bio-CCS"* (ER 2021:31) M2021/00822. Konkurrensverket konkurrensverket.pdf (regeringen.se)
- SOU (2023) *Förnybart i tanken Ett styrmedelsförslag för en stärkt bioekonomi*. ISBN 978-91-525-0581-6 (pdf) <https://www.regeringen.se/contentassets/5351ab1c7862465ba9b6999e16d5a9cd/delbetankande-av-bioekonomiutredningen-sou-202315.pdf>
- Sveriges riksdag (2023, beslut 22 maj 2024) *Regeringens klimathandlingsplan – hela vägen till nettonoll*. Regeringens klimathandlingsplan – hela vägen till nettonoll (Betänkande 2023/24:MJU15 Miljö- och jordbruksutskottet) | Sveriges riksdag (riksdagen.se)
- Zetterberg, L. & Elkerbout, M. (2023) *EU Emissions Trading System – Implications of the 2023 reform and prospects for the 2030'ies* Policybrief_EU-ETS_FINAL_rev2_20231031_.pdf (squarespace.com)
- Østby Stub, S., Svendsen Skriung, C., Post-Melbye, AM., Holm, M. (2019) *New business models for carbon capture and storage*. Publicerad av Zero Emission Resource Organisation

10.2.3 Finansiering – utsläppshandel och negativa utsläpp (avsnitt 7.5)

- Abegg, M., Clulow, Z., Nava, L., & Reiner, D. M. (2024). Expert insights into future trajectories: assessing cost reductions and scalability of carbon dioxide removal technologies [Original Research]. *Frontiers in Climate, Volume 6 - 2024*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1331901>
- Bednar, J., Höglund, R., Möllersten, K., Obersteiner, M., & Tammé, E. (2023). *The role of carbon dioxide removal in contributing to the long-term goal of the Paris Agreement*. I. S. E. R. Institute.
- Blomberg. (2025). *EU ETS II Market Outlook*. BloombergNEF.
- ESABCC. (2025). *Scaling up carbon dioxide removals: Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU*. E. S. A. B. o. C. Change.
- EU. (2024). *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and amending Council Directive 96/61/EC (including amendments until 29.2.2024)*. T. E. Union.
- Fridahl, M., Schenuit, F., Lundberg, L., Möllersten, K., Böttcher, M., Rickels, W., & Hansson, A. (2023). Novel carbon dioxide removals techniques must be integrated into the European Union's climate policies. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 459. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01121-9>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R.

- B., Alin, S. R.,...Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth Syst. Sci. Data*, 17(3), 965-1039. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. T. I. f. G. E. S. (IGES).
- La Hoz Theuer, S., Baran, D., William, A., & and Kellner, K. Emissions trading systems: Trading removals? *Climate Policy*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2434092>
- Mantulet, G., Peffen, A., & Cail, S. (2023). *Is the current design of the EU ETS suited for post-2030 deep decarbonisation?* Enerdata.
- Melakh, Y. (2025). *The State of the EU ETS 2: Europe's New Carbon Market*. ClearBlue.
- Meyer-Ohlendorf, N. (2023). *Making Carbon Removals a Real Climate Solution: How to integrate carbon removals into EU Climate Policies*. E. Institute.
- Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J., & Fridahl, M. (2021). Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading [Policy and Practice Reviews]. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.690023>
- Rickels, W., Rothenstein, R., Schenuit, F., & Fridahl, M. (2022). Procure, Bank, Release: Carbon Removal Certificate Reserves to Manage Carbon Prices on the Path to Net-Zero. *Energy Research & Social Science*, 94, 102858. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102858>
- Schenuit, F., Colvin, R., Fridahl, M., McMullin, B., Reisinger, A., Sanchez, D. L., Smith, S. M., Torvanger, A., Wreford, A., & Geden, O. (2021). Carbon Dioxide Removal Policy in the Making: Assessing Developments in 9 OECD Cases [Policy and Practice Reviews]. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.638805>
- Schneider, L., Cludius, J., & La Hoz Theuer, S. (2018). Accounting for the linking of emissions trading systems under Article 6.2 of the Paris Agreement. I. C. A. P. (ICAP).
- Supercritical. (2025). *Novel CDR*. Supercritical.
- UK CCC. (2025). *The Seventh Carbon Budget: Advice for the UK Government*. T. U. C. C. Committee.
- Wildgrube, T. (2023). Fit for 55? An assessment of the effectiveness of the EU COM's reform proposal for the EU ETS. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 47(3), 52-65. <https://doi.org/10.1007/s12398-023-0931-3>
- Zaklan, A., Jakob, W., & and Duscha, V. (2021). The EU ETS to 2030 and beyond: adjusting the cap in light of the 1.5°C target and current energy policies. *Climate Policy*, 21(6), 778-791. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1878999>

10.2.4 Finansiering – frivilligmarknad (avsnitt 7.6)

- Ahonen, H., Berninger, K., Kessler, J., Möllersten, K., Spalding-Fecher, R., & Tynkynen, O. (2022). Harnessing voluntary carbon markets for climate ambition. Nordic Council of Ministers.
- Dufour m.fl., 2024.

- EU. (2024). Directive (EU) 2024/825 of the European Parliament and of the Council of 28 February 2024 amending Directives 2005/29/EC and 2011/83/EU as regards empowering consumers for the green transition [...] unfair practices and through better information. European Union.
- Europakommissionen. (2023). Directive of the European Parliament and of the Council on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive). Brussels: European Commission.
- Europaparlamentet. (2024). P9_TA(2024)0131 European Parliament legislative resolution of 12 March 2024 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive). Europaparlamentet.
- European Commission. (2023). Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards.
- Fankhauser, S., Smith, S., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., . . . Wetzter, T. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature climate change*, 12, 15-21. doi:10.1038/s41558-021-01245-w
- ISO. (2022). Net zero guidelines. Geneva: International Organisation of Standardization (ISO). Hämtat från <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:iwa:42:ed-1:v1:en>
- Möllersten, K., Kloow, E., & Sandgren, A. (2024). Att hävda klimatneutralitet i bygg- och anläggningsprojekt. SBUF.
- Möllersten, K., Källmark, L., & Ryding, S.-O. (2020). Genomlysning av klimatkompensation. Konsumentverket.
- Race to Zero. (2022a). Race to Zero Lexicon. UNFCCC/Climate Champions. Hämtat från <https://climatechampions.unfccc.int/wp-content/uploads/2022/06/R2Z-Lexicon-2.0.pdf>
- Race to Zero. (2022b). Interpretation Guide, Race to Zero Expert Peer Review Group.
- SBTi. (2021). SBTi corporate net-zero standard. Science-Based Targets Initiative. Hämtat från <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard.pdf>
- The European Parliament and the Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council. The European Parliament and the Council of the European Union. Hämtat från <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022L2464>
- The United Nations. (2022). Integrity Matters: Net Zero Commitments by Businesses, Financial Institutions, Cities and Regions. The United Nations. Hämtat från https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/high-level_expert_group_n7b.pdf

BIO-CCS I FJÄRRVÄRMESEKTORN

Avskiljning och lagring av koldioxid (CCS) från förbränning av biobränslen och avfall möjliggör negativa utsläpp och utsläppsminskning i stor skala.

Inom den svenska fjärrvärmesektorn finns teknisk potential att bidra med över 10 miljoner ton negativa utsläpp årligen. Den här rapporten visar hur långt utvecklingen kommit – och vad som krävs för att gå från planer till verklighet.

Rapporten presenterar resultat från Energiforskprojektet Bio-CCS i fjärrvärmesektorn – etapp 2. Projektet har pågått 2023-2025 och har kartlagt CCS-planer, finansieringslösningar, policyfrågor, avskiljningsteknik, infrastruktur och samverkan, lagringsmöjligheter samt systemanalys. Nyckelresultaten är bland annat att det behövs kompletterande styrmedel för att finansiera CCS på fossil koldioxid från avfallsförbränning, ett långsiktigt EU-ramverk för negativa utsläpp samt troligen en svensk överbryggande lösning. Det behövs även en nationell plan för infrastruktur och lagring.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

