

Beställt av

Energimyndigheten

Utfört av

Viktor Stenberg & Elin Svensson, CIT Renergy

Maria Hernández Leal, IVL

Karin Pettersson & Filippa Andersson, RISE

Datum

2026-08-20

Version

Slutrapport

Sammanställning av nuläge för CCU i Sverige

Sammanfattning

Denna rapport ger en samlad och aktuell nulägesbild av CCU (Carbon Capture and Utilisation) i Sverige. Sammanställningen visar att CCU utgör ett brett och heterogent område med stora skillnader mellan tillämpningar och produktsegment vad gäller efterfrågan, mognad och systemberoenden. En central iakttagelse är att olika användningsområden av koldioxid fyller skilda funktioner i omställningen och därför inte kan bedömas som en enhetlig åtgärd eller lösning.

En annan viktig slutsats är att teknisk mognad i många fall inte utgör det huvudsakliga hindret för CCU, utan att utvecklingen i hög grad begränsas av systemförutsättningar såsom tillgång till fossilfri el och vätgas, samordning längs värdekedjan samt marknads- och policyförutsättningar.

Klimatnyttan varierar samtidigt kraftigt mellan olika tillämpningar och påverkas av flera faktorer, däribland energianvändning, eventuell substitution av fossila råvaror, och hur länge kolet binds i produkter. I vissa tillämpningar, exempelvis för bränslen, är klimatnyttan huvudsakligen kopplad till substitution av fossila alternativ, medan materialtillämpningar i vissa fall kan bidra till mer långvarig kolinbindning.

Skillnader mellan produktkategorier

Skillnaderna mellan produktkategorierna är tydliga. CCU-baserade bränslen och energibärare har generellt en mycket stor potentiell efterfrågan, och är centrala för sektorer där direkt elektrifiering är svår, såsom flyg och sjöfart. Samtidigt är dessa tillämpningar starkt beroende av fossilfri el, vätgas och styrmedel, vilket medför hög osäkerhet och låg marknadsmognad i dagsläget. För kemiska produkter och intermediärer är bilden mer varierad. Vissa segment har relativt hög teknisk och kommersiell mognad men utvecklingen är beroende av att det skapas betalningsvilja för hållbara produkter och därigenom konkurrenskraft gentemot fossilbaserade alternativ.

Byggmaterial och mineralbaserade tillämpningar har i stället ofta en hög lokal mognad och potential för långvarig kolinbindning. Samtidigt är volymerna begränsade och utvecklingen beroende av standarder, regelverk och marknadsacceptans. Direkt användning av koldioxid är den mest mogna kategorin, men dess potentiella efterfrågan på koldioxid är begränsad i förhållande till de totala koldioxidflödena.

En övergripande slutsats är att det finns en tydlig avvägning mellan tillämpningar med stor förväntad efterfrågan, men hög osäkerhet och starka system- och policyberoenden, och tillämpningar som är mer marknadsnära, men begränsade i

skala. Generellt är de mest mogna tillämpningarna ofta begränsade till specifika produktsegment och har därför mindre betydelse för de totala koldioxidflödena.

CCU i Sverige – nuläge

Sverige har i grunden goda förutsättningar för CCU, med relativt fossilfri elproduktion och betydande tillgång till koldioxid från industriella och biogena punktkällor. Trots detta befinner sig CCU i Sverige fortfarande i ett tidigt skede. Antalet projekt i drift är begränsat och i mindre skala och flera planerade satsningar har pausats eller omprövats till följd av höga kostnader, osäker efterfrågan och otydliga investeringsförutsättningar. Utvecklingen påverkas också av att flera delar av värdekedjan behöver utvecklas parallellt – från avskiljning till transport, omvandling och efterfrågemarknader. Detta skapar betydande osäkerheter och försvårar uppskalning.

De tillämpningar som idag är i drift återfinns i anslutning till bioetanol- och biogasproduktion och avser direkt användning av koldioxid inom livsmedelsindustrin. Storskaliga tillämpningar, särskilt inom produktion av bränslen och kemikalier, befinner sig i huvudsak i planerings- eller demonstrationsfas.

CCU inom och utanför industrin

Omvandling av CCU till produkter kan i de allra flesta fall ses som industriell produktion. I en del av den här rapporten görs ändå en uppdelning av tillämpningar inom respektive utanför industrin, för att belysa skillnader i förutsättningar om CCU implementeras inom eller utanför traditionell, befintlig industri.

Tillämpningar inom industrin kännetecknas oftare av stora och koncentrerade punktkällor, vilket ger goda tekniska förutsättningar för avskiljning och möjlighet till storskaliga lösningar. Inom många industrier finns också möjligheter att integrera av energi- och materialflöden mellan avskiljnings- och omvandlingsprocesserna för koldioxid och de befintliga industriella processerna. Samtidigt varierar förutsättningarna mellan sektorer, exempelvis mellan massa- och pappersindustri, raffinaderier och cementindustri, såväl som mellan enskilda bruk och anläggningar. Tillämpningar utanför industrin, framför allt inom energi- och avfallssektorn och biogasproduktion, präglas i högre grad av samordningsbehov, utveckling av infrastruktur och integration i energisystemet.

Systemperspektiv och alternativa åtgärder

CCU:s roll i omställningen är starkt kontextberoende och olika tillämpningar behöver bedömas i relation till alternativa åtgärder. I många fall finns mer energi- och resurseffektiva alternativ, såsom elektrifiering, materialåtervinning eller biobaserade processer. Detta innebär att CCU bör ses som en del av en bredare omställning av samhällets kolflöden, där inflödet av fossilt kol successivt fasas ut och ersätts av cirkulära och biogena alternativ.

Innehåll

1	Inledning	10
1.1	Nulägesanalys i ett läge av förändring och osäkerhet	11
1.2	CCU inom och utanför industrin	12
1.3	Avgränsningar och vägledande principer	13
2	Grundläggande kunskapsbas – vad är CCU?	15
2.1	Definition av CCU	15
2.2	Explicit och implicit CCU	16
2.3	Skillnaden mellan CCU och CCS	16
2.4	CCUs klimatnytta	17
2.4.1	Koldioxidens ursprung	17
2.4.2	Substitution	17
2.4.3	Produktens livslängd	18
2.4.4	Energibehov	19
2.4.5	Läckage och sekundära utsläpp	19
2.4.6	Rekyleffekter	20
3	Systemperspektiv och CCUs roll	21
3.1	CCU och CCS som en del av den bredare (kol)omställningen	21
3.2	Andra alternativ till CCU	23
3.3	Styrmedel på EU- och nationell nivå kopplade till CCU	23
3.3.1	EU-nivå	23
3.3.2	Nationell nivå	26
3.4	Utmaningar kring styrmedel för CCU	27
3.4.1	Undvika risker för suboptimala lösningar	27
3.4.2	Hinder för investeringar i CCU i nuvarande regelverk	27
3.5	Aspekter kopplat till förslaget om Industriklivets utvidgning	28
4	CCU i Sverige idag	30
4.1	Starka förutsättningar men begränsad implementering	30
4.2	En växande men osäker projektportfölj	31
4.3	Flera projekt tar nästa steg	31
5	CCU inom och utanför industrin	34
5.1	CCU inom industrin	35
5.1.1	Järn- och stålindustri	35

5.1.2	Övrig metallindustri och gruvor	36
5.1.3	Raffinaderier	36
5.1.4	Kemiindustri	37
5.1.5	Cement- och mineralindustri	37
5.1.6	Massa- och pappersindustri	38
5.1.7	Sågverksindustrin	38
5.1.8	Övriga industriella biogena källor	39
5.2	CCU utanför industrin	39
5.2.1	Energi- och avfallssektorn	39
5.2.2	Biogasproduktion	40
5.2.3	Fristående produktion av bränslen och energibärare	41
5.2.4	Byggt miljö och lokala materialtillämpningar	41
5.2.5	System- och infrastrukturlösningar	42
5.2.6	Gränsfall och kategorisering	42
6	Produktkategorier: Marknad och samhällsrelevans	43
6.1	Kemiska produkter och intermediärer	45
6.2	Bränslen och energibärare	47
6.3	Byggmaterial och mineralbaserade produkter	48
6.4	Direkt användning av koldioxid	49
6.5	System- och infrastrukturlösningar	50
6.6	Jämförelse av produktkategorier	52
6.7	Generella hinder och utmaningar	55
7	Värdekedjan för CCU och dess aktörer	57
7.1	Översiktliga huvudsteg och dess aktörer	57
7.1.1	Tvärgående aktörer och möjliggörare i CCU-värdekedjan	61
7.1.2	Skillnader i värdekedjornas organisering och systemintegration	62
7.2	Kritiska beroenden, flaskhalsar och systembehov	62
7.2.1	Kemiska produkter och intermediärer	63
7.2.2	Bränsle och energibärare	64
7.2.3	Byggmaterial och mineralbaserade produkter	64
7.2.4	Direkt användning av koldioxid	65
7.3	Import/export	65
7.3.1	Kemiska produkter och intermediärer	65
7.3.2	Bränsle och energibärare	65

7.3.3	Byggmaterial och mineralbaserade produkter	66
7.3.4	Direkt användning av koldioxid	67
7.4	Gemensamma aktörer i värdekedjorna för CCU och CCS	67
8	Teknikens mognad och FoU-perspektiv	68
8.1	Kemiska produkter och intermediärer	69
8.2	Bränslen och energibärare	70
8.3	Byggmaterial och mineralbaserade produkter	70
8.4	Direkt användning av koldioxid	71
8.5	System- och infrastrukturlösningar	71
8.6	Jämförelse av produktkategorier	72
9	CCS utanför industrin – kompletterande nulägesbild	74
9.1	Energi- och avfallssektorn	75
9.2	Biogasproduktion	75
9.3	Mobila tillämpningar	76
9.3.1	Sjöfart	76
9.3.2	Vägtransport	77
10	Övergripande observationer och kvarstående frågeställningar	78
10.1	Reflektion kring rapportens metod och avgränsningar	78
10.2	Var finns de största osäkerheterna?	79
10.3	Vilka frågor kvarstår för fortsatt analys?	80
	Referenser	82

Begreppslista

Atmosfärisk koldioxid	Koldioxid som avskiljs direkt från luften.
Avfallshierarkin/ avfallstrappan	Prioriteringsordning för hur avfall ska hanteras
Avskiljning av koldioxid	Separation av koldioxid från rökgaser eller procesströmmar
(Bio-) CCS (Carbon Capture and Storage)	Avskiljning och permanent lagring av (biogen) koldioxid.
(Bio-) CCU (Carbon Capture and Utilisation)	Avskiljning och användning av (biogen) koldioxid i produkter eller processer.
Bioelektrobränslen/ hybridbränslen	Bränslen som produceras från biomassa och el/vätgas.
Biogen koldioxid	Koldioxid från biologiska källor.
Bioraffinaderier	Industriellt system där biomassa nyttjas för att producera flera produkter
Cirkulära kolflöden	Återanvändning av kol i stället för nytt fossilt kol.
DAC (Direct Air Capture)	Teknik för att fånga koldioxid direkt från luften.
DACCS	DAC kombinerat med permanent lagring av koldioxid.
Elektrobränslen	Syntetiska bränslen som producerats av (förnybar) el, via vätgas (från elektrolys) och koldioxid, t.ex. e-metan, e-metanol.
Elektrolys	En process där elektricitet används för att producera vätgas från vatten.
e-SAF (Sustainable Aviation Fuel)	Syntetiskt, hållbart flygbränsle, elektro-flygbränsle.
EU ETS (Emissions Trading Scheme)	EU:s utsläppshandelssystem.
Explicit CCU	Processer där koldioxid avskiljs från en utsläppskälla och sedan används eller omvandlas vidare.
Fossil koldioxid	Koldioxid från fossila bränslen.
Fossilfri el	El producerad utan fossila bränslen.
Implicit CCU	Processer där kolutnyttjandet ökas genom att undvika att koldioxid bildas, dvs CCU utan behov av koldioxidavskiljning.

Industriklivet	Svenskt stödprogram som finansierar projekt för industrins klimatomställning.
Karbonatisering	Kemisk reaktion där koldioxid reagerar med kalcium- eller magnesiumrika material och bildar stabila karbonater.
Kemiska intermediärer	Mellanprodukter i kemisk produktion som används som byggstenar för andra produkter, t.ex. metanol eller metan.
Klimatklivet	Svenskt investeringsstöd för klimatåtgärder.
Klimatnytta	Den minskning av växthusgasutsläpp en åtgärd ger, oftast bedömd över livscykeln.
Kolinbindning	Lagring av kol i material eller geologiska formationer under längre eller kortare tidsperiod.
Livscykelanalys (LCA)	Analys av en produkts miljöpåverkan under hela livscykeln.
Läckage av koldioxid	Förluster av koldioxid längs värdekedjan.
Marknadsmognad	Hur etablerad marknaden för en produkt är.
Mineralisering	Process där koldioxid omvandlas till stabila karbonatmineral.
Negativa utsläpp	När mer koldioxid tas bort från atmosfären än vad som släpps ut.
Punktkälla	En koncentrerad källa till koldioxidutsläpp.
RED (Renewable Energy Directive)	EU-direktiv för förnybar energi.
RFNBO (Renewable Fuel of Non-Biological Origin)	Förnybara bränslen av icke-biologiskt ursprung.
Skalbarhet	Möjligheten att bygga ut en teknik i stor skala
Substitution	Ersättning av fossila produkter.
Systemperspektiv	Analys av hela värdekedjan och energisystemet.
TRL (Technology Readiness Level)	Skala för en tekniks mognadsgrad.
Värdekedja	Alla steg från råvara till slutlig användning.
Verkningsgrad	Förhållandet mellan den nyttiga energin eller produkten som skapas och den totala energi (och råvara) som krävs för hela processen. Den utvärderar hur effektivt koldioxid omvandlas till en resurs.

1 Inledning

Den här rapporten utgör ett kunskapsunderlag kring nuläget för CCU i Sverige med fokus på faktisk implementering, marknadsmognad och värdekedjor.

Analysen genomförs i ett snabbt föränderligt omvärldsläge, där flera projekt har försenats, omprövats eller pausats till följd av förändrade marknadsförutsättningar, ökade kostnader och osäkerheter kring styrmedel och investeringsvillkor. Detta förstärks av beroenden i värdekedjor där flera delar behöver utvecklas parallellt.

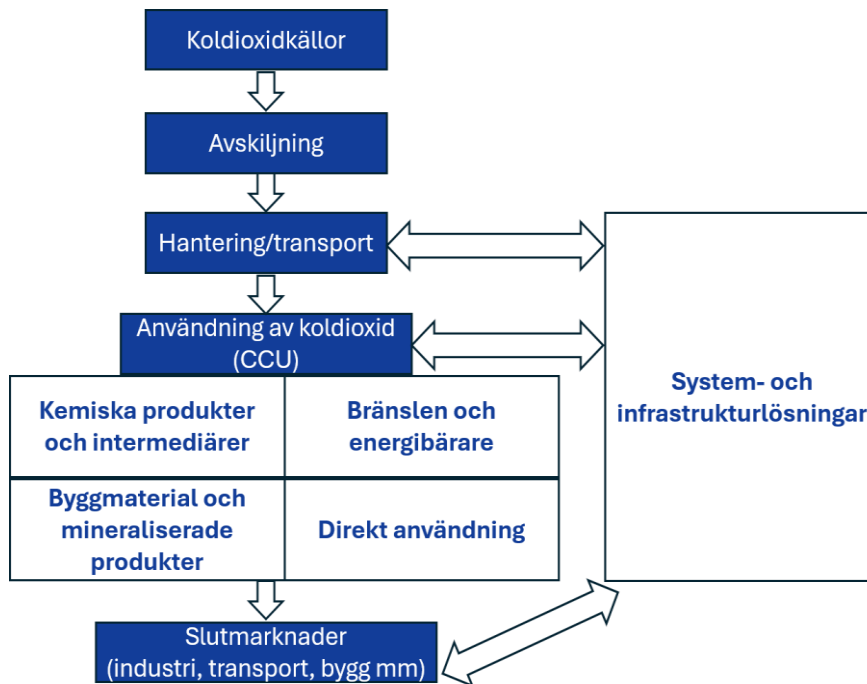
I rapporten görs en del gränsdragningar mellan olika typer av tillämpningar, t.ex. mellan CCU inom och utanför industrin, och mellan olika produktkategorier och sektorer. Dessa uppdelningar används för att strukturera innehållet, och syftar inte till att fastställa definitioner av olika typer av CCU-projekt.

För att möjliggöra jämförelser mellan olika CCU-tillämpningar används ett antal analyskriterier: efterfrågan, marknadsmognad, skalbarhet, systemberoenden och klimatlogik.

Denna rapport utgör ett kunskapsunderlag om nuläget för koldioxidavskiljning och användning, Carbon Capture and Utilisation (CCU), i Sverige. Uppdraget genomförs som en del av Energimyndighetens regeringsuppdrag att analysera lämpligheten i att vidga Industrilivet till att även omfatta koldioxidavskiljning och lagring, Carbon Capture and Storage (CCS), och CCU utanför industrisektorn.

Rapporten kompletterar tidigare svenska kartläggningar och studier om CCU och CCS genom ett uppdaterat nuläge och ett tydligt fokus på faktisk implementering och marknadsnärhet. Till skillnad från flera tidigare studier, som ofta haft ett framåtblickande eller potentialbaserat perspektiv, beskriver rapporten hur långt olika tillämpningar har kommit i praktiken samt vilka strukturella hinder och möjliggörare som kan identifieras i dag.

För att tydliggöra hur CCU-tillämpningar hänger samman illustrerar Figur 1 en förenklad systembild av CCU-landskapet, från koldioxidkällor via avskiljning och hantering till produktkategorier och slutmarknader. Figuren fungerar som en referensram för rapportens fortsatta struktur, där användningsområdena beskrivs i kapitel 6 och värdekedjorna analyseras i kapitel 7.



Figur 1: Översiktlig systembild av CCU där de blå rutorna visar stegen från koldioxidkällor via avskiljning och hantering till användning och slutmarknader, och de vita rutorna visar olika produktkategorier för användningen samt de system- och infrastrukturlösningar som knyter ihop kedjan.

Rapportens huvudsakliga syfte är att ge en samlad, strukturerad och aktuell nulägesbild av CCU-tillämpningar i Sverige. Fokus ligger på marknadsläge, värdekedjor, aktörer och teknikens mognad. Underlaget är avsett att fungera som analytiskt stöd i Energimyndighetens fortsatta arbete och kan även komma att användas som referens eller bilaga i myndighetens egen rapportering inom ramen för regeringsuppdraget.

1.1 Nulägesanalys i ett läge av förändring och osäkerhet

Nulägesanalysen ska ses i ljuset av ett snabbt föränderligt omvärldsläge. Under de senaste åren har flera planerade CCU- och närliggande satsningar i både Sverige och övriga Europa omprövats, försenats eller givits ny inriktning till följd av förändrade marknadsförutsättningar, ökade kostnader och en ökad osäkerhet kring styrmedel och investeringsvilkor. I flera fall har efterfrågan dessutom haft svårt att motivera de kostnadsnivåer som krävs för produktion. Geopolitisk oro, konjunkturvariationer och förändrade globala spelregler förstärker osäkerheten, särskilt för kapitalintensiva industri- och energiprojekt.

Utvecklingen försvåras också av att utbyggnaden av produktion, infrastruktur och användning inte sker i samma takt¹, vilket skapar osäkerhet i genomförandet av projekt och påverkar hur värdekedjor organiseras och samverkan mellan aktörer

utvecklas². Europeiska analyser visar att investeringar i CCU och CCS ofta fördröjs av svårigheter att få finansiering, till följd av osäker lönsamhet, policyosäkerhet och otydliga/motstridiga regelverk och incitament³ samt av osäkerhet kring hur investeringar ska klassificeras och vilka villkor som gäller för att kvalificera för stöd eller marknadstillträde¹. Eftersom avskiljning, transport, användning och lagring är ömsesidigt beroende kan förseningar i en del av värdekedjan påverka hela systemets utveckling³. Liknande utmaningar återfinns även inom vätgas och elektrobränslen, där teknikerna bedöms vara strategiskt viktiga men samtidigt beroende av långsiktiga policy- och marknadsförutsättningar.² Det bör också påpekas att utvecklingen i Sverige sker i en internationell kontext där allt fler länder aktivt positionerar sig inom vätgasområdet. Detta påverkar konkurrensförutsättningarna för europeiska och svenska aktörer.

Därutöver har geopolitiska förändringar och ett ökat fokus på försörjningstrygghet och strategiska beroenden synliggjort sårbarheter i fossilbaserade värdekedjor. Detta har i sin tur aktualiserat frågor om inhemsk produktion, resiliens och självförsörjning. Sammantaget förstärker dessa utvecklingar behovet av ett empiriskt förankrat kunskapsunderlag som tydliggör vilka tillämpningar som i dag är marknads- och tekniknära, respektive vilka som fortsatt präglas av osäkerhet eller beroenden av framtida policyutveckling.

1.2 CCU inom och utanför industrin

I kapitel 5 ges särskilt fokus på CCU-tillämpningar inom olika sektorer – inom och utanför industrin. Detta motiveras av regeringsuppdragets inriktning mot att analysera en möjlig breddning av Industriklivet. Analysen bredare omfattning speglar också att avskiljning och användning av koldioxid i ökande grad aktualiseras i sektorer där Industriklivet traditionellt haft en mer begränsad tillämpning, såsom energi- och avfallssektorn eller i tillämpningar där koldioxid från exempelvis kraftvärme- eller avfallsanläggningar används för produktion av elektrobränslen, ofta i nära koppling till dessa anläggningar. CCU utanför traditionell, befintlig industri aktualiserar därmed nya typer av aktörer, delvis med annan investeringslogik, och dessutom andra förutsättningar för integration med energisystemet exempelvis via fjärrvärmenäten. Samtidigt blir gränsdragningen mot industriella tillämpningar mer komplex i och med att CCU i många fall i sig innebär en industriell omvandling av koldioxid till produkter.

Hur uppdelningen mellan inom och utanför industrin ska göras är dock inte självklart, och i rapporten görs detta framför allt som ett sätt att strukturera innehållet.

1.3 Avgränsningar och vägledande principer

Rapporten baseras på befintlig kunskap och erfarenheter från litteratur, öppen och offentligt tillgänglig information samt dialoger med experter inom CCU-området. Inga egna kvantitativa beräkningar, scenariomodellering eller systemanalyser har gjorts inom uppdraget.

I Tabell 1 sammanfattas de avgränsningar som styr urval, analysnivå och tolkningar i rapporten. Sammanställningen omfattar inte en portföljanalys av projekt inom Industriklivet, inte heller någon konsekvensanalys, behovsanalys av statsstöd eller förslag till förändringar i författningar eller utformning av styrmedel. Sådana bedömningar hanteras parallellt av Energimyndigheten som en del av det övergripande regeringsuppdraget.

Tabell 1: Centrala avgränsningar för nulägesammanställningen.

Dimension	Avgränsning i denna rapport
Geografi	Sverige (med EU-kontext där relevant)
CO₂-ursprung	Fossil, atmosfärisk och biogen koldioxid beaktas
Fokus	CCU-tillämpningar (CCS behandlas endast för gränsdragning/sammanhang)
Analysnivå	Översikt per produktkategori och värdekedja (inte analys på TRL-nivå för enskilda tekniker)
Metod	Beskrivande sammanställning baserad på befintlig kunskap (inga egna kvantitativa beräkningar eller scenarier)
Prioritering	Marknadsnära tillämpningar och tillämpningar med större potentiell efterfrågan

För att skapa en konsekvent struktur i bedömningar av produktkategorier, marknadsrelevans och teknikmognad används ett antal gemensamma analyskriterier. Tabell 2 sammanfattar kriterierna och hur de används genom rapporten.

Tabell 2: Analyskriterier som används för att jämföra CCU-tillämpningar mellan produktkategorier.

Kriterium	Vad kriteriet fångar	Hur det används i rapporten
Efterfrågan	Potentiell användning av koldioxid i olika tillämpningar	Prioritering mellan produktkategorier
Marknadsmognad	Teknisk och kommersiell mognad	Bedömning av nulägesrelevans (framför allt i avsnitt 6)
Skalbarhet	Möjlighet att expandera	Identifiera risk för mättnad eller begränsad möjlighet till expansion
Systemberoenden	Tillgång till el, vätgas, infrastruktur och logistik	Förklara flaskhalsar och värdekedjebehov
Klimatlogik	Inbindning av kol samt substitutionseffekter	Bedöma klimatnytta och identifiera gränfall mellan CCU och andra åtgärder

En viktig utgångspunkt är klimatnytta, där CCU-tillämpningar beskrivs utifrån deras potentiella bidrag till minskade nettoutsläpp, substitution av fossila insatsvaror eller produkter samt andra systemeffekter (se vidare avsnitt 2.4). Klimatnyttan kvantifieras dock inte, eftersom den i hög grad beror på systemkontext och framtida utveckling.

Analysen prioriterar verkliga och marknadsnära exempel framför teoretiskt uppskattade potentialer. Fokus ligger på tillämpningar med stora volymer avskild koldioxid och därmed störst relevans i ett svenskt sammanhang, medan nischade eller småskaliga lösningar ges mindre utrymme. Rapporten har ett tydligt Sverigefokus och internationella exempel används främst för att sätta svenska förhållanden i ett sammanhang eller belysa möjliga utvecklingsriktningar.

Rapporten gör inga antaganden om framtida stödnivåer, affärsmodeller eller policyutfall. I stället beskrivs hur dagens styrmedel, marknadsförutsättningar och energisystem påverkar olika CCU-tillämpningar. Osäkerheter, exempelvis kopplade till styrmedel, energipriser, efterfrågan och regelverk, redovisas explicit i stället för att hanteras genom förenklade antaganden.

De gränsdragningar som görs i rapporten syftar till att strukturera innehållet och tydliggöra skillnader i förutsättningar, och ska inte ses som allmänt etablerade eller förslag till definitioner. Detta gäller exempelvis uppdelningar mellan CCU-tillämpningar inom respektive utanför industrin, liksom gränsdragningar mellan CCU och CCS i vissa tillämpningar.

Analysen fokuserar på koldioxid från punktkällor. Tekniker för direktavskiljning av koldioxid från luft (Direct Air Capture, DAC) omfattas därmed inte.

2 Grundläggande kunskapsbas – vad är CCU?

Carbon Capture and Utilisation (CCU) innebär att koldioxid avskiljs och används som råvara i produkter eller processer. Tillämpningarna omfattar allt från bränslen och kemikalier till material och direkt användning av koldioxid.

CCU omfattar en bred grupp av tillämpningar med stora skillnader i funktion, teknisk utformning och klimatprestanda. Klimatnyttan avgörs av ett samspel mellan koldioxidens ursprung, vilken fossil användning som ersätts, energibehovet i processen och hur länge kolet binds i produkten. Ett systemperspektiv är avgörande för att bedöma CCU:s klimatnytta och när tekniken är motiverad jämfört med andra alternativ.

CCU skiljer sig från CCS (Carbon Capture and Storage) genom att kolet nyttiggörs i produkter eller processer i stället för att lagras permanent. Gränsen mellan CCU och CCS kan dock vara flytande, särskilt när koldioxid används i material där kolet binds långsiktigt.

2.1 Definition av CCU

Carbon Capture and Utilisation (CCU) avser tillämpningar där koldioxid först avskiljs och därefter används i en produkt eller process. Tillämpningarna omfattar ett brett spektrum av tekniker med varierande mognadsgrad, från etablerade användningar till lösningar under utveckling. Koldioxiden kan ha fossilt, biogent eller atmosfärisk ursprung. Kolatomens ursprung är viktig för bedömningen av klimatnytta, men är inte i sig avgörande för om en tillämpning betraktas som CCU.

Användning av koldioxiden kan till exempel ske genom att den omvandlas kemiskt till syntetiska bränslen, såsom e-metanol, e-metan eller e-SAF (syntetiskt, hållbart flygbränsle). Koldioxiden kan även användas som råvara för kemiska intermediärer, exempelvis metanol för vidare produktion av olika kemikalier. Utöver dessa användningsområden kan koldioxid bindas i material, exempelvis genom mineralisering eller karbonatisering, där den reagerar med mineraler eller alkaliska material och omvandlas till stabila karbonater som kan användas i exempelvis betong, ballast eller andra byggmaterial. Slutligen, kan koldioxid användas direkt utan omfattande kemisk omvandling, exempelvis som processgas i pH-reglering, kylmedium, inertgas, gas i livsmedelsproduktion och växthus eller i biologiska processer.

2.2 Explicit och implicit CCU

När man pratar om CCU avses oftast ren, *explicit* CCU, där koldioxid *avskiljs* och sedan *används* eller *omvandlas*, till exempel omvandlas till e-bränslen med hjälp av vätgas.

I flera processer finns det dock andra sätt att öka kolutnyttjandet utan att gå vägen via avskild koldioxid. Ett exempel är förgasningsbaserade processer för produktion av drivmedel från biomassa. I en sådan process kan man, genom att tillsätta vätgas, undvika att koldioxiden bildas, och därmed se till att mer av kolet i biomassan hamnar i drivmedelsprodukten (se vidare avsnitt 3.2). Detta kan sägas utgöra en form av *implicit* CCU.

Ur ett policyperspektiv görs ingen skillnad på explicit och implicit CCU. I Förnybartdirektivet (RED) inbegrips både explicit och implicit CCU inom ramen för begreppet förnybara bränslen av icke-biologiskt ursprung (RFNBO) (se avsnitt 3.3).

I den här rapporten avser de allra flesta exempel på existerande och möjliga CCU-tillämpningar explicit CCU, där koldioxid avskiljs från stora punktutsläpp inom eller utanför industrin eller tillämpningar baserade på de relativt rena koldioxidströmmar som uppstår vid etanol- och biogastillverkning. Dessa bygger alla på existerande processer, medan tillämpningar för implicit CCU i större utsträckning bygger på processer som inte finns i kommersiell skala idag.

2.3 Skillnaden mellan CCU och CCS

Den principiella skillnaden mellan CCU och CCS är att CCS syftar till permanent lagring av koldioxid, medan CCU innebär att koldioxiden nyttiggörs i en produkt eller process. CCS är därmed i första hand en åtgärd för att förhindra att koldioxid når atmosfären. CCU kan däremot ha flera olika funktioner: att ersätta fossilt kol i produkter, att skapa cirkulära kolflöden, att möjliggöra fossilfria bränslen eller kemikalier, eller att i vissa fall lagra kol i långlivade material.

Gränsen mellan CCU och CCS kan dock i praktiken vara flytande. Detta gäller särskilt tillämpningar där koldioxiden binds i material under lång tid i olika former av mineralisering och karbonatisering i byggprodukter. Det kan exempelvis handla om koldioxidhårdad betong, karbonatiserad återvunnen betongballast, prefabricerade betongelement, byggblock eller material baserade på alkaliska restströmmar såsom slagg, askor eller cementrelaterade restprodukter. I dessa tillämpningar reagerar koldioxiden med kalcium- eller magnesiumrika material och bildar stabila karbonater, vilket kan innebära att kolet hålls utanför atmosfären under produktens livslängd och i vissa fall betydligt längre.

Ett annat exempel på CCU som ligger nära CCS-konceptet är produktion av metanol, som kan omvandlas till metanolderivat såsom formaldehyd, ättiksyra och alkener⁴. Dessa kemikalier används i många olika industrier och kan ingå i slutprodukter med relativt lång livslängd, exempelvis isoleringsmaterial, färg, lösningsmedel, textil fiber, lim eller plast⁵. I sådana fall återförs kolatomen inte nödvändigtvis direkt till atmosfären, utan kan bindas i produkten under en längre period. Detta illustrerar att vissa tillämpningar ligger i gränslandet mellan användning och lagring (se vidare avsnitt 2.4.2).

2.4 CCUs klimatnytta

Klimatnyttan av CCU beror inte enbart på att koldioxid fångas in, utan på flera samverkande faktorer. Detta inkluderar koldioxidens ursprung, hur länge kolet binds in i produkten, vilken fossil råvara eller vilket fossilbaserat alternativ som ersätts (vad substitueras), den energi som krävs för processen (energibehov), förluster av koldioxid längs värdekedjan (läckage), utsläpp som uppstår i andra steg av livscykel (sekundära utsläpp) och i vilken utsträckning användningen skapar nya eller ökande utsläpp (rekyleffekter). Utöver dessa faktorer kan även samspel med andra delar av energisystemet ha betydelse, exempelvis i de fall där produktion av CCU-produkter möjliggör tillvaratagande av restströmmar som värme eller andra biprodukter².

2.4.1 Koldioxidens ursprung

CCU kan bidra till cirkulära kolflöden oavsett om koldioxiden har fossilt, biogent eller atmosfäriskt ursprung. Ur ett systemperspektiv avgörs klimatnyttan främst av om användningen minskar behovet av nytt fossilt kol, snarare än av kolatomens ursprung⁶.

Om fossil koldioxid används i CCU kan klimatnytta uppstå om den ersätter annat fossilt kol och därmed minskar behovet av ny fossil råvara. Exempelvis kan koldioxid från en industriell process användas som insatsvara i kemikalieproduktion. I ett sådant fall uppstår klimatnytta endast om användningen innebär att fossil råvara faktiskt ersätts. Om användningen i stället bidrar till att upprätthålla en fossil utsläppskälla genom att ge koldioxiden ett ekonomiskt värde kan klimatnyttan minska.

Biogen eller atmosfärisk koldioxid kan användas för att producera hållbara bränslen, kemikalier och material. Om kolet dessutom lagras långsiktigt, exempelvis genom bio-CCS eller DACCS, kan negativa utsläpp uppnås.

2.4.2 Substitution

Substitution är en viktig del av klimatnyttan med CCU, eftersom nyttan inte uppstår enbart genom att koldioxid används, utan genom vad den ersätter. Om en

CCU-produkt ersätter fossil råvara, fossila bränslen eller fossilbaserade material kan den bidra till minskade utsläpp. Bio-CCU kan till exempel användas för att producera hållbara kolbaserade produkter, såsom drivmedel, kemikalier och material, som ersätter fossila alternativ. Ett exempel är metanol som produceras från avskild koldioxid och fossilfri vätgas och därefter används som råvara i kemiindustrin i stället för fossil metanol. På motsvarande sätt kan avskild koldioxid användas för att producera elektrobränslen till flyg och sjöfart, där direkt elektrifiering är svårare.

Samtidigt behöver CCU ses i ett bredare systemperspektiv. I vissa användningar kan mer energi- och resurseffektiva lösningar, exempelvis direkt elektrifiering, materialåtervinning eller minskad användning, ge större klimatnytta än att först fånga in och omvandla koldioxid. Det är därför viktigt att jämföra CCU med andra alternativ som finns för samma användning.

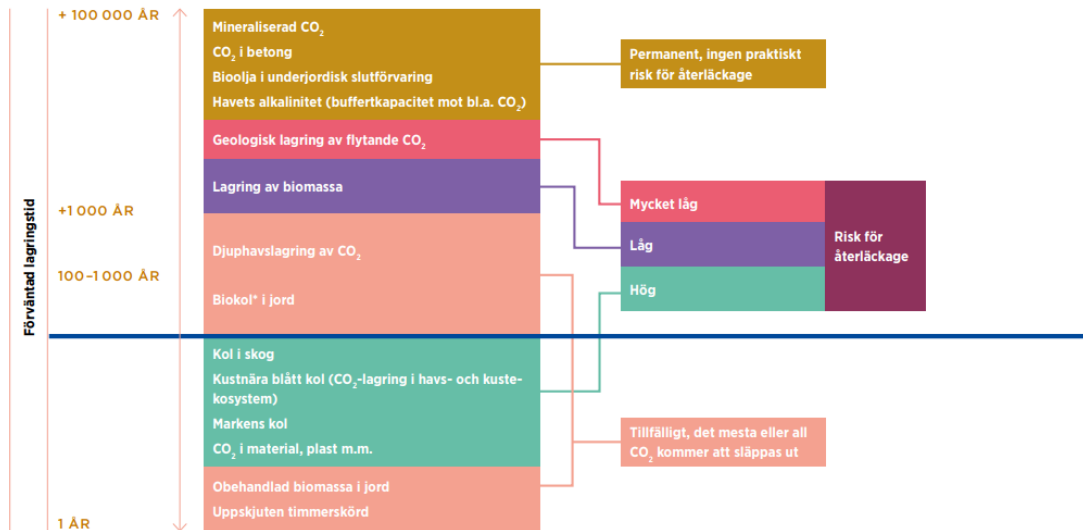
2.4.3 Produktens livslängd

Klimatnyttan av CCU påverkas i hög grad av permanens, det vill säga hur länge kolet hålls borta från atmosfären innan det eventuellt släpps ut igen. I EU:s certifieringsramverk⁷ för kolsänkor anges exempelvis att koldioxid behöver lagras i minst 35 år för att kunna klassas som inlagrad i produkt. Figur 2 visar den förväntade lagringstiden för kol i olika produkter⁸.

Om koldioxid används för att producera bränslen, exempelvis e-metanol, e-metan eller e-SAF, frigörs kolet normalt vid förbränning inom veckor eller månader. I kemiska produkter varierar lagringstiden från kortlivade produkter, såsom lösningsmedel och färger, till plaster och isoleringsmaterial där kolet kan vara bundet i årtionden. Klimatnyttan påverkas därför både av produktens livslängd och av vad den ersätter (se avsnitt 2.4.2).

I byggmaterial kan koldioxid bindas kemiskt genom mineralisering eller karbonatisering i exempelvis betong, ballast och andra mineralbaserade produkter. Eftersom dessa material ofta har livslängder på flera decennier, ibland över hundra år, kan klimatfunktionen i vissa fall närma sig CCS, särskilt om kolet förblir bundet även vid återbruk eller materialåtervinning. Ett närliggande exempel är biokol, där kol kan lagras långsiktigt i mark.

KOLINLAGRINGSMETODER



Figur 2: Förväntad lagringstid av olika kolinlagringsmetoder presenterad av Fossilfritt Sverige (2024)⁸ utifrån Höglund (2023)⁹.

2.4.4 Energiförbrukning

Energiförbrukning har stor betydelse för nettoutsläppet av CCU. Både CCU och CCS kräver energi för avskiljning, rening, komprimering, transport och eventuell lagring, men energiförbrukningen blir särskilt stor när koldioxid ska omvandlas till nya produkter, till exempel elektrobränslen eller kemikalier⁶. Att avskilja och lagra 10 miljoner ton koldioxid uppskattas kräva cirka 4–7 TWh el, medan omvandling av samma mängd koldioxid till elektrobränsle kan kräva upp emot 100 TWh el (främst för väteproduktion) för att producera cirka 50 TWh elektrobränsle⁸.

Om elen har låg klimatpåverkan och används i tillämpningar där alternativen är begränsade, exempelvis vissa bränslen för flyg eller sjöfart, kan CCU bidra till minskade utsläpp. Om samma el däremot hade kunnat ge större utsläppsminskning genom mer direkt användning, exempelvis elektrifiering, energieffektivisering eller andra åtgärder, behöver detta vägas in. Klimatnyttan av CCU behöver därför bedömas i relation till både elens klimatpåverkan, tillgången på fossilfri el och den alternativa användningen av elen.

2.4.5 Läckage och sekundära utsläpp

Läckage och sekundära utsläpp kan påverka klimatnyttan av CCU. Läckage avser att koldioxid går förlorad längs värdekedjan, exempelvis vid avskiljning, rening, komprimering, mellanlagring eller transport. Även små förluster kan minska den samlade nyttan, särskilt om värdekedjan omfattar flera steg eller långa transporter.

Utöver sådana oavsiktliga utsläpp kan vissa CCU-tillämpningar ge upphov till utsläpp senare i produktens livscykel. Detta gäller särskilt produkter där koldioxiden inte binds långsiktigt. För bränslen sker utsläppen vid förbränning, medan kol i lösningsmedel, färger, rengöringsmedel eller vissa industriella kemikalier kan frigöras gradvis, delvis eller diffust under användning och slutbehandling¹⁰. Vid direkt användning av koldioxid, exempelvis i växthus, livsmedel eller dryck, återförs koldioxiden ofta relativt snabbt till atmosfären.

Därför behöver både förluster längs värdekedjan och utsläpp under användning och slutbehandling ingå när klimatnyttan av olika CCU-lösningar beskrivs. Skillnaden mellan en tillämpning där koldioxiden snabbt släpps ut igen och en där kolet binds under längre tid kan vara stor, även om båda utgår från avskild koldioxid.

2.4.6 Rekyleffekter

En möjlig konsekvens av CCU är att avskild koldioxid får ett ekonomiskt värde, vilket kan påverka incitamenten hos den verksamhet som genererar utsläppen. Om en aktör kan sälja avskild koldioxid till exempelvis direkt användning, elektrobränslen eller kemikalieproduktion kan koldioxiden börja betraktas som en intäktskälla snarare än en restström som bör minska över tid¹¹. Detta kan i vissa fall försvaga drivkraften att minska uppkomsten av koldioxid i tidigare led, särskilt om försäljningen av koldioxid bidrar till anläggningens lönsamhet.

Risken är störst när CCU bygger på kontinuerliga flöden av fossil koldioxid och när investeringar, infrastruktur eller långsiktiga avtal utformas kring dessa flöden. En producent av elektrobränslen eller kemikalier kan till exempel behöva stabil tillgång till koldioxid under lång tid för att motivera en investering. Om denna tillgång kommer från en fossil utsläppskälla kan det skapa ett beroende mellan användaren av koldioxid och den utsläppsgivande verksamheten. På så sätt kan CCU bidra till en form av inlåsning, där fortsatt drift av utsläppskällan blir en del av värdekedjans affärslogik¹². Klimatnyttan skiljer sig samtidigt tydligt mellan tillämpningar, där kortlivade användningar främst ger substitutionsnytta medan materialtillämpningar som innebär en ny användning av kol i vissa långlivade material i vissa fall kan ge mer varaktig kolinbindning.

3 Systemperspektiv och CCUs roll

CCU och CCS behöver ses som en del av en bredare omställning av samhällets kolflöden, där fossilt kol successivt ersätts av cirkulärt och biogent kol. Med Sveriges stora tillgång på biomassa och omfattande industrisektor finns goda förutsättningar att bli en betydande nettoexportör av både hållbara kolbaserade produkter och negativa utsläpp.

Omställningen måste ses i ett globalt perspektiv där kolresursen används så effektivt som möjligt. Eftersom CCU generellt är ett energi- och kostnadskrävande sätt att tillvarata kol bör det främst användas där mer energi- och resurseffektiva alternativ saknas. Förbränning kommer samtidigt att ha en fortsatt roll i vissa tillämpningar. Därtill finns processrelaterade utsläpp inom industri och andra verksamheter som sannolikt kvarstår även efter omfattande effektiviseringar och därför utgör långsiktigt relevanta tillämpningsområden för CCU och CCS.

Styrmedel för CCS och CCU innebär en balansgång mellan att möjliggöra teknikerna där alternativ saknas och att undvika att mer effektiva lösningar trängs undan. Detta är också en viktig aspekt vid en utvidgning av Industriklivet. Nuvarande europeiska regelverk premierar inte alltid de mest energi- och resurseffektiva lösningarna, vare sig mellan olika värdekedjor eller inom CCU. Exempelvis gynnas inte CCU-processer med lägre energianvändning eller möjligheter att nyttiggöra biprodukter. Regelverken innehåller dessutom flera investeringshinder som kan försvåra långsiktiga satsningar på CCU, exempelvis kopplat till avfallsbaserade kraftvärmeverk.

3.1 CCU och CCS som en del av den bredare (kol)omställningen

Omställningen av sektorer som flyg, sjöfart och kemikalie- och materialproduktion kräver långsiktigt hållbart kol. Jungfruligt fossilt kol i form av olja, naturgas och kol behöver successivt ersättas med cirkulärt, återvunnet kol från avfalls- och industriella procesströmmar, hållbart biobaserat kol direkt från biomassa, avskild biogen koldioxid samt avskild koldioxid från luften. Parallellt behöver en ökande mängd kol varje år fångas in från atmosfären genom både naturliga och tekniska åtgärder för att därigenom skapa negativa utsläpp för att nå mål om klimatneutralitet och sedan nettonegativa utsläpp på en global nivå. Det finns

därmed ett långsiktigt behov av hållbara kolatomer både för hållbara kolbaserade produkter i form av drivmedel, kemikalier och material och för negativa utsläpp^{13,8}. CCU och CCS utgör således en del av den bredare kolomställningen.

I Sverige hamnar i dag mindre än hälften av det biogena kolet från skogen i produkter¹⁴, medan mer än hälften förbränns för energi, främst inom massa- och pappersindustrin och fjärrvärmesektorn. Samtidigt uppgår de biogena punktutsläppen från större anläggningar (>100 kton) i Sverige till omkring 32 miljoner ton koldioxid, främst från skogsindustrin men även från avfallsförbränning. Detta visar på en betydande potential att öka användningen av biogent kol för att höja både koleffektiviteten och förädlingsvärdet utifrån svensk skog. För att möjliggöra en framtida hållbar kolförsörjning och en utfasning av det fossila kolet behöver en betydligt större andel av det biogena kolet hamna i produkter (inkl. negativa utsläpp). Med god tillgång till skog och en stor processindustri har Sverige goda förutsättningar att bli en nettoexportör av hållbara kolbaserade produkter såväl som negativa utsläpp. Omställningen måste därför ses i en global kontext där kolet används så effektivt som möjligt. Här spelar CCU och CCS en viktig roll.

CCU och CCS bör i detta sammanhang ses som kompletterande snarare än konkurrerande lösningar. Satsningar på CCU kan bidra till att bygga upp kapacitet för koldioxidavskiljning och hantering, samtidigt som utvecklingen begränsas av tillgången till el, infrastruktur och styrmedel, samt av att biogent kol är en begränsad resurs på längre sikt.

Hur kolet används har också stor betydelse. Att omvandla koldioxid till nya produkter efter förbränning är betydligt mer elkrävande än att utnyttja kolet tidigare i värdekedjan, exempelvis i elektrifierade bioraffinaderier. Ett effektivt kolutnyttjande innebär därför att kolet i många fall behöver användas innan förbränning¹⁵, även om förbränning fortsatt kan vara motiverad för exempelvis svåråtervinningsbart avfall, ligninutarmad svartlut, topplastpannor i fjärrvärmesystem och vissa industriella värmeprocesser. Dock är det osäkert i vilken utsträckning det kommer att behövas då det i flera fall finns alternativ även till förbränning för dessa applikationer, såsom förgasning av avfall och svartlut och andra flexibilitetslösningar.

Koldioxidutsläpp uppstår inte enbart vid förbränning utan även i industriella processer, exempelvis inom cementindustrin, vätgasproduktion genom metanreforming samt vid produktion av etanol och biogas. Eftersom många av dessa processutsläpp kan kvarstå även efter omställningen utgör de långsiktigt relevanta källor för både CCU och CCS.

3.2 Andra alternativ till CCU

För att producera permanenta tekniska negativa utsläpp är bio-CCS (tillsammans med DACCS) det främst alternativet. För produktion av hållbara kolbaserade produkter krävs däremot ett bredare perspektiv än CCU, eftersom andra lösningar på sikt ofta är mer energi- och resurseffektiva för de flesta applikationer⁸.

Bioelektrobränslen utgör ett exempel på hur denna princip kan tillämpas i praktiken. I flera bioraffinaderiprocesser, exempelvis förgasning, avskiljs relativt rena koldioxidströmmar som kan användas för bio-CCU eller bio-CCS, utan en energikrävande avskiljningsprocess. Genom att tillföra el eller vätgas kan en större andel av det biogena kolet omvandlas till produkter, vilket ökar verkningsgraden och minskar kolförlusterna¹⁶.

Att producera drivmedel och värme från biomassa och el via förgasning (bioelektrobränslen) är generellt mer energieffektivt än att producera drivmedel och värme från biomassa och el i ett kraftvärmeverk med efterföljande CCU (elektrobränslen). En sådan jämförelse är relevant vid nyinvesteringar i till exempel fjärrvärmekapacitet i kombination med förnybara drivmedel. För befintliga kraftvärmeverk är situationen en annan och startpunkten för CCU/elektrobränsleprocessen är rökgaserna från skorstenen och inte biomassan.^{8,17}

Ett liknande resonemang gäller för avfall. Enligt Naturvårdsverkets avfallshierarki bör återanvändning, materialåtervinning och andra mer resurs- och energieffektiva lösningar prioriteras framför CCU^{18,6}. Kemisk återvinning, pyrolys och förgasning utgör också alternativ som i många fall bör övervägas före. Energimyndigheten (ER 2023:26) lyfter fram dessa aspekter inom ramen för uppdraget *Styrmedel för CCS och CCU*⁶. Där lyfts att CCU är mer energi- och resurskrävande än lösningar som bevarar produkter, material eller molekyler högre upp i värdekedjan, och att CCU främst bör användas där sådana alternativ inte är möjliga.

3.3 Styrmedel på EU- och nationell nivå kopplade till CCU

Bränslesektorn omfattas av fler mål, styrmedel och regleringar som stimulerar övergången till användning av hållbart kol inklusive CCU medan motsvarande incitament till stor del saknas för material. Effekter av dessa styrmedel framkommer i marknadsanalysen i kapitel 6.

3.3.1 EU-nivå

Det finns ett flertal styrmedel, regelverk, processer och initiativ på EU-nivå som på olika sätt påverkar förutsättningarna för utveckling och utbyggnad av CCU. Exempel på sådana regelverk är förnybartdirektivet (RED), FuelEU Maritime-förordningen, ReFuelEU Aviation, handlingsplanen för cirkulär ekonomi (CEAP)

samt direktivet om förpackningar och förpackningsavfall. Därtill tillkommer den europeiska klimatlagen och EU:s klimatmål för 2040, EU:s system för handel med utsläppsrätter (EU ETS), strategin för industriell koldioxidhantering, Net-Zero Industry Act, EU:s innovationsfond samt Industrial Decarbonisation Bank. Nedan beskrivs de centrala styrmedel och initiativ som har särskild betydelse för incitamenten att utveckla och implementera CCU. EU:s politik på området motiveras i stor utsträckning av behovet att både minska utsläpp och stärka konkurrenskraften¹¹. Detta hänger samman med höga energipriser inom EU, som till stor del är kopplade till beroendet av importerad fossil energi och råvaror vilket ökar sårbarheten och påverkar industrins konkurrenskraft.

Förnybartdirektivet (RED)

Syftet med förnybartdirektivet (RED) är att främja ökad användning av förnybar energi och hållbara bränslen inom EU. RED reglerar produktion och inblandning av hållbara bränslen samt anger vilken metod som ska användas för att kvantifiera minskningen av växthusgasutsläpp, beroende på olika råvaror. Den senaste revideringen av direktivet (RED III) infördes i mars 2023¹⁹.

Förnybara bränslen av icke-biologiskt ursprung (RFNBO) är bränslen som produceras genom att i) omvandla förnybar el via vattenelektrolys för att producera vätgas, eller ii) kombinera vätgas med koldioxid för att skapa kolväten (e-bränslen via CCU). Begreppet "syntetiska bränslen" används även inom ReFuelEU Aviation och FuelEU Maritime. En närmare granskning av RED¹⁷ visar att även bioelektrobränslen inbegrips i RFNBO. Bioelektrobränslen ska klassificeras som en blandning av biodrivmedel och RFNBO, där energiinnehållet i tillsatt vätgas bestämmer andelen RFNBO. Bioelektrobränslen kan därmed vara med och uppfylla mål och kvoter för både biodrivmedel och RFNBO.

RED III innehåller ett mål på 5,5 % för avancerade biodrivmedel, biogas och RFNBO, varav minst 1 % ska utgöras av RFNBO till år 2030. Enligt RED ska avancerade biodrivmedel och biogas som används inom flyg och sjöfart räknas som 1,2 gånger sitt energiinnehåll, och RFNBO som 1,5 gånger sitt energiinnehåll.

I februari 2023 antogs två delegerade akter kopplade till RED, som bland annat innehåller hållbarhetskriterier och metoder för RFNBO^{20,21}. Dessa inkluderar exempelvis (i) att en minskning av växthusgasutsläpp med minst 70 % jämfört med det fossila referensalternativet ska uppnås, och (ii) att icke-förnybara kolkällor ska räknas som utsläpp efter 2035 för elproduktionsanläggningar och efter 2040 för andra anläggningar. Dessutom beskrivs regler för hur växthusgasintensiteten i den använda elektriciteten ska beräknas.

Enligt RED III ska RFNBO tillgodoräknas måluppfyllelsen i den sektor och det land där slutprodukten används, och inte längre där den produceras, vilket var fallet i RED II. Detta innebär också att den förnybara el som används vid produktionen inte får

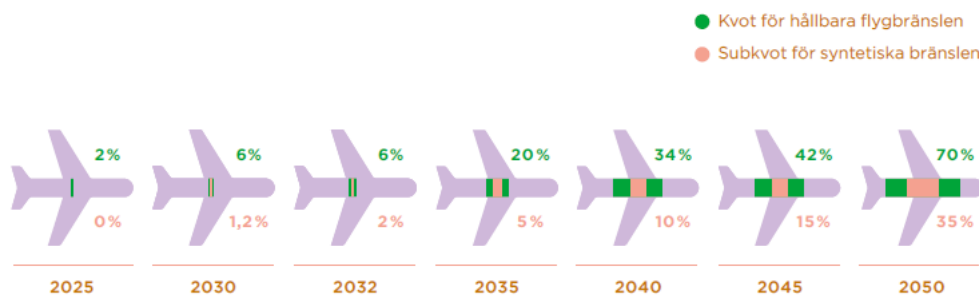
räknas mot måluppfyllelsen. Syftet är att undvika dubbelräkning av den förnybara elen vid både produktion och förbränning av bränslet.

ReFuelEU Aviation

År 2023 antogs nya mål för hållbara flygbränslen (SAF) inom ReFuelEU Aviation²². Målen består av kvoter för SAF som andel av den framtida bränslemixen, med särskilda subkvoter för syntetiska bränslen, se Figur 3.

Nivåerna är relativt låga på kort sikt (t.ex. 6 % SAF och 1,2 % syntetiska bränslen till 2030). Till år 2050 förväntas dock SAF utgöra 70 % av bränslemixen, med en subkvot på 35 % för syntetiska bränslen. Subkvoten för syntetiska bränslen kan, förutom RFNBO, uppfyllas av annan förnybar vätgas (till exempel från biogasreforming) såväl som "low carbon aviation fuels". Det senare är bränslen av icke-biologiskt ursprung vars energinnehåll kommer från icke-fossila källor och inkluderar således även elektrobränslen där elen kommer från kärnkraft. Som nämndes i föregående stycke inkluderar RFNBO inte bara rena elektrobränslen, utan även bioelektrobränslen, som därmed kan vara med och uppfylla subkvoten för syntetiska bränslen.

MÅL FÖR HÅLLBARA FLYGBRÄNSLEN



Figur 3. Mål för hållbara flygbränslen inom EU i form av volymbaserade kvoter (totalt för hållbara flygbränslen och med specifika subkvoter för syntetiska bränslen). Figuren är hämtad från Fossilfritt Sverige (2024)⁸.

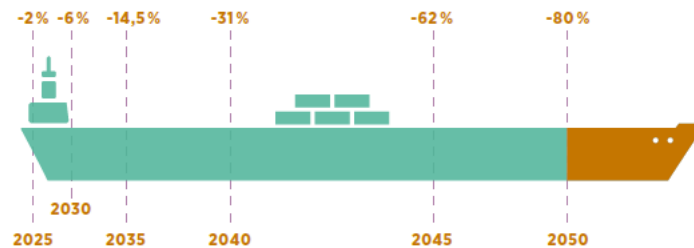
FuelEU maritime

FuelEU Maritime-förordningen²³ kräver att fartyg över 5 000 bruttoton som anlöper europeiska hamnar ska minska växthusgasintensiteten i den energi som används ombord med 80 procent till år 2050, med delmål enligt Figur 4.

En subkvot (på 2 %) för syntetiska bränslen kommer att införas från och med 2034 om deras totala energibidrag till sjöfarten är under 1 % år 2031. Den dubbelräkning (multiplikatorer) som anges för biogas, avancerade biodrivmedel och RFNBO i RED ingår inte i FuelEU Maritime-förordningen. Däremot kommer en multiplikator på 2

att gälla för RFNBO som används inom sjöfarten under perioden 2025–2033, i syfte att stimulera användningen av dessa bränslen i sjöfartssektorn.

GENOMSNITTLIG ÅRLIG REDUKTION AV VÄXTHUSGASINTENSITET JÄMFÖRT MED GENOMSNITTET ÅR 2020



Figur 4. Mål för att minska växthusgasintensiteten i den energi som används ombord på fartyg som anlöper europeiska hamnar. Figuren är hämtad från Fossilfritt Sverige (2024)⁸.

3.3.2 Nationell nivå

Reduktionsplikten

Leverantörer av bensin och diesel i Sverige behöver enligt lagen om reduktionsplikt blanda in biodrivmedel så att utsläppen av växthusgaser årligen minskar med en viss procentsats. Biodrivmedel som ingår i reduktionsplikten betalar full energi- och koldioxidskatt. Reduktionsplikten har tidigare endast omfattat biodrivmedel. Men förordningen är kompletterad så att även RFNBOs inkluderas.^{24,25}

Skatteundantaget för biodrivmedel och biogas

Rena och höginblandade biodrivmedel är befriade från energi- och koldioxidskatt för att främja en ökad användning av dessa bränslen. Elektrobränslen omfattas i nuläget inte av skatteundantaget. Vid användandet av fossila kolatomer för produktion av elektrobränslen behövs utsläppsrätter. Därmed blir det en dubbel beskattning för den fossila delen, trots att det är en återanvändning av en resurs som substituerar användning av drivmedel från nya fossila resurser.

Energimyndigheten (ER 2023:26)⁶, såväl som Fossilfritt Sverige⁸, har föreslagit att elektrobränslen ska likställas med biodrivmedel i beskattning.

Förslag gällande styrmedel för inhemsk produktion av förnybara drivmedel

Ett styrmedel som stimulerar inhemsk produktion av förnybara drivmedel har efterfrågats under lång tid. Hittills har svenska styrmedel främst riktats mot användningen av biodrivmedel, vilket bidragit till att Sverige är en stor nettoimportör av både biodrivmedel och råvaror. Sedan 2021 kan Industriklivet och Klimatklivet ge investeringsstöd till nya produktionsanläggningar, och Riksgälden kan lämna statliga gröna kreditgarantier. Enligt Bioekonomiutredningen (SOU 2023:15) krävs dock ytterligare styrmedel eftersom dagens stöd minskar

investeringskostnader men inte intäktsriskerna för ny teknik. Utredningen föreslår därför ett konkurrensutsatt system med tioåriga intäktsgarantier för ny inhemsk produktion av flytande förnybara drivmedel och mellanprodukter inkl. elektrobränslen. Garantin baseras på skillnaden mellan marknadspriset på en referensprodukt och det anbudspris som producenten erbjuder, och ska främja nya råvaror och tekniker.

3.4 Utmaningar kring styrmedel för CCU

3.4.1 Undvika risker för suboptimala lösningar

Energimyndigheten (ER 2023:26)⁶ lyfter utmaningar kopplade till styrmedel för CCS och CCU utifrån att båda teknikerna kommer att behövas, men inte bör ses som förstahandslösningar. Detta innebär avvägningar mellan att möjliggöra CCU där alternativ saknas och att undvika att mer effektiva lösningar trängs undan. Tidsperspektivet blir också komplext – teknikerna kan ge snabb klimatnytta, men riskerar samtidigt att låsa fast system i mindre optimala lösningar.

För avfall föreslår Energimyndigheten (ER 2023:26) därför att återvunna kolatomer ges en tydligare roll i avfallspolitiken, så att energi- och resurseffektiv cirkulation prioriteras. Samtidigt bör incitament finnas för CCU när andra alternativ saknas, något som enligt myndigheten bör återspeglas i EU:s avfallshierarki och kommande krav på återvunnet material i plastförpackningar.

Vidare påpekar Pettersson och Wickman¹⁷ samt Beiron m.fl.²⁶ att nuvarande lagstiftning gynnar det mindre energieffektiva alternativet med e-bränslen via CCU framför exempelvis bioelektrobränslen, vilket riskerar att låsa in systemet i suboptimala lösningar. En bidragande orsak till det är att vid produktion av bioelektrobränslen kommer enbart en del av det producerade bränslet kunna klassificeras som RFNBO, och med nuvarande lagstiftning är incitamenten större för RFNBO än för andra avancerade drivmedel. REDs metod för att kvantifiera klimatpåverkan av elektrobränslen (RFNBOs) stimulerar heller inte energi- och resurseffektiva koncept som till exempel innovativa elektrobränsleprocesser med lägre elanvändning eller fall där avsättning för syrgas (från elektrolysen) finns¹⁷.

3.4.2 Hinder för investeringar i CCU i nuvarande regelverk

Otydliga, inkonsekventa och ofördelaktiga regler för RFNBO i RED och relaterade regelverk riskerar att skapa hinder för investering¹⁷.

Enligt RED III ska RFNBO:s tillgodoräknas till måluppfyllelsen i den sektor och det land där slutprodukten används och inte längre där den produceras, vilket var fallet i RED II. Det innebär också att den förnybara el som används vid produktionen inte tillgodoräknas måluppfyllelsen. Syftet är att undvika

dubbelräkning av den förnybara elen vid både framställning och förbränning av bränslet. Samtidigt som uppstramningarna kan förväntas öka efterfrågan på elektrobränslen blir det mindre attraktivt för en medlemsstat att inhemska företag producerar dem för export. Det finns dock möjlighet att upprätta särskilda samarbetsavtal för att delar av den förnybara energin i stället ska tillgodoräknas i det land som den producerats.⁶

En inkonsekvens mellan regelverken för RFNBO gäller allokering av biogen och fossil koldioxid från blandade flöden (som avfall). EU ETS tillåter inte att någon allokering görs, medan RED gör det. Energimyndigheten (ER 2023:26)⁶, såväl som Fossilfritt Sverige⁸, har därför föreslagit att reglerna i EU ETS därför bör harmoniseras med RED. Ett argument för att tillåta allokering av den biogena koldioxiden till RFNBO är att fossil koldioxid i praktiken förbjuds efter 2040. Allokeringen måste därför tillåtas för att skapa incitament för långsiktiga investeringar i CCU från avfallsbaserade anläggningar.

En viktig aspekt, för vissa anläggningar, gällande allokeringen av biogen och fossil koldioxid, är tidsperioden för vilken man behöver uppfylla massbalanskriterierna. Är den tidsperioden endast 3 månader riskerar det att utgöra ett problem, men detta kan lösas om så kallade virtuella lager av biogen koldioxid tillåts, eller om tidsperioden förlängs i Sverige.¹⁷

Det kan argumenteras att det är bättre att återanvända fossila kolatomer än att inte göra det. Det är i stället inflödet av jungfruligt kol – i form av primära fossila bränslen och insatsvaror – som bör regleras och begränsas. Ur ett sådant perspektiv bör all återanvändning av kol tillåtas, och inget stoppår finnas för användning av fossil koldioxid. Det är dock viktigt att denna syn inte används som argument för fortsatt inflöde av fossilt kol med hänvisning till att kolatomerna återanvänds.¹⁷

3.5 Aspekter kopplat till förslaget om Industriklivets utvidgning

Som lyfts i detta kapitel behövs det för produktion av hållbara kolbaserade produkter antas ett bredare perspektiv än CCU, då det finns mer effektiva lösningar än ren CCU på sikt för de flesta applikationer. Som nämnts pekar därför Energimyndigheten (ER 2023:26)⁶ på att CCU i första hand bör användas där mer energi- och resurseffektiva lösningar inte är möjliga. Vidare ska inte CCU eller CCS användas som ett sätt att motivera fortsatt tillförsel av fossila bränslen och råvaror i de fall det finns andra alternativ.

Såväl Energimyndigheten (ER 2023:26)⁶ som Fossilfritt Sverige⁸ föreslår en vidgning av Industriklivets förordning till att omfatta CCS och CCU, oavsett sektor och oavsett kolatomernas ursprung. Men det lyfts att Industriklivets möjlighet att

stödja CCS och CCU på fossila tillämpningar bör begränsas till fall där det saknas rimliga alternativ för att minska utsläppen.

Fossilfritt Sverige lyfter också att det vid en utvidgning bör säkerställas att även andra cirkulära lösningar från avfall blir stödberättigade inom Industriklivet. Detta för att skapa en incitamentsstruktur som gynnar återvinning av kolatomer från avfall så högt upp i avfallstrappan som det är möjligt samtidigt som också ett ökat tillvaratagande av kolatomerna från avfallsförbränning genom CCU eller CCS gynnas på ett sätt som inte skapar inlåsning och fördröjer omställning till mer långsiktiga lösningar.

Motsvarande resonemang kan även föras för biobaserade lösningar på samma sätt som för avfall, där det också bör säkerställas att andra alternativ till ren CCU också inbegrips i Industriklivet eller på annat sätt har samma möjligheter att få stöd.

4 CCU i Sverige idag

Sverige har goda förutsättningar för CCU, tack vare tillgång till fossilfri el, stora punktkällor av koldioxid samt en konkurrenskraftig processindustri. Samtidigt finns ett tydligt behov av CCU drivet av klimatmål, EU-regelverk och industrins omställning från fossila råvaror.

Utvecklingen av CCU i Sverige präglas av en växande projektportfölj, men också av betydande osäkerhet. Flera satsningar inom bland annat e-metanol, e-metan och e-SAF har initierats, samtidigt som andra projekt har pausats, omprövats eller lagts ned. Detta visar att tekniken väcker ett stort intresse, men att kommersialiseringen fortfarande är känslig för marknadsförutsättningar, investeringskostnader och styrmedel.

Samtidigt fortsätter nya projekt att utvecklas. Förstudier för bland annat SkyKrafts e-SAF-anläggning i Skellefteå och Södras satsning på e-metan tillsammans med OX2 och TES visar att intresset för CCU kvarstår, medan Liquid Winds konkurs illustrerar de betydande kommersiella risker som fortfarande präglar sektorn. Sammantaget befinner sig CCU i Sverige i ett tidigt utvecklingsskede med både betydande möjligheter och stora utmaningar.

4.1 Starka förutsättningar men begränsad implementering

Sverige har i grunden goda förutsättningar för CCU, tack vare en stabil och relativt fossilfri elproduktion, stora punktkällor av både biogen och fossil koldioxid samt en internationellt konkurrenskraftig processindustri. Samtidigt ökar behovet av CCU genom klimatmålen, EU-regelverk och industrins omställning från fossila råvaror. Sverige har mål om nettonollutsläpp senast 2045 och därefter negativa utsläpp, vilket skapar behov av tekniker som kan minska fossila utsläpp och ersätta fossila råvaror²⁷. Samtidigt ökar EU-regelverk som ReFuelEU Aviation och FuelEU Maritime efterfrågan på hållbara bränslen och elektrobränslen. Inom raffinaderi- och kemiindustrin pekar omställningen också mot en övergång från fossil till förnybar råvara, bland annat genom fossilfri vätgas, elektrobränslen, elektrokemikalier och återvunna eller biobaserade insatsvaror¹¹.

Trots dessa förutsättningar används CCU idag endast i begränsad omfattning. De etablerade tillämpningarna utgörs främst av direkt användning av koldioxid från bioetanol- och biogasproduktion, medan de flesta satsningar inom bränslen, kemikalier och material fortfarande befinner sig i planerings-, förprojekterings- eller demonstrationsfas. En stor del av de biogena koldioxidflödena från bland

annat skogsindustrin och fjärrvärmesektorn används därför fortfarande inte som råvara², samtidigt som kemi- och plastindustrin till stor del är beroende av fossilt kol och cementindustrins potential för koldioxidavskiljning och användning eller lagring ännu inte har realiserats²⁸ (se vidare kapitel 5).

4.2 En växande men osäker projektportfölj

Under de senaste åren har ett flertal svenska CCU-projekt annonserats med inriktning mot produktion av e-metanol, e-metan och e-SAF baserade på biogen koldioxid och fossilfri el. Projekten är dock fortfarande beroende av fortsatta tekniska studier, tillståndprocesser, kommersiella avtal och investeringsbeslut innan de kan realiseras.

Samtidigt visar utvecklingen att projekten är känsliga för förändrade marknadsförutsättningar. Höga investeringskostnader, osäker efterfrågan på fossilfria produkter, kostnader för el och vätgas samt osäkerhet kring styrmedel och tillståndprocesser¹¹ har lett till att flera satsningar har pausats, ändrats eller lagts ned. Konkursen för Liquid Wind i maj 2026²⁹ illustrerar detta tydligt. Bolaget utvecklade tre planerade e-metanolprojekt i Sundsvall, Umeå och Örnsköldsvik, där det senare skulle använda biogen koldioxid från Övik Energi för produktion av e-metanol samtidigt som överskottsvärme skulle återföras till fjärrvärmenätet. Verksamheten är i nuläget till salu, vilket illustrerar både de möjligheter och utmaningar som präglar utvecklingen av CCU i Sverige.

Andra satsningar har också pausats eller omprövats. Vattenfall och St1 genomförde tidigare en förstudie om produktion av e-SAF baserat på el från havsbaserad vindkraft, men 2025 meddelade St1 att arbetet pausas till följd av bristande efterfrågan^{30,31}. Vattenfall och Shell initierade 2021, tillsammans med SAS och LanzaTech, ett projekt med målsättningen att producera 50 kton e-SAF årligen. Under 2024 fattades dock beslut om att pausa projektet³². Även Unipers och Sasols planerade satsning i Långsele, med inriktning på produktion av SAF, pausades under 2024 efter beslut från Uniper³³. Detta visar att de största utmaningarna idag främst är kommersiella snarare än tekniska.

4.3 Flera projekt tar nästa steg

Trots dessa utmaningar fortsätter nya investeringar att utvecklas. SkyKraft beviljades i maj 2026, 231 miljoner kronor i stöd från Industriklivet för produktion av e-SAF baserat på biogen koldioxid från lokala industrier³⁴. Vidare har OX2, Södra och TES inlett i mars 2026 en förprojekteringsfas för produktion av e-metan vid Värö³⁵, medan Fortum tillsammans med Skavsta Logistik och Flygfrakt AB har tecknat en avsiktsförklaring om att undersöka möjligheterna att producera e-SAF vid Stockholm Skavsta flygplats³⁶.

Även Green Birch i samarbete mellan Braathens Renavia, Mana, NG Nordic, Umeå Energi och Umeå Eco Industrial park visar på alternativa utvecklingsvägar. Projektet, som planeras tas i drift omkring 2030, ska producera 100 kton SAF genom förgasning av avfall³⁷ och utgör ett exempel på implicit CCU (se avsnitt 2.2), där kolet nyttiggörs utan att först avskiljas som koldioxid. Ett liknande koncept utvecklas inom Biorefinery Östrand.

Samtidigt finns etablerade CCU-tillämpningar redan i drift. Sedan 2014 avskiljer och renar Lantmännen tillsammans med Linde biogen koldioxid från bioetanolproduktionen i Norrköping för användning inom livsmedelsindustrin³⁸. Under 2026 började även Tekniska verken i Linköping leverera biogen koldioxid från sin biogasanläggning till livsmedelsindustrin.

Tabell 3 visar en sammanställning av de projekt som nämns i texten ovan.

Tabell 3: Exempel på CCU-projekt i Sverige, inklusive projekt i drift, planerings- och genomförandefas samt pausade initiativ.

Företag/ huvudpartners	Projektnamn	CO2 ursprung	Produkt	Kapacitet	Status	Kommentar
Liquid Wind Övik Energi	EF Övik	Biogen, kraftvärme	e-metanol	150 000 ton CO ₂ /år	Paus	Ansökan om miljötillstånd inlämnad
Liquid Wind Sundsvall Energi	Flagship TWO	Biogen, kraftvärme	e-metanol	150 000 ton CO ₂ /år	Paus	Tillstånd
Liquid Wind Umeå Energi	Flagship THREE	Biogen, kraftvärme	e-metanol	150 000 ton CO ₂ /år	Paus	Tillstånd
Skellefteåkraft SkyNRG	SkyKraft	Industrier & verksamheter	e-SAF	360 000 ton CO ₂ /år	Byggnation 2027	Stöd från Industriklivet för förstudiefas
Södra, OX2, TES	-	Biogen, massaproduktion	e-metan	-	Drift början av 2030-talet	Stöd från Industriklivet för förprojektering (pre-FEED).
Lantmännen Agroetanol Linde, Norlic	-	Biogen, bioetanolproduktion	CO ₂ till livsmedel	120 000 ton CO ₂ /år	I drift	
Tekniska verken Linköping	-	Biogen, biogasproduktion	CO ₂ till livsmedel	20 000 ton CO ₂ /år	I drift	Stöd från Klimatklivet
Fortum Skavsta Logistik och Flygfrakt AB	-	-	e-SAF	-	Avsiktsförklaring	
St1 Vattenfall	-	-	e-SAF	-	Paus	
Vattenfall (Shell)	HySkies	Kraftvärme	e-SAF	200 000 ton CO ₂ /år	Paus	Vattenfall letar ny parner. Projektet har beviljats 80 miljoner Euro i stöd från EU:s innovationsfond.
Uniper Sasol	SkyFuel H2	Biomassa-förgasning	SAF/e-SAF	(implicit CCU)*	Paus, avslutat	Beviljades 133 miljoner kronor från Industriklivet
Braathens Renavia Mana, NG Nordic Umeå Energi	Green Birch	Förgasning av restavfall	SAF/e-SAF	(implicit CCU)*	Produktion år 2030	Förgasning av avfall. Stöd från Industriklivet
SCA St1	Östrand Biorefinery	Biomassa-förgasning	SAF/e-SAF	(implicit CCU)*	Projektering	Stöd från Industriklivet och EU:s innovationsfond

* Implicit CCU, dvs bildandet av koldioxid och behovet att fånga in den undviks genom att processen boostas med vätgas så att kolatomerna tas tillvara i produkten som en integrerad del av processen

5 CCU inom och utanför industrin

Möjliga CCU-tillämpningar inom industrin är i hög grad kopplade till stora, koncentrerade punktkällor och integrerade i befintliga industriella processer, vilket skapar goda tekniska förutsättningar för effektiv avskiljning och potential för storskaliga tillämpningar, särskilt inom exempelvis massa- och pappersindustri, raffinaderier och cementindustri.

Samtidigt varierar förutsättningarna mellan industrisektorer. Inom massa- och pappersindustrin är tillgången på biogena koldioxidflöden särskilt stor, medan raffinaderier kännetecknas av integrerade material- och energiflöden där CCU i hög grad kopplas till hantering av restgaser. För cement- och kalkrelaterade processer utgör processutsläpp relaterat till råvarans kemiska omvandling en stor del av utsläppen, vilket gör att CCU eller CCS krävs för att undvika utsläppen. I vissa fall, såsom kemiindustrin, är CCU främst kopplat till utveckling av nya råvarubaser och värdekedjor, medan det i andra sektorer i högre grad kopplas till hantering av befintliga restflöden och optimering av processer. I delar av industrin, särskilt utanför de största punktkällorna, är koldioxidflöden mer heterogena och mindre koncentrerade, vilket försvårar avskiljning och uppskalning.

Möjliga CCU-tillämpningar utanför industrin inkluderar främst energi- och avfallssektorn. Detta omfattar även tillämpningar kopplade till biogasproduktion, där relativt rena men små koldioxidflöden uppstår som en del av processen och i vissa fall redan nyttiggörs kommersiellt, men där den totala volymen är begränsad. Fristående produktionsanläggningar för omvandling av koldioxid till produkter kan visserligen ses som industriell produktion, men beskrivs här som en tillämpning utanför industrin, då det handlar om nya anläggningar utan direkt koppling till befintlig, traditionell industri. CCU-tillämpningar utanför industrin är i högre grad beroende av samordning mellan aktörer, tillgång till infrastruktur och integration i energisystemet, inklusive transport av koldioxid och tillgång till insatsvaror som vätgas.

Gränsen mellan CCU inom och utanför industrin är i många fall flytande. Likartade tekniska lösningar kan klassificeras olika beroende på hur projekt organiseras, hur värdekedjan är uppdelad mellan aktörer och var i systemet användningen sker.

I detta kapitel görs en uppdelning mellan CCU-tillämpningar inom respektive utanför industrin. Syftet är att synliggöra skillnader i förutsättningar, aktörslogik, systemintegration och relevans i relation till Industriklivet och Energimyndighetens uppdrag. Uppdelningen är specifik för denna rapport och används för att strukturera nulägesbeskrivningen, inte för att utgöra en juridisk klassificering.

Förutsättningarna för CCU varierar mellan sektorer beroende på koldioxidflödenas volym, koncentration och hur utsläppen är fördelade. Dessa faktorer påverkar både kostnaderna för avskiljning och vilka tillämpningar som är tekniskt och ekonomiskt genomförbara. De sektorsspecifika förutsättningarna beskrivs närmare i följande avsnitt.

5.1 CCU inom industrin

Med CCU inom industrin avses tillämpningar där avskiljning och/eller användning av koldioxid sker integrerat i en befintlig industriell process eller värdekedja.

Koldioxiden avskiljs typiskt från industriella punktkällor och används antingen i direkt anslutning till källan eller i närliggande industriella system. Svensk industri står för ungefär en tredjedel av Sveriges territoriella fossila växthusgasutsläpp¹¹ och genererar dessutom betydande biogena koldioxidflöden, särskilt inom skogsindustrin och bioenergibaserade verksamheter. Eftersom utsläppen är koncentrerade till ett begränsat antal stora punktkällor är den tekniska potentialen för koldioxidavskiljning också koncentrerad till ett fåtal anläggningar¹¹.

Tillämpningarna kännetecknas ofta av integration med befintliga material- och energiflöden och av att delar av värdekedjan redan har relativt hög teknisk mognad.

5.1.1 Järn- och stålindustri

Inom järn- och stålindustrin aktualiseras CCU främst vid stora processrelaterade punktkällor, exempelvis masugnsprocesser och andra kolintensiva produktionssteg. En stor del av utsläppen i sektorn är processrelaterade och därmed svåra att eliminera genom energieffektivisering eller bränslebyten¹¹ vilket gör alternativa lösningar som förändrade processer eller hantering av koldioxidflöden särskilt framträdande. Dessa utsläpp kännetecknas av relativt höga volymer och i vissa fall gynnsam sammansättning för avskiljning och vidare användning¹¹.

Avskild koldioxid kan användas i industriella kluster, exempelvis genom koppling mellan stålverk, kraftvärmeverk, kemiindustri och raffinaderier. Därigenom kan befintlig infrastruktur och lokala värdekedjor utnyttjas för användning av koldioxid i stället för lagring.

5.1.2 Övrig metallindustri och gruvor

Inom övrig metallindustri och gruvverksamhet kan CCU kopplas till både metallurgiska processer och anläggningarnas energisystem. En stor del av utsläppen utgörs av processutsläpp från reduktionsprocesser och metallurgiska reaktioner¹¹, exempelvis vid användning av kol och koks som reduktionsmedel vid primärframställning, samt i samband med oxidation av kol i råmaterial. Eftersom dessa utsläpp är svåra att minska enbart genom energieffektivisering eller bränslebyten kan hantering eller nyttiggörande av koldioxid vara ett relevant komplement.

Källorna till koldioxid kan omfatta både processutsläpp och förbränningsrelaterade utsläpp, ofta med varierande koncentration och sammansättning. Utsläpp kan dessutom uppstå i flera olika processteg¹¹, inklusive återvinning av metallskrot och behandling av restmaterial, vilket bidrar till en mer heterogen utsläppsbild jämfört med sektorer med mer koncentrerade punktkällor. Detta kan ge en något större komplexitet och därmed högre kostnader för både avskiljning och vidare användning. Både utsläppsnivåer och sammansättningen av koldioxidflöden kan dessutom förändras i takt med att produktionsprocesserna ställs om för att ersätta fossila reduktionsmedel med alternativa lösningar såsom biokol eller vätgas¹¹.

Nyttiggörandet kan i många fall ske utanför kärnprocessen, exempelvis i angränsande verksamheter eller genom externa aktörer, vilket gör industriell symbios och regional samverkan central. Samtidigt finns flera exempel där rest- och sidoströmmar från produktionen innehåller både koldioxid och metallinnehåll, vilket öppnar för kombinerade lösningar där materialåtervinning och koldioxidhantering sker parallellt¹¹. Detta kan påverka hur olika åtgärder prioriteras i värdekedjan.

Volymer och förutsättningar varierar mellan anläggningar beroende på processer, råvaror och energisystem, vilket gör lösningarna platsbundna och beroende av lokal tillgång till energi, infrastruktur och användare av koldioxid. Gränsen mot CCU utanför industrin är därmed i flera fall flytande, särskilt när koldioxiden transporteras till fristående användning eller integreras i bredare systemlösningar.

5.1.3 Raffinaderier

Raffinaderiindustrin utgör ett centralt tillämpningsområde för CCU, där avskiljning och användning ofta kan kopplas till befintliga process- och materialflöden, och produktion av exempelvis elektrobränslen passar väl in i raffinaderiernas traditionella produktion av drivmedel. Raffinaderier har integrerade processer där flera produkter framställs parallellt och där restgaser och intermediärer används som insatsvaror eller energikälla i andra delar av anläggningen. Detta innebär att CCU i raffinaderier i hög grad förväntas kopplas till koldioxidflöden som uppstår

vid hantering av restgaser och optimering av befintliga energiflöden snarare än införande av helt nya produktionssteg⁶.

Koldioxid inom raffinaderiindustrin uppstår både från förbränning och från processer som vätgasproduktion (via metanreforming) och raffinering av fossila eller biobaserade råvaror. Samtidigt återfinns merparten av kolet i insatsvarorna i slutprodukterna (en bit över 90%), medan koldioxidutsläppen utgör en mindre del av värdekedjans totala kolflöde. Omställningen från fossila drivmedel, som idag kraftigt dominerar, till förnybara drivmedel bygger därför huvudsakligen på biogena råvaror. Detta omfattar dels de biobaserade oljor och fetter som används idag, dels skogsbaserade råvaror som bedöms få ökad betydelse framöver. Men att även producera drivmedel via CCU från raffinaderierarnas koldioxid kan utgöra ett komplement i denna omställning.

I dag sker nästan all svensk drivmedelsproduktion vid raffinaderier, men framöver väntas en större andel förnybara drivmedel produceras även i anslutning till exempelvis skogsindustrin och energisektorn, bland annat genom CCU (se avsnitt 6.2).

5.1.4 Kemiindustri

Kemiindustrin utgör ett centralt område för användning av koldioxid som råvara i produktionen av kemiska produkter och intermediärer (se också avsnitt 6.1). Tillämpningarna är ofta kopplade till specifika syntesprocesser, exempelvis produktion av metanol och andra kolbaserade kemikalier. Kemiindustrins omställning från fossil till hållbar råvara bygger på tre ben: återvunna råvaror, biogena råvaror och koldioxidbaserade råvaror. Likt raffinaderiindustrin så återfinns en stor del av kolet i produkterna och en mindre del i utsläppen. Tillgången på koldioxid inom sektorn är därför liten, vilket innebär att koldioxid från andra källor kan behövas för framtida CCU-baserad produktion.

Hur CCU integreras varierar mellan olika processer. I vissa fall kan användningen ske inom befintliga produktionssystem, medan den i andra kräver nya processer, värdekedjor och samarbeten. CCU behöver därför bedömas i relation till andra omställningsspår, såsom ökad användning av biobaserade eller återvunna råvaror och fossilfri vätgas, vilka påverkar dess framtida roll inom sektorn.

5.1.5 Cement- och mineralindustri

Cementindustrin står för merparten av växthusgasutsläppen inom mineralindustrin. Utsläppen uppstår huvudsakligen vid kalcinering av kalksten och utgörs till största delen av processutsläpp, medan resterande del kommer från bränsleförbränning. Eftersom processutsläppen kvarstår även vid en fossilfri energiförsörjning är sektorn ett av de viktigaste tillämpningsområdena för CCU och CCS. Övriga delar

av mineralindustrin, såsom glas- och gipsproduktion, har generellt lägre utsläpp och domineras främst av förbränningsutsläpp³⁹.

Användning av koldioxid i denna sektor är främst kopplat till mineralisering eller karbonatisering, där koldioxiden binds kemiskt i cement, betong och andra byggmaterial som en del av produktionsprocessen (se vidare avsnitt 6.3).

Tillämpningarna kan integreras i befintliga produktionsprocesser, exempelvis vid betonghärdning eller behandling av restmaterial, men även omfatta användning av infångad koldioxid från externa källor.

Volymerna per enhet är ofta begränsade, men den samlade potentialen påverkas av möjligheten till uppskalning och koppling till stora materialflöden inom bygg- och anläggningssektorn. Tillämpningarna är därmed ofta lokalt eller regionalt förankrade, med tydliga beroenden till tillgång på råmaterial, koldioxid och efterfrågan på slutprodukter.

5.1.6 Massa- och pappersindustri

Massa- och pappersindustrin är Sveriges största källa till biogena punktutsläpp av koldioxid. Utsläppen uppstår främst i förbrännings- och återvinningsprocesser, såsom sodapannor, barkpannor och kalkugnar. Mer än hälften av det biogena kolet i biomassan återfinns som koldioxidutsläpp. Endast en liten mängd fossila bränslen används inom industrin. Totalt finns det stora (>100 kton) biogena punktutsläpp av koldioxid på ungefär 22 miljoner ton. Även flertalet mycket stora utsläppare återfinns i denna sektor (cirka 90 % av anläggningarna med biogena koldioxidutsläpp över 500 kton per år⁸). Tillsammans med en kontinuerlig produktion ger detta goda förutsättningar för storskalig koldioxidavskiljning.

Erfarenheten av koldioxidavskiljning från massa- och pappersbruk är dock fortfarande begränsad. Rökgaserna, särskilt från sodapannor, skiljer sig från andra industriella rökgaser, vilket innebär behov av ytterligare tester och demonstrationsprojekt för att utveckla branschpassade lösningar⁴⁰.

CCU-tillämpningar omfattar främst produktion av elektrobränslen och kemiska intermediärer samt användning av koldioxid i industriella processer, exempelvis för pH-reglering vid ligninutfällning. Samtidigt kan bioraffinaderikoncept, såsom ligninuttag och svartlutsförgasning, utnyttja kolet tidigare i processen och därmed minska de framtida koldioxidutsläppen från sektorn.

5.1.7 Sågverksindustrin

Även sågverksindustrin ger upphov till biogena koldioxidutsläpp, främst genom förbränning av bark och spån för att täcka det egna värmebehovet. De samlade utsläppen är betydande (exempelvis större än från raffinaderiindustrin), men är fördelade på många små och geografiskt spridda punktkällor (inga över 100 kton),

vilket begränsar förutsättningarna för storskalig CCU. Till skillnad från koncentrerade koldioxidflöden, exempelvis från bioetanol- eller biogasproduktion, kräver utsläppen avskiljning från rökgaser, där kostnaderna är höga och skalfördelarna begränsade. Samtidigt finns potential att minska utsläppen genom elektrifiering av värmeproduktionen, exempelvis med värmepumpar, vilket kan minska behovet av koldioxidavskiljning på sikt.

5.1.8 Övriga industriella biogena källor

Produktion av etanol och biogas ger upphov till relativt rena koldioxidströmmar som kan användas direkt, exempelvis inom livsmedelsindustrin, utan energikrävande avskiljning. Flera befintliga CCU-tillämpningar bygger på sådana flöden. Eftersom merparten av biogasanläggningarna ligger utanför industrin behandlas dessa närmare i avsnitt 5.2.2.

Förgasning utgör en potentiell framtida nyckel teknik från vilken ett flertal olika produkter, som olika drivmedel, energibärare och kemiska intermediärer, kan produceras utifrån flera olika typer av råvaror. Vid förgasning återfinns mer än hälften av kolet i ingående råvara i form av koldioxidutsläpp från processen. Likt från etanol och biogasproduktion utgör de relativt rena koldioxidströmmar som skulle kunna nyttjas för CCU utan en energikrävande avskiljningsprocess. Det är dock effektivare att istället undvika att denna koldioxid bildas genom att boosta processen med vätgas och därmed se till att mer av kolet i ingående biomassa hamnar i huvudprodukten. Denna process kan sägas utgöra en implicit form av CCU (se avsnitt 2.2 och 3.2).

I dagens raffinaderi-, kemi- och cementindustri utgör biogena utsläpp en begränsad andel av koldioxidflödena, men denna andel väntas öka i takt med omställningen. CCU-tillämpningar som idag skulle vara huvudsakligen fossilbaserade kan i framtiden bli rena bio-CCU-tillämpningar.

5.2 CCU utanför industrin

Med CCU utanför industrin avses tillämpningar där avskiljning och användning av koldioxid sker utanför traditionell processindustri, eller där användningen sker i fristående anläggningar som inte är direkt kopplade till en specifik industriell process. Tillämpningarna är ofta beroende av infrastruktur, energisystem och marknadsförutsättning, oavsett om koldioxidkälla och användning är samlokaliserade eller separerade.

5.2.1 Energi- och avfallssektorn

Inom energi- och avfallssektorn kan koldioxid avskiljas från värme- och kraftvärmelanläggningar baserade på exempelvis biomassa eller avfall, där både fossil och biogen koldioxid förekommer. Till skillnad från många industriella

punktkällor är dessa anläggningar ofta mindre och har mer varierande drift till följd av dygns- och säsongsvariationer i värmebehovet. I vissa fall kan de samtidigt ha bättre möjligheter att nyttiggöra restvärme från avskiljningsprocessen⁸.

Den avskilda koldioxiden kan därefter användas i andra värdekedjor för produktion av exempelvis syntetiska bränslen, kemikalier eller byggmaterial, ofta i kombination med fossilfri vätgas. Även om dessa tillämpningar i sig är industriella processer sker de normalt inte som en integrerad del av en befintlig industriell huvudprocess, utan i fristående anläggningar eller i anslutning till exempelvis kraftvärmeverk i fjärrvärmesystem. De klassificeras därför i denna rapport som CCU utanför industrin.

5.2.2 Biogasproduktion

CCU kopplat till biogasproduktion är en etablerad och marknadsnära tillämpning utanför industrin. Vid uppgradering av biogas avskiljs en relativt ren koldioxidström som en integrerad del av processen, vilket innebär att ingen separat avskiljning krävs. Detta ger goda förutsättningar för kostnadseffektivt nyttiggörande, trots de relativt små volymerna.

Däremot är flödena relativt små, vilket påverkar förutsättningarna för vidare användning samt medför utmaningar med kostnadsbilden nedströms kopplat till förvätskning, transport eller vidare omvandling av koldioxiden. Detta ligger i linje med bedömningar i den senaste Net Zero Industry Act (NZIA)-rapporten⁴¹, där avskiljning av koldioxid från biogas hittills bedöms ske i för liten skala för att vara systemmässigt relevant för storskalig transport- och lagringsinfrastruktur. Den avskilda koldioxiden från biogasproduktion har dock en potential att användas kostnadseffektivt i mer småskaliga tillämpningar och särskilt där vidare omvandling av koldioxiden inte krävs, t.ex. inom livsmedelsindustrin. Tillsammans med andra mindre koldioxidflöden från exempelvis energi- och avfallssektorn kan koldioxid från biogasproduktion också utgöra en relevant resurs trots att enskilda anläggningar har begränsad skala¹⁵.

Det är än så länge ett fåtal anläggningar i Sverige som använder koldioxiden, men ett flertal planerade nya biogasanläggningar inkluderar förvätskning av koldioxid i sina tillståndsansökningar⁴¹. De planerade biogasanläggningarna för uppgradering och förvätskning av koldioxid omfattar i huvudsak volymer upp till cirka 20 kton koldioxid per år eller mindre⁴¹, vilket innebär att de har begränsad betydelse för dimensioneringen av framtida transport- och lagringsinfrastruktur, trots sin lokala och regionala relevans.

5.2.3 Fristående produktion av bränslen och energibärare

Fristående produktion av elektrobränslen och syntetiska gaser avser tillämpningar där koldioxid samlas in från flera källor, såsom energi- eller avfallsanläggningar, och transporteras till separata produktionsanläggningar. Där omvandlas koldioxid och vätgas till exempelvis metanol, metan eller andra kolvätebaserade bränslen. Dessa anläggningar utgör i sig industriella processer, men klassas här som “utanför industrin” eftersom de inte är integrerade i en befintlig industriell huvudprocess, eller direkt kopplade till en specifik utsläppskälla. Lösningen kan möjliggöra uppskalning genom att flera koldioxidkällor försörjer samma anläggning, men ökar samtidigt beroendet av transportinfrastruktur och samordning mellan aktörer.

Centraliserad omvandling kan ge skalfördelar och lägre specifika produktionskostnader än mindre anläggningar vid varje utsläppskälla. Samtidigt minskar möjligheterna till processintegration, exempelvis att nyttiggöra överskottsvärme från omvandlingen i avskiljningsprocessen, och transport av koldioxid medför ytterligare kostnader. I en tidigare studie uppnåddes liknande kostnader för centraliserade och decentraliserade produktion i större skala där koldioxid från flera källor samlades jämfört med mer decentraliserad produktion där flera anläggningar för omvandling i mindre skala var samlokaliserade med avskiljning från respektive utsläppskälla⁴².

5.2.4 Byggd miljö och lokala materialtillämpningar

Inom den byggda miljön kan koldioxid användas i lokal mineralisering eller materialtillämpningar som sker utanför traditionell industriell produktion, exempelvis kopplat till enskilda byggprojekt eller regional materialanvändning. Till skillnad från cementindustrin, där mineralisering sker som en del av den industriella produktionsprocessen, sker dessa tillämpningar i användnings- eller byggskedet. Tillämpningarna omfattar exempelvis karbonatisering av betong eller andra material i byggskedet.

I praktiken innebär detta att koldioxid förs i kontakt med alkaliska byggmaterial, såsom betong eller krossade restmaterial, så att en kemisk reaktion kan ske. I byggskedet kan detta ske genom att material exponeras för luft eller tillförd koldioxid, exempelvis genom att sprida krossat material i luftiga lager eller behandla material med koldioxid i mer kontrollerade miljöer. För att reaktionen ska ske effektivt krävs att materialet har tillräcklig fukthalt och reaktiv yta, så att koldioxiden kan lösa sig, diffundera in och reagera med de alkaliska komponenterna⁴³. Tillämpningarna är oftast små- till medelskaliga och platsbundna, vilket minskar transportbehovet men ställer krav på lokal tillgång till koldioxid och integration i byggprojektens logistik

5.2.5 System- och infrastrukturlösningar

System- och infrastrukturlösningar omfattar koldioxid-hubbar, transport, mellanlagring och samordnade lösningar som möjliggör användning av koldioxid från flera källor. Dessa kan inkludera gemensam insamling och distribution av koldioxid via rörledningar, fartyg eller andra logistiklösningar, samt centraliserade knutpunkter där koldioxid samlas, bereds och vidarefördelas till olika användare.

Lösningarna är särskilt relevanta för CCU utanför industrin, där skala och flexibilitet kan kräva gemensam infrastruktur för att koppla samman spridda källor och användare. Genom samordnad insamling, mellanlagring och distribution kan koldioxid utnyttjas effektivare och kostnaderna minska genom stordriftsfördelar.

Behovet av sådan infrastruktur varierar mellan olika CCU-tillämpningar. Vissa bygger på lokala eller regionala koldioxidflöden, medan andra är beroende av transport mellan flera aktörer. Infrastruktur kan också delas mellan olika CCU-tillämpningar och i vissa fall med CCS, exempelvis genom gemensam transport och mellanlagring av koldioxid. Därmed kan den bidra till att koppla samman tillämpningar inom och utanför industrin och underlätta utvecklingen av nya CCU-värdekedjor.

5.2.6 Gränsfall och kategorisering

Redan i dag förekommer gränsfall mellan CCU inom och utanför industrin. Sådana uppstår exempelvis när industriella aktörer samarbetar med energibolag kring gemensam avskiljning av koldioxid, eller när koldioxiden nyttiggörs i fristående produktionsenheter som inte är organisatoriskt kopplade till den ursprungliga punktkällan.

Ett återkommande exempel är produktion av elektrobränslen, som kan vara integrerad i befintliga raffinaderi-, kemi- eller massa- och pappersanläggningar (inom industri), men också förekomma i separata produktionsanläggningar som inte är direkt kopplade till en specifik industriell process, och som i stället kan vara kopplade till exempelvis energi- eller avfallsanläggningar (utanför industri). Liknande gränsdragningar kan uppstå för mineralisering eller fall där endast en del av avskild koldioxid nyttiggörs medan resterande flöden lagras genom CCS.

Gränsdragningen påverkas också av ansvarsfördelningen mellan aktörer. I praktiken kan avskiljning, uppgradering och användning av koldioxid ske inom samma fysiska system men vara uppdelade mellan olika aktörer, exempelvis mellan ett energibolag som ansvarar för avskiljningen och en separat aktör som driver den koldioxidbaserade produktionsenheten. Beroende på hur projektet organiseras kan en sådan lösning analytiskt betraktas som CCU inom eller utanför industrin, trots likartade tekniska förutsättningar.

6 Produktkategorier: Marknad och samhällsrelevans

CCU-tillämpningar skiljer sig tydligt mellan produktkategorier vad gäller efterfrågad volym, mognad, klimatnytta och systemberoenden. Därmed skiljer sig även deras möjliga bidrag till omställningen och deras relevans i ett svenskt perspektiv.

Bränslen och energibärare har den klart största potentiella användningen av koldioxid och en central roll för omställningen av svårelektrifierade transportsektorer, men är i nuläget kostsamma, tekniskt och systemmässigt komplexa samt starkt beroende av policy, tillgång till el och vätgas och utvecklingen av hela värdekedjor.

Kemiska produkter och intermediärer omfattar i vissa fall mer marknadsnära tillämpningar, men med stor variation mellan produktsegment. Möjlig framtida efterfrågan på koldioxid för CCU kan vara relativt stor, men mindre än för bränslemarknaden, och ännu mer begränsad för enskilda produkter inom kategorin. Efterfrågan på CCU-baserade produkter är beroende av konkurrenskraft gentemot fossilbaserade alternativ, vilket ytterligare begränsar möjligheten till storskalig användning av koldioxid på kort sikt.

Byggmateriäl och mineralbaserade produkter utgör främst lokala och platsbundna tillämpningar med möjlighet till mer varaktig kolinbindning, men har begränsad potentiell efterfrågan och påverkas i hög grad av regelverk, standarder och acceptans.

Direkt användning av koldioxid är tekniskt mogen och etablerad, men har liten betydelse för större utsläppsflöden eftersom volymerna är begränsade och användningen ofta är kortlivad.

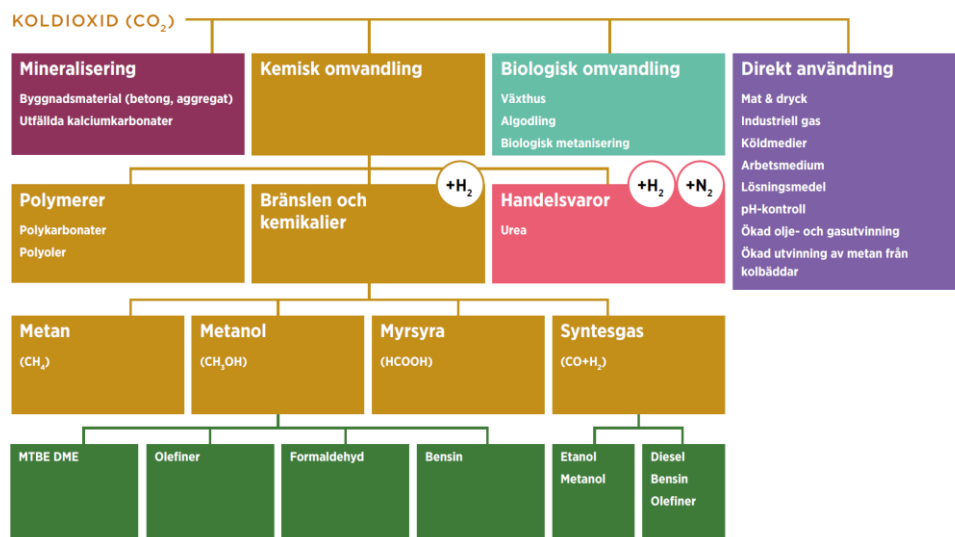
För att möjliggöra storskalig CCU i flera tillämpningar är utvecklingen av **system- och infrastruktur lösningar** också en förutsättning. Efterfrågan drivs av utvecklingen inom de olika produktkategorierna. Utvecklingen präglas av hög investeringsrisk, beroende av samordning och osäker utveckling av efterföljande marknader.

Sammantaget finns det en tydlig spännvidd mellan tillämpningar med potentiellt stor efterfrågan, och mer marknadsnära tillämpningar, där de storskaliga lösningarna är mer osäkra och beroende av systemutveckling och tillgång till resurser medan de mer mogna tillämpningarna har ett mer begränsat behov av koldioxid.

För att strukturera CCU-landskapet delas tillämpningar i denna rapport in i ett antal produktkategorier utifrån hur avskild koldioxid används. Indelningen bygger på funktion och slutprodukt snarare än sektor eller aktör, vilket underlättar jämförelser mellan tillämpningar med liknande tekniska och systemmässiga egenskaper. Samtidigt synliggörs skillnader i bland annat marknadsförutsättningar, teknisk mognad, skalbarhet och roll i energi- och klimatomställningen.

Samtliga produktkategorier kan förekomma både inom och utanför industrin, beroende på hur tillämpningarna är integrerade i befintliga processer eller organiserade som fristående lösningar¹¹. Produktkategorierna delar gemensamma grundläggande förutsättningar i form av att de bygger på samma övergripande värdekedja för avskiljning, hantering och användning av koldioxid.

Figur 5 visar en översikt från av Fossilfritt Sverige som illustrerar bredden av möjliga CCU-tillämpningar, från direkt användning och biologiska processer till kemisk omvandling och materialtillämpningar. Figuren tydliggör även hur olika användningar skiljer sig åt vad gäller funktion och slutprodukt.



Figur 5: Exempel på användningsområden för koldioxid. Figuren är hämtad från Fossilfritt Sverige (2024)⁸ som i sin tur baserat den på en figur från Olsson m.fl. (2022)⁴⁴.

I den här rapporten används en något annan kategorisering av produkter. Medan Fossilfritt Sveriges indelning i högre grad utgår från omvandlingsprocesser, görs i den här rapporten en uppdelning som fokuserar på slutprodukt och funktion. De övergripande produktkategorier som används i rapporten är:

- Kemiska produkter och intermediärer (avsnitt 6.1)
- Bränslen och energibärare (avsnitt 6.2)
- Byggmaterial och mineralbaserade produkter (avsnitt 6.3)
- Direkt användning av koldioxid (avsnitt 6.4)

Utöver detta beskrivs även de system- och infrastrukturlösningar (avsnitt 6.5) som behövs för att möta kringliggande behov i värdekedjan.

I kapitlet görs en kvalitativ bedömning av produktkategoriernas marknadsläge och samhällsrelevans, med syftet att ge ett strategiskt underlag för bedömning av var CCU-tillämpningar i ett svenskt sammanhang bedöms vara mest respektive minst relevanta i nuläget. Rangordningen innebär inte en värdering av enskilda projekt eller aktörer, utan syftar till att synliggöra övergripande mönster i marknadsnärhet, skalbarhet och osäkerheter. Utgångspunkten för denna analys är att marknadsmognad inte enbart avgörs av teknisk genomförbarhet, utan i stor utsträckning av samspelet mellan efterfrågan, kostnadsstruktur, tillgång till insatsvaror och policyutveckling^{6,15}. Marknadsförutsättningarna påverkas också i hög grad av hur olika tillämpningar klassificeras i regelverk (se även avsnitt 3.3), vilket kan ha stor betydelse för efterfrågan, investeringsvillkor och konkurrenskraft mellan olika produktionsvägar.

6.1 Kemiska produkter och intermediärer

Efterfrågan och mognad varierar mellan olika produktsegment, där flera produkter har etablerade användningsområden, men där CCU-baserad produktion på kort sikt är begränsad och beroende av konkurrenskraft mot fossila och andra alternativa råvarubaser samt styrmedel.

Denna kategori omfattar CCU-tillämpningar där avskild koldioxid används som råvara för framställning av kemiska produkter och intermediärer. Omvandlingen kan ske genom flera olika tekniska processvägar, där de mest centrala är termokatalytisk, elektrokemisk och fotokemisk omvandling⁴⁵. Dessa skiljer sig åt i energibehov, mognadsgrad och integrationsmöjligheter, men innebär gemensamt att koldioxid aktiveras genom reaktion med exempelvis vätgas eller elektroner för att bilda nya kolbaserade molekyler. Exempel inkluderar metanol och andra plattformskemikalier, såsom myrsyra och urea, kolmonoxid (via koldioxid reduktion) och dimetyleter (DME), samt vidareförädlade produkter baserade på dessa. Koldioxid kan även användas i polymerproduktion, exempelvis för polykarbonater (PC) och polyuretaner (PUR), där den ersätter delar av fossil råvara. Koldioxid kan även återcirkuleras inom industriella processer genom produktion av intermediärer såsom kolmonoxid⁴⁶.

Produkterna används som insatsvaror inom bland annat kemi-, material- och tillverkningsindustrin¹. Produktionen kan integreras i befintliga processer, men kan också kräva nya anläggningar eller samverkan med externa aktörer, särskilt vid behov av vätgas².

Flera av tillämpningarna bygger på etablerad processteknik, men kommersialiseringen är fortfarande begränsad. Efterfrågan på koldioxidbaserade produkter är generellt begränsad, särskilt vad gäller betalningsvilja för produkter med lägre klimatpåverkan. Exempelvis saknas ofta tydliga drivkrafter att betala en premie för metanol baserad på avskild koldioxid. Detta ligger i linje med analyser som visar att betalningsviljan för förnybar metan till kemiindustrin i regel inte är tillräcklig för att bära produktionskostnaderna utan styrmedel eller en tydlig grön prispremie⁴⁷.

Marknadsförutsättningarna varierar samtidigt mellan olika produktsegment. Metanol har exempelvis bred användning och större marknadspotential än mer nischade kemikalier, såsom specialpolymerer och andra högvärdiga kemikalier, där marknaderna är betydligt mindre. Även om vissa nischmarknader, exempelvis plast eller kemikalier med särskilda hållbarhetskrav, kan uppvisa en viss betalningsvilja för CCU-baserade produkter är dessa marknader begränsade. Skillnaderna mellan produktsegment påverkar också möjligheterna till uppskalning.

Drivkraften för CCU i denna kategori är främst att ersätta fossil råvara i den kemiska industrin. Kemikalier är centrala insatsvaror i många värdekedjor, och efterfrågan på kolbaserade råvaror bedöms kunna öka på lång sikt⁸. Samtidigt är den svenska marknaden betydligt mindre än för bränslen, och materialanvändning står endast för en mindre del av den totala kolanvändningen. Dessutom saknas i dagsläget tydliga styrsignaler för att ersätta fossil råvara med biogent eller återvunnet kol, vilket begränsar incitamenten att investera i CCU-baserad produktion⁸.

Styrmedel påverkar främst genom koldioxidprissättning, hållbarhetskrav och upphandlingskriterier⁶, snarare än genom direkta investeringsstöd. Hittills är bedömningen att styrningen i högre grad är inriktad mot utsläpp i slutledet än mot materialflöden tidigare i värdekedjan, vilket skapar svaga incitament i producentledet för att ersätta fossil råvara med biogent eller återvunnet kol. I flera fall finns alternativa produktionsvägar som kan vara mer resurseffektiva än CCU, exempelvis biobaserade eller cirkulära lösningar, vilket kan påverka den långsiktiga efterfrågan på CCU-baserade kemikalier⁶.

För svenska förutsättningar kan styrkor kopplas till befintlig kemi- och raffinaderinfrastruktur samt tillgång till biogena koldioxidflöden¹⁵, särskilt i industrikluster som Stenungsund. Hur koldioxiden används påverkas dock i hög grad av styrmedel och regelverk, vilka i flera fall ger starkare ekonomiska incitament för användning i bränslen än i kemiska produkter⁴⁷.

6.2 Bränslen och energibärare

Störst förväntad efterfrågan och starkt policydriven efterfrågan inom transportsektorn, men låg marknadsmognad och starkt beroende av tillgång till el, vätgas och systemförutsättningar

CCU-baserade bränslen och energibärare omfattar produktion av syntetiska bränslen där koldioxid används tillsammans med vätgas, för att framställa exempelvis metanol, syntetisk diesel, syntetiskt flygbränsle och metan^{2,6}. Bränslena kan ersätta fossila alternativ inom sektorer där direkt elektrifiering är svår⁶, såsom flyg, sjöfart och annan tung transport.

Tillämpningarna förekommer både integrerat i industriella processer och i fristående anläggningar och är ofta nära kopplade till energisystemet. Uppskalning är därför beroende av en samtidig utveckling av vätgasproduktion, tillgång till fossilfri el och koldioxid, infrastruktur samt marknader för hållbara bränslen.

Kategorin har den största potentiella användningen av koldioxid, eftersom energisystemets efterfrågan på bränslen är omfattande. Samtidigt är produktionen mycket elintensiv, vilket innebär att tillgången till fossilfri el är en central förutsättning för storskalig uppskalning (se avsnitt 2.4.4).

Efterfrågan drivs främst av sektorer där alternativen till fossila bränslen är begränsade, såsom transportsegment med höga energibehov (t.ex sjöfart, flyg och lastbilar)¹⁵. För luftfartssektorn väntas krav inom ReFuelEU Aviation skapa en betydande efterfrågan på hållbara flygbränslen, motsvarande omkring 250 TWh per år⁸. För sjöfarten⁴⁸ innebär EU ETS, FuelEU Maritime och AFIR ett växande krav på bränslen med lägre utsläppsintensitet och på ny hamninfrastruktur. Baserat på nuvarande energianvändning inom EU på cirka 500 TWh per år, motsvarar kraven på utsläppsreduktioner enligt FuelEU Maritime ett framtida behov av hållbara bränslen på upp till cirka 450 TWh/år⁸, vilket illustrerar mycket stora potentiella volymer. Den faktiska efterfrågan och betalningsviljan kan dock påverkas av elektrifiering och effektivisering¹⁵ och betalningsvilja är nära kopplad till hur regelverkens krav och sanktionsmekanismer faller ut i praktiken.

Marknadspotentialen är därmed hög på lång sikt men fortfarande osäker på kort sikt. Den elintensiva produktionen bidrar till höga kostnadsnivåer, och affärslogiken är i stor utsträckning beroende av styrmedel, kvotplikter eller efterfrågeskapande policy. Kostnadsuppskattningar⁴⁹ illustrerar storleksordningen på kostnadsgapet till fossila alternativ där elektro- och bioelektrobränslen uppskattas ligga i intervallet cirka 110–230 €/MWh på 5–10 års sikt och 90–160 €/MWh på längre sikt medan produktionskostnader för fossila drivmedel är i storleksordningen 20–70 €/MWh för oljepriser mellan 30-100 dollar per fat.

Produktionskostnaderna för bioelektrobränslen är lägre än motsvarande kostnader för elektrobränslen, men högre än för rena biodrivmedel. Styrmedlens utformning blir därför avgörande både för marknadsutvecklingen och för vilka produktionsvägar eller kolkällor som blir konkurrenskraftiga.

Osäkerheten gäller inte bara efterfrågan utan även investeringsförutsättningarna. Även med kvotkrav skapas inte nödvändigtvis tillräckliga investeringssignaler för snabb utbyggnad, och produktion etableras inte automatiskt inom EU eftersom hela värdekedjan måste vara konkurrenskraftig i förhållande till importalternativ¹¹. Liknande utmaningar lyfts för sjöfarten, där aktörer behöver hantera parallella regelverk, osäkra investeringstidpunkter, begränsad infrastruktur och finansieringsutmaningar⁴⁸.

Utvecklingen illustreras av både motgångar och framsteg. Konkursen för den svenska e-bränsleutvecklaren Liquid Wind under 2026⁵⁰ visar hur projekt i tidiga skeden kan vara sårbara för höga kapitalkrav, komplexa värdekedjor och osäker finansiering. Samtidigt föreslår regeringens utredning om hållbara drivmedel för luftfart och sjöfart, som presenterades av regeringen i maj 2026⁵¹, en mer aktiv statlig roll med riskdelning och finansiellt stöd för att möjliggöra investeringar. Ett exempel på den fortsatta utvecklingen är projektet SkyKraft, som 2026 beviljades stöd genom Industrikivet för projektering inför ett investeringsbeslut om produktion av e-SAF i Sverige.

6.3 Byggmaterial och mineralbaserade produkter

Tekniskt genomförbara och lokala, platsbundna tillämpningar med potential för kolinbindning, men begränsad skala och beroende av regelverk och marknadsacceptans

Inom denna kategori används koldioxid i produktion av byggmaterial och andra mineralbaserade produkter. Vid dessa processer reagerar koldioxiden med kalcium- eller magnesiuminnehållande faser och omvandlas till termodynamiskt stabila karbonater i fast form, vilket innebär att koldioxiden lagras i materialet på potentiellt geologisk tidsskala. I praktiken varierar dock graden av inbindning beroende på hur fullständigt karbonatiseringen sker⁴³. Tillämpningar kan bidra till att ersätta fossilbaserade material eller råvaror i byggsektorn, vilket innebär att klimatnyttan inte enbart är kopplad till kolinbindning utan även till substitution av utsläppsintensiva material. Exempel inkluderar betong, cementbaserade produkter och material baserade på industriella restströmmar⁶.

Efterfrågan är i hög grad kopplad till bygg- och anläggningssektorn, där intresset för material med lägre klimatpåverkan har ökat. Offentlig upphandling⁶ och

hållbarhetscertifierade byggprojekt kan i vissa fall skapa en betalningsvilja för sådana produkter. Den potentiella marknaden är dock betydligt mindre än för bränslen¹⁵ och expansionen sker i regel lokalt eller regionalt genom successiv integration i befintliga produktionsprocesser⁶.

Affärslogiken påverkas av etablerade materialstandarder, regelverk⁶ och konservativa marknadsstrukturer. Krav på testning, certifiering och verifierad prestanda⁵², kan innebära att introduktion av nya material tar tid även när tekniken finns tillgänglig. Ytterligare utmaningar är kopplade till resurs- och processförutsättningar, såsom behov av energi för aktivering och bearbetning av material, tillgång till lämpliga alkaliska råvaror samt variation i sammansättning hos industriella restströmmar⁵². Samtidigt kan dessa tillämpningar i vissa fall kombineras med existerande produktionsprocesser, vilket kan underlätta implementering, men även ställa krav på att den faktiska klimatnyttan kan kvantifieras och verifieras i praktisk tillämpning.

I ett svenskt perspektiv finns god tillgång till relevanta restmaterial och en etablerad cement- och materialindustri. Potentialen är samtidigt begränsad i relation till de totala koldioxidflödena, då endast en mindre del av utsläppen kan bindas i material. Det bör dock påpekas att redovisningen av dessa tillämpningar skiljer sig från traditionell utsläppsrapportering, eftersom klimatnyttan i hög grad fångas i livscykelanalyser snarare än vid enskilda punktkällor⁵³.

6.4 Direkt användning av koldioxid

Hög marknadsmognad och etablerade tillämpningar, men lågt behov och begränsad systemmässig klimatrelevans

Direkt användning av koldioxid avser tillämpningar där koldioxid används i sin befintliga form som processtöd eller funktionsgas, utan att omvandlas kemiskt till en ny produkt.

Exempel inkluderar användning som kylmedium, inertgas, i pH-reglering och olika industriella processer, samt i biologiska tillämpningar såsom växthusodling och algodling. Ett exempel i Sverige är koldioxid från bioetanolproduktion som används inom livsmedelsindustrin⁴¹. Detta illustrerar en etablerad tillämpning där koldioxid används direkt utan kemisk omvandling. Liknande användning förekommer även för biogen koldioxid från biogasproduktion, där processen, liksom vid etanolproduktion, ger upphov till relativt koncentrerade koldioxidströmmar. Precis som för bioetanolproduktion kan denna koldioxid renas till godkänd livsmedelkvalitet, vilket i dagsläget också är den främsta användningen (Tekniska verken i Linköping är ett sådant exempel⁵⁴). Tillämpningarna är i många fall etablerade och tekniskt mogna.

Direkt användning av koldioxid är bedömd som den mest marknadsnära och tekniskt mogna kategorin⁶. Flera tillämpningar är redan etablerade och kommersiellt gångbara. Globalt används uppskattningsvis omkring 230 miljoner ton koldioxid per år⁸, där huvuddelen används för produktion av urea och ökad olje- och gasutvinning. Det mesta av denna användning baseras i dag på fossil koldioxid. Övrig användning sker främst inom livsmedels- och processindustrin. Behovet är dock begränsat, och användningen innebär i regel att koldioxiden återförs till atmosfären efter kort tid. Klimatnyttan är därför främst kopplad till möjligheten att ta tillvara på biogena koldioxidflöden för substitution av fossil koldioxid. .

Kategorin förekommer i både industriella och icke-industriella sammanhang och kännetecknas av låg komplexitet och hög grad av marknadsnärhet. Klimatnyttan är oftast kopplad till ersättning av fossilproducerad koldioxid, men produktkategorin bedöms ha begränsad strategisk betydelse i relation till större utsläppsflöden, möjliga marknadsvolymer och därmed potentiell klimatnytta.

I flera fall finns dessutom alternativa lösningar som erbjuder likvärdig funktion utan behov av koldioxid. Detta inkluderar exempelvis HFO- och HFC-baserade köldmedier för kylning och värmepumpar, ammoniak eller kolväten för industriella kylsystem, samt kväve och argon som alternativ till koldioxid i inertgas- och skyddsgastillämpningar. För användning inom pH-reglering och vattenbehandling kan koldioxid ersättas av konventionella syror eller andra kemiska lösningar. Även inom livsmedelsförpackning och andra gasapplikationer kan kvävebaserade skyddsgaser eller vakuumförpackning utgöra alternativ, och inom olika process- och extraktionstillämpningar kan koldioxid i vissa fall ersättas av organiska lösningsmedel eller vattenbaserade processer. Detta innebär att konkurrensen i denna kategori inte enbart sker mellan olika koldioxidkällor utan även mot andra tekniska lösningar.

I ett svenskt perspektiv kan tillämpningarna bidra till att skapa initial efterfrågan på avskild koldioxid och därmed spela en roll i uppbyggnaden av lokala marknader och koldioxidhubbar, även om deras bidrag till större utsläppsminskningar är begränsat^{15,11}.

6.5 System- och infrastrukturlösningar

Nödvändiga möjliggörare för storskalig CCU, men utan egen efterfrågan och med hög investeringsrisk kopplad till osäker efterfråge- och marknadsutveckling

System- och infrastrukturlösningar utgör en tvärgående kategori som omfattar transport, mellanlagring, uppgradering och samordning av koldioxid mellan källor

och användare. Dessa lösningar utgör inte i sig en slutlig användning av koldioxid, men är ofta en förutsättning för att möjliggöra CCU-tillämpningar, särskilt i fall där källor och användning är geografiskt separerade. Kategorin kan också bidra till att möjliggöra större och mer flexibla flöden av koldioxid samt till att koppla samman flera sektorer och aktörer. Den är därmed särskilt relevant för tillämpningar med stora volymer eller behov av samordning.

I jämförelse med andra produktkategorier är affärslogiken för system- och infrastrukturlösningar mer indirekt, eftersom intäktsströmmar ofta är beroende av användningen i efterföljande delar av värdekedjan. Marknadsrelevansen är därför starkt beroende av utvecklingen inom främst bränsle- och kemikaliekategorierna. Detta kan skapa osäkerhet i investeringsbeslut och bidra till att utvecklingen sker stegvis eller i kluster. Samtidigt kan dessa lösningar möjliggöra tillräckligt storskaliga flöden för att uppnå bättre kostnadseffektivitet i gemensam CCU-infrastruktur.

Kategorin präglas därför i hög grad av samordningsbehov, lång tidshorisont och hög osäkerhet. Genomförbarheten är ofta beroende av såväl koordinering mellan aktörer som tillräcklig investeringsvilja och utvecklingen av marknader för koldioxid och koldioxidbaserade produkter, vilket i sin tur innebär ett betydande beroende av offentliga aktörer och policyutveckling. Detta innebär att investeringsbeslut i hög grad påverkas av osäkerheter kring hur snabbt efterfrågan i efterföljande led kommer att realiseras. Samverkan mellan aktörer, exempelvis genom regionala koldioxidhubbar där flöden från flera anläggningar samlas, lyfts ofta fram som en förutsättning för att uppnå tillräcklig skala och kostnadseffektivitet. I vissa fall kan även osäkerheter i regelverk kopplade till hantering av blandade koldioxidflöden påverka investeringsförutsättningarna, exempelvis genom att det är otydligt hur fossil och biogen koldioxid kan särskiljas i olika användningar¹¹. Detta gäller särskilt för andra CCU-tillämpningar än bränslen, där det i dagsläget saknas etablerade och enhetliga metoder för att beräkna och redovisa klimatnytta, medan det för bränslen finns regelverk kring hur klimatnyttan ska kvantifieras för olika bränslen, inkl. RFNBO, inom förnybartdirektivet. Detta bidrar till osäkerhet kring hur olika tillämpningar ska värderas i marknad och regelverk och påverkar därmed investeringsförutsättningarna.

I Sverige saknas i nuläget i stor utsträckning etablerade transportkedjor och lagringslösningar. Detta innebär att utvecklingen är beroende av internationella lösningar eller framtida investeringar⁴¹. Det finns dock förutsättningar för regionala lösningar baserat på koncentrerade utsläppskällor och geografisk närhet mellan industriella aktörer, samtidigt som möjligheterna begränsas av relativt låga samlade volymer jämfört med större europeiska industrikluster. Detta kan skapa särskilt goda förutsättningar för utveckling av regionala koldioxidkluster och samordnade

värdekedjor, även om de totala volymerna är mindre än i större europeiska industriregioner.

6.6 Jämförelse av produktkategorier

Produktkategorierna kan jämföras översiktligt utifrån deras typ av klimatbidrag och roll i omställningen (se Tabell 4). Indelningen synliggör skillnader i hur tillämpningarna bidrar till klimatnytta, men sammanfattar också hur de relaterar till befintliga värdekedjor samt vilka typer av beroenden som präglar deras utveckling. Klassificeringen baseras på tillämpningens funktion i systemet snarare än på enskilda produkter.

Bedömningen är övergripande och baseras på generella egenskaper hos respektive produktkategori, vilket innebär att det kan finnas tillämpningar som avviker från denna bild. De flesta tillämpningarna bidrar till klimatnytta genom att i någon mån möjliggöra substitution av fossila råvaror, men de skiljer sig åt avseende hur länge kolet binds in i produkten. Den samlade klimatnyttan av en CCU-baserad produkt beror förutom typen av klimatbidrag även av skalan i produktionen, såväl som av en rad andra faktorer (se avsnitt 2.4), som inte låter sig generaliseras för en hel produktkategori.

Generellt kännetecknas bränslen och direkt användning av kortlivade kolflöden där koldioxiden snabbt återförs till atmosfären, medan vissa materialtillämpningar kan innebära att kolet binds under längre tid. För kemiska produkter varierar varaktigheten i kolinbindningen beroende på slutprodukt och användning. System- och infrastrukturlösningar innebär i sig inte någon varaktig kolinlagring, utan utgör en förutsättning för de olika produktkategoriernas värdekedjor.

Skillnaderna mellan produktkategorierna innebär även att behovet av stöd, liksom den förväntade effekten av stödinsatser varierar mellan dem. I vissa fall kan stöd bidra till att etablera nya marknader eller möjliggöra uppskalning, medan det i andra fall främst kan påverka marginaler i redan etablerade tillämpningar.

Tabell 4: Översikt av produktkategorier inom CCU baserat på typ av klimatbidrag och roll i omställningen.

Produktkategori/ tjänst	Typ av klimatbidrag	Roll i omställningen
Kemiska produkter och intermediärer	Främst substitution (kolinbindning varierar beroende på produkt)	Substitution av fossil råvara i etablerade värdekedjor, med viss marknadsnärhet för vissa produkter men begränsat behov på kort sikt och beroende av utvecklingen av efterfrågan och styrmedel.
Bränslen och energibärare	Substitution utan varaktig kolinlagring	Potentiellt storskaliga lösningar med central roll för substitution av fossil råvara i sektorer som är svåra att elektrifiera (t.ex. flyg), men beroende av stora mängder el och vätgas
Byggmaterial och mineralbaserade produkter	Delvis varaktig kolinlagring (decennier eller längre)	Lokala och platsbundna tillämpningar med potential för långvarig kolinbindning, men med begränsad skalbarhet på systemnivå.
Direkt användning av koldioxid	Främst substitution utan varaktig kolinlagring	Etablerade och marknadsnära tillämpningar med generellt begränsad betydelse för utsläppsminskningar i ett systemperspektiv, då användningen är kortlivad och volymerna små.
System- och infrastruktur- lösningar	Indirekt (möjliggör andra tillämpningar)	Möjliggör övriga tillämpningar genom att koppla samman värdekedjor, men saknar egen efterfrågan och är beroende av utvecklingen i andra delar av värdekedjan och de marknader som dessa skapar.

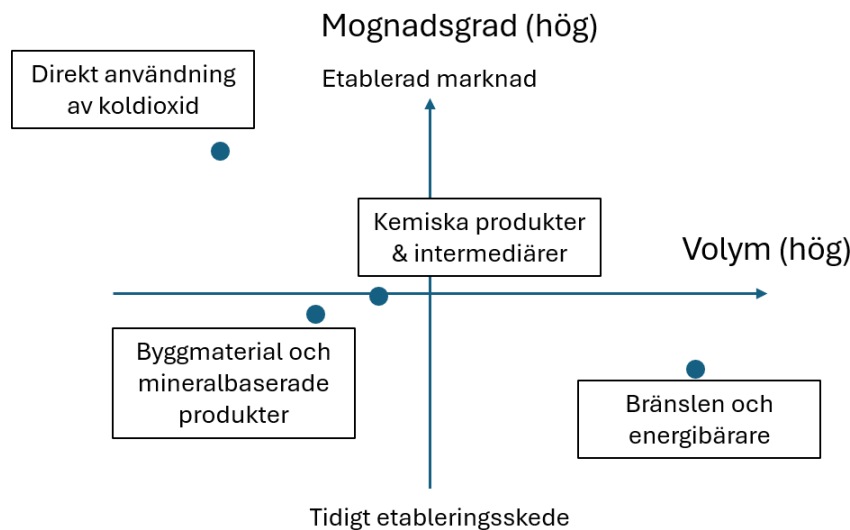
Tabell 5 sammanfattar marknadsläget för de huvudsakliga produktkategorierna inom CCU utifrån ett svenskt perspektiv. Marknadsläget beskrivs utifrån kriterierna efterfrågan, marknadsmognad och skalbarhet, där bedömningarna i första hand ska tolkas relativt mellan de olika produktkategorierna. I tabellen kommenteras också de huvudsakliga drivkrafterna för efterfrågan samt de dominerande riskerna för respektive kategori. Syftet är att ge en översiktlig jämförelse mellan kategorierna och synliggöra centrala skillnader vad gäller potentiell samhällsnytta.

Tabell 5: Översikt av produktkategorier inom CCU baserat på efterfrågan, marknadsmognad, skalbarhet, drivkrafter och risker i ett svenskt perspektiv. Skalan (låg–medel–hög) är relativ och baseras på en kvalitativ jämförelse mellan kategorier. Bedömningarna är grova och indikativa, och variationen inom flera av kategorierna är betydande.

Produktkategori / Tjänst	Efterfrågan (volymbehov Sverige)	Marknadsmognad	Skalbarhet	Drivkrafter & efterfrågelogik	Genomföranderisk
Kemiska produkter och intermediärer	Medel, potentiellt hög på längre sikt	Medel (varierar mellan tillämpningar)	Medel (varierar mellan tillämpningar och marknader)	Substitution av fossil råvara i etablerade värdekedjor; efterfrågan beroende av styrmedel och konkurrenskraft gentemot fossil råvara	Begränsade marknader, beroende av konkurrenskraft mot fossil råvara & alternativa produktionsvägar
Bränslen och energibärare	Mycket hög	Låg–medel	Hög (beroende av el och vätgas)	Klimatmål, kvoter och styrmedel; starkt policydriven efterfrågan	Höga kostnader, beroende av el och vätgas samt konkurrens från andra alternativ
Byggmaterial och mineralbaserade produkter	Låg–medel	Medel	Begränsad till medel (lokalt beroende och kopplad till bygg- & materialmarknader)	Klimatkrav, upphandling och standarder; kombination av policy och marknad	Regelverk och standarder samt acceptans
Direkt användning av koldioxid	Låg	Hög	Låg	Befintliga industriella behov; marknadsdriven efterfrågan	Begränsad efterfrågevolym samt tillgång till alternativa lösningar
System- och infrastruktur-lösningar	Indirekt (möjliggör stora CO2-flöden)	Låg–medel	Hög på systemnivå, men beroende av samordnad utbyggnad av värdekedjan	Behov av värdekedjeintegration och uppskalning; indirekt, policy- och systemdriven efterfrågan	Höga investeringsbehov och osäker efterfrågeutveckling som försvårar dimensionering och timing

För att illustrera skillnaderna mellan produktkategorierna ur ett svenskt perspektiv görs i Figur 6 en indikativ bedömning av efterfrågad volym relativt marknadsmognad. Figuren ska tolkas som en översiktlig struktur, inte som en exakt kvantifiering. System- och infrastruktur-lösningar inkluderas inte i figuren eftersom dessa utgör möjliggörande funktioner snarare än egna marknader och därför inte kan positioneras i samma diagram.

Positioneringen illustrerar att tillämpningar med hög förväntad efterfrågan generellt har lägre marknadsmognad i nuläget, medan mer mogna och etablerade användningar (främst direkt användning) är begränsade till mindre koldioxidflöden, även om vissa tillämpningar kan få en ökad betydelse på längre sikt. Positioneringen för kemiska produkter speglar en relativt stor variation mellan olika tillämpningar, snarare än en enhetlig nivå av mognad.



Figur 6: Indikativ (relativ) positionering av produktkategorier utifrån efterfrågad volym (Sverige) och marknadsmognad, där marknadsmognad avser mognaden hos marknaden för enskilda produkter inom kategorin oberoende av produktionssätt.

6.7 Generella hinder och utmaningar

Erfarenheter från europeiska projekt visar att bristande efterfrågan kan utgöra ett centralt hinder för investeringar, även i fall där tekniken är tillgänglig och infrastrukturlösningar utvecklas³. Detta är nära kopplat till att värdekedjan ännu inte är fullt utvecklad och påverkar därmed kostnader och marknadsutveckling. Utvecklingen sker i flera fall stegvis, där mindre och mer avgränsade tillämpningar initialt kan spela en viktig roll för att etablera marknader och möjliggöra vidare uppskalning. I vissa fall drivs efterfrågan av existerande marknader där koldioxid ersätter fossil råvara. I andra fall är efterfrågan i hög grad policydriven och kopplad till klimatmål och regulatoriska krav⁸.

Flera aktörer lyfter svårigheten att teckna långsiktiga leveransavtal för CCU-baserade produktion (exempelvis för elektrobränslen), vilket försvårar finansiering och investeringsbeslut i tidiga skeden¹¹. För CCU-tillämpningar innebär detta att flera lösningar som i nuläget saknar förutsättningar för bred implementering. Detta beror dels på att produktionen av fossilfria bränslen och relaterade kolbaserade produkter i många fall är otillräcklig i förhållande till efterfrågan. Erfarenheter från länder där projekt har nått längre indikerar samtidigt att större initiala projekt i många fall har varit beroende av omfattande statligt stöd eller riskdelning för att kunna nå investeringsbeslut³. Detta är särskilt kritiskt för tidiga projekt i ett uppbyggnadsskede, där osäkerheter och kostnadsnivåer generellt är högre än i mer mogna marknader, och där fördröjda investeringsbeslut därmed kan få långsiktiga konsekvenser för utvecklingstakten.

För vissa tillämpningar, särskilt utanför bränsleområdet, påverkas förutsättningarna även av att det saknas etablerade och enhetliga metoder för att beräkna och redovisa klimatnytta, vilket skapar osäkerhet kring hur sådana produkter ska värderas i marknad och regelverk¹¹.

Utöver detta påverkar skillnader i regelverk och styrmedel på nationell, europeisk och global nivå konkurrensvillkoren⁴⁸. Detta förstärks av att utvecklingen sker i olika takt i olika delar av världen, vilket kan försvåra investeringar i konkurrensumsatta marknader. Även förändrade finansiella förutsättningar, såsom högre räntenivåer, kan öka svårigheterna med att genomföra kapitalintensiva projekt genom ökade kapitalkostnader.

Framtida tillgång på biogent och återvunnet kol är begränsad. Detta innebär att olika tillämpningar kommer att konkurrera om dessa resurser¹⁵. Detta sker i en situation där priser på biomassa och biobaserade råvaror på sikt förväntas öka, vilket särskilt kan påverka sektorer där omställningen är beroende av biobaserade kolväten, såsom raffinaderi- och kemiindustrin. Mot denna bakgrund blir det centralt hur kolet används i systemet, och i vilka tillämpningar det ger störst klimatnytta per insatt resurs, särskilt för resursintensiva och systemberoende tillämpningar såsom produktion av bränslen och kemiska intermediärer. I detta perspektiv kan avskild koldioxid förstås som en sekundär råvara som återförs till värdekedjor för att ersätta fossilt kol i kemikalier, material eller bränslen.

För metall- och gruvsektorn tillkommer ytterligare en systemdimension kopplad till försörjningen av kritiska råmaterial¹¹. Efterfrågan på dessa material förväntas öka samtidigt som importberoendet är betydande och återvinningsgraden i flera fall låg, vilket kan påverka både prisbild och investeringsförutsättningar. Detta kan i sin tur öka incitamenten för att utveckla mer cirkulära lösningar där även koldioxidhantering kan utgöra en integrerad del.

Flexibilitet i elanvändningen kan bidra till att hantera begränsningar i elsystemet, exempelvis genom att elintensiva processer anpassas efter variationer i elpris och tillgänglig kapacitet. Detta kräver ofta investeringar i överkapacitet eller energilagring, vilket i dagsläget är kostsamt och sällan genomförs. Samtidigt kan utbyggnaden av el- och vätgasinfrastruktur i vissa fall behöva samordnas¹¹, eftersom de delvis utgör alternativa lösningar för att tillgodose energibehovet. Detta innebär att elintensiva CCU-tillämpningar, såsom produktion av elektrobränslen, kan begränsas av tillgången på el och behovet av nödvändig infrastruktur.

7 Värdekedjan för CCU och dess aktörer

Olika CCU-tillämpningar är alla uppbyggda längs värdekedjor där koldioxid avskiljs, hanteras, transporteras och används som råvara i produkter eller processer. De olika produktkategorierna delar därför många aktörer, tekniker och infrastrukturer, även om de skiljer sig åt i omvandlingsprocess och slutprodukt. CCU och CCS har dessutom flera gemensamma delar i värdekedjan, vilket skapar möjligheter till samordning av exempelvis koldioxidavskiljning, transport och mellanlagring.

Värdekedjorna omfattar vanligtvis verksamhetsutövare som genererar koldioxidflöden, teknikleverantörer, transportaktörer, producenter av koldioxidbaserade produkter samt slutanvändare.

CCU-värdekedjorna kännetecknas ofta av beroenden mellan olika delar av systemet. Avskiljning, transport, tillgång till energi och insatsvaror samt efterfrågan på slutprodukter behöver utvecklas parallellt för att investeringar ska bli genomförbara. Detta innebär att osäkerheter eller flaskhalsar i en del av kedjan kan påverka utvecklingen av hela systemet. Särskilt produktion av bränslen och kemikalier är beroende av tillgång till fossilfri el och vätgas, medan byggmaterialtillämpningar i större utsträckning påverkas av regelverk, standarder och marknadsacceptans.

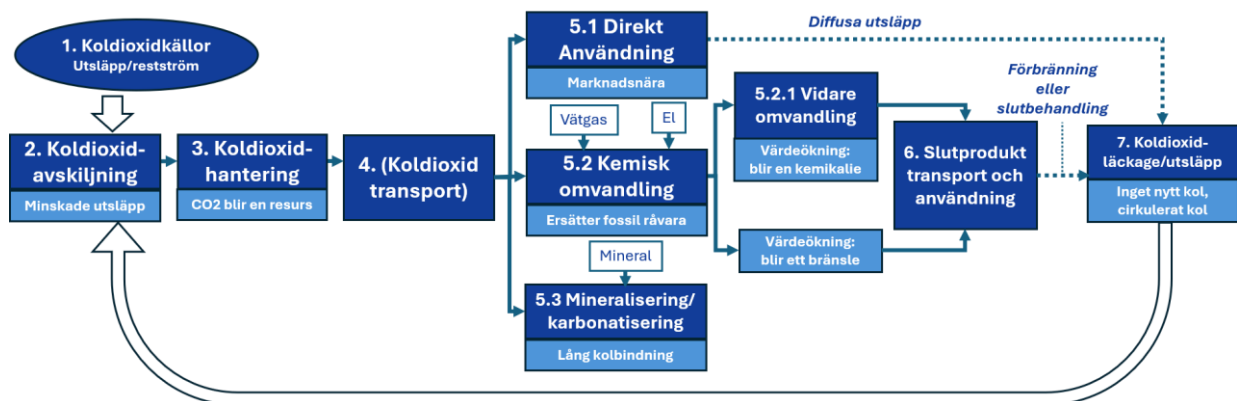
Förutsättningarna för import och export skiljer sig mellan produktkategorier. Elektrobränslen och kemikalier har potential att produceras för en internationell marknad, medan byggmaterial, mineralisering och direkt användning av koldioxid i huvudsak bygger på regionala värdekedjor där koldioxidkälla och användning finns nära varandra.

7.1 Översiktliga huvudsteg och dess aktörer

CCU omfattar värdekedjor med många gemensamma huvudsteg, även om tekniker, produkter och aktörer varierar mellan olika tillämpningar. I de flesta fall behöver koldioxid först avskiljas, renas och hanteras innan den används direkt eller omvandlas vidare till exempelvis bränslen, kemikalier eller material. Skillnaderna mellan olika CCU-värdekedjor uppstår främst i omvandlingsprocessen, produktens användning och hur länge kolet binds innan det återförs till atmosfären.

Värdekedjan omfattar ett flertal aktörer, från utsläppskällor och teknikleverantörer till producenter, transportaktörer, slutanvändare och myndigheter. Samverkan mellan dessa aktörer är en förutsättning för att etablera fungerande och kommersiellt livskraftiga CCU-värdekedjor.

Figur 7 visar en översiktlig värdekedja för CCU. Följande steg beskriver en förenklad och generell struktur för hur flera CCU-värdekedjor kan se ut och de aktörer som typiskt ingår i respektive steg.



Figur 7: Översiktliga huvudsteg i CCU-värdekedjor. Mörkblå visar stegen och ljusblå visar värdet.

1. Koldioxidkällor

Det första steget i CCU värdekedjan utgörs av koldioxidkällor, det vill säga de verksamheter där koldioxid genereras som en del av processen. Koldioxid uppstår i en rad industriella sammanhang, både som ett resultat av energianvändning och som en direkt följd av kemiska reaktioner. För fossila utsläpp är de dominerande källorna i Sverige järn- och stålindustrin, cementindustrin samt kemi- och raffinaderisektorn, där kolbaserade råvaror och bränslen används i stor omfattning. När det gäller biogena utsläpp kommer merparten från pappers- och massaindustrin, där biomassa förädlas i processer som naturligt ger upphov till koldioxid samt fjärrvärmeproduktion. Även avfallssektorn utgör en viktig del av utsläppsbilden. Vid förbränning av avfall frigörs både fossilt kol (till exempel från plast) och biogent kol (från organiskt material).

2. Avskiljning av koldioxid

Nästa steg i värdekedjan är koldioxidavskiljning från en utsläpps- eller restström. Värdet i detta steg ligger främst i att utsläppet minskar vid källan och att koldioxiden görs tillgänglig som råvara. För att kunna avskilja koldioxiden krävs avskiljningstekniker. En avgörande faktor för utsläppskällorna är att avskiljningstekniken inte påverkar den befintliga huvudprocessen negativt, vare sig

tekniskt eller ekonomiskt. Därför behöver tekniken anpassas till varje enskild anläggnings förutsättningar, såsom gasflödets sammansättning, temperatur, tryck och processens integrering i stort. Detta gör att valet av avskiljningsmetod ofta är skräddarsytt för varje aktör i värdekedjan.

Teknikleverantörer utgör därför en central del av CCU-värdekedjan. De ansvarar för att utveckla och leverera de tekniska lösningar som möjliggör effektiv avskiljning och vidareförädling av koldioxid. Inom avskiljningsteknik är aminbaserade processer och HPC (Hot Potassium Carbonate) två av de vanligast förekommande metoderna, även om det finns flera alternativa tekniker under utveckling och i kommersiell användning. Valet av teknik beror i hög grad på de specifika förhållanden som råder vid utsläppskällan, såsom gasens sammansättning och processens temperatur- och trycknivåer.

3. Koldioxidhantering

Efter avskiljning behöver koldioxiden behandlas så att den kan användas i efterföljande steg. Detta kan omfatta rening, torkning, komprimering, kylning, mellanlagring eller annan rening/upparbetning beroende på användningsområde. Värdet i hanteringssteget är att koldioxiden omvandlas till en kontrollerad och användbar resurs med rätt kvalitet för transport, lagring eller direkt användning.

4. Koldioxidtransport

I de fall användningen inte sker i direkt anslutning till koldioxidkällan, krävs transport. Transporten kan ske inom en industriell anläggning, mellan närliggande aktörer eller över längre avstånd via exempelvis lastbil, järnväg, fartyg eller rörledning. Val av transportsätt beror på volym, avstånd och tillgänglig infrastruktur. Vid transport med lastbil och järnväg transporteras koldioxiden vanligtvis som vätska i isolerade tankar vid 14-20 bar och -18°C. Fartygstransport sker också normalt i flytande form vid 15 bar och -39°C eller 6.5 bar och -50°C. För rörledning transporteras större volymer ofta vid betydligt högre tryck, vanligtvis 40 bar onshore och högre än 74.5 bar offshore⁵⁵.

5. Direkt användning, omvandling eller mineralisering/karbonatisering

I detta steg används den avskilda och hanterade koldioxiden i en produkt eller process. Det kan ske på tre huvudsakliga sätt. Vid direkt användning (steg 5.1 i Figur 7) används koldioxiden utan större kemisk omvandling, exempelvis som processgas, kylmedium, i livsmedel, växthus eller pH-reglering. Dessa tillämpningar är ofta marknadsnära. Vid kemisk omvandling (5.2) används koldioxiden som kolkälla för att producera kemiska produkter, intermediärer eller bränslen, ofta tillsammans med vätgas och energi. Exempel är e-metanol, e-metan, e-SAF eller andra kolbaserade produkter. Metanol, kan vidareförädlas (5.2.1) till exempelvis lösningsmedel, färger, plaster, lim, textilfibrer och andra kemiska

produkter eller material. Värdet skapas genom att koldioxiden kan ersätta fossil råvara eller fossilt kol i produkter och bränslen. Vid mineralisering eller karbonatisering (5.3) reagerar koldioxiden med mineraliska material eller restströmmar och binds som stabila karbonater. Det kan exempelvis handla om koldioxid-härdad betong, karbonatiserad ballast eller andra mineralbaserade byggmaterial.

Även i detta steg är teknikleverantörer och -utvecklare viktiga aktörer, då teknik är avgörande för användning/omvandling. Teknikkomponenter som katalysatorer, som möjliggör omvandling av koldioxid till värdefulla produkter, samt elektrolysörer som kan producera vätgas, en viktig insatsvara i många CCU-processer. Därtill krävs infrastruktur i form av rörsystem för transport av gaser och avancerad elkraft- och styrteknik, såsom regulatorer och kontrollsystem, för att säkerställa en stabil och effektiv drift.

6. Transport av slutprodukt och användning

I detta steg transporteras den färdiga produkten, som har framställts genom kemisk omvandling av koldioxid, till den aktör eller sektor där den ska användas. För bränslen och energibärare kan användningen ske inom transportsektorn, sjöfarten, flyget eller i vissa industriella processer där flytande eller gasformiga bränslen fortsatt behövs. För kemiska produkter och intermediärer kan den färdiga produkten eller vidareförädlade derivat distribueras till industriella användare, leverantörer eller slutkonsumenter.

Aktörer som använder CCU-produkter utgör en central del av värdekedjan, eftersom de skapar efterfrågan på både avskild koldioxid och de produkter som framställs av den. Dessa användare kan återfinnas i flera olika sektorer och deras roll varierar beroende på vilken typ av produkt som produceras, vilket beskrivits i tidigare avsnitt.

7. Koldioxidläckage/utsläpp eller fortsatt inbindning

Det sista steget visar vad som händer med kolet efter användning. I många CCU-tillämpningar frigörs koldioxiden igen, antingen snabbt eller efter en viss tid. Direkt användning leder ofta till snabba utsläpp som är geografiskt eller tidsmässigt spridda och inte kan hänföras till en enskild identifierbar utsläppskälla, det vill säga diffusa utsläpp. Detta beror på att koldioxiden är fysiskt lagrad och inte kemiskt bunden och därför frigörs när trycket minskar, temperaturen förändras, systemet öppnas eller när jämvikten förskjuts. Vid användning av bränslen sker utsläppen på ett annat sätt. När bränslet förbränns oxideras kolet direkt och omvandlas till koldioxid, som släpps ut från en tydligt avgränsad källa, såsom en skorsten eller ett avgasrör. Utsläppen sker därmed som punktutsläpp och uppstår omedelbart i själva förbränningsprocessen. Kemiska produkter kan innebära fördröjda utsläpp, beroende på produktens livslängd och slutbehandling,

exempelvis om produkten återanvänds, materialåtervinns, kemiskt återvinns, förbränns, deponeras eller bryts ned under användning. För lösningsmedel, färger och vissa kemikalier kan utsläpp också ske mer diffust genom avdunstning eller spridning under användningsfasen, och därefter oxideras kolet successivt i atmosfären och återgår till koldioxid. Mineralisering och karbonatisering skiljer sig genom att koldioxiden kan bindas under längre tid i materialet. Om koldioxiden släpps ut igen kan den i princip fångas in på nytt och användas i en ny CCU-cykel.

7.1.1 Tvärgående aktörer och möjliggörare i CCU-värdekedjan

Utöver de aktörer som ingår i den direkta CCU-värdekedjan påverkas affärsmodellen av omgivande marknadsstrukturer och etablerade värdekedjor. CCU-produkter är idag generellt dyrare än fossila alternativ, eftersom de konkurrerar med etablerade värdekedjor som har utvecklats och optimerats under lång tid, samtidigt som tekniken fortfarande befinner sig i ett tidigare utvecklingsskede med högre investeringskostnader och lägre processmognad.

Mot denna bakgrund utgör offentliga myndigheter en viktig aktör i CCU-värdekedjan. Efterfrågan på CCU-produkter är i hög grad beroende av klimatpolitik och styrmedel, såsom koldioxidprissättning, investeringsstöd och subventioner, samtidigt som tydliga och långsiktiga regelverk skapar förutsättningar för investeringar och uppskalning av CCU-tekniker.

Forskning och utveckling är en annan viktig möjliggörare. Genom att förbättra teknikernas prestanda, minska kostnaderna och utveckla nya processer och användningsområden för koldioxid bidrar forskningen till att stärka CCU:s konkurrenskraft.

I Sverige bedrivs omfattande forskning inom CCUS vid flera universitet och forskningsinstitut, bland annat Chalmers tekniska högskola, Kungliga Tekniska högskolan, Luleå tekniska universitet, Uppsala universitet, Lunds universitet, Stockholms universitet samt Linköpings universitet. Därtill bidrar flera forskningsinstitut, såsom RISE Research Institutes of Sweden, IVL Svenska Miljöinstitutet och Sveriges geologiska undersökning (SGU), med betydande forskningsinsatser.

Forskning bedrivs längs hela värdekedjan, från avskiljning och lagring till nya användningsområden för koldioxid. Ett viktigt område är utvecklingen av nya tillämpningar, där koldioxid kan omvandlas till värdefulla produkter. Universiteten bidrar även till kompetensförsörjningen genom utbildning av bland annat

ingenjörer och processspecialister, vilket är en viktig förutsättning för uppskalning och långsiktig drift av CCU-anläggningar.

7.1.2 Skillnader i värdekedjornas organisering och systemintegration

Värdekedjornas organisering varierar beroende på var koldioxiden avskiljs och hur den används. Den viktigaste skillnaden gäller graden av systemintegration och behovet av transporter mellan värdekedjans olika delar.

När avskiljning, eventuell förädling och användning kan integreras i en befintlig industriell process eller produktionsmiljö minskar behovet av externa aktörer, transporter och samordning. Befintliga material-, energi- och produktflöden kan då utnyttjas, vilket ger kortare beroenden inom värdekedjan.

Om värdekedjan i stället bygger på fristående produktionsanläggningar eller hubbar, där koldioxid från exempelvis energi- eller avfallssektorn kopplas samman med externa användare, fossilfri vätgas och nya slutmarknader, ökar beroendet av transportinfrastruktur och samordning mellan flera aktörer. Gränserna mellan koldioxidkälla, produktionsanläggning och marknad blir därmed tydligare, vilket ställer högre krav på logistik och systemintegration.

7.2 Kritiska beroenden, flaskhalsar och systembehov

CCU-tillämpningar kännetecknas av beroenden mellan tekniska, ekonomiska och institutionella faktorer som tillsammans avgör om en värdekedja kan realiseras. Dessa beroenden kan uppstå både inom enskilda anläggningar och mellan aktörer, liksom mellan energisystemet och industrins värdekedjor. Avskiljning, transport och användning av koldioxid behöver därför utvecklas parallellt. Om en del av kedjan inte realiseras, exempelvis på grund av bristande efterfrågan eller otillräcklig transportinfrastruktur, kan utvecklingen av övriga delar fördröjas eller försvåras.

I tidiga utvecklingsskeden är dessutom flexibiliteten i systemet ofta begränsad. Aktörer har då små möjligheter att byta samarbetspartner eller omdirigera koldioxidflöden, samtidigt som kostnader och risker ofta uppstår i andra delar av värdekedjan än där intäkterna realiseras³. Detta försvårar investeringsbeslut och ökar behovet av samordning mellan aktörer. Värdekedjorna är dessutom ofta geografiskt bundna, där lokaliseringen av produktion, användning och infrastruktur påverkar vilka lösningar som är praktiskt genomförbara.

Internationella erfarenheter visar att dessa beroenden ofta hanteras genom klusterbaserade lösningar, där flera utsläppskällor kopplas till gemensam

transport- och lagringsinfrastruktur. Detta kan minska riskerna, öka utnyttjandegraden av infrastruktur och förbättra de ekonomiska förutsättningarna för enskilda projekt³.

Beroendenas karaktär varierar mellan olika produktkategorier. För kemiska produkter och bränslen är tillgång till fossilfri el, vätgas och koldioxid centrala förutsättningar, medan byggmaterial och direkt användning i större utsträckning begränsas av lokala förutsättningar, regelverk och marknadens storlek. De följande avsnitten beskriver de viktigaste beroendena, flaskhalsarna och systembehoven för respektive produktkategori.

7.2.1 Kemiska produkter och intermediärer

Den största flaskhalsen i värdekedjan kemiska produkter och intermediärer är utvecklingen av ett sammanhängande industriellt system. Produktion av koldioxid-baserade kemikalier kräver samtidigt tillgång till infångad koldioxid, storskalig produktion av fossilfri vätgas, konkurrenskraftig fossilfri el samt infrastruktur för transport och hantering av koldioxid⁵⁶. Särskilt tillgången till billig fossilfri el är avgörande eftersom elektrolys för vätgasproduktion står för en stor del av produktionskostnaden. Samtidigt förväntas den svenska industrins elbehov öka kraftigt fram till 2045, vilket innebär att CCU kommer att konkurrera om samma elresurser som stål-, gruv- och batteriindustrin⁵⁷.

Kostnadskonkurrens utgör en ytterligare central flaskhals. Koldioxid baserade intermediärer har i dagsläget högre produktionskostnader än fossilbaserade alternativ, främst till följd av höga energi- och kapitalkostnader samt behovet av ny infrastruktur⁵⁸. Samtidigt är marknaderna för kemiska intermediärer globala och marginalkänsliga, vilket innebär att konkurrenskraft ofta kräver stödjande styrmedel eller koldioxidprissättning⁵⁶.

En annan kritisk systemförutsättning är att CCU integreras i befintliga kemiska värdekedjor snarare än utvecklas som en fristående industri. Infångad koldioxid kan fungera som en alternativ kolråvara i existerande produktionsprocesser, vilket möjliggör användning av befintlig industriell infrastruktur, logistik och marknader. Industriella kluster där koldioxid källor, vätgasproduktion och kemisk industri samlokaliseras bedöms därför ge betydande kostnads- och effektivitetsfördelar⁵⁶. För svensk del innebär detta att etablerade kemikluster kan spela en central roll i en framtida cirkulär kolekonomi.

Efterfrågan påverkas också av konkurrens mellan olika kolkällor. Den kemiska industrin är beroende av kol som råvara, men koldioxid-baserade flöden konkurrerar med både biobaserade och återvunna material. Tillgång, kostnad och policyutveckling avgör vilka kolkällor som prioriteras, vilket skapar osäkerhet kring framtida marknader för koldioxid-baserade intermediärer⁵⁹.

Till skillnad från produktkategorin kopplat till bränsle och energibärare, har aktörer inom denna produktkategori inte lika tydliga policydrivna hållbarhetskrav på sig (RED III / ReFuelEU Aviation / FuelEU Maritime). Produktportföljen är kraftigt diversifierad, och incitamenten för hållbara alternativ, liksom kravställningar på produkternas kvalitet, egenskaper och miljöprestande skiljer sig betydligt mellan olika typer av produkter inom kategorin.

7.2.2 Bränsle och energibärare

Värdekedjan för produktkategorin bränslen och energibärare innebär i många fall att koldioxiden används i nära anslutning till avskiljningen. Koldioxiden avskiljs då från industriella punktkällor eller energi- och avfallsanläggningar och renas därefter till den kvalitet som krävs för vidareförädling. Vidareförädlingen sker vanligtvis i processer där koldioxiden kombineras med förnybar vätgas för att omvandlas till bränslen och energibärare.

Eftersom avskiljning och produktion ofta sker i nära anslutning till varandra skapas goda möjligheter till att samordna avskiljning, vidareförädling och resursflöden inom samma anläggning eller system. Biprodukter, främst i form av restvärme och syrgas från vätgasproduktion och bränslesyntes, kan då integreras med den befintliga anläggningen, alternativt i kringliggande energisystem. Beroende på typ av bränsle sker därefter lämplig hantering för att möjliggöra transport av produkten till slutanvändaren.

Produktionen är beroende av fossilfri el och vätgas. Flaskhalsar kan uppstå genom höga energikostnader, begränsad elnätskapacitet och konkurrens om biogena och fossila koldioxidflöden samtidigt som avskiljnings- och uppgraderingsstegen i sig kan medföra ett betydande behov av ytterligare energitillförsel. Dessutom krävs omfattande investeringar i produktionsanläggningar och integrerade industrisystem för att möjliggöra storskalig uppskalning. Ett viktigt systembehov är därför utbyggnad av elproduktion, elnät och vätgasinfrastruktur, samt långsiktiga styrmedel som skapar marknadsefterfrågan för elektrobränslen och andra koldioxidbaserade energibärare.

7.2.3 Byggmaterial och mineralbaserade produkter

Värdekedjan för byggmaterial och mineralbaserade produkter skiljer sig från övriga CCU-tillämpningar genom att den inte är beroende av vätgasproduktion. Därmed är den mindre känslig för tillgången till fossilfri el och de höga kostnader som är förknippade med vätgasproduktion.

De främsta flaskhalsarna är i stället kopplade till implementering. Etablerade materialstandarder, certifieringskrav och regelverk inom bygg- och anläggningssektorn kan innebära långa införandeprocesser även när tekniken är tillgänglig. Utvecklingen påverkas även av tillgången till lämpliga alkaliska råvaror

och industriella restströmmar samt variationer i deras sammansättning och energibehovet för bearbetning.

Systembehoven handlar därför främst om anpassade regelverk, standardisering och ökad efterfrågan på klimatförbättrade byggmaterial. Samtidigt kan integration i befintliga produktionsprocesser underlätta implementeringen, förutsatt att klimatnyttan kan kvantifieras och verifieras på ett robust sätt.

7.2.4 Direkt användning av koldioxid

Direkt användning av koldioxid bygger på relativt enkla och mogna värdekedjor, där koldioxiden används utan kemisk omvandling, ofta inom livsmedelsindustrin, växthusodling eller industriella processer. Användningen sker ofta lokalt eller regionalt, vilket begränsar transportbehoven.

De främsta flaskhalsarna är den begränsade efterfrågan och att alternativa tekniker eller råvaror i vissa tillämpningar kan ersätta behovet av koldioxid. Uppskalning begränsas därför främst av marknadens storlek snarare än av tekniska eller infrastrukturella hinder. Systembehoven är generellt mindre omfattande än för övriga CCU-kategorier, men inkluderar tillgång till renad koldioxid, lokal logistik och distribution samt standarder och kvalitetskrav anpassade till respektive användningsområde.

7.3 Import/export

Import- och exportmönstren skiljer sig mellan olika CCU-värdekedjor beroende på produkternas egenskaper, produktionsförutsättningar och graden av systemintegration. Medan vissa produkter främst produceras och används lokalt, ingår andra i globala handelsflöden. CCU kan därför påverka Sveriges import- och exportmönster på olika sätt beroende på produktkategori.

7.3.1 Kemiska produkter och intermediärer

Värdekedjorna för kemiska produkter är i hög grad internationella och bygger idag på importerade fossila råvaror och baskemikalier. Sverige saknar exempelvis inhemsk produktion av metanol och är därför beroende av import⁶⁰.

CCU-baserad produktion av metanol och andra baskemikalier skulle kunna minska detta importberoende och samtidigt stärka den svenska kemiindustrins tillgång till fossilfria råvaror.

7.3.2 Bränsle och energibärare

Sverige är idag beroende av import av fossila energibärare, särskilt råolja, petroleumprodukter, naturgas och gasol. Samtidigt produceras och exporteras

förädlade oljeprodukter från svenska raffinaderier, medan biodrivmedel produceras både inom landet och genom import av råvaror och färdiga produkter.

För transportsektorn dominerar fortfarande bensin och diesel med fossilt ursprung, även om biodrivmedel som HVO, FAME, etanol och biogas spelar en viktig roll, särskilt inom vägtrafiken. En del av biodrivmedlen produceras i Sverige, men betydande mängder importeras⁶¹. Inom sjöfarten används främst marina destillat, diesel och eldningsolja, men alternativa bränslen som LNG, metanol, biodrivmedel och på sikt elektrobränslen får ökad betydelse⁶². Göteborg/Skagerrak är Sveriges viktigaste bunkringsregion, där bränsleförsörjningen bygger på den lokala raffinaderi- och depåstrukturen, kompletterad med importerade oljeprodukter. Även svenskproducerad biometan (LBG) levereras till fartyg i Göteborg⁶³.

Flygsektorn är fortfarande starkt beroende av jetbränsle men svensk produktion av hållbart flygbränsle (SAF) har påbörjats och flera satsningar på bio- och elektrobränslen är under utveckling. Ett konkret exempel är St1:s bioraffinaderi i Göteborg, som togs i drift 2024. Under det första året levererade anläggningen 20 kton SAF, vilket motsvarar cirka 10% av raffinaderiets totala årliga kapacitet. En del av producerad SAF:en exporteras till Danmark⁶⁴. St1 producerar även HVO, bionaftha och bio-LPG i samma raffinaderi^{65,66}. St1 och SCA har också planer på att bygga ytterligare ett bioraffinaderi i Östrand för produktion av både bio- och elektrobränsle⁶⁷. Denna typ av satsningar speglar ett bredare växande intresse för SAF i Sverige, där även offentligt stöd spelar en viktig roll. Till exempel har Energimyndigheten beviljat 231 miljoner kronor i stöd till Skykraft AB för att undersöka en framtida produktionsanläggning för syntetiskt flygbränsle, e-SAF³⁴.

Industrins bränsleanvändning varierar mellan olika sektorer. Vissa verksamheter använder främst el, biobränslen och fjärrvärme, medan andra fortfarande är beroende av fossila bränslen och råvaror som naturgas, gasol, eldningsolja, kol och koks. Importen av dessa energibärare är därför fortsatt viktig för delar av industrin, även om utvecklingen går mot elektrifiering, biobaserade bränslen och vätgas⁶⁸.

Den nuvarande import- och exportstrukturen utgör en viktig utgångspunkt för utvecklingen av CCU-baserade värdekedjor. Under en övergångsperiod kan import av bränslen eller insatsvaror fortfarande vara nödvändig för att möta efterfrågan och uppfylla regelkrav.

7.3.3 Byggmateriel och mineralbaserade produkter

Byggmateriel har huvudsakligen lokala eller regionala värdekedjor eftersom produkterna är tunga och har ett relativt lågt värde i förhållande till vikten. Import och export har därför generellt mindre betydelse än för bränslen och kemikalier. CCU kan framför allt bidra till att minska klimatpåverkan från den inhemska byggsektorn snarare än att förändra handelsmönstren.

7.3.4 Direkt användning av koldioxid

Koldioxid för direktanvändning levereras ofta via internationella industribolag, men koldioxid kommer vanligtvis från koncentrerade sidoströmmar från exempelvis fermentering, biogasuppgradering eller industriella processer. Gasen renas, förvätskas och distribueras från leverantör till användare. På den svenska marknaden finns exempel på inhemsk koldioxid som redan tas tillvara.

Lantmännen Biorefineries i Norrköping tar tillvara koldioxid från spannmålsfermentering, medan Tekniska verken i Linköping uppgraderar koldioxid från biogasproduktion till flytande biogen koldioxid. Det finns dock ingen samlad offentlig statistik som visar ursprunget för all koldioxid som säljs på den svenska industrigasmarknaden. Därför är import och exportbilden svår att kvantifiera, men den direkta handeln med koldioxid bedöms främst ske genom regionala industrigasflöden snarar än som en stor internationell exportmarknad.

7.4 Gemensamma aktörer i värdekedjorna för CCU och CCS

Det finns flera synergier mellan CCU och CCS, och aktörerna i de två värdekedjorna överlappar till stor del. I många steg, såsom avskiljning, transport och teknikutveckling, är det ofta samma typer av aktörer involverade. Den huvudsakliga skillnaden ligger i hur den avskilda koldioxiden hanteras i slutet av kedjan.

Inom CCU används koldioxiden som en råvara i olika processer, vilket innebär att ytterligare aktörer tillkommer i form av producenter och användare av koldioxidbaserade produkter. Inom CCS ligger fokus istället på permanent lagring av koldioxiden, vilket kräver aktörer med kompetens och kapacitet inom geologisk lagring.

Trots dessa skillnader finns betydande möjligheter till samverkan mellan de två systemen. Gemensam infrastruktur, teknikutveckling och kompetens kan delas mellan CCU och CCS, vilket skapar effektivitet och kan bidra till att minska kostnader. Aktörerna i de båda värdekedjorna har därmed goda förutsättningar att dra nytta av varandra och tillsammans bidra till att minska koldioxidutsläppen.

8 Teknikens mognad och FoU-perspektiv

Teknikmognaden varierar mellan olika CCU-tillämpningar, men för de flesta produktkategorier är den tekniska genomförbarheten inte längre det främsta hindret för implementering. I stället begränsas utvecklingen i hög grad av utmaningar kopplat till uppskalning, systemintegration och marknadsförutsättningar.

Bränslen och energibärare samt kemiska produkter bygger på tekniker som är kända och delvis mogna, men deras genomförbarhet begränsas av behovet av att integrera flera steg i större system samt av tillgång till el och vätgas. Byggmaterial och mineralbaserade produkter befinner sig i demonstrations- eller tidig marknadsfas, där tekniken fungerar men uppskalning i hög grad begränsas av anpassning till befintliga produktionsprocesser, standarder och verifiering av materialegenskaper. Direkt användning av koldioxid är tekniskt mogen och etablerad, med begränsade FoU-behov.

System- och infrastrukturlösningar bygger på tekniskt etablerade komponenter, men utmaningarna ligger i att utveckla fungerande och samordnade system mellan aktörer, snarare än i grundläggande teknikutveckling.

Sammantaget finns det ett tydligt gap mellan teknisk mognad och faktisk implementering, där utvecklingen i många fall begränsas mer av system- och marknadsförutsättningar än av den tekniska genomförbarheten i sig.

Teknikens mognad inom CCU varierar mellan olika produktkategorier och delar av värdekedjan, och påverkar hur snabbt olika tillämpningar kan realiseras. I detta kapitel bedöms teknikmognaden övergripande per produktkategori, med fokus på praktisk implementerbarhet snarare än detaljerad klassificering av enskilda tekniska lösningar.

För teknik som inte redan är kommersiell struktureras bedömningen i tre övergripande nivåer:

- Låg - Tidigt utvecklingsskede: forskning och pilotprojekt med begränsad praktisk tillämpning
- Medel - Demonstrationsskede: större pilot- och demonstrationsanläggningar samt initial marknadsintroduktion
- Hög - Marknadsnära eller tidig kommersialisering: tillämpningar i drift, ofta med kvarvarande beroenden av stöd eller särskilda förutsättningar

Indelningen syftar till att ge en praktisk bild av hur nära olika tillämpningar är implementering, snarare än en detaljerad teknisk klassificering.

En viktig utgångspunkt är att teknikmognad inte enbart handlar om enskilda processers eller komponenters utvecklingsnivå, utan också om hur väl dessa kan integreras i större system och värdekedjor². Flera grundläggande tekniska steg, såsom koldioxidavskiljning och kemisk omvandling, är redan demonstrerade eller kommersiellt tillgängliga. Samtidigt kvarstår utmaningar kopplade till uppskalning, samordning av CCU-värdekedjan och stabil drift i industriell skala samt tillgång till infrastruktur och insatsvaror såsom el och vätgas^{2,15}.

FoU-behovet skiljer sig mellan kort och lång sikt. På kort sikt (0–3 år) ligger fokus på processoptimering, kostnadsreduktion och integration i befintliga system. På längre sikt (10–15 år) rör utvecklingsbehoven i större utsträckning nya processvägar för omvandling av koldioxid, utveckling av material som kan binda eller ersätta fossil råvara samt systemlösningar för integrerade CCU-värdekedjor. Detta inkluderar även utveckling av så kallad implicit CCU, där kolatomer tas till vara innan de hunnit bilda koldioxid (se avsnitt 2.2).

Teknikmognad sammanfaller inte nödvändigtvis med marknadsberedskap. För flera CCU-tillämpningar är de tekniska komponenterna beprövade, medan uppskalning begränsas av systemintegration, infrastruktur, regelverk och högre kostnader än för fossila alternativ. Flera analyser pekar också på ett gap mellan forskning, demonstration och kommersialisering, där tekniker som visat god funktion ännu inte implementerats brett⁴⁸.

8.1 Kemiska produkter och intermediärer

Inom kemikaliekategorin är flera av de ingående processtegen tekniskt mogna, särskilt i form av etablerade katalytiska processer och välkända reaktionsvägar. Samtidigt uppstår utmaningar i integrering av koldioxid som råvara i befintliga processflöden, särskilt i värdekedjor där flera tekniska steg och aktörer behöver samverka².

Kortsiktiga FoU-behov är i stor utsträckning kopplade till förbättrad processeffektivitet, exempelvis ökad omvandlingsgrad av koldioxid till önskad produkt och minskad bildning av biprodukter. Vidare är utveckling av katalysatorprestanda central, inklusive högre reaktionshastighet, bättre selektivitet mot målprodukter samt förbättrad stabilitet över tid. Även energieffektiviteten är en avgörande faktor, särskilt i form av minskad energianvändning per producerad enhet och förbättrad integration mellan olika processteg.

Långsiktiga utvecklingsbehov omfattar däremot i större utsträckning nya processvägar och mer flexibla systemlösningar som kan hantera variationer i tillgången på koldioxid och vätgas. Ett exempel är omvandling av koldioxid till kolmonoxid (CO), som kan användas som reduktionsmedel i metallurgiska processer i stället för fossilbaserat kol. Detta utgör inte en kemisk produkt eller intermediär i traditionell mening, utan en alternativ användning av koldioxid inom industriella processer. Sådana lösningar skulle kunna betraktas som en form av CCU, men befinner sig i ett tidigt utvecklingsskede och är i nuläget mindre utvecklade än alternativa lösningar baserade på exempelvis vätgas.

8.2 Bränslen och energibärare

För CCU-baserade bränslen varierar teknikmognaden mellan olika värdekedjor, men många av de centrala processtegen är tekniskt väl kända. Den övergripande utmaningen ligger i att kombinera dessa steg i storskaliga, integrerade system som kan drivas kontinuerligt och kostnadseffektivt, vilket förutsätter koppling mellan flera delar av värdekedjan från avskiljning till slutlig användning².

Uppskalning innebär särskilda utmaningar kopplade till energieffektivitet, värmeintegration och samordning mellan elektrolys, koldioxidförsörjning och syntesprocesser².

På kort sikt dominerar FoU-behov kopplade till samordning av flera processsteg, driftoptimering och minskad energianvändning, medan långsiktiga behov i högre grad rör utveckling av alternativa processkoncept och mer resurseffektiva omvandlingsvägar.

8.3 Byggmaterial och mineralbaserade produkter

För byggmaterial och mineralbaserade produkter varierar den tekniska mognaden mellan olika typer av mineraliserings- och karbonatiseringsprocesser¹¹. Flera lösningar har nått demonstrations- eller tidig marknadsfas, inklusive industriella demonstrationer av koldioxid-härdning i betongproduktion⁶⁹ samt kommersiella lösningar där koldioxid injiceras i färsk betong och mineraliseras direkt i materialet⁷⁰. Det finns även tekniker där koldioxid används för att producera karbonatiserade betongprodukter med reducerad cementandel⁷¹.

Samtidigt återstår utmaningar kopplade till hur dessa processer kan integreras i befintliga produktionsflöden utan att påverka materialegenskaper, produktionshastighet eller kostnadsbild.

Kortsiktiga FoU-behov handlar i stor utsträckning om att säkerställa jämn och förutsägbar processprestanda, exempelvis hur koldioxid reagerar i materialet under olika förutsättningar och hur processen kan anpassas till industriella produktionsförhållanden.

På längre sikt finns utvecklingsbehov kopplade till att bredda tillämpningarna, öka mängden koldioxid som kan bindas i materialen samt utveckla processer som kan integreras mer flexibelt i olika typer av produktionsmiljöer. Exempelvis pågår forskning kring användning av industriella restmaterial och gruvavfall för koldioxidavskiljning genom passiv karbonatisering¹¹. I dessa processer reagerar koldioxid med kalcium-, magnesium- eller kiselrika mineral och binds i stabila karbonatformer, vilket medför att koldioxid kan lagras i material under lång tid. Potentialen för sådana lösningar är beroende av tillgången till lämpliga restmaterial samt möjligheten att integrera processerna i befintliga material- och avfallssystem. Detta är en central förutsättning för uppskalning inom denna produktkategori som helhet, utöver behov kopplade till standardisering och hantering av befintliga regelverk¹¹. Fortsatt forskning och utveckling är därmed viktig för att möjliggöra dessa steg.

8.4 Direkt användning av koldioxid

För direkt användning av koldioxid är teknikmognaden generellt hög, då många tillämpningar baseras på etablerade processer och användningsområden. Avskiljning av koldioxid kan däremot i vissa fall utgöra en begränsande faktor, särskilt i mindre eller distribuerade system.

FoU-behoven är därför relativt begränsade jämfört med övriga kategorier och är främst kopplade till processeffektivisering, rening av koldioxid samt integration i lokala system. I vissa fall finns även utvecklingsbehov kopplade till att anpassa tekniska lösningar till varierande kvalitet på koldioxidflöden, snarare än att utveckla helt nya användningsområden.

8.5 System- och infrastrukturlösningar

Teknikmognaden för system- och infrastrukturlösningar varierar mellan olika delar av värdekedjan. Enskilda komponenter, såsom transport, komprimering och lagring av koldioxid, är i många fall tekniskt etablerade, särskilt inom CCS-relaterade tillämpningar.

Utmaningarna är i stället kopplade till att utveckla integrerade system som möjliggör flexibel och effektiv koppling mellan flera källor och användare av koldioxid. FoU-behoven handlar därför i hög grad om systemdesign, logistik och driftoptimering, snarare än om grundläggande teknikutveckling. På längre sikt kan

även utveckling av standardiserade lösningar för koldioxidhantering och integration i energisystemet vara centrala².

8.6 Jämförelse av produktkategorier

För att sammanfatta skillnader i teknikmognad och övergripande genomförandehinder mellan produktkategorier presenteras i Tabell 6 en syntes baserad på analysen i detta kapitel. Tabellen utgör en kvalitativ syntes av teknikmognad och centrala genomförandehinder per produktkategori i ett svenskt perspektiv, baserad på analysen i kapitlet. Fokus ligger på vad som i praktiken begränsar uppskalning snarare än på en exakt klassificering av mognad. Som vägledning för att tolka skalan för teknikmognad (Låg-Medel-Hög) hänvisas till de nivåer som beskrivs i kapitlets inledning (Tidigt utvecklingsskede / Demonstrationsskede / Marknadsnära eller tidig kommersialisering).

Tabell 6: Övergripande jämförelse av CCU-tillämpningars teknikmognad (Låg-Medel-Hög) och huvudsakliga genomförandehinder.

Produktkategori	Teknikmognad (övergripande)	Huvudsakligt genomförandehinder
Kemiska produkter och intermediärer	Medel	Anpassning till befintliga processer samt tillgång till el och vätgas
Bränslen och energibärare	Medel	Tillgång till el, vätgas och samordning mellan delar av värdekedjan
Byggmaterial och mineralbaserade produkter	Medel	Standarder, certifiering och marknadsacceptans
Direkt användning av koldioxid	Hög	Begränsad efterfrågevolym och liten systempåverkan
System- och infrastrukturlösningar	Medel	Samordning mellan aktörer samt hög investeringsrisk

För kemiska produkter och bränslen bygger flera tillämpningar på likartade tekniska processteg, vilket innebär att skillnader i teknikmognad i hög grad är kopplade till integration med befintliga processer och marknadsförutsättningar snarare än till de enskilda reaktionerna i sig. Kategorin kemiska produkter omfattar samtidigt ett brett spektrum av tillämpningar, vilket innebär att teknikmognaden varierar mellan olika processer. Exempelvis har metanol en relativt hög mognad för CCU-baserade lösningar, medan specialpolymerer och andra högvärdiga kemikalier generellt befinner sig på en lägre mognadsnivå. Vidare är de huvudsakliga genomförandehindren i flera fall likartade mellan kategorier och kopplade till tillgång till el och vätgas, systemintegration samt marknadsförutsättningar.

För övriga produktkategorier är bilden något annorlunda. Byggmaterial och mineralbaserade produkter kännetecknas av att tekniken i många fall är fungerande men att uppskalning främst begränsas av standardisering, certifiering och anpassning till befintliga produktionsprocesser. Direkt användning av koldioxid utgör en tekniskt mogen kategori, där begränsningarna snarare ligger i ett lågt behov och därmed begränsad betydelse för att minska större koldioxidflöden. System- och infrastrukturlösningar bygger i huvudsak på etablerad teknik, men deras genomförbarhet är beroende av samordning mellan aktörer och utveckling av sammanhängande värdekedjor.

9 CCS utanför industrin – kompletterande nulägesbild

Utanför industrin är CCS-tillämpningar inom energi- och avfallssektorn de mest relevanta områdena i en svensk kontext, särskilt kopplat till potentialen för negativa utsläpp genom bio-CCS och de stora mängder koldioxid som sektorn producerar. Biogasproduktion bedöms också vara en relevant tillämpning, eftersom koldioxiden redan avskiljs i samband med uppgradering av biogas till biometan, men de enskilda volymerna är mindre och kan därför kräva samordning, gemensam infrastruktur eller klusterlösningar för att bli kostnadseffektiva i större skala.

Tillämpningar av CCS inom mobila system bedöms i nuläget ha lägre relevans till följd av tekniska och logistiska utmaningar, där utsläppen ofta är spridda över många små utsläppspunkter, vilket försvårar avskiljning, hantering och transport av koldioxid och därmed förstärker både komplexitet och kostnader. Detta innebär att utvecklingen i närtid främst förväntas vara koncentrerad till stationära punktkällor.

Kapitlet syftar till att ge en översiktlig bild av vilka tillämpningar som är relevanta att beakta i en svensk kontext och fungerar som ett komplement till den huvudsakliga genomgången av CCU. Syftet är att säkerställa att relevanta CCS-tillämpningar inte förbises i nulägesbilden, särskilt i de fall där de inte faller inom traditionell processindustri men ändå är relevanta i relation till Industriklivet. Kapitlet hålls på en översiktlig kvalitativ nivå och syftar inte till en fördjupad analys av teknik, kostnader eller styrmedel.

Exemplen som redovisas i kapitlet sammanfattas i Tabell 7 och avser tillämpningar inom energi- och avfallssektorn, biogasproduktion och mobila tillämpningar. Tabellen visar exempel på aktörer och projekt, uppskattad kapacitet, koldioxidens ursprung samt en övergripande bedömning av relevansen i ett svenskt sammanhang.

Tabell 7: Exempel på olika tillämpning av CCS utanför industrin

Tillämpning	Energi- och avfallssektor			Biogasproduktion	Mobila tillämpningar
Exempel	Stockholm Exergi	Öresunds-kraft	Renova	Göteborg Energi	Mazda, Toyota, Scania
Kapacitet	800 000 ton/år	200 000 ton/år	100 000 ton/år	7 000 ton/år	-
CO₂ ursprung	Biogen	Fossil och biogen	Fossil och biogen	Biogen	Fossil, biogen och atmosfärisk
Relevans		Hög		Medel	Låg

9.1 Energi- och avfallssektorn

Kraft och fjärrvärmeproduktion omfattar anläggningar som producerar värme och el med bränslen såsom kommunalt restavfall, returbränsle och skogsbiomassa. Avfallsförbränning ger upphov till både biogena och fossila koldioxidutsläpp eftersom avfallet innehåller både biobaserade och fossilbaserade material, exempelvis plast. Anläggningar som eldas med skogsbiomassa ger däremot huvudsakligen upphov till biogen koldioxid. CCS bedöms därför ha hög relevans i sektorn, både för att minska fossila utsläpp och för att möjliggöra negativa utsläpp genom permanent lagring av biogen koldioxid.

Till skillnad från många andra energianläggningar kan avfallsförbränningsanläggningar inte enkelt minska sina utsläpp genom bränslebyte, eftersom de behandlar det avfall som uppstår i samhället. CCS kan därför vara en viktig åtgärd för att minska klimatpåverkan från de fossila utsläppen. Samtidigt behöver styrningen hantera risken för inlåsning. CCS bör inte minska incitamenten att förebygga avfall, öka materialåtervinningen eller flytta kolatomer högre upp i avfallshierarkin, men kan vara relevant för de avfallsflöden där förbränning fortsatt bedöms vara den bästa behandlingslösningen⁷².

Konkreta svenska exempel är Stockholm Exergis bio-CCS-projekt i Värtan, där upp till omkring 800 kton biogen koldioxid per år planeras att avskiljas och lagras permanent⁷³, Öresundskrafts CCS-satsning vid Filbörnaverket i Helsingborg, där omkring 200 kton koldioxid per år kan avskiljas⁷⁴, samt Renovas planerade CCS/CCU-satsning vid Sävenäs avfallskraftvärmeverk i Göteborg⁷⁵.

9.2 Biogasproduktion

Biogasanläggningar behandlar organiskt material, såsom matavfall, gödsel, avloppsslam och andra biologiska restflöden, genom rötning. Processen producerar rå biogas, som huvudsakligen består av metan och koldioxid. För att biogasen ska kunna användas som fordonsgas eller matas in på gasnätet uppgraderas den ofta till biometan. Vid uppgraderingen separeras koldioxid från metan, vilket innebär att en

relativt koncentrerad biogen koldioxidström redan uppstår vid många biogasanläggningar.

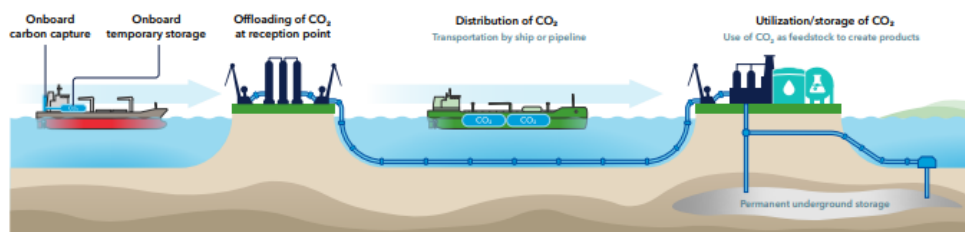
Eftersom koldioxiden redan avskiljs i uppgraderingsprocessen handlar CCS främst om att rena, kondensera eller komprimera den för transport och permanent lagring. Detta gör avskiljningssteget mindre komplext än vid exempelvis kraftvärme- och avfallsförbränningsanläggningar. Bio-CCS från biogas kan därmed bidra till negativa utsläpp, men de enskilda anläggningarnas volymer är ofta små. Kostnadseffektiv uppskalning bedöms därför i många fall kräva samordning, gemensam infrastruktur eller klusterlösningar.

Ett konkret svenskt exempel är Göteborg Energis planerade bio-CCS-projekt vid biogasanläggningen Gasendal, där omkring 7 kton biogen koldioxid per år skulle kunna kondenseras och transporteras för permanent lagring. Flera andra svenska biogasanläggningar separerar eller kan separera koldioxid i samband med uppgradering till biometan, och i vissa fall finns även teknik eller planer för att förvätska koldioxiden. Hur den separerade koldioxiden slutligen ska användas eller om den ska lagras permanent är dock inte alltid offentligt redovisat.

9.3 Mobila tillämpningar

9.3.1 Sjöfart

Tillämpning av CCS inom sjöfart bedöms ha låg relevans i ett svenskt perspektiv i nuläget, särskilt jämfört med stationära punktkällor inom energi- och avfallssektor och biogasproduktionen. CCS skulle kunna tillämpas genom avskiljning och mellanlagring av koldioxid ombord för vidare hantering i hamn, men tekniken innebär betydande tekniska och logistiska utmaningar kopplade till utrymme, energibehov, hantering av koldioxid och behov av mottagningsinfrastruktur i hamn⁷⁶. Denna logistik kan visualiseras i Figur 8.



Figur 8: Process för ombord avskiljning av koldioxid

Flera tekniker för avskiljning studeras, bland annat aminbaserad avskiljning, membran- och kryoteknik samt karbonatiseringsbaserade lösningar⁷⁶. För LNG utredas också avskiljning före förbränning där bränslet först omvandlas till vätgas och koldioxid genom reformering, så att koldioxid kan avskiljas innan den

vätgasrika gasen förbränns⁷⁶. Oavsett teknik krävs att den avskilda koldioxiden mellanlagras ombord och transporteras vidare till användning eller permanent lagring, vilket innebär att hela värdekedjan behöver byggas ut.

Sjöfartens omställning bedöms därför i första hand drivas av flera parallella lösningar snarare än av CCS som huvudspår. Alternativen omfattar energieffektivisering, rutt- och hastighetsoptimering, landström i hamn, elektrifiering för kortare rutter samt övergång till alternativa bränslen som biobränslen, metanol, ammoniak och vätgas^{77,78}. DNV⁷⁹ bedömer samtidigt att CCS kan få en roll på längre sikt, med en möjlig introduktion under 2030-talet och uppskalning från omkring 2040, främst för fartyg där alternativa bränslen är svåra eller kostsamma att införa. En sådan utveckling förutsätter dock utbyggd infrastruktur samt ekonomiska styrmedel, vilket innebär att CCS- och CCU-baserade lösningar i nuläget bedöms ha begränsade förutsättningar att etableras i någon större omfattning.

9.3.2 Vägtransport

För vägtransportsektorn bedöms CCS ha låg direkt relevans, eftersom omställningen i första hand drivas av elektrifiering, energieffektivisering och byte till fossilfria eller lågutsläppsbränslen. Batterielektrifiering bedöms dominera för personbilar, lätta lastbilar och stadsbussar, medan tunga transporter sannolikt kommer att kräva en kombination av batterielektriska fordon, vätgas, biodrivmedel, elektrobränslen och effektivare logistik. CCS kan däremot ha en indirekt roll genom att minska utsläpp från produktionen av bränslen, el, vätgas och batterimaterial samt genom bio-CCS och andra negativa utsläpp.

Ombordbaserad koldioxidavskiljning från vägfordon befinner sig fortfarande på koncept- eller demonstrationsnivå och bedöms inte vara en huvudlösning för sektorn. De främsta utmaningarna är utrymmesbehov, ökad vikt, energianvändning och extern hantering av den avskilda koldioxiden. Utrustning tar plats, ökar fordonets vikt och kräver energi, vilket kan påverka både lastkapacitet och bränsleförbrukning.

Internationellt finns demonstrationsprojekt, bland annat från Mazda och Toyota. Mazda har exempelvis testat ett mobilt koldioxidavskiljningssystem från avgaser i en tävlingsbil⁸⁰. Toyota har också testat koldioxidavskiljning från luften i anslutning till en vätgasdriven förbränningsmotor⁸¹. I Sverige har Scania studerat sorbentbaserad koldioxidavskiljning för dieseldrivna tunga lastbilar. Studierna visar att tekniken är tekniskt möjlig, men att energibehov, kostnader och koldioxid hantering fortfarande utgör betydande hinder⁸².

10 Övergripande observationer och kvarstående frågeställningar

Den samlade analysen identifierar ett antal återkommande mönster och osäkerheter som påverkar hur olika CCU-tillämpningar kan utvecklas i ett svenskt perspektiv. Kapitlet sammanfattar dessa utan att ta ställning till prioriteringar eller val av åtgärder.

10.1 Reflektion kring rapportens metod och avgränsningar

De övergripande observationerna ska tolkas i ljuset av rapportens metod och avgränsningar (se kapitel 1.3). Att analysen har strukturerats utifrån produktkategorier baserade på slutanvändning påverkar hur tillämpningarna avgränsas och jämförs. Samma produkt, exempelvis metanol, kan ges olika betydelse beroende på om den används som bränsle eller råvara för kemisk produktion. I praktiken innebär detta att tekniskt närliggande tillämpningar behandlas separat i rapporten, eftersom deras roll i energisystemet och deras marknadsförutsättningar skiljer sig åt.

Denna ansats möjliggör en tydligare koppling till efterfrågan och policy, men innebär samtidigt tekniska synergier blir mindre synliga. Exempelvis kan gemensamma behov av infrastruktur, avskiljningsteknik eller tillgång till vätgas delas mellan tillämpningar som här analyseras var för sig. Även möjligheten att styra användningen av vissa produkter (som metan eller metanol) mellan olika slutmarknader utifrån efterfrågan och styrmedel kan därmed framstå som mindre central i analysen.

Ett alternativ hade varit att strukturera analysen utifrån tekniska delsteg i värdekedjan, såsom avskiljning och omvandlingsprocesser, där omvandlingsprocesser i sin tur hade kunnat delas in i vätgasbaserade och icke-vätgasbaserade processer. En sådan uppdelning hade kunnat synliggöra andra typer av mognad, hinder och utvecklingsbehov, exempelvis mer teknikspecifika förutsättningar eller potential för lärande och standardisering mellan tillämpningar.

De metodmässiga begränsningarna bör beaktas vid tolkning av resultaten, särskilt i frågor som rör teknikmognad, där mognaden i praktiken kan vara mer kopplad till specifika processteg än till slutlig produktkategori.

10.2 Var finns de största osäkerheterna?

En central osäkerhet rör efterfrågan, betalningsvilja och värdekedjornas utveckling. För flera tillämpningar saknas etablerade marknader eller tydliga prisnivåer, samtidigt som efterfrågan i många fall är beroende av styrmedel. För bränslen och energibärare dominerar osäkerheter kopplade till implementering och långsiktighet, inklusive risken för förändringar, i de styrmedel som är avsedda att driva efterfrågan framåt. För kemiska produkter finns mer grundläggande osäkerheter i hur marknader för hållbara alternativ kan utvecklas, för att uppnå konkurrenskraft gentemot fossilbaserade produkter. För byggmaterial och mineralbaserade tillämpningar är snarare regelverk, standarder och marknadsacceptans avgörande begränsningar.

Samtidigt förutsätter flera CCU-tillämpningar att värdekedjan med avskiljning, transport, omvandling och användning utvecklas parallellt. Dessa ömsesidiga beroenden innebär att utvecklingen i en del av kedjan kan påverka genomförbarheten i andra delar, vilket skapar osäkerhet i investeringar och uppskalning.

Ytterligare en osäkerhet rör tillgången på centrala insatsvaror och hur dessa fördelas mellan olika tillämpningar, särskilt fossilfri el, vätgas och biogent eller återvunnet kol. Osäkerheter kring tillgång, kostnadsutveckling och geografisk tillgänglighet på dessa resurser innebär att olika tillämpningar i praktiken konkurrerar om samma resurser. Resursbegränsningar kan därmed påverka vilka tillämpningar som utvecklas, samt i vilken utsträckning de kan skalas parallellt.

Det finns även osäkerheter kopplade till klimatnyttans utfall. Klimatprestandan påverkas av flera faktorer, inklusive energianvändning, produktens livslängd och vilken fossil värdekedja som ersätts. Detta innebär att resultatet kan variera kraftigt även inom de olika produktkategorierna beroende på hur och i vilken energisystemkontext en specifik produkt produceras och hur den används. Därtill påverkas bedömningen av vilka metodval och systemgränser som används för att värdera klimatnyttan, vilket kan skilja sig mellan tillämpningar och aktörer.

En återkommande punkt i rapporten är att CCU behöver bedömas både i relation till alternativa sätt att utnyttja koltatomerna, exempelvis genom att undvika förbränning, och i relation till alternativa sätt att uppfylla den CCU-baserade produktens funktion, exempelvis genom direkt elektrifiering, materialåtervinning eller användning av biobaserade råvaror (se t.ex. avsnitt 2.2, 2.4.2 och 3.2). De kvarstående frågeställningarna handlar därför inte enbart om hur CCU kan utvecklas, utan även om i vilka fall CCU utgör ett mer eller mindre resurseffektivt alternativ jämfört med andra åtgärder. Detta är särskilt relevant i tillämpningar med högt energi- och resursbehov, där konkurrensen om fossilfri el och vätgas är en avgörande systemfaktor.

Slutligen finns osäkerheter kring regelverk, klassificering och hur olika tillämpningar värderas, vilket påverkar investeringsförutsättningar och marknadsutveckling. Detta gäller särskilt gränsdragningar mellan CCU, CCS och andra lösningar samt hur klimatnytta redovisas.

10.3 Vilka frågor kvarstår för fortsatt analys?

Mot bakgrund av dessa osäkerheter framträder ett antal frågor som särskilt relevanta för fortsatt analys:

- Hur kan olika CCU-tillämpningar jämföras utifrån klimatnytta, resursanvändning och systemeffekter, givet att dessa varierar mellan tillämpningar?
- Hur utvecklas efterfrågan och betalningsviljan i relation till produktionskostnader för koldioxidbaserade produkter i olika sektorer, och i vilken utsträckning drivs denna av marknad respektive policy?
- Hur påverkar lokal/regional tillgång på el, vätgas och biogent eller återvunnet kol möjligheter att skala olika typer av CCU-tillämpningar?
- Hur kan beroenden och samordningsbehov i värdekedjor hanteras i ett uppbyggnadsskede där flera delar ännu inte är etablerade eller kommersiellt mogna?
- Hur utvecklas samspelet mellan CCU, CCS och andra omställningsspår, såsom elektrifiering, materialåtervinning och biobaserade lösningar, i olika sektorer?
- Hur påverkar regelverk och styrmedel förutsättningarna för olika typer av CCU, inklusive hur klimatnytta redovisas och värderas samt hur olika klassificeringar påverkar investeringsincitament?
- I vilka typer av tillämpningar bedöms CCU utgöra ett relevant komplement till andra lösningar, snarare än ett alternativ, och hur varierar detta mellan sektorer?

Sammantaget visar analysen att CCU omfattar tillämpningar med olika roller, förutsättningar och systemeffekter. Detta innebär att fortsatt analys i många fall behöver ta hänsyn till skillnader mellan tillämpningar, snarare än att behandla CCU som ett enhetligt område.

Om CIT Renergy

CIT Renergy AB är ett helägt dotterbolag till Stiftelsen Chalmers Industriteknik med energirelaterad konsultverksamhet inom de fyra affärsområdena Industri, Byggd Miljö, Samhälle och Inomhusmiljö. CIT Renergy har totalt ca 35 medarbetare.

Vår unika kompetens består av att kombinera detaljerad teknisk kunskap med ett övergripande energisystemperspektiv. Vi är specialiserade på analyser och utredningar av energisystem och energitekniker samt energieffektivisering och inomhusmiljö. Vi har lång erfarenhet av att arbeta med den energiintensiva industrin såväl som med bebyggelsens energibehov samt med strategiska frågor kring energiplanering och energisystem generellt. Vi har också stor vana vid att arbeta med uppdrag från olika myndigheter, näringsliv samt offentligfinansierade projekt. En stor andel av våra medarbetare har disputerat.

Vi är certifierade enligt ISO 9001 för kvalitet och ISO 14001 för miljö.

Referenser

- ¹ Energimyndigheten (2024): Vätgas för energi- och klimatomställning – Slutrapport inom uppdraget att samordna arbetet med vätgas i Sverige (ER 2024:25)
- ² Renström m.fl. (2026): Vätgasens roll i energi- och klimatomställningen – En kombinerad system- och syntesstudie om vätgas och elektrobränslens roll i framtidens sektorkopplade energisystem | Energiforsk (Rapport 2026-1171)
- ³ CCSA (2026): CCSA Europe Market Study 2026
- ⁴ European Commission (2022): Innovation Fund. Project Air- Production of sustainable methanol as raw material for chemical products by first-of-a-kind Carbon Capture and Utilization process integrated with world scale electrolysis unit.
- ⁵ IRENA and Methanol Insitute (2021): Innovation Outlook - Renewable Methanol
- ⁶ Energimyndigheten (2023): Styrmedel för CCS och CCU (ER 2023:26)
- ⁷ European Commission (2024). Commission welcomes political agreement on EU-wide certification scheme for carbon removals.
- ⁸ Fossilfritt Sverige (2024): Strategi för biogen koldioxidinfångning | Fossilfritt Sverige
- ⁹ Höglund (2023): When do sales of carbon removal credits benefit climate?
- ¹⁰ Clean Air Task Force, CONCITO (2025): Pricing it right: Accounting for non-permanent CCU while safeguarding the EU ETS
- ¹¹ Energimyndigheten (2025): Industrin – nuläge och förutsättningar för omställning: En nulägesanalys av svensk industris klimatomställning för år 2025 (ER 2025:38).
- ¹² Erickson, Lazarus, and Tempest (2015): Carbon lock-in from fossil fuel supply infrastructure
- ¹³ Sveriges riksdag (2022): Certifieringsramverk för upptag och infångning av koldioxid
- ¹⁴ Svensson m.fl. (2023): Områdesanalys för kartläggning av biogena kolflöden - skog | BioInnovation
- ¹⁵ Pettersson m.fl. (2025): Sveriges kolbalans – nulägesbild och möjliga framtida utvecklingar | Klimatledande Processindustri
- ¹⁶ Fursjö m.fl. (2022): Bio-elektro-bränslen - teknik med potential för ökad resurseffektivitet | f3 centre
- ¹⁷ Pettersson och Wickman (2025): Bio+ | Klassificering och hållbarhetskriterier för förnybara drivmedel i EU - vad gäller egentligen? | Bio+
- ¹⁸ Lassesson m.fl. (2021): Kemisk återvinning av plast | Naturvårdsverket
- ¹⁹ Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2023/2413
- ²⁰ Kommissionens delegerade förordning (EU) 2023/1184
- ²¹ Kommissionens delegerade förordning (EU) 2023/1185
- ²² Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2023/2405
- ²³ Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2023/1805
- ²⁴ SFS 2021:747. Lag om ändring i lagen (2017:1201) om reduktion av växthusgasutsläpp från vissa fossila drivmedel
- ²⁵ Energimyndigheten (2025): Lagändringar på gång för hållbarhetskriterier och reduktionsplikt
- ²⁶ Beiron m.fl (2026): Locked in on RFNBOs – Will EU mandates for drop-in synthetic aviation fuels lead to decreased energy- and cost-efficiency? | Fuel
- ²⁷ Naturvårdsverket (2026): Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk.
- ²⁸ Heidelberg Materials (2025): CCS-satsningen vid cementfabriken i Slite pausas.
- ²⁹ Liquid Wind (2026): Liquid Wind AB Declared Bankrupt
- ³⁰ Vattenfall: Minska industrins växthusgasutsläpp
- ³¹ Dagens Industri (2025): Ny motgång – ytterligare ett miljardprojekt på paus
- ³² Vattenfall (2024): Vattenfall ser över HySkies-projektet
- ³³ Saffinvestor (2024): Uniper abandons SkyFuelH2 e-SAF project

- ³⁴ Energimyndigheten (2026): 231 miljoner kronor i stöd för satsning på hållbart flygbränsle
- ³⁵ OX2 (2026): OX2, Södra och TES går vidare med projekt för elektrisk naturgas i Varö, Sverige
- ³⁶ Bra Group (2026): Skavsta och Fortum Tecknar LOI om Etablering av Hållbara Industri- och Energilösningar
- ³⁷ Green birch (2026): Green Birch: From waste to sustainable jet fuel
- ³⁸ Lantmännen (2020): Linde och Lantmännen Agroetanol bygger ut koldioxidanläggningen Norlic i Norrköping
- ³⁹ Naturvårdsverket (2022): Industrins klimatomställning
- ⁴⁰ Jordal et al. (2026): Potential and challenges for CDR in the European pulp and paper sector
- ⁴¹ CIT Renergy & RISE (2025): Net Zero Industry Act. 2025 års rapportering av artikel 21.2 och 21.3 i kapitel 3 i förordningen. 21.3 i kapitel 3 i förordningen | Energimyndigheten (ER 2026:05)
- ⁴² Pettersson och Axelsson (2025): Cost-effective supply chain configurations for the production of bioelectro- and electrofuels – the case of Sweden | IEA Bioenergy
- ⁴³ National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2024): Mineralization of CO2 to Inorganic Carbonates.
- ⁴⁴ Olsson m.fl. (2022): Carbon accounting in Bio-CCUS supply chains - Identifying key issues for science and policy | IEA Bioenergy
- ⁴⁵ Ghat et al. (2025): Circularity within carbon capture networks: A review of capture and utilization technologies | Journal of CO₂ Utilization.
- ⁴⁶ Nippon Steel Corporation (2022): Overview and Research Examples of CCU, Carbon Dioxide Capture and Utilization from Steel-making Industry.
- ⁴⁷ Svensson m.fl. (2025): Koleffektiv produktion av biometan eller -metanol: Utvärdering av värdekedjor för förnybara kemikalier och bränslen | Klimatledande processindustri
- ⁴⁸ Energimyndigheten (2026): Styrmedel för en fossilfri sjöfart – Åtgärder och stöd för sjöfartens omställning (ER 2026:03)
- ⁴⁹ Grahn et al. (2022): Review of electrofuel feasibility—cost and environmental impact | Progress in Energy.
- ⁵⁰ Ny Teknik (2026): Liquid Winds konkursförvaltare: Målet är att sälja rörelsen som en helhet.
- ⁵¹ Regeringen (2026). Utredning föreslår handlingsplan för hållbara drivmedel för luftfart och sjöfart.
- ⁵² National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024): Carbon Utilization Infrastructure, Markets, and Research and Development: A Final Report | The National Academies Press.
- ⁵³ Karlsson (2024): Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of pathways towards decarbonization of buildings and transport infrastructure | Chalmers University of Technology
- ⁵⁴ TT (2026). Tekniska verken först i landet med livsmedelscertifierad koldioxid från biogasproduktion.
- ⁵⁵ MAP-IT CCU project (2025): Pipeline transport
- ⁵⁶ World Economic Forum (2025): Defossilizing Industry: Considerations for Scaling-up Carbon Capture and Utilization Pathways.
- ⁵⁷ SKGS (2023): The Swedish Industry's demand for electricity up to 2035
- ⁵⁸ Lanting et al. (2025): Prospective techno-economic assessment of carbon capture & utilization and biobased processes for methanol and ethanol production
- ⁵⁹ IKEM (2024): EU Agenda for competitiveness and transition
- ⁶⁰ Tillväxtverket (2026): Kartläggning av kemiindustrin i Sverige
- ⁶¹ Energimyndigheten (2024): Rapport drivmedel 2024
- ⁶² IVL (2024): Blue supply chains
- ⁶³ Nordion Energi (2025): Nordion Energi möjliggör svensk biogas i Göteborgs hamn

-
- ⁶⁴ St1 (2026): From refinery to runway: Sustainable aviation fuel from St1 powers daily Danish flights
- ⁶⁵ St1 (2025): A Year of SAF – welcome aboard
- ⁶⁶ St1 (2024): St1 SAF and e-fuels production
- ⁶⁷ Biorefinery Östrand (2026): Vår lösning - Ett bioraffinaderi för vår framtid
- ⁶⁸ Energimyndigheten (2025): Sveriges energisystem
- ⁶⁹ Wang et al. (2022). An industrial demonstration study on CO2 mineralization curing for concrete | iScience
- ⁷⁰ Monkman (2017): Calculating Sustainability Impacts of CarbonCure Ready Mix | Journal of Cleaner Production
- ⁷¹ Prentice, Raab and Sant (2021). Field demonstration of the Reversa mineral carbonation process | National Carbon Capture Center
- ⁷² Naturvårdsverket (2025): Avfallshierarkin visar stegen vi behöver ta
- ⁷³ Stockholm Exergi (2025): Building Beccs Stockholm
- ⁷⁴ Innozero (2026): Helsingborg Approves CCS – Öresundskraft Moves Forward with Carbon Capture Project
- ⁷⁵ Renova (2026): Nu förbereds för koldioxidinfångning
- ⁷⁶ DNV (2024): The potential of onboard carbon capture in shipping
- ⁷⁷ IMO (2023): Strategy on Reduction of GHG emissions from ships
- ⁷⁸ Trafikverket (2021): Sjöfartens användning av alternativa bränslen
- ⁷⁹ DNV (2025): Energy Transition Outlook: Carbon Capture and Storage to 2050
- ⁸⁰ Mazda (2025): Mazda Begins Demonstration Experiment of Onboard CO₂ Capture System
- ⁸¹ Toyota (2023): Evolution of Hydrogen Technology and Taking on New Challenges in Australia
- ⁸² InsideEVs (2024): Toyota's New Engine Can Suck Carbon Out Of The Air