



Tekniska lösningar för koldioxidinfångning

Rickard Enqvist

Lärdomsprov

Energi- och miljöteknik

2023

Lärdomsprov

Rickard Enqvist

Tekniska lösningar för koldioxidinfångning

Yrkeshögskolan Arcada: Energi- och miljöteknik, 2023

Identifikationsnummer:

9058

Uppdragsgivare:

Yrkeshögskolan Arcada

Sammandrag:

Detta examensarbete är en litteraturstudie som behandlar tekniska lösningar för koldioxidinfångning. Examensarbetet presenterar de olika metoderna för koldioxidinfångning från industri- och kraftverksanläggningar samt koldioxidinfångning direkt från luften. Vidare beskrivs de olika metoderna för transporter av den avskilda koldioxiden och de tillgängliga alternativen för att lagra eller använda koldioxiden som råmaterial. Arbetet behandlar också de olika initiativen och lagstiftningar som görs i EU för att främja utvecklingen av koldioxidinfångning. Avslutningsvis presenteras en sammanfattning av resultatet där de olika metoderna jämförs. På basen av det som presenteras i arbetet kan det konstateras att trenden i samhället pekar mot nettonollutsläpp av koldioxid i framtiden, och för att uppnå detta är koldioxidinfångning nödvändigt. För industri- och kraftverksanläggningar är klimatnyttan av koldioxidinfångning för lagring beroende på om bränslet i processerna kommer från fossila källor eller biomassa. De anläggningar som använder sig av fossila bränslen kunde bidra till nettonollutsläpp, medan anläggningar som använder sig av biomassa kunde bidra till negativa utsläpp. Infångning av koldioxid direkt från luften kan också bidra till negativa utsläpp, men kostnaderna måste komma ner rejält för att det ska ses som ett seriöst alternativ. Att räkna de potentiella klimatförändringarna för användning av koldioxid är komplext och noggranna livscykelanalyser krävs inom samtliga användningsområden. Ett gemensamt problem med metoderna är energikostnaden för infångning och avskiljning av koldioxiden. Kostnaderna för samtliga infångningsmetoder måste minska för att de ska kunna bli kommersiellt relevanta. Investeringar i forskning och utveckling av koldioxidinfångning kan bidra till att metoderna fortsätter att förbättras och på så sätt kan storskalig implementering möjliggöras.

Nyckelord:

Koldioxidinfångning för lagring eller användning, direkt luftinfångning, klimatmål, koldioxidutsläpp

Degree Thesis

Rickard Enqvist

Technical solutions for carbon capture

Arcada University of Applied Sciences: Energy and Environmental Engineering, 2023

Identification number:

9058

Commissioned by:

Arcada University of Applied Sciences

Abstract:

This thesis is a literature review that explores various technical solutions for carbon capture. It examines the different methods used to capture carbon dioxide from industrial plants, power plants, and directly from the air. Additionally, it explores the transportation methods for captured carbon dioxide and the available options for its storage or utilization as a raw material. The thesis also delves into the initiatives and legislation within the EU that promote the development of carbon capture technologies. In the concluding section, the thesis summarizes the findings, and the different methods for carbon capture get compared. Based on the information and research presented, it is evident that societal trends are shifting towards achieving net-zero carbon dioxide emissions in the future, necessitating the adoption of carbon capture techniques. For industrial and power plants, the climate benefits of carbon capture for storage depend on whether the fuel source is derived from fossil fuels or bioenergy. Fossil fuel-based industries and power plants could contribute to net-zero emissions, whereas those utilizing bioenergy have the potential for negative emissions. Capturing carbon dioxide directly from the air could also contribute to negative emissions, but significant cost reductions are required for this approach to be considered a viable option. Calculating the potential climate benefits of carbon dioxide use is complex, and detailed life cycle assessments are needed in all applications. A common challenge with the methods is the energy cost of carbon dioxide capture and sequestration. To achieve commercial viability, it is essential to decrease the costs associated with all carbon capture methods. Investment in carbon capture research and development can help to ensure that the methods continue to improve and thus enable large-scale implementation.

Keywords:

Carbon capture storage and utilization, direct air capture, climate targets, carbon emissions

Innehåll

1	Introduktion	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Syfte och metod	6
1.3	Frågeställningar och avgränsningar	6
2	Punktinfångning för lagring eller användning	7
2.1	Infångning och avskiljning	7
2.1.1	Post-combustion	8
2.1.2	Pre-combustion	10
2.1.3	Oxyfuel combustion	11
2.2	Transportering	12
2.2.1	Transportnätverk	13
2.3	Lagring	15
2.3.1	Geologisk lagring	15
2.3.2	Havslagring	16
2.3.3	Mineralisering	17
2.3.4	För- och nackdelar med CCS	17
2.4	Användning	18
2.4.1	Koldioxid för ökad oljeutvinning	19
2.4.2	Kemikalier och bränslen	20
2.4.3	Mineralisering	21
2.4.4	Biologisk användning	21
2.4.5	Direkt användning	22
2.4.6	För- och nackdelar med CCU	22
2.5	Utvecklingen av punktinfångning	23
3	BECCS	24
3.1	BECCS i Norden	25
3.2	BECCS projekt	27
4	Direkt luftinfångning	28
4.1	Infångning och avskiljning	28
4.1.1	L-DAC	28
4.1.2	S-DAC	29
4.2	DAC projekt	30
4.3	För- och nackdelar med DAC	32
5	Utsläppshandel i EU	33
5.1	EU ETS	33
5.2	Koldioxidinfångning inom ETS	34
6	Sammanfattning	36
7	Källor	39

Figurer

Figur 1. Metoder för koldioxidinfångning implementerade i ett kraftvärmeverk.....	8
Figur 2. Processen för infångning och avskiljning med aminateknologi	9
Figur 3. Kostnadsfördelning av koldioxidinfångning med monoetanolamin.....	10
Figur 4. Blockdiagram av pre-combustion metoden implementerad i ett kraftvärmeverk	11
Figur 5. Blockdiagram av oxy-combustion metoden implementerad i ett kraftvärmeverk	12
Figur 6. Översikt av transportalternativen	13
Figur 7. Funktionsprincipen för Northern Lights projektet	15
Figur 8. Översikt av de geologiska lagringsalternativen	16
Figur 9. Potentiella rutter för koldioxidanvändning	18
Figur 10. Funktionsprincipen för EOR.....	20
Figur 11. Utvecklade omvandlingsrutter för koldioxidbaserat bränsle	21
Figur 12. Blockdiagram av Petra Novas koldioxidavskiljningsprocess.....	24
Figur 13. Funktionsprincipen för BECCS	25
Figur 14. Totalförbrukning av energi efter energikälla i Finland 2021	26
Figur 15. Exempel på koldioxidinfångning med L-DAC.....	29
Figur 16. Exempel på koldioxidinfångning med S-DAC.....	30
Figur 17. Bild från Orca enheten på Island	32
Figur 18. Auktionspriser vid auktioner av allmänna utsläppsrätter 2013–2022	36

Tabeller

Tabell 1. CO ₂ infrastrukturprojekt av gemensamt intresse för Europa	14
Tabell 2. DAC anläggningar i drift	30
Tabell 3. Årligt tak för utsläpp från stationära anläggningar och antal utsläppsrätter för luftfart som satts i omlopp.....	34

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Koldioxid är en viktig växthusgas som finns naturligt i vår atmosfär och påverkar balansen mellan inkommande och utgående strålning från solen. Den naturliga växthuseffekten är essentiell för vår planet och har varierat genom tiderna, men idag har vi också en förstärkt växthuseffekt som främst beror på mänskliga utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser. (Rummukainen, 2005) Mängden koldioxid i vår atmosfär har ökat stadigt sedan 1960-talet och år 2021 var mängden koldioxid i atmosfären 416,54 ppm, jämfört med 316,9 ppm år 1960. (Scripps Institution of Oceanography, 2023) En av de mest omtalade klimatförändringar är att det blir varmare vid jordens yta och enligt FN:s klimatpanel IPCC bör den globala uppvärmningen inte överstiga 1,5 °C jämfört med förindustriella nivåer. Enligt IPCC:s senaste utvärderingsrapport skulle en begränsning av uppvärmningen till 1,5 °C kräva att växthusgasutsläppen når sin topp senast år 2025 för att sedan minska med 43% till år 2030. I rapporten konstaterades det också att den globala temperaturen kommer att stabiliseras när koldioxidutsläppen når netto noll. För 1,5°C betyder detta att man uppnår netto noll koldioxidutsläpp globalt i början av 2050-talet, för 2°C är det i början av 2070-talet. (IPCC, 2022) År 2016 trädde Parisavtalet i kraft, som majoriteten av världens länder har skrivit under. Ett av målen i avtalet är att den globala uppvärmningen skall begränsas till under 2°C jämfört med förindustriell tid, med hopp om att parterna kunde vidta åtgärder för att begränsa uppvärmningen till under 1,5°C. (Miljöministeriet, u.å.) År 2019 tillkännagav Europeiska kommissionen deras strategi (European Green Deal) för att uppnå klimatneutralitet i EU år 2050. EU:s ledare välkomnade detta initiativ från kommissionen och stödde 2050-målet om ett klimatneutralt EU. Därefter hoppas man att EU år 2050 framåt kunde ta upp mer växthusgaser än vad som släpps ut, det vill säga att utsläppen blir negativa. (European Commission, 2023) För att minska på koldioxidutsläppen och uppnå de ambitiösa klimatmålen så har metoder för koldioxidinfångning utöver naturliga kolsänkor diskuterats som potentiella lösningar.

1.2 Syfte och metod

Syftet med denna studie är att presentera de olika tekniska tillvägagångssätten för koldioxidinfångning samt de olika metoderna för lagring eller användning av koldioxid.

Målet är att ge läsaren en fördjupad förståelse för potentialen, fördelarna och nackdelarna med de olika teknikerna både nu och i framtiden. Arbetet bygger på litteraturgranskning som forskningsmetod.

1.3 Frågeställningar och avgränsningar

Frågor som ska besvaras i studien är följande:

- Vilka är de mest effektiva lösningarna för koldioxidinfångning och hur fungerar de?
- Vilka utmaningar och hinder finns det för att implementera lösningar för koldioxidinfångning i större skala?
- Hur kan lösningar för koldioxidinfångning integreras med andra strategier för att minska utsläppen av växthusgaser?
- Vilka faktorer kommer att påverka utvecklingen och utbredningen av tekniska lösningar för koldioxidinfångning i framtiden?

I detta arbete kommer fokuset att ligga på tekniska lösningar för koldioxidinfångning samt metoder för lagring eller användning och dess potential för att minska utsläppen av växthusgaser. Eftersom detta är ett omfattande ämne kommer vissa avgränsningar att göras för att hålla fokus och skapa en mer genomförbar studie. En avgränsning är att arbetet kommer att fokusera på lösningar för koldioxidinfångning som har utvecklats och testats i praktiken, och inte på teoretiska eller experimentella teknologier som ännu inte är praktiskt genomförbara. Vidare kommer endast tekniska lösningar för koldioxidinfångning att behandlas, naturliga kolsänkor så som skog, hav och växtlighet behandlas inte i detta arbete även om dessa bör anses spela en viktig roll i infångning av koldioxid.

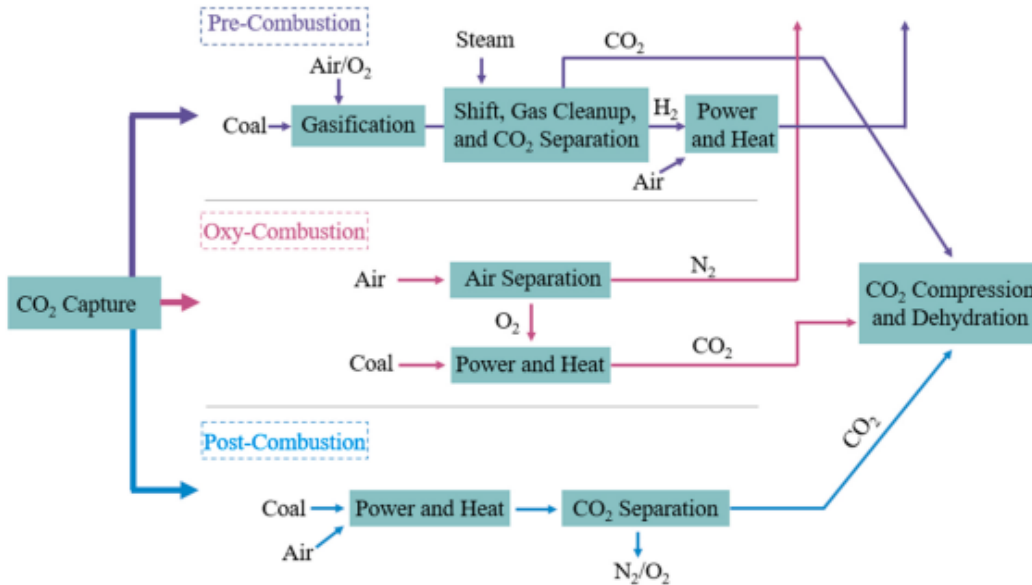
2 Punktfångning för lagring eller användning

Punktfångning av koldioxid innebär att man fångar in koldioxid från industrianläggningar eller kraftverk. För att minska på utsläppen kan man använda sig av koldioxidinfångningstekniker för att sedan lagra eller använda koldioxiden. Koldioxidinfångning och lagring (CCS) innebär att man avskiljer koldioxiden från punktkällorna för att sedan lagra den. Detta gör att koldioxiden inte släpps ut i atmosfären och därmed inte bidrar till växthuseffekten. Koldioxidinfångning och användning (CCU) innebär att man avskiljer koldioxiden från punktkällorna och sedan återanvänder den till olika ändamål.

I följande kapitel presenteras de olika infångningsmetoderna, transporteringsmetoderna samt de potentiella lagrings- och användningsområden för koldioxidutsläpp från industrianläggningar och kraftverk.

2.1 Infångning och avskiljning

Infångning av koldioxid från industriella processer och kraftverk har den fördelen att koncentrationen av koldioxid ofta är hög, vilket gör att processerna för infångning är effektivare än infångning från luften. När det kommer till avskiljningsmetoderna för CCU och CCS processerna är metoderna som används samma. Avskiljningsmetoderna delas vanligtvis upp i 3 kategorier: pre-combustion, som innebär att koldioxiden avskiljs innan förbränning, post-combustion, var koldioxiden avskiljs efter förbränningsprocessen och oxy-combustion, som syftar till att avlägsna kvävet från luften innan förbränning. Vilken metod som används är i stort sett beroende på kostnader, tillgänglighet och drivmedlet i industrianläggningen. Största problemet med koldioxidinfångningen är de extra kostnaderna som uppstår för industrierna. Kostnaderna varierar mycket beroende på koldioxidkälla och sträcker sig från 15–25 dollar per ton CO₂ för industriella processer som producerar "rena" eller mycket koncentrerade CO₂-strömmar (t.ex. etanolproduktion eller naturgasbehandling) till 40–120 dollar per ton CO₂ för processer med "utspädda" gasströmmar (t.ex. cementproduktion och elproduktion). I jämförelse med att fånga koldioxid direkt från luften (134–342 dollar per ton) är infångning från industrin ändå betydligt billigare i nuläget. Vissa tekniker för infångning av koldioxid är nu kommersiellt tillgängliga medan andra fortfarande är under utveckling, vilket ytterligare bidrar till de stora kostnadsskillnaderna. (IEA, 2021)



Figur 1. Metoder för koldioxidinfångning implementerade i ett kraftvärmeverk. (Fu et al., 2022)

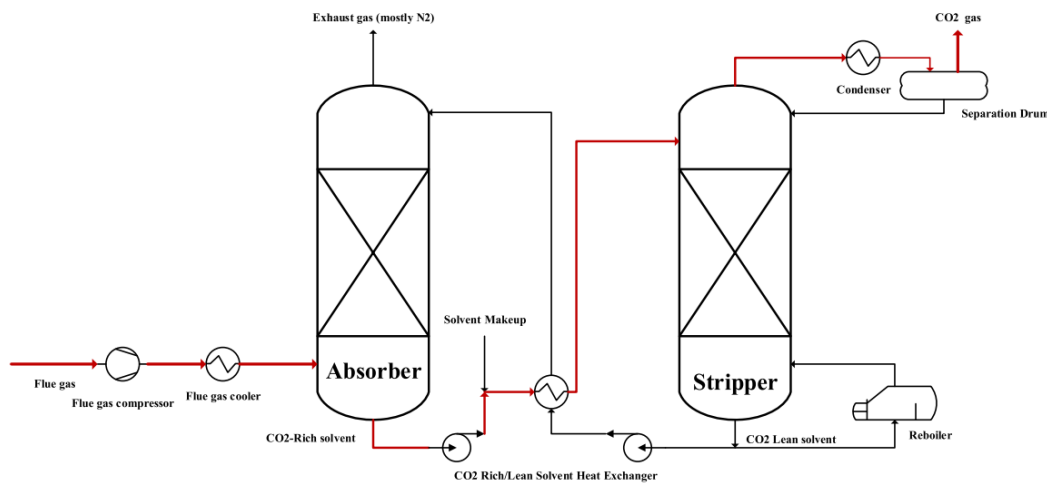
2.1.1 Post-combustion

I post-combustion metoden så passerar rökgaserna som uppstår efter förbränningen genom en skrubber som med hjälp av en kemisk absorbent, ett fast adsorbent, membran eller något annat lösningsmedel binder CO₂. Detta leder till att koldioxiden kan separeras från rökgasblandningen för att sedan komprimeras och transporteras vidare för lagring eller användning. Fördelarna med post-combustion är att det är en väldigt mångsidig teknik och det är möjligt att installera systemet på befintliga industriella anläggningar eftersom enheten ansluts i sista steget av processen. Post-combustion är den vanligaste av de 3 metoderna varav kemisk absorption med aminer, främst monoetanolamin, är den mest kommersiella metoden. (Regufe, 2021)

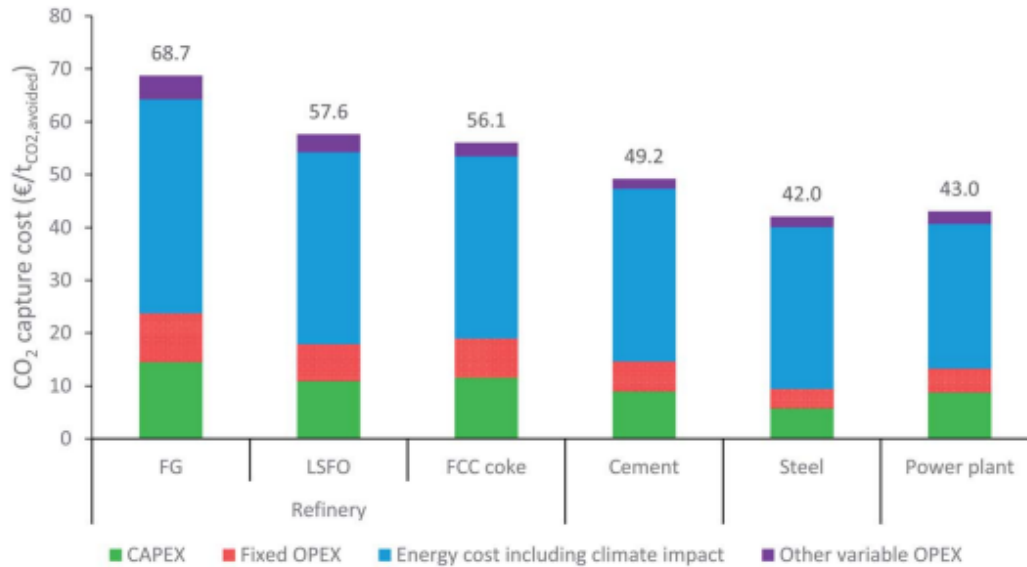
Processen för infångning och avskiljning med aminer bygger på en absorptionsdel och en regenereringsdel. Absorptionsprocessen fungerar genom att aminlösningen tillsätts i en skrubber där rökgaserna som passerar aminlösningen reagerar med lösningen varvid CO₂ och H₂O absorberas. När aminlösningen runnit genom skrubbern och fångat in CO₂ körs den genom en värmeväxlare för att höja dess temperatur innan den förs vidare till regenereringsdelen, även kallad strippern. I strippern leds den CO₂-rika aminlösningen genom strippern som med hjälp av hög temperatur regenererar CO₂ och H₂O medan den nu CO₂-fattiga aminlösningen kan cirkulera genom processen igen. CO₂ och H₂O ångan går sedan genom en kondensator som kyler ångan till 40°C för att avskilja vatt-

net. Därefter komprimeras och kyls koldioxiden ytterligare för att sedan kunna transporteras vidare för lagring eller användning. Monoetanolamin är den mest använda aminen på grund av att den bland annat anses vara billig, har en hög vattenlöslighet och har hög förmåga att både absorbera och regenerera CO₂. (Nilsson & Östlund, 2021)

Kostnaderna för användning av aminteknologin med monoetanolamin är likt alla metoder främst beroende på halten av koldioxid i rökgaserna, en högre procenthalt av koldioxid minskar på mängden ånga och elektricitet som behövs i processen, dessutom minskar investeringskostnaderna samt driftskostnaderna. Roussanaly et al. (2018) har jämfört kostnaderna för infångning med monoetanolamin implementerad i cementindustrin, stålindustrin, kolkraftverk och tre olika raffinaderier. Kostnaderna varierar mellan 42€–69€ per infångad ton CO₂ (se figur 3) och visar på att energiförbrukningen står för den största kostnaden i samtliga fall (60–75% av kostnaderna). När det gäller kolkraftverket är det värt att notera att kostnaden för avskiljning är lägre än FCC raffinaderiet även om koldioxidkoncentrationen är lägre i kolkraftsrökgaserna (14,6% jämfört med FCC 16,6%). Det beror på att kolkraftverket har tillgång till spillånga från den egna processen vilket leder till en signifikant lägre energikostnad än de industrier som inte har samma tillgång till ånga.



Figur 2. Processen för infångning och avskiljning med aminteknologi (Olabi et al., 2022)



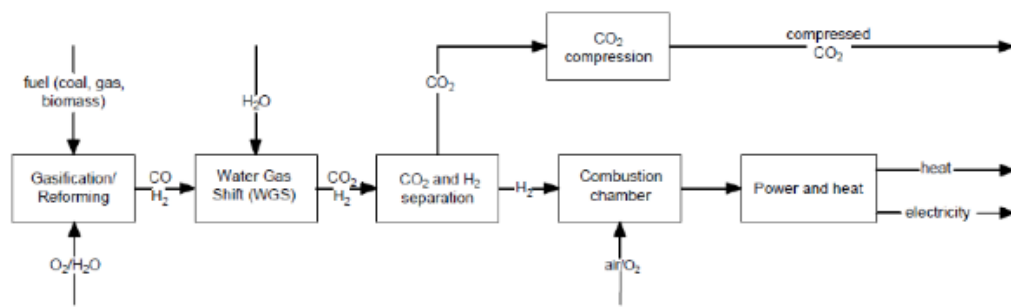
Figur 3. Kostnadsfördelning av koldioxidinfångning med monoetanolamin (Roussanaly et al., 2018)

2.1.2 Pre-combustion

Motsatsen till post-combustion är pre-combustion som innebär att infångningen av koldioxid sker innan förbränning. Vid pre-combustion leds bränslet genom en förgasare var bränslet blandas med ånga och syre i högt tryck och temperatur. Detta resulterar i att bränslet omvandlas till en gasblandning som huvudsakligen består av kolmonoxid och vätgas, så kallad syntesgas. Kolmonoxiden i syntesgasen konverteras sedan till koldioxid och mera vätgas genom att tillsätta vattenånga i en lägre temperatur, också kallad vatten-gas-skiftreaktion. Slutligen separeras koldioxiden med vätgasen genom kemisk eller fysikalisk absorption och den avskilda vätgasen kan förbrännas eller användas som råmaterial medan koldioxiden komprimeras och förs vidare för lagring eller användning. (Madejski et al., 2022)

Eftersom gasströmmen i pre-combustion är under högre tryck än i post-combustion, samtidigt som CO₂ koncentrationen är högre (15–60%) så är fysikaliska lösningsmedel ofta att föredra över kemiska lösningsmedel. Fysikalisk absorption är temperatur- och tryckberoende, det vill säga att högt partialtryck av koldioxid och låga temperaturer underlättar absorptionen. Efter att CO₂ har fångats in kan det fysikaliska lösningsmedlet separera CO₂ genom att sänka på trycket, detta gör att energibehovet är mindre än med kemiska lösningsmedel som kräver stor del värme. Samtidigt är själva förgasningsprocessen komplex, vilket gör att pre-combustion metoder ofta ändå landar kring samma pris som post-combustion. (Jansen et al., 2015)

PRE-COMBUSTION



Figur 4. Blockdiagram av pre-combustion metoden implementerad i ett kraftvärmeverk (Madejski et al., 2022)

2.1.3 Oxyfuel combustion

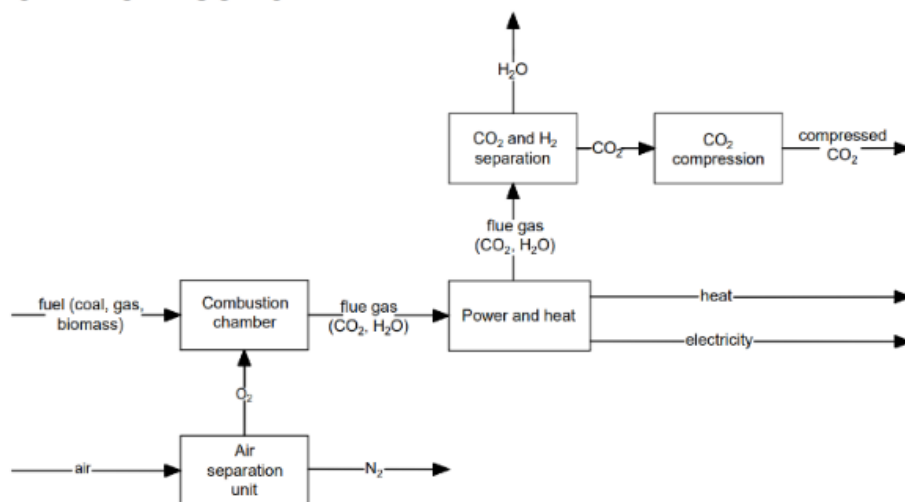
För infångning och avskiljning genom oxyfuel combustion (syrgasförbränning) så avlägsnas kvävet från luften innan förbränningsprocessen. Bränslet förbränns då i syrgasen som lämnar kvar efter separering från kväve. Oftast behöver också en del av rökgasen som bildas under förbränningen återvinnas och tillsättas i bränsleförbränningsprocessen, detta för att styra flamtemperaturen. Eftersom rökgasen som bildas består av en så hög koncentration av koldioxid och vattenånga är processen för själva koldioxidsavskiljningen relativt enkel jämfört med de andra metoderna. Koldioxiden separeras från vattenångan genom att rökgasen kyls ned vilket gör att vattnet kondenseras, energimängden som krävs för avskiljning är därför mindre än för post- och pre-combustion. Därefter kan koldioxiden komprimeras och transporteras vidare för användning eller lagring. (Regufe, 2021)

Den mest energikrävande delen i processen är själva luftseparationsenheten som separerar syret från luften, en kryogen luftseparationsenhet (ASU) som är den mest använda metoden förbrukar upp till 200–225 kWh/t syre infångad i industriell skala och den står samtidigt för en stor del av investeringskostnaderna, detta gör att kostnaderna ligger runt det samma per ton CO₂ som infångas med oxyfuel tekniken gentemot pre-och post-combustion. (Madejski et al., 2022) Enligt Beiron et al. (2022) är oxyfuel tekniken svår att tillämpa i befintliga pannor eftersom dessa oftast inte är täta och tillåter hög andel luftläckage in i rökgasen vilket ökar kväve- och syrehalten i CO₂ produkten, men det kan vara en möjlig lösning för nybyggda anläggningar.

Oxyfuel tekniken användes i ett 30 MW pilotprojekt på Vattenfalls kolkraftverk Schwarze Pumpe i Tyskland och anläggningen tog i bruk år 2008, men år 2014 sänkte Vat-

tenfall sin totala R&D budget med 20% och valde då att lägga ned projektet och samtidigt all CCS forskning. Enligt vattenfall fann de tekniken ohållbar på grund av kostnaderna och energin som krävs. (MIT, u.å.)

OXY-COMBUSTION

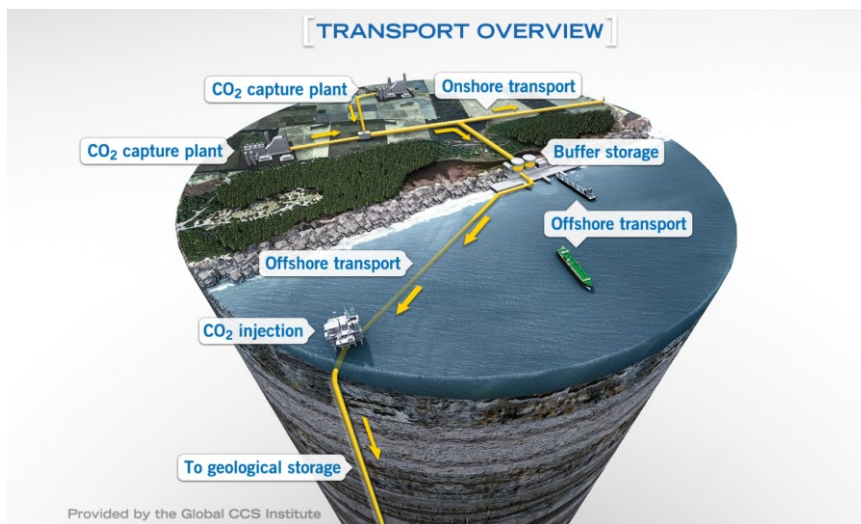


Figur 5. Blockdiagram av oxy-combustion metoden implementerad i ett kraftvärmeverk (Madejski et al., 2022)

2.2 Transportering

Efter att koldioxiden blivit infångad behöver den transporteras vidare till en lagringsplats eller för vidareanvändning. Koldioxid kan transporteras med lastbilar, järnväg eller fartyg, men den vanligaste och mest effektiva metoden för tillfället är transportering genom rörledningar. Transportering genom rörledningar anses också vara den mest lovande metoden framöver eftersom det redan nu finns stora nätverk av rörledningar för transportering av olika gaser. Dock krävs en avsevärd utbyggnad av infrastrukturen för långsiktig koldioxidinfångning. Det uppskattas att transportinfrastrukturen för koldioxid kommer att behöva öka 100 gånger mer än dagens nivåer under de närmaste 30–40 åren. Transportering av koldioxid med fartyg används redan i Europa, men till största del småskalig transport av koldioxid för livsmedelsbruk. För storskalig transportering med fartyg kommer troligtvis metoder liknande transportering av flytande gasol att användas. Eftersom gasoltransporter redan är en global industri finns det stor kompetens inom området. Detta kunde möjliggöra fartygstransport av koldioxid i en mängd på 10 000–40 000 m^3 . För mindre mängder är det möjligt att transportera koldioxid med last-

bil eller järnväg till en närliggande lagringsplats eller ett rörsystem. Men med tanke på de stora mängder koldioxid som antas fångas på lång sikt så är det osannolikt att dessa transportmetoder kommer vara betydande. (Grafström, 2022)



Figur 6. Översikt av transportalternativen. (Global CCS Institute, u.å.)

2.2.1 Transportnätverk

De första CCS projekten använde sig av punkt till punkt modellen, det innebär att en enda stor anläggning som fångade in koldioxid låg på ett rimligt avstånd från en lagringsplats vilket möjliggör en relativt effektiv transporter. På senare tid har ett flertal projekt för CCS-hubbar utvecklats, vilket innebär att koldioxidsavskiljningen sker på ett flertal olika anläggningar medan koldioxiden sedan kan anslutas till samma system för transporter och lagring. I Europa är ett flertal koldioxidshubbar i utveckling, bland annat runt Nordsjön och Island. Med dessa knytpunkter hoppas man kunna möjliggöra betydande minskningar i kostnaderna för koldioxidtransport och lagring genom stor-driftsfördelar. Punktkällorna för koldioxidutsläppen i Europa från industrin och kraftverk skulle möjliggöra en insamling av 1,4Gt CO₂ per år, vilket motsvarar cirka 50% av Europas årliga utsläpp. Ett gemensamt nätverk i Europa som förbinder dessa utsläppskällor anses vara ett av de effektivaste och billigaste sätten att transportera koldioxiden. (Becattini et al., 2022)

Den europeiska kommissionen arbetar för närvarande med en undersökning om hur man på bästa sätt kan bygga upp en koldioxidinfrastruktur för hela EU. Dessutom har kommissionen beställt en undersökning för att analysera det möjliga framtida regelverket för

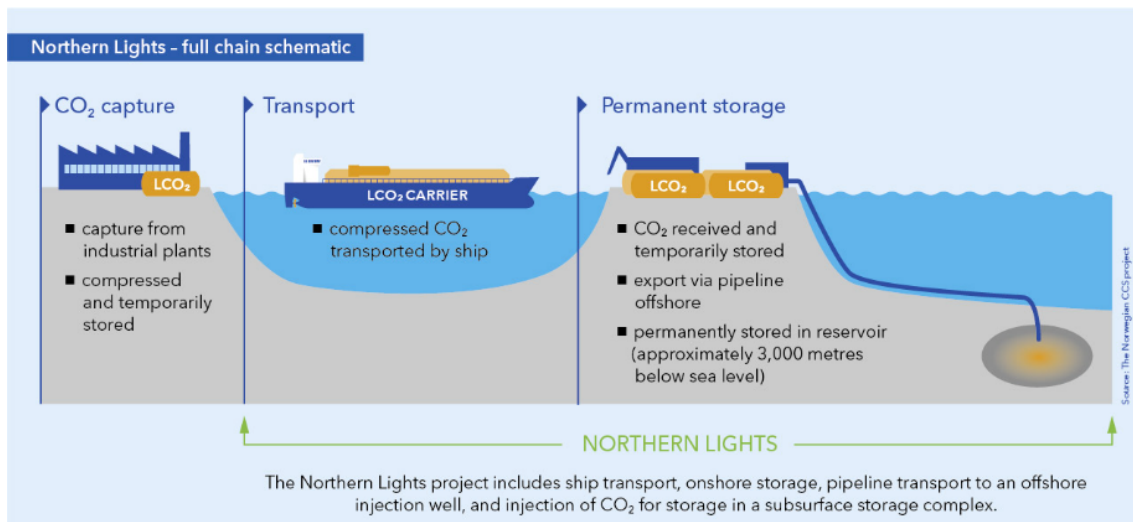
transportinfrastruktur för koldioxid i EU. Resultatet av båda studierna väntas vara klart sommaren år 2023. (European Commission, 2022) I november 2021 publicerade också kommissionen en lista med projekt av gemensamt intresse i Europa under The Trans-European Networks for Energy, som är en policy inriktad på att sammanlänka EU-ländernas energiinfrastruktur. Listan inkluderade 6 trans-Europeiska infrastrukturprojekt som fokuserar på utvecklingen av koldioxidnätverk. (European Commission, 2022)

Tabell 1. CO₂ infrastrukturprojekt av gemensamt intresse för Europa. (European Commission, 2022)

(12) Priority Thematic Area Cross-border carbon dioxide network

No.	Definition
12.3	CO ₂ TransPorts aims to establish infrastructure to facilitate large-scale capture, transport and storage of CO ₂ from Rotterdam, Antwerp and the North Sea Port
12.4	Northern lights project – a commercial CO ₂ cross-border transport connection project between several European capture initiatives (United Kingdom, Ireland, Belgium, the Netherlands, France, Sweden) and transport the captured CO ₂ by ship to a storage site on the Norwegian continental shelf
12.5	Athos project proposes an infrastructure to transport CO ₂ from industrial areas in the Netherlands and is open to receiving additional CO ₂ from others, such as Ireland and Germany Developing an open-access cross-border interoperable high-volume transportation structure is the idea.
12.7	Aramis – cross-border CO ₂ transport and storage project (intake from emitters in the hinterland of Rotterdam harbour area and storage to location on the Dutch continental shelf)
12.8	Dartagnan - CO ₂ export Multimodal HUB from Dunkirk and its hinterland (emitters from the industrial cluster in the area of Dunkirk, France with storage where available in the North Sea country territories)
12.9	Poland – EU CCS Interconnector (emitters from the industrial cluster in the area around Gdansk, Poland with storage where available in the North Sea country territories)

Ett av projekten publicerade i denna lista är Northern Lights projektet som förväntas tas i drift år 2024. Detta projekt kommer vara det första gränsöverskridande infrastruktur-nätverk för transport och lagring av koldioxid. Det kommer att ge företag i hela Europa möjlighet att lagra sin koldioxid cirka 2600 meter under havsbotten i Norge. Företaget bygger två transportfartyg som kommer transporter den insamlade koldioxiden till en landbaserad terminal belägen i kommunen Øygarden i västra Norge, varifrån koldioxiden sedan transporteras via rörledningar till lagringsplatsen under havet i Nordsjön. Projektets första fas kommer att vara klar i mitten av år 2024 med en lagringskapacitet på upp till 1,5 Mt CO₂ per år. Ambitionen är att utöka kapaciteten med ytterligare 3,5 Mt till totalt 5 Mt, beroende på efterfrågan. Emellertid kommer mottagningsterminalen, offshore-rörledningen och nätet att byggas för att rymma de extra volymerna. (Northern Lights, u.å.)



Figur 7. Funktionsprincipen för Northern Lights projektet. (DNV GL, 2020)

2.3 Lagring

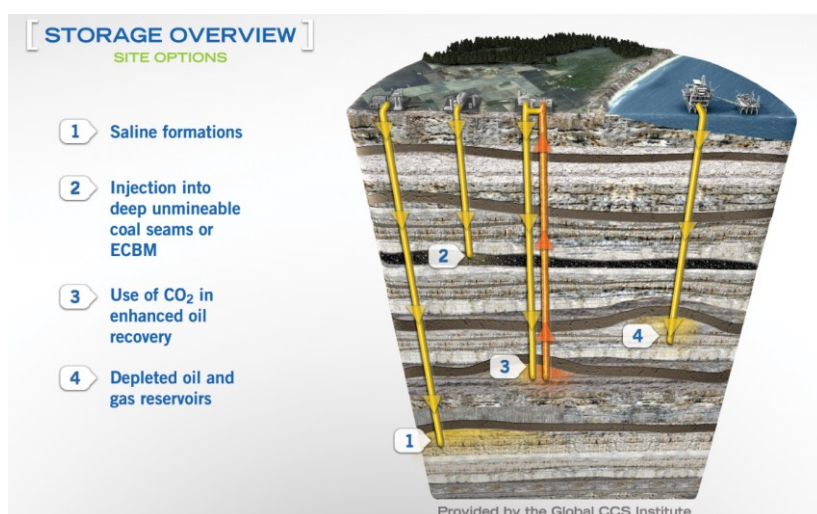
2.3.1 Geologisk lagring

För lagring av koldioxid finns det ett flertal metoder, den vanligaste är geologisk lagring som projektet Northern Lights också är ett exempel på. Det innebär att koldioxiden pumpas ner i geologiska formationer såsom tömda olje- och gasreservoarer, djupa salina akviferer och kolbäddsformationer. Geologisk lagring av koldioxid är för tillfället det mest lovande sättet att lagra koldioxid på. Tömda olje- och gasreservoarer anses mest lovande eftersom dessa reservoarer har analyserats grundligt av oljebolagen vilket gör att osäkerheterna förknippade med lagring i dessa reservoarer är mindre. Dessutom har dessa reservoarer visat sig ha en bra lagringsförmåga i och med att de har kunnat lagra kolväten under geologiska tidsperioder. (Fateen & Hafez, 2016)

Salina akviferer är också ett lovande alternativ för geologisk lagring av koldioxid. En akvifer är en berggrundsstruktur som kan hålla stora mängder vatten, djupa salina akviferer innehåller fossilt eller relikvatten som har varit instängt i tusentals till miljontals år och har hög salthalt. En stor fördel med salina akviferer är att det finns mer utrymme för lagring än i gamla olje- och gasreservoarer. Det uppskattade lagringsutrymmet i salina akviferer är mellan 700–900 Gt CO₂. (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015) Dessutom är mängden akviferer spridda mera jämt geografiskt. Det ökar chansen att hitta en akvifer nära infångningsplatsen, vilket minskar transportkostnaderna av koldioxiden. (Fateen & Hafez, 2016).

EOR, eller ökad oljeutvinning räknas också av vissa som geologisk lagring, men eftersom koldioxiden används för att utvinna olja kommer EOR kategoriseras som koldioxidanvändning i detta arbete (läs kapitel 2.4.1).

Geologisk lagring av koldioxid är dock inte helt oproblematiskt. För det första är det inte möjligt att lagra koldioxid på alla platser i världen eftersom berggrunden har en stor betydelse, kostnaderna för detta kunde dock lösas genom effektiva transportnätverk beskrivna i kapitel 2.2.1. En hård berggrund med många sprickor ökar risken för läckage av den nedpumpade koldioxiden genom sprickorna och även om man hittar en tät berggrund finns det risk för att det ökade gstrycket från koldioxid skapar sprickor som minskar tätheten. Dessutom finns det en oro för att skador på grundvattnet eller seismisk aktivitet kan uppstå. Enligt forskare är ändå risken för läckage av lagrad koldioxid mindre än en procent under en 1000-årsperiod vilket inte skulle påverka uppnåendet av netto-noll utsläpp dramatiskt. (Grafström, 2022)



Figur 8. Översikt av de geologiska lagringsalternativen (Global CCS Institute, u.å.)

2.3.2 Havslagring

Havslagring innebär att koldioxiden på ett eller annat sätt injiceras och lagras i havet. En stor del av CO₂ från atmosfären lagras redan naturligt i haven, men i mycket långsam takt. Detta sker genom att koldioxiden från atmosfären löser sig gradvis i havsvattnet och bildar en sur lösning kolsyra. Haven estimeras för tillfället lagra mer än 140 000 Gt CO₂ genom denna naturliga process. Utöver naturliga processen finns det flera för-

slag på tekniker som kunde öka havets lagring av koldioxid genom att försnabba denna process. Tekniker som diskuteras är bland annat att omvandla koldioxiden till torr is och dumpa det i havet. En annan teknik är att med hjälp av fartyg släppa ner flytande koldioxid 1000 meter under havsytan. Även om havslagring är en potentiell metod för lagring av koldioxid så finns det ännu mycket forskning som behöver utföras för att bedöma dess möjligheter och risker. Dessa risker är bland annat skador på biotoper och risker för havsförurning. (Fateen & Hafez, 2016)

2.3.3 Mineralisering

Mineralisering av koldioxid är en process där koldioxid reagerar med bergarter för att bilda karbonatmineral. Koldioxiden injiceras (som gasform, vätskeform, superkritiskt tillstånd eller blandat med vatten) i speciellt utvalda mineralrika områden, vanligtvis kalk- eller magnesiumrika bergarter. Koldioxiden reagerar sedan med mineralerna i bergarten och omvandlas till stabila karbonatmineral. Denna process resulterar i att koldioxiden permanent binds i mineralform vilket minimerar risken för koldioxidläckage till atmosfären. (Kelemen et al., 2019) Mineraliseringsprocessen sker redan naturligt men den naturliga processen kan ta tusentals år. Med tekniska lösningar hoppas man kunna försnabba denna process. Denna metod används bland annat på Island av Carbfix i projektet Orca (läs Kapitel 4.2). Där fångas koldioxid direkt från luften för att sedan mineraliseras med basalt. Testerna på Island har varit framgångsrika och med denna process kan man mineralisera koldioxiden på bara 2 år.

2.3.4 För- och nackdelar med CCS

CCS möjliggör utsläppsminskningar från redan etablerade industrianläggningar och kraftverk vilket innebär att man potentiellt kunde undvika att ersätta dessa med miljövänligare metoder. Detta kan ses som både en fördel och en nackdel när det samtidigt kan sporra vissa industrier att inte dra sig från fossila bränslen i hopp om att CCS tekniker i stället kan användas. För energisektorn finns det dock redan förnybara energikällor och kärnkraft, vilket gör att CCS inte borde anses som en lösning för energiproduktion. Största möjligheten för CCS är i stället implementering i industrianläggningar där det saknas andra åtgärder för minskning av deras processutsläpp. CCS är den metod som hittills har möjliggjort utveckling av infångningstekniker, vilket gör att utvecklingen av

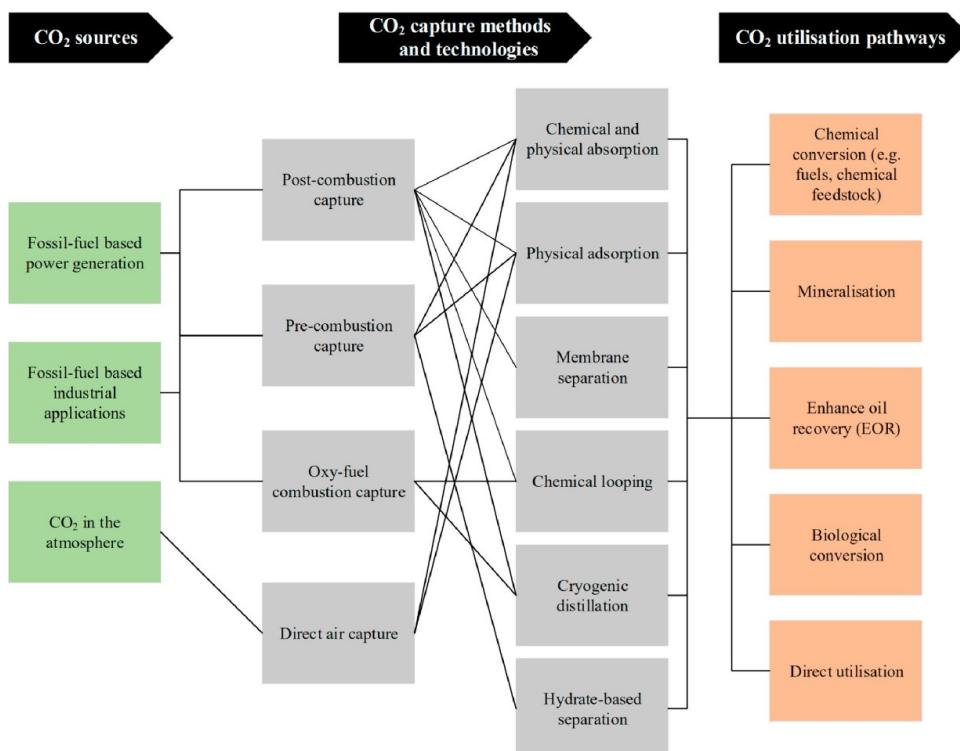
CCS också kan ses som ett led i utveckling av andra infångningsmetoder så som direkt luftinfångning. Storskalig CCS användning bidrar också till utvecklingen av infrastruktur för transport- och lagring som också krävs för utnyttjandet av andra infångningsmetoder. Enligt IEA (2022e.) är det med tanke på de projekt som är i utveckling troligt att mer än 50% av den infångade koldioxiden kommer att lagras år 2030. I dag används nästan 70% av den infångade koldioxiden för ökad oljeutvinning medan cirka 20% lagras i lagringsanläggningar och resterande 5% förs vidare för användning.

2.4 Användning

Utöver lagring av koldioxid så kan den infångade koldioxiden också återanvändas.

Varje år används globalt ungefär 230 Mt CO₂ för olika industriella ändamål. Gödselindustrin är den största konsumenten och använder cirka 130 Mt för ureatillverkning.

Olje- och gasindustrin är den näst största konsumenten med en förbrukning på 70 till 80 Mt för ökad oljeutvinning. (IEA, 2019a.) De fem huvudsakliga användningskategorierna för koldioxid är direkt användning, kemisk omvandling, mineralisering, oljeutvinning och biologisk omvandling.



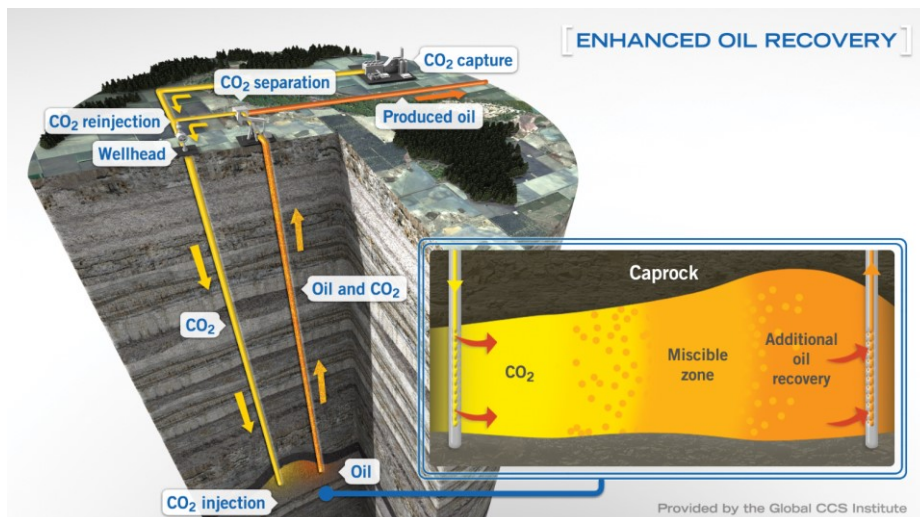
Figur 9. Potentiella rutter för koldioxidanvändning. (Ghiat & Al-Ansari, 2021)

2.4.1 Koldioxid för ökad oljeutvinning

Även om olje- och gasindustrin står för en stor del av våra växthusgasutsläpp så är de ledande i utveckling och användning av fångad koldioxid. Av den infångade koldioxiden från industrin kommer cirka 70% från olje- och gasindustrin. Detta beror på att oljeindustrin har ekonomisk nytta av koldioxiden eftersom den kan användas för att förbättra oljeutvinningen, denna process kallas EOR. (IEA, 2019b.)

Användning av koldioxid för förbättrad oljeutvinning har använts i oljeindustrin över 40 år. Genom att injicera koldioxid i oljefält ökar man på trycket i oljefältet vilket tvingar ut oljan från oljebrunnen, detta möjliggör en utvinningsprocent från oljefältet på 30–60% jämfört med 20–40% genom konventionella metoder. (Ghiat & Al-Ansari, 2021)

När koldioxiden har använts för oljeutvinning lämnar en del av koldioxiden lagrad under marken, den koldioxid som kommer upp tillsammans med oljan separeras och återanvänds sedan för att pumpa ut mer olja, detta gör att EOR metoden går hand i hand med geologisk lagring av koldioxid. Majoriteten av den koldioxid som används för EOR utvinns dock fortfarande från naturliga lagringsplatser av koldioxid under marken, på grund av saknaden av infångad koldioxid nära oljefälten. Detta gör att koldioxiden som används för EOR inte bidrar till en minskning av koldioxidutsläppen eftersom koldioxiden blir pumpad ur marken för att sedan lagras i marken på nytt, medan oljan som upptas också förbränns vilket leder till en ökning av växthusgasutsläpp. Av de oljebolag som använder sig av EOR tekniken i USA har man räknat med att mellan 300–600 kg koldioxid pumpas ner i marken per producerat oljefat. Koldioxidutsläppen för ett oljefat under produktions-, process- och transportfasen är cirka 100 kg koldioxid medan förbränningen av oljan sedan släpper ut cirka 400 kg koldioxid. Detta öppnar möjligheter till att producera koldioxidneutral olja genom att använda EOR i kombination med koldioxidinfångningsmetoder som genererar negativa utsläpp. (IEA, 2019b.)

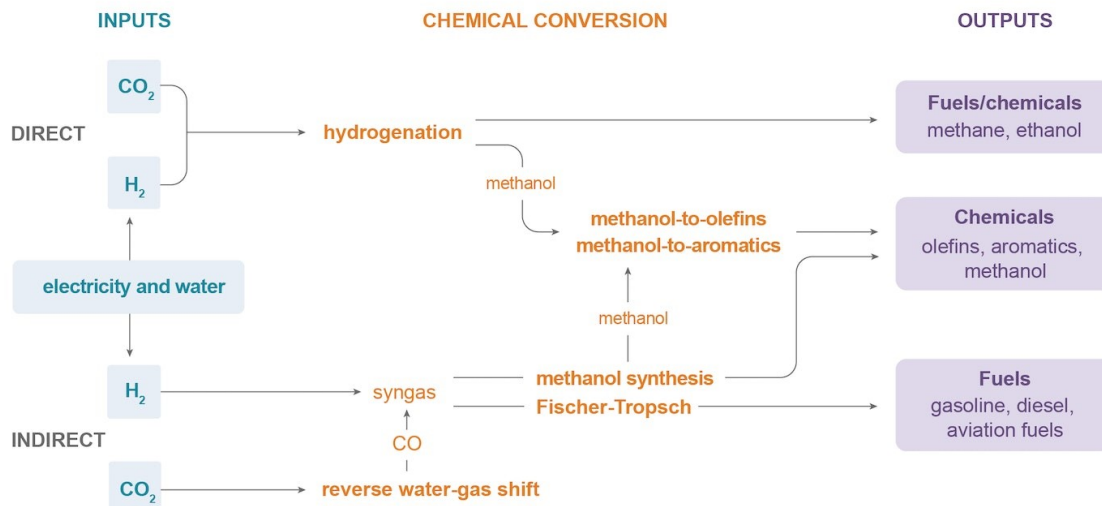


Figur 10. Funktionsprincipen för EOR (Global CCS Institute, u.å.)

2.4.2 Kemikalier och bränslen

Användning av koldioxid till kemikalier har potentialen att utnyttja cirka 500 Mt infångad CO₂ per år. En sådan kemikalie är bland annat urea, som är ett viktigt gödselmedel inom jordbruket. Urea används också inom andra områden, som produktion av vissa läkemedel samt tillverkning av vissa plaster och polymerer. Ureaproduktion innebär att man låter koldioxid reagera med ammoniak vid höga temperaturer och tryck för att producera ammoniumkarbamat, som sedan bryts ner till urea och vatten. (Ghiat & Al-Ansari, 2021)

Användning av koldioxid till bränslen som bland annat metan och metanol har fått en stor uppmärksamhet den senaste tiden eftersom dessa bränslen kunde användas där tillämpning av energibärare med låga koldioxidutsläpp (t.ex. elektricitet och vätgas) är problematiskt. Processen innebär att koldioxid används i kombination med vätgas, vilket resulterar i ett kolhaltigt bränsle som är lättare att hantera och använda en ren vätgas. Men produktionskostnaden för metanol och metan från koldioxid är för närvarande 2 till 7 gånger högre än för deras fossila motsvarigheter. En stor del av produktionskostnaden är eltillförseln, som står för mellan 40–70% av kostnaderna. För att göra bränsleproduktion av infångad koldioxid konkurrenskraftig krävs ett lågt genomsnittligt elpris. (IEA, 2019a.)



Figur 11. Utvecklade omvandlingsrutter för koldioxidbaserat bränsle (IEA,2019a.)

2.4.3 Mineralisering

Mineraliseringsprocessen för användning av koldioxid är likadan som beskriven i lagring genom mineralisering, skillnaden är att man sedan kan utvinna karbonatmineralerna för återanvändning. Utöver att använda sig av bergarter rika på kalcium och magnesium så kan man ta tillvara industriella restprodukter som till exempel slagg från stålindustrin. När koldioxiden sedan reagerar med restprodukten eller bergarten rik på magnesium eller kalcium och skapar kalcium- eller magnesiumkarbonater så kan man avskilja karbonaterna. Dessa karbonatmineraler kan sedan användas för att tillverka produkter som till exempel betong och gipsskivor. (Ghiat & Al-Ansari, 2021)

2.4.4 Biologisk användning

Biologisk användning innebär att man utnyttjar koldioxiden till fotosyntesen. En typ av biologisk användning är koldioxidanvändning i växthus. Genom att tillföra koldioxid till växthusmiljön kan man öka koncentrationen av koldioxid som växterna tar upp under fotosyntesen. Högre koncentrationer av CO₂ kan öka fotosyntesen och därmed tillväxten av växterna. Detta kan i sin tur öka skörden av grönsaker, frukter, blommor och andra växter som odlas i växthus. Generellt sett är CO₂-nivåer på upp till 1200 ppm fördelaktiga för de flesta jordbruksgrödor och i bästa fall ökas avkastningen med 30% (Ghiat & Al-Ansari, 2021)

2.4.5 Direkt användning

Direkt användning av koldioxid är applicerbart i många industrier, bland annat i kolsyrning av drycker, konservering av livsmedel samt för uppvärmning och kylning var koldioxid kan användas som köldmedium. Koldioxid är ett gammalt köldmedium som allmänt användes i början av 1900-talet, men ett nytt intresse för koldioxid i kylmaskiner väcktes efter att Montrealprotokollet trädde i kraft år 1989. Montrealprotokollets huvudsyfte är att stegvis minska produktionen och användningen av ozonskadliga CFC och HCFC kemikalier. De fysikaliska egenskaperna i dessa kemikalier har gjort att de varit effektiva inom kyltekniken. På grund av utfasningen av dessa kemikalier så återvände koldioxiden tillbaka till marknaden som ett köldmedium i början av 2000-talet. Åkermarck (2018) jämförde i sitt examensarbete fyra traditionella köldmedier: propan (R290), isobutan (R600a), ammoniak (R717) och koldioxid (R744). Studien visar på att koldioxid som köldmedium har stor potential i framtiden eftersom företag investerar mycket på utvecklingen av kylprocesser med koldioxid som köldmedium. Dessutom har koldioxid inga kemiska belastningar och är ett icke brandfarligt och giftfritt köldmedium.

2.4.6 För- och nackdelar med CCU

Att räkna de potentiella klimatfördelarna med CCU är komplext och noggranna livscykelanalyser krävs för att kunna bedöma fördelarna. Användning av infångad koldioxid leder inte nödvändigtvis till minskade utsläpp. Klimatfördelarna med koldioxidanvändning beror på källan till koldioxiden, den produkt som koldioxidbaserade produkten ersätter, vilken energi som används vid omvandlingsprocessen och hur länge koldioxiden kvarstår i produkten. Även om en viss användning av koldioxid skulle kunna ge betydande klimatfördelar så innebär den relativt begränsande marknadsstorleken för dessa tillämpningar att lagring bör förbli det primära fokuset. I netto-nollscenariot används endast 5% av den koldioxid som fångas in år 2030 medan resten lagras. (IEA, 2022f.) CCU kan dock stödja en tidig marknad och bidra till teknikutveckling för andra koldioxidavskiljningstekniker med hjälp av den efterfrågan som finns på koldioxid. Detta kunde leda till teknikutvecklingar för infångningsmetoderna vilket gör att infångning för användning kunde fungera som en inkörsport till andra metoder. (Grafström, 2022) Som redan nämnts används idag den största delen av koldioxid till ureatillverk-

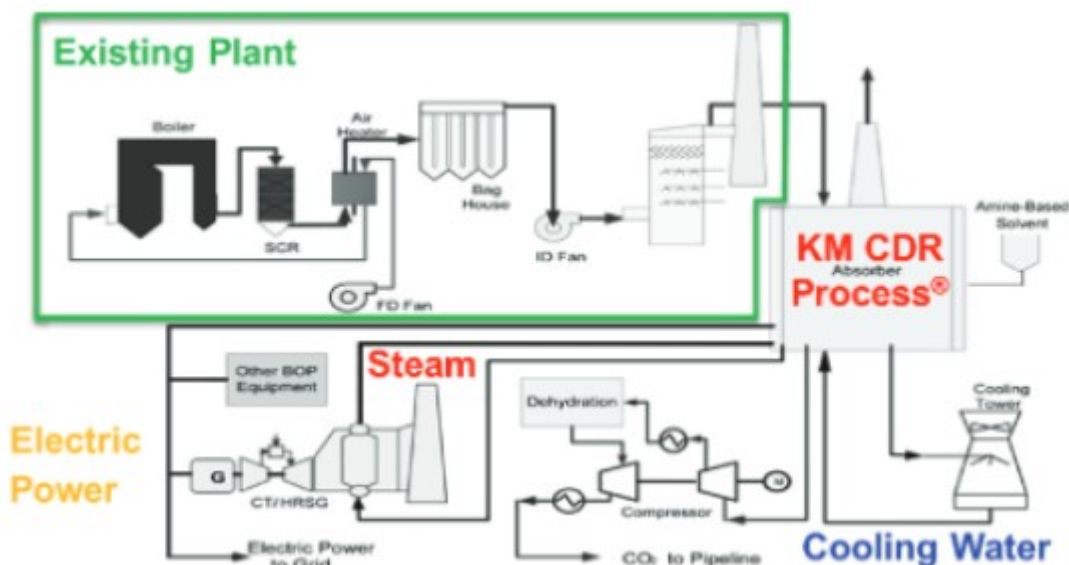
ning och EOR, men idag pågår också planer för cirka 20 kommersiella avskiljningsanläggningar som är inriktade på CO₂-användning, främst för bränslen, kemikalier och byggmaterial. Tio av dessa projekt har tillkännagivits bara sedan början av år 2021. Omkring 5 Mt CO₂ per år skulle kunna avskiljas för produktion av syntetiska bränslen fram till år 2030. Projekten kommer dock troligen att behöva ytterligare stöd för att kunna fortsätta och hälften av projekten befinner sig fortfarande i ett tidigt utvecklingsstadium. (IEA, 2022f.)

2.5 Utvecklingen av punktfångning

Enligt IEA (2022g.) finns det idag runt 35 kommersiella anläggningar som använder sig av punktfångning av koldioxid. Dessa anläggningar har en årlig infångningskapacitet på runt 45 Mt CO₂ vilket nästan motsvarar Finlands totala årliga utsläpp 2021, som enligt Miljöministeriet (2022) var 47,7Mt CO₂. Utbyggnaden av punktfångning har legat efter förväntningarna men har ökat betydligt under de senaste åren. För närvarande finns cirka 65 % av den operativa kapaciteten för avskiljning av koldioxid i naturgasbehandlingsanläggningar som är en av de mest kostnadseffektiva tillämpningarna för avskiljning av koldioxid, men nya projekt inriktas i allt högre grad på andra tillämpningar. Granskar man de projekt som är i utveckling just nu så kan den årliga avskiljningskapaciteten från både nybyggnation och ombyggnationer fram till år 2030 uppgå till cirka 70 Mt CO₂ från vätgasproduktion, 70 Mt CO₂ från kraftproduktion och 20 Mt CO₂ från industrianläggningar. Projektutvecklare har meddelat ambitioner på att ha över 200 nya avskiljningsanläggningar i drift år 2030, vilka förväntas kunna avskilja mer än 220 Mt CO₂. Men även på en sådan nivå skulle dock utbyggnaden av punktfångning vara betydligt lägre än vad som krävs i nettollscenariot. (IEA, 2022g.)

I de projekten var man försökt använda koldioxidinfångning från kolkraftverk har också kostnaderna för installationen ofta underskattats. Ett exempel är Petra Nova projektet nära Houston, Texas som blev klart utan problem och hade en kapacitet på 1,4Mt CO₂ per år. Petra Nova var ett koldioxidavskiljningsprojekt utformat till en av pannorna i kolkraftverket. Kostnaderna för att addera koldioxidinfångningen beräknades till en miljard dollar och projektet färdigställdes enligt budget och tid. Men efter 3,5 års tid så stängdes projektet ner på grund av olönsamhet. I Petra Nova-

anläggningen användes koldioxiden för EOR och det varierande oljepriset gjorde det olönsamt. (Grafström, 2022). Koldioxidinfångningssystemet byggde på post-combustion metoden och aminteknologi som lösningsmedel. Elektriciteten och ångan för avskiljningsanläggningen levererades från en separat gasturbin och värmeåtervinningssånga, för kylning byggdes ett separat kyltorn till avskiljningsenheten. (Miyamoto et al., 2017) Petra Nova har tekniskt sett givit värdefulla insikter som sannolikt kommer att förbättra kommande generationers projekt för koldioxidavskiljning. Det är viktigt att komma ihåg att Petra Nova primärt var en teknikdemonstration för att identifiera eventuella tekniska problem vid uppskalning av infångning och för att förbättra tekniken för implementering i framtida projekt. Projektets ekonomiska situation var också unik genom att den var beroende av utökad oljeutvinning, skatteincitament, bidrag och speciallån. I en värld som rör sig bort från olja kommer utökad oljeutvinning sannolikt att ha en mindre betydelse för denna teknik. (Grafström, 2022)

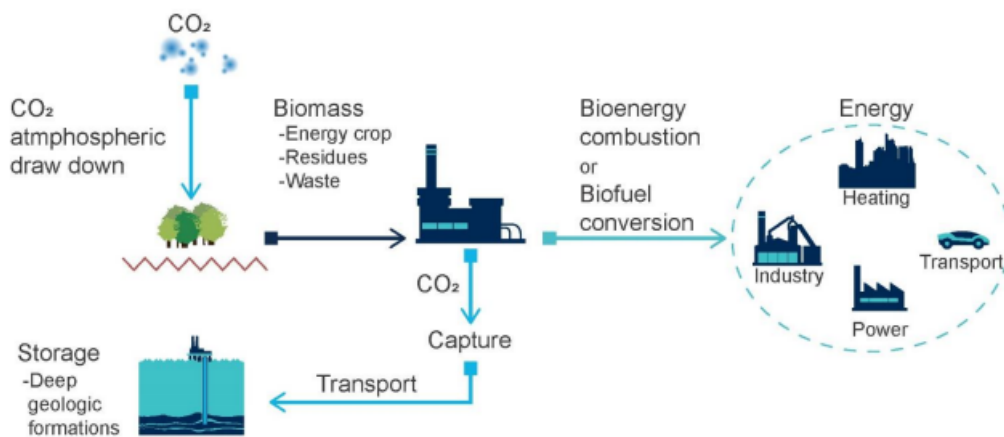


Figur 12. Blockdiagram av Petra Novas koldioxidavskiljningsprocess (Miyamoto et al., 2017)

3 BECCS

Bioenergi med koldioxidavskiljning och lagring (BECCS) är en teknik som syftar till att minska koldioxidutsläppen från bioenergianläggningar genom att fånga upp och lagra koldioxid från anläggningarna. För infångning av koldioxid genom BECCS används de samma metoderna som beskrevs för CCS, skillnaden är främst källan till koldioxidut-

släppen. Bioenergi är redan nu utsläppsneutralt då växtriket genom fotosyntesen lagrar koldioxid som sedan släpps tillbaka i atmosfären vid förbränning, varav nya växter planteras som återigen binder koldioxid. Detta leder till att implementering av BECCS i en bioenergianläggning möjliggör negativa utsläpp av koldioxid genom att lagra den koldioxid som växtriket fångat. Biogena källor som används för BECCS kan vara processutsläpp från produktion av biobränsle och biovätgas, eller förbränningsutsläpp från värme- och elproduktion i kraftverk, avfallskraftverk och industriella anläggningar som eldar med biomassa (cement-, massa- och pappersindustrin). BECCS är också en typ av punktfångning, men på grund av att metoden möjliggör negativa utsläpp så kategoriseras den skiljt från de andra punktfångningsmetoderna. Som ett alternativ till lagring kan den infångade koldioxiden likt CCU också användas som råvara för en rad olika produkter och går då under namnet BECCU. (IEA, 2022a.)



Figur 13. Funktionsprincipen för BECCS (Consoli, 2019)

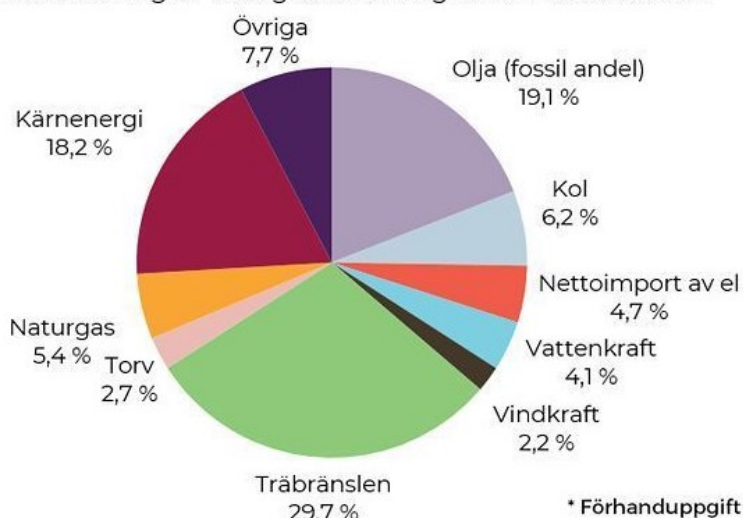
3.1 BECCS i Norden

Enligt Nordic Council of Ministers (2021) kan de ambitiösa målen till nettonollutsläpp som de nordiska länderna har satt upp inte nås utan någon form av infångning av koldioxid som leder till netto-negativa utsläpp. I Finland och Sverige är BECCS metoder i teorin de mest sannolika lösningarna till detta eftersom vi har en hög andel biogena koldioxidutsläpp från bland annat massa-och pappersindustrin, kraftvärmeproduktion och fjärrvärmesektorn.

Finland förbrukade år 2020 19,4 miljoner kubikmeter fasta trädbränslen i värme- och kraftverk, vilket motsvarar 37,6 TWh. Bark utgjorde två tredjedelar av alla fasta biprodukterna och en tredjedel bestod av avfallsflis från skogsindustrin och olika slags spån.

(Jord- och skogsbruksministeriet, u.å.) Andelen energi från träbränslen år 2021 stod för nästan 30% av vår energianvändning i Finland. (Motiva, 2022) Samma gäller i Sverige var biobränsle också är den största energikällan med cirka 25% andel av totala energianvändningen år 2020. (Energimyndigheten, 2023) I perspektiv står bioenergi globalt för 6% av energiförsörjning vilket gör att BECCS i synnerhet är mera intressant för Sverige och Finland. (IEA, 2022b.)

Totalförbrukning av energi efter energikälla i Finland 2021*



Figur 14. Totalförbrukning av energi efter energikälla i Finland 2021. (Motiva, 2022)

Rodriguez et al. (2021) intervjuade 24 företag i Sverige och Finland med biogena koldioxidutsläpp på mer än 0.3 Mt CO₂ per år. I analysen av intervjumaterialet där företagen blev frågade vad de anser om potentialen för BECCS som lösning framkom i stora drag fyra huvudsakliga osäkerheter. För det första finns det en brist på policyn för negativa utsläpp och BECCS, både internationellt och nationellt, så det finns inga incitament att investera i BECCS. För det andra, med fokus på deras lilla andel av de fossila utsläppen anser företagen inte att de bör förväntas gå längre än sina nuvarande hållbarhetsinsatser även om punktkällor av biogena utsläpp har potential för BECCS. För det tredje anser företagen att BECCS kan leda till tekniska kompromisser genom att det minskar deras processeffektivitet och leder till potentiella förluster av säljbara produkter, till exempel den el och värme som i stället behöver användas för infångning. För det fjärde gör bristen på kundernas krav på negativa utsläpp det svårt för företag att prioritera investeringar i teknik för avskiljning av koldioxid i sina hållbarhetsstrategier.

BECCS anses ändå fortfarande vara en framtida lösning som har potential att skapa negativa utsläpp i Norden, men det finns flera hinder för dess implementering. Stora kapitalinvesteringar krävs och det leder samtidigt till högre driftkostnader. Idag finns det inget värde kopplat till den utsläppsminskning som BECCS metoder ger. Nuvarande styrmedel ger inte projektutvecklare tillräcklig avkastning på investeringar i BECCS. Begränsade privata investeringar i kombination med en allt starkare enighet för behovet av negativa utsläpp ger därför starka argument för statligt ingripande. På kort sikt anses det krävas statliga garantier avseende betalningar för negativa utsläpp som sedan kan fasa ut när tekniker för BECCS har blivit mer etablerat och kostnadseffektivt. (Nordic Council of Ministers, 2021)

3.2 BECCS projekt

Idag avskiljs endast cirka 2 Mt CO₂ från biogena källor per år varav cirka 1 Mt förs vidare för lagring. Mer än 90% av koldioxiden fångas upp från bioetanolfabriker som är en av de mest kostnadseffektiva BECCS tillämpningarna på grund av den höga koncentrationen koldioxid i procesströmmen. Den höga koncentrationen gör att koldioxiden endast behöver separeras från H₂O och komprimeras innan lagring eller användning. Prisuppskattningar för BECCS varierar för olika råvaror, tekniker och systemlösningar. Som redan nämnts så är det generellt billigare att avskilja CO₂ desto större procentandel CO₂ den infångade gasen innehåller. Enligt IEA (2021) ligger priset för infångning från bioetanolproduktion runt 25–35 dollar per ton CO₂ infångad, medan infångning från kraftverk ligger kring 50–100 per ton CO₂. Baserat på de projekt som för tillfället byggs ut så kan avskiljning av koldioxid genom BECCS år 2030 nå upp till cirka 40 Mt CO₂/år. Det största BECCS projektet hittills är Illinois Industrial CCS Project, som sedan 2018 avskiljer cirka 1Mt CO₂ från bioetanolproduktion per år för permanent lagring. De resterande småskaliga bioetanolanläggningarna med BECCS teknik i USA och Europa säljer i stället sin koldioxid antingen till växthus för att öka skörden eller till oljeutvinningsbolag för EOR. (IEA, 2022a.)

I Sverige har ett BECCS projekt fått stöd från EU:s innovationsfond. Stödet gavs till Stockholms Exergi som genom projektet Beccs Stockholm planerar att installera BECCS i deras biokraftvärmeverk i Stockholm. Beccs Stockholm projektet är fortfa-

rande i ett tidigt stadie men förväntas kunna lagra 7 Mt koldioxid under de första 10 åren i drift. (Beccs Stockholm, u.å.)

Ett annat nordiskt projekt är BECCS för ett avfallskraftvärmeverk i Oslo som startades av finska Fortum, men i maj 2022 sålde Fortum sin andel i företaget. Enligt ett pressmeddelande av Oslo stad kommer ändå BECCS projektet fortsätta och förväntas fånga in 0,4 Mt CO₂/år från och med år 2026. Enligt pressmeddelandet kommer Oslo stad och ägarparterna investera totalt 6 miljarder norska kronor i projektet varav 3 miljarder kronor har lovats av den norska regeringen. (The City of Oslo, 2022)

4 Direkt luftinfångning

Ett annat alternativ för koldioxidinfångning som likt BECCS kan leda till netto-negativa utsläpp är DAC, eller direkt luftinfångning. Till skillnad från de tidigare nämnda metoderna som bygger på infångning från punktkällor så syftar DAC till att fånga upp koldioxiden direkt från atmosfären. Efter att man fångat upp koldioxiden kan man likt koldioxidinfångning från punktkällor antingen använda (DACCU) eller lagra (DACCS) koldioxiden.

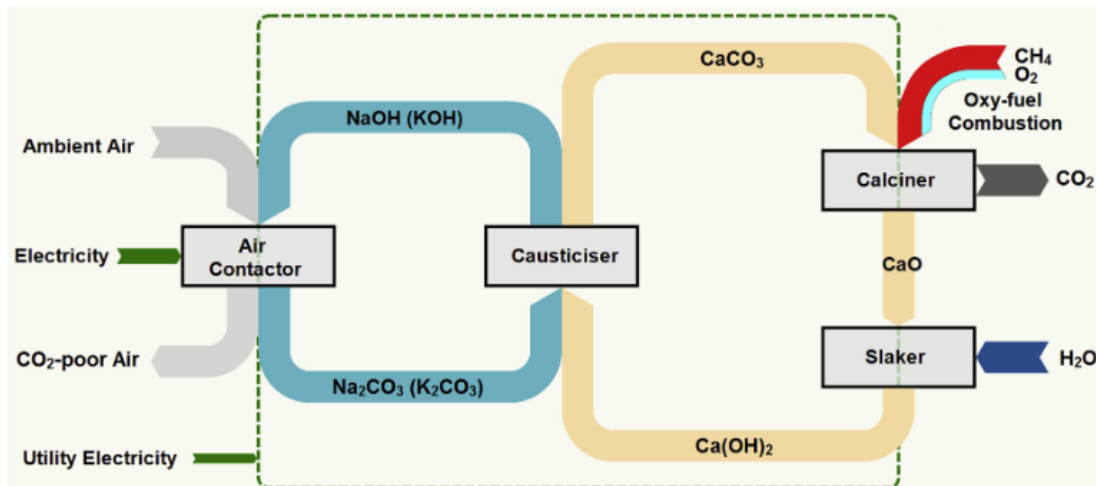
4.1 Infångning och avskiljning

För att fånga in koldioxiden från luften kan man använda sig av ett flytande lösningsmedel i hög temperatur för att absorbera koldioxiden (L-DAC), eller en fast adsorbent i låg temperatur (S-DAC).

4.1.1 L-DAC

Vid L-DAC kommer luften i kontakt med natriumhydroxid (NaOH) med hjälp av fläktar eller det naturliga luftflödet. Koldioxiden reagerar då med NaOH och bildar en lösning av natriumkarbonat (Na₂CO₃) i normalt tryck och rumstemperatur varav den koldioxidrenade luften sedan släpps ut i atmosfären igen. Na₂CO₃ förs sedan vidare till nästa steg var det blandas med kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) som leder till att fast kalciumkarbonat (CaCO₃) bildas och NaOH regenereras. NaOH kan sedan återanvändas för att starta om cykeln medan CaCO₃ värms upp till cirka 900 grader för att frigöra koldioxiden. När koldioxiden har separerats samlas den upp medan kalciumoxiden (CaO) som

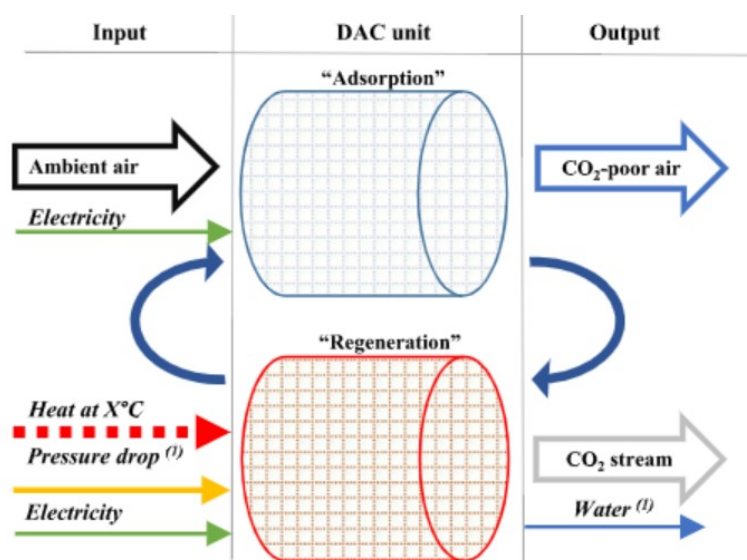
kvarstår blandas med vatten för att regenerera $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Uppvärmningen av CaCO_3 är den mest energiintensiva delen i processen med ett totalt värmeenergibehov på 1420–2250 kWh/ton koldioxid. Förutom värmebehovet behövs också elkraft som beräknas ligga mellan 366–764 kWh/ton koldioxid för att driva resterande delarna av processen. (Fasihi et al., 2019)



Figur 15. Exempel på koldioxidinfångning med L-DAC (Fasihi et al., 2019)

4.1.2 S-DAC

Tekniker för adsorption har i huvudsak en enda enhet med ett fast adsorptionsmedel där adsorption och frigöring sker efter varandra. Luften från atmosfären passerar genom systemet med hjälp av fläktar eller det naturliga luftflödet. Koldioxiden binds sedan kemiskt till filtret och koldioxidrenade luften lämnar sedan systemet. När sorbenten är mättad på koldioxid stängs fläktarna av och inloppsventilerna stängs. Frigöringen sker sedan genom att systemet värms till en viss temperatur (runt 80–120 grader) beroende på vilken sorbent som används. Den frigjorda koldioxiden samlas sedan upp och transporteras ut ur systemet och systemet kyls ned för att starta om processen. Climeworks använder i sin process ett filter av speciella cellulosa-fibrer som stöds av aminer i fast form för att binda koldioxiden. Deras system kräver 200–300 kWh el/ton koldioxid för att styra fläktarna och systemet, samt 1500–2000 kWh värmeenergi för frigöringen. Men eftersom temperaturen som krävs är lägre möjliggör det användning av industriell spillvärme för frigöringen vilket inte är möjligt med L-DAC på grund av den höga temperaturen som krävs. (Fasihi et al., 2019)



Figur 16. Exempel på koldioxidinfångning med S-DAC (Fasihi et al., 2019)

4.2 DAC projekt

Enligt IEA (2022d.) finns det idag 18 DAC anläggningar i drift globalt. Av dessa 18 anläggningar säljer alla utom 2 anläggningar sin koldioxid för användning. Användningsområden inkluderar Power-to-X, kolsyrning av drycker och växthuseffektivering.

Tabell 2. DAC anläggningar i drift (IEA, 2022d.)

Company	Country	Sector	CO ₂ storage or use	Start-up year	CO ₂ capture capacity (tCO ₂ /year)
Global Thermostat	United States	R&D	Not known	2010	500
Global Thermostat	United States	R&D	Not known	2013	1 000
Climeworks	Germany	Customer R&D	Use	2015	1
Carbon Engineering	Canada	Power-to-X	Use	2015	Up to 365
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2016	50
Climeworks	Switzerland	Greenhouse fertilisation	Use	2017	900
Climeworks	Iceland	CO ₂ removal	Storage	2017	50
Climeworks	Switzerland	Beverage carbonation	Use	2018	600
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2018	3
Climeworks	Italy	Power-to-X	Use	2018	150
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Netherlands	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	50
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	50
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	3
Climeworks	Iceland	CO ₂ removal	Storage	2021	4 000

Den senaste och mest omtalade anläggningen som tagits i bruk heter Orca och är byggt i Island. Orca är den första storskaliga DACCS anläggningen i drift och byggdes av det schweiziska bolaget Climeworks som är en ledare inom DAC tekniker, tillsammans med isländska Carbfix som specialiserar sig på lagring av koldioxid genom mineralisering. För infångning av koldioxiden använder Climeworks 8 containrar som genom S-DAC metoden tillsammans kan fånga upp 4000 ton CO₂ årligen. Värmen som behövs för avskiljningen samt den elektricitet som behövs för att driva anläggningen levereras från ett lokalt geotermiskt kraftverk. (Climeworks, u.å.) Carbfix blandar därefter koldioxiden med vatten för att sedan pumpa ner den djupt under marken. I marken reagerar sedan koldioxiden med basalt genom mineralisering vilket gör att fasta karbonater fyller upp porerna i basalten. Enligt Carbfix visade deras pilotprojekt på att 95% av den injicerade koldioxiden hade mineraliserats på bara 2 år. (Carbfix, u.å.) Enligt Soltoff (2021) låg priset för att fånga in ett ton CO₂ med Orca mellan 600–800 dollar år 2021 vilket är ett oöverkomligt pris för de flesta potentiella betalare. De första kunderna har varit privatpersoner och företag som är villiga att betala för att kompensera egna utsläpp, t.ex. Microsoft, Stripe, Swiss Re och bandet Coldplay (som anlätade Climeworks för att eliminera en del av utsläppen från sin då kommande världsturné). Climeworks hoppas kunna få ner denna kostnad till mellan 100–200 dollar. Utöver den höga kostnaden har Orca också blivit kritiserat för den mängd som anläggningen fångar in. 4000 ton koldioxid är ingenting på en global skala och med vår nuvarande utsläppsnivå så motsvarar Orcas årliga ansträngningar cirka 3 sekunder av årliga globala koldioxidutsläppen. Climeworks meddelade i juni 2022 att de redan börjat jobba på sitt nästa projekt i Island som också är en DACCS enhet. Projektet heter Mammoth och ska ha en lagringskapacitet på 36 000 ton per år när den är klar.

Ett annat intressant projekt under utveckling av 1PointFive är DAC1. DAC1 utvecklas i USA och använder sig av Carbon Engineerings L-DAC teknik för infångning. Infångningskapaciteten förväntas vara 1 Mt CO₂ per år och anläggningen förväntas vara i drift 2024. (IEA, 2022d.)



Figur 17. Bild från Orca enheten på Island (Climeworks, u.å.)

4.3 För- och nackdelar med DAC

För L-DAC metoder används fortfarande i de flest fall fossila bränslen för att kunna tillhandhålla den höga värmen som behövs i processen. Det gör att avskiljning med absorption för DACCU inte skulle vara ett hållbart system eftersom den fossila CO₂-delen slutligen skulle hamna i atmosfären och DACCS skulle endast kunna möjliggöra delvis negativa utsläpp. S-DAC teknikerna öppnar möjligheten för flera alternativ att tillhandhålla värmen på grund av den lägre temperaturen som krävs. Man kan till exempel använda sig av energieffektiva värmepumpar som drivs med förnybar energi eller spillvärme från industrin vilket är en stor fördel med infångning genom adsorption. (Fasihi et al., 2019)

Det kan konstateras att DAC metoder är betydligt mer energiintensiva än de andra infångningsmetoderna vilket gör att de också är dyrare. Detta beror på att koncentrationen koldioxid i luften är betydligt lägre än till exempel i rökgaser från industrianläggningar vilket gör separationen från luften svårare.

En fördel med DAC är dess flexibilitet när det gäller placering av anläggningarna. I teorin kan DAC-anläggningar placeras på vilken plats som helst, vilket man kunde dra nytta av genom att placera anläggningarna där potentialen att utnyttja förnybara energi-

källor är stor. Dessutom kan man placera anläggningarna nära lagringsområden eller alternativt nära användningskällan. (IEA, 2022c.) Enligt Grafström et al. (2018) kommer det, trots dessa fördelar, sannolikt bli svårare att implementera DAC i en större skala än vad förespråkare utlovar. Detta eftersom mängden koldioxid som behöver fångas är så stor, både i volym, vikt och kostnad. Likt BECCS finns det inte någon stor möjlighet till lönsamma investeringar eftersom ersättningsstrukturer för DAC saknas. Detta kunde lösas genom att inkludera negativa utsläpp i utsläppsrättshandel eller att man på annat sätt ersätts för negativa utsläpp. Däremot är DACCS förmodligen den mest optimala tekniken som är tillgänglig på global nivå om en situation av ett akut behov till negativa utsläpp skulle uppstå.

5 Utsläppshandel i EU

5.1 EU ETS

År 2005 tog EU i kraft EU ETS (European Union Emissions Trading Scheme) som är ett system för handel med utsläppsrätter i alla EU länder samt Island, Lichtenstein och Norge. Detta system är framtaget för att minska på utsläppen av växthusgaser från industrier, kraftverk och flygtrafiken genom att kostnaderna sporrar företagen att investera i klimatvänligare lösningar. Systemet bygger på att ett tak (som successivt sänks varje år) sätts för koldioxidmängden som får släppas ut av företag som faller under ETS-systemet. Varje utsläppsrätt motsvarar ett värde av 1 ton CO₂, om företag använder färre än de blivit tilldelad kan de antingen spara eller sälja vidare utsläppsrätterna till andra företag. Företag som överskrider utsläppsrätterna tilldelade måste betala en bot på 100€ per överskridet ton CO₂. Majoriteten av utsläppsrätterna fördelas genom auktionering då företagen kan köpa utsläppsrätterna, priset styrs av tillgången och efterfrågan och varierar därför hela tiden. 43% av utsläppsrätterna delas ut gratis för att hantera risken för koldioxidläckage genom att företagen flyttar sin produktion till länder utanför EU. (European Commission, u.å.a)

Sedan systemet infördes har utsläppen av koldioxid minskat med 30 procent varav största bidragande sektorn är kraftverk eftersom det finns fossilfria alternativ inom sektorn. Utsläppen från den tunga industrin har under samma tidsperiod legat på ungefär samma nivå eftersom det inte är lika lätt för tung industrin att använda sig av alternativa

metoder. Detta har lett till att största delen av gratis utsläppsrätterna har tilldelats tungindustrin för att undvika förflyttning av produktionen utanför EU. (Naturskyddsför-
eningen, 2021)

Idag ingår runt 10 000 industri- och kraftanläggningar i denna utsläppshandel och tillsammans står de för cirka 40% av växthusgasutsläppen i EU. År 2021 utgjorde utsläppstaket för stationära anläggningar 1 571 583 007 utsläppsrätter och framöver kommer taket minska med 2,2% per år vilket motsvarar 43 0003 515 utsläppsrätter för stationära anläggningar per år. (Europeiska Kommissionen, 2022) Enligt Miljöministeriet (2022) var utsläppen från de finländska anläggningar som omfattas av utsläppshandeln år 2021 totalt 20,3 Mt CO₂ och deras andel av Finlands totala utsläpp uppgick till 43 procent.

Tabell 3. Årligt tak för utsläpp från stationära anläggningar och antal utsläppsrätter för luftfart som satts i omlopp (Europeiska Kommissionen, 2022)

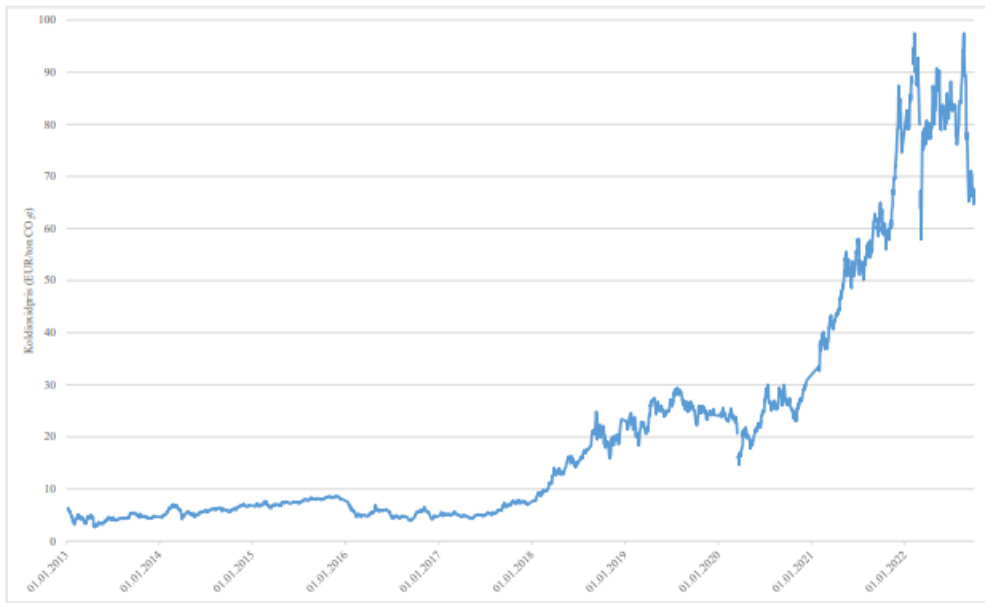
År	Årligt tak (stationära anläggningar)	Volym utsläppsrätter för luftfart som årligen satts i omlopp
2013	2 084 301 856	32 455 296
2014	2 046 037 610	41 866 834
2015	2 007 773 364	50 669 024
2016	1 969 509 118	38 879 316
2017	1 931 244 873	38 711 651
2018	1 892 980 627	38 909 585
2019	1 854 716 381	38 830 950
2020	1 816 452 135	42 803 537
2021	1 571 583 007	28 306 545

5.2 Koldioxidinfångning inom ETS

Enligt European Commission (u.å.b.) är ETS-systemet det viktigaste incitamentet för utbyggnad av CCS eftersom EU:s regelverk betraktar koldioxid som avskilt och lagrats på ett säkert sätt som "ej utsläppt" inom ramen för ETS. Sedan 2015 års ändring av direktivet om handel med utsläppsrätter ingår anläggningar för avskiljning, transport och lagring uttryckligen i systemet för handel med utsläppsrätter. Systemet gör det möjligt för företagen att få utsläppsrätter för varje ton koldioxid som de avskiljer och lagrar, dessa utsläppsrätter kan sedan säljas vidare på koldioxidmarknaden eller användas för att kompensera egna utsläpp. Dessutom genererar auktioneringen av utsläppsrätter betydande intäkter för medlemsstaterna och enligt EU:s utsläppshandelssystem måste minst 50% av intäkterna användas till klimat- och energirelaterade ändamål. Utöver

detta har EU:s system för handel med utsläppsrätter en särskild bestämmelse om stöd till CCS-projekt genom finansieringsprogrammet NER 300. Detta program ger finansiering till storskaliga CCS-projekt som ska demonstrera att tekniken är lönsam när det gäller att minska utsläppen av växthusgaser. (Europeiska Kommissionen, 2022) Finansiellt har dock företag som vill utveckla och kommersialisera CCS fortfarande utmaningar eftersom kostnaden för koldioxid inom det nuvarande ETS-systemet ligger under beräknade kostnader för koldioxidinfångning. På grund av detta ser industrierna ingen mening med att implementera CCS eftersom det är mera ekonomiskt gynnsamt att betala för utsläppsrätterna och straffpriserna ifall utsläppen överskrids. (Grafström, 2022)

ETS-systemet ger också endast fördelar för CCS eftersom ingen annan koldioxidinfångningsmetod omfattas av utsläppshandeln. Det finns alltså inget direkt incitament i EU som liknar priset på utsläppsrätt för de andra infångningsmetoderna så som BECCS och DACCS. Kommersiella lösningar har hittills grundat sig på en frivillig marknad för koldioxidinfångning och lagring för dessa metoder. Med tanke på det osäkra marknadsläget har investeringar i BECCS och DACCS inte genomförts i den storleksklass på miljoner ton som har förväntats behövas. (Statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet, 2023) När det kommer till infångningsmetoder för användning så stöds inte heller CCU av ETS-systemet, och den koldioxid som vidaresäljs räknas som användning av utsläppsrätterna. Detta gör att det endast skulle löna sig för industrier som är bundna till ETS att sälja sin koldioxid för vidareanvändning i ett scenario var de företag som köper koldioxiden är villiga att betala ett pris för koldioxiden som överstiger infångningskostnaden plus den utsläppsrätt som säljande företaget har betalat. Men om trenden fortsätter som nu, där koldioxidpriset blir högre medan koldioxidinfångning blir billigare så kommer detta scenario att uppfyllas utan att några ändringar görs i ETS-systemet.



Figur 18. Auktionspriser vid auktioner av allmänna utsläppsrätter 2013–2022 (Europeiska Kommissionen, 2022)

6 Sammanfattning

I denna litteraturstudie har de olika tekniska tillvägagångssätten för koldioxidinfångning samt de olika metoderna för lagring eller användning presenterats. Målet var att ge läsaren en fördjupad förståelse för potentialen, fördelarna och nackdelarna med de olika metoderna. I arbetet presenterades CCS-, BECCS- och DACCS-metoderna samt deras motsvarande användningsmöjligheter som lösningar.

CCS viktigaste uppgift är att i framtiden förhoppningsvis kunna implementeras i industrier var det inte är möjligt eller är för dyrt att få processen helt utsläppsfri med andra metoder, till exempel inom cementtillverkning. När det kommer till implementering för energiproduktion kan CCS ifrågasättas eftersom det redan finns alternativa metoder så som förnybar energi och kärnkraft. För infångning och avskiljning kan man använda sig av post-, pre- eller oxy-combustion. Post-combustion med aminteknologi är för tillfället den mest utvecklade och kommersiellt mest attraktiva metoden för infångning, detta beror bland annat på dess mångsidighet och möjligheten att installera systemet i befintliga anläggningar.

BECCS är den enda metoden som möjliggör negativa utsläpp från punktinångning genom att koldioxiden avskiljs från biomassa. För infångning och avskiljning används

samma metoder som i CCS. BECCS är den infångningsmetod som diskuteras mest som lösning i Finland och Sverige på grund av den stora konsumtionen av biogena källor för energiproduktionen. Idag används BECCS till största del för bioetanolfabriker, men nordiska projekt i Sverige och Norge utvecklar för tillfället BECCS anläggningar på ett biokraftvärmeverk och avfallskraftvärmeverk.

DAC skiljer sig från de andra metoderna i och med att CO₂ fångas in direkt från luften. För infångning används antingen L-DAC eller S-DAC metoder, ingen av metoderna har tydligt visat på bättre prestation och båda teknikerna utvecklas fortfarande i samma takt. DAC befinner sig fortfarande i en tidig fas och mycket utveckling behövs för att få ner priset.

Största intresset för CO₂ användning är idag till syntetiska bränslen som metan och metanol, men de flesta uppstartade projekten befinner sig i ett tidigt skede och kommer troligen att behöva ytterligare stöd för att kunna fortsätta. CCU har endast visat sig vara ekonomiskt lönsamt för oljeutvinning i dagsläget. I netto-nollscenariot används endast 5% av den koldioxid som beräknas fångas in år 2030 medan resten lagras, detta tillsammans med ekonomisk olönsamhet visar på att lagring bör förbli det primära fokuset för infångad CO₂.

Transporten av koldioxid anses vara den tekniskt mest utvecklade delen i kedjan, varav transporter genom rörledningar i kombination med fartyg till välutvecklade lagringshubbar är den effektivaste och ekonomiskt mest lönsamma metoden. Geologisk lagring har visat sig vara den mest lovande metoden som lagringsplats.

Att jämföra olika koldioxidinfångningsmetoder är en utmaning trots att de har utvecklats för samma syfte, att minska koldioxidutsläppen och motverka klimatförändringen. Detta beror på att de sist och slutligen har helt olika användningssyften. Resultatet från litteraturstudien visar att den huvudsakliga skillnaden mellan metoderna är att CCS kan bidra till nettonollutsläpp medan BECCS och DACCS kan uppnå negativa utsläpp. Klimatfördelarna för användning av CO₂ (CCU, BECCU och DACCU) är beroende av källan till koldioxiden, den produkt som det ersätter, energin som används vid omvandlingsprocessen och hur länge koldioxiden kvarstår i produkten.

Vad som kan konstateras är att ingen av infångningsmetoderna utesluter den andra. Men priset för samtliga metoder måste komma ner för att någon ska bli relevant i större skala. Arbetet visar på att kostnaderna för infångning av ett ton koldioxid från punktin-

fångning ligger på ett intervall mellan 15–120 dollar beroende på koncentrationen av koldioxid från källorna, medan DAC ligger runt 134–342 dollar. CCS innebär stora kapitalinvesteringar och högre driftskostnader för företagen, enda möjligheten till lönsamhet för CCS i Europa just nu är där koldioxidspriset i ETS-systemet ligger högre en motsvarande priset för infångning. Men även i ett sådant scenario så finns det industrier som blir tilldelade gratis utsläppsrätter, priset för infångning måste därför komma ner signifikant för att dessa företag ska överväga CCS. BECCS har samma kostnadsutmaningar som CCS, dessutom finns ingen möjlighet att utnyttja ETS-systemet i anläggningar med BECCS. DAC är den mest kostsamma metoden för infångning på grund av den låga andelen CO₂ i luften jämfört med punktfångning. Stora utvecklingar i DAC-teknologin behöver därför ske för att det ska ses som ett seriöst alternativ. BECCS och DAC utvecklingen skulle främjas genom att inkludera negativa utsläpp i utsläppsrätts-handel eller att man på annat sätt ersätts för negativa utsläpp. På kort sikt anses det krävas statliga garantier som sedan kunde fasas ut när dessa tekniker har blivit mer etablerade och kostnadseffektiva. Statliga garantier är dock också beroende av allmänhetens medvetenhet och acceptans för utvecklingen av koldioxidinfångning som lösning till klimatmålen.

Trenden i samhället pekar på en snabb utveckling inom området för negativa utsläpp, vilket indikerar att koldioxidinfångningstekniker kommer att fortsätta att utvecklas. Implementeringen av de olika metoderna som kompletterande åtgärder för att uppnå nettollutsläpp varierar beroende på vilken teknik som används och de specifika förutsättningarna i olika länder. Dessa olikheter är främst relaterade till industrierna och de geologiska förhållandena. Till exempel har BECCS betydande potential i Finland och Sverige på grund av den omfattande användningen av biomassa. Island har visat sig ha potential för DAC tack vare sin reaktiva berggrund av basalt och tillgången till geotermisk värme. Länder med omfattande olje- och gasindustrier, som USA och Norge, har störst potential för CCS-implementering.

7 Källor

- Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal Economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>
- Beccs Stockholm. (u.å.) *About Beccs Stockholm*. <https://beccs.se/about-beccs-stockholm-2/>
- Beiron, J., Svanberg Frisinger, M.-S., Holm, J., Unger, T., & Wolf, J. (2022). *Teknik, systemintegration och kostnader för bio-CCS*. (Rapport 2022:837)
<https://energiforsk.se/media/30909/teknik-systemintegration-och-kostnader-energiforskrappport-2022-837.pdf>
- Carbfix. (u.å.). *How it works*. <https://www.carbfix.com/how-it-works>
- Climeworks. (u.å.). *Orca: the first large-scale plant*.
<https://climeworks.com/roadmap/orca>
- Consoli, C. (2019). *Bioenergy and carbon capture and storage*.
<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/bioenergy-and-carbon-capture-and-storage/>
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and Utilisation Technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*, 9, 82–102.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- DNV GL. (2020). *Northern Lights shows the way to seaborne CCS Solutions*.
<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Northern-Lights-shows-the-way-to-seaborne-CCS-solutions.html>
- Energimyndigheten. (2023). *Energiläget 2022 – en översikt*.
<https://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/>
- European Commission. (2021). *Annex to commission delegated regulation (EU)*.
https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-11/fifth_pci_list_19_november_2021.pdf
- European Commission. (2022). *Carbon capture, storage and utilisation*.
https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en

- European Commission. (2023). *A european green deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Commission. (u.å.a.). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- European Commission. (u.å.b.). *Carbon capture, use and storage*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage_en#legislation-and-policy-initiatives-in-the-eu
- Europeiska Kommissionen. (2022). *Rapport från kommissionen till Europaparlamentet och rådet*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0516&from=EN>.
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-Economic Assessment of CO₂ Direct Air Capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Fateen, S.-E. K., & Hafez, A. (2016). *CO₂ Transport and Storage Technologies*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/304251602_CO2_Transport_and_Storage_Technologies
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., & Xu, P. (2022). Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>
- Ghiat, I., & Al-Ansari, T. (2021). A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF Nexus. *Journal of CO₂ Utilization*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>
- Global CCS Institute. (u.å.). *CCS Image Library*. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-image-library/>
- Grafström, J. (2022). *Dags att städa upp*. Ratio. <https://ratio.se/publikationer/dags-att-stada-upp-potential-for-koldioxidinfangning/>
- Grafström, J., Hvalgren, N., & Korpi, M. (2018). *Förutsättningar för storskaligt Infångande av koldioxid*. Ratio Working Paper No. 309 <https://ratio.se/publikationer/working-paper-no-309-forutsattningar-storskaligt-infangande-av-koldioxid/>
- IEA. (2019a.). *Putting CO₂ to use*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
- IEA. (2019b.). *Can CO₂-EOR really provide carbon-negative oil?*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/commentaries/can-co2-eor-really-provide-carbon-negative-oil>

- IEA. (2021). *Is carbon capture too expensive?* IEA. <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- IEA. (2022a.). *Bioenergy with carbon capture and storage – analysis*. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>
- IEA. (2022b.). *Bioenergy*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/bioenergy>
- IEA. (2022c.). *Direct air capture*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- IEA. (2022d.). *Direct Air Capture 2022* . IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022/executive-summary>
- IEA. (2022e.) *CO2 Transport and storage – analysis*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/co2-transport-and-storage>
- IEA. (2022f.) *CO2 Capture and utilisation*. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/co2-capture-and-utilisation>
- IEA. (2022g.) *Carbon capture, utilisation and storage*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E. van, & Carbo, M. (2015). Pre-combustion CO2 Capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 167–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028>
- Jord-och skogsbruksministeriet. (u.å.). *Trädbränslen i Finlands energiproduktion*. <https://mmm.fi/sv/skogar/anvandning-av-tra/anvandning-av-virke-for-energiproduktion>
- Kelemen, P., Benson, S. M., Pilorgé, H., Psarras, P., & Wilcox, J. (2019). *An overview of the status and challenges of CO2 Storage in Minerals and Geological Formations*. *Frontiers in Climate*, 1. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00009/full>
- Madejski, P., Chimel, K., Subramanian, N., & Kuś, T. (2022). *Methods and techniques for CO2 Capture*. *Encyclopedia*. <https://encyclopedia.pub/entry/19427>
- Miljöministeriet. (2022) *Klimatårsberättelse 2022*. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164424>
- Miljöministeriet. (u.å.). *Klimatavtalet från Paris*. <https://ym.fi/sv/klimatavtalet-fran-paris>

- MIT. (u.å.). *Schwarze Pumpe Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project*. Carbon Capture and Sequestration Technologies. https://sequestration.mit.edu/tools/projects/vattenfall_oxyfuel.html
- Miyamoto, O., Maas, C., Tsujiuchi, T., Inui, M., Hirata, T., Tanaka, H., Yonekawa, T., & Kamijo, T. (2017). KM CDR Process Project Update and the new novel Solvent Development. *Energy Procedia*, 114, 5616–5623. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1700>
- Motiva. (2022). *Den totala Energiförbrukningen*. https://www.motiva.fi/sv/losningar/energianvandningen_i_finland/den_totala_energiforbrukningen
- Naturskyddsföreningen. (2021). *Hur Fungerar Handeln Med Utsläppsrätter?* <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/hur-fungerar-handeln-med-utslappsratter/>
- Nilsson, E., & Östlund, E. (2021). *Möjligheterna att implementera bio-CCS och ccs på högdalenverket*. [Masteruppsatts, Linköpings univeritet] DiVA. <https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1566079/FULLTEXT01.pdf>
- Nordic Council of Ministers. (2021). *Policies for the promotion of BECCS in the Nordic countries*. Nordic co-operation. <https://www.norden.org/en/publication/policies-promotion-beccs-nordic-countries>
- Northern Lights. (u.å.). *What we do*. Norlights. <https://norlights.com/what-we-do/>
- Olabi, A. G., Obaideen, K., Elsaid, K., Wilberforce, T., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into Sustainable Development Goals SDGs using novel indicators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111710. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111710>
- Regufe, M.J. (2021). *Carbon Capture Storage and/or Utilization*. Encyclopedia. <https://encyclopedia.pub/entry/9434>
- 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. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124527>
- Roussanaly, S., Anantharaman, R., Lindqvist, K., & Hagen, B. (2018). A new approach to the identification of high-potential materials for cost-efficient membrane-based post-combustion co2capture. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(6), 1225–1243. <https://doi.org/10.1039/c8se00039e>
- Rummukainen, M. (2005). *Växthuseffekten*. (Nr 119) SMHI https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.1795!/meteorologi_119_webb%5B1%5D.pdf

- Scripps Institution of Oceanography. (2023). *The Keeling curve*. The Keeling Curve. <https://keelingcurve.ucsd.edu/>
- Soltoff, B. (2021). *A step forward for CO2 Capture*. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2021/12/03/co2-capture-iceland-climeworks-orca/>
- Statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet. (2023). *Användning och upptag av koldioxid medför betydande möjligheter för Finland*. Valtioneuvosto. <https://valtioneuvosto.fi/sv/-/10616/utredning-anvandning-och-upptag-av-koldioxid-medfor-betydande-mojligheter-for-finland>
- The City of Oslo. (2022, March 23). *The city of Oslo ensures realisation of carbon capture and storage (CCS)*. Oslo kommune. <https://www.oslo.kommune.no/politics-and-administration/politics/press-releases/the-city-of-oslo-ensures-realisation-of-carbon-capture-and-storage-ccs#gref>
- Åkermarck, A. (2018). *Användning av koldioxid i kylanläggningar*. [Examensarbete, Yrkehögskolan Arcada]. Theseus. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/148310/Final%20examensarbete.pdf?sequence=1&isAllowed=y>