

Marts 2023

Potentialet i et europæisk CCS-marked set fra et dansk perspektiv

Kontakt

Partner
Henrik Mulvad
Tlf. 30934016
E-mail: hmu@kraka-advisory.com

Ledende økonom
Kristian Stamp Hedeager
Tlf. 61650183
E-mail: ksh@kraka-advisory.com

Økonom
Joacim Madsen
Tlf. 28722172
E-mail: jom@kraka-advisory.com

1. Sammenfatning

CCS er nødvendigt for at nå klimamål

Fangst, transport og lagring af CO₂ i underjordiske reservoirer (CCS) er blandt de teknologier, som bliver afgørende for, at internationale klimamål kan opfyldes. Mange udledningsskilder kan ikke reducere udledninger i tilstrækkelig grad, hvorfor det er nødvendigt at indfange CO₂. På sigt skal globale nettoudledninger være negative, og det kræver, at man kan fjerne CO₂ fra atmosfæren. I samspil med en række andre vigtige tiltag, skal CCS altså spille en central rolle i opfyldelsen af de globale klimaambitioner.

Store forskelle på europæiske landes muligheder for egen CO₂-lagring

Der er store forskelle på de europæiske landes muligheder for at lagre CO₂. Lande med rig adgang til underjordiske reservoirer i fx Nordsøen, som Danmark, Norge og Storbritannien, kan lagre deres egne CO₂-udledninger i mange år. Andre lande som Tyskland og Polen har store lagringsbehov, men mindre mulighed for CO₂-lagring og nogle lande har slet ingen plads. Derfor er der behov for at etablere et internationalt marked for handel og transport af CO₂.

CCS bliver billigere i takt med at markedet modnes

Et internationalt samarbejde kan også bidrage til, at omkostningerne ved CCS reduceres markant. Det skyldes, at omkostningerne er høje, når man lagrer små mængder CO₂, men har potentiale til at blive halveret ved større mængder. Danmark og andre lande med gode lagringsmuligheder kan på kort sigt ikke indfange nok CO₂ til at opnå de fordelagtige skalaeffekter. De opnås kun hvis markedsstørrelsen øges, hvorfor der er behov for at etablere en fælles europæisk infrastruktur til transport og handel med CO₂ fra flere andre lande.

Markedspotentialet for CCS i Europa er stort

Den samlede mængde CO₂, som potentielt kan lagres på tværs af EU-landene i år 2030, opgøres til mellem ca 360 og 790 mio. ton CO₂. Et årligt markedspotentiale i denne størrelsesorden kræver et solidt og sikkert netværk for transport og løbende monitorering af lagringsfaciliteter. Sådant et system kræver international koordination og standardisering, som oplagt kan varetages i EU-regi.

CCS kan bidrage til dansk økonomi og beskæftigelse

Et europæisk marked anslås at kunne nå en samlet økonomisk værdi på mellem 450 og 1.000 mia. kr. De lande som deltager i et fremtidigt marked for CCS, kan se frem til at få del i markedet, men det er usikkert, hvor stor del der tilfalder hvert enkelt land. Hvis Danmarks andel af markedet fx udgør 5 til 10 pct., anslås den økonomiske værdi at nå mellem 23 og 100 mia. kr. Opstår CCS-branchen en sådan størrelse, anslås det samtidig, at antallet af arbejdspladser, som direkte og indirekte kan blive beskæftiget i CCS-branchen, vil ligge mellem 4.000 og 17.000 personer.

Danmark kan blive foregangsland indenfor CCS

Danmarks muligheder som modtagerland for CO₂-lagring er allerede gode i dag. Denne position forstærkes dog kun i fremtiden, i takt med at CO₂-udledninger falder og man løbende kortlægger mere egnet lagringskapacitet. I Danmark er der allerede politisk velvilje til lagring af CO₂, hvorfor det er oplagt, at Danmark går forrest i arbejdet med at skabe et europæisk marked for fangst, transport og lagring af CO₂. Dansk CO₂-lagring i stor skala kan samtidig bane vejen for investeringer i udvikling og anvendelse af fangst-teknologier, som mange virksomheder alternativt ville være tilbageholdende med i fravær af aftagere af CO₂.

2. Hvad er CCS?

CO₂ indfanges og lagres sikkert

CCS (Carbon Capture and Storage) er fællesbetegnelsen for de teknologier og processer, som først fanger CO₂ for derefter at transportere og lagre den.

Fangstanlæg isolerer CO₂'en

CO₂ kan indfanges på flere måder, men det sker oftest gennem en kemisk proces, hvor man forsimplet sagt isolerer CO₂'en fra de gasser, som frigives ved afbrænding af fossile brændsler og i forbindelse med industrielle processer. Det kan lade sig gøre ved at installere fangstanlæg på kilder, hvor der er store udledninger af CO₂.

CO₂-fangsten foregår ved såkaldte punktkilder

Det største potentiale for CO₂-fangst gælder udledninger fra såkaldte "CO₂-punktkilder". Eksempler på punktkilder er energiproduktion baseret på kul eller biogas, kraftvarmeværker, affaldsforbrændingsanlæg og CO₂-intensive industrianlæg, såsom cement- og kemikalieproduktion. Udledninger fra punktkilder kan deles op i biogene og fossile udledninger. Dertil kommer, at CO₂ også kan fanges direkte fra luften.

CO₂ transporteres på flydende form

CO₂ kan derefter transporteres frem til de lokationer, hvor man ønsker at lagre det, gennem rørledninger eller i tanke på lastbiler eller specialbyggede tankskibe. Transport muliggøres ved, at man sætter den opfangede CO₂ under tryk, hvorved den overgår til flydende form.

Lagringen foregår bl.a. i udtømte olie-felter, som monitoreres for udslip

Lagringen finder sted ved, at CO₂ ledes ind i i geologiske stenformationer eller udtømte olie- eller naturgasfelter, som er placeret dybt i undergrunden. Velegnede reservoirer til CO₂-lagring er sjældne, da de skal opfylde en række vigtige krav, som sikrer, at CO₂'en ikke undslipper og siver op til overfladen igen. Derfor afsøges egnede reservoirer løbende, hvor der også foretages grundige vurderinger af sikkerhed for mennesker og miljø samtidig med, at der er behov for vedvarende overvågning af anvendte reservoirer og den øvrige infrastruktur.

3. CCS er nødvendigt for at nå klimamål

CCS er nødvendigt for at opnå klimamål, men kan ikke stå alene

For at nå verdens klimamål er det nødvendigt at anvende nye teknologier og teknikker, som er med til at reducere drivhusgasudledningerne. CCS er blandt de teknologier, som bliver afgørende. Det er der enighed om blandt en bred vifte af videnskabsfolk og internationale organisationer. Det slår fx FN's Klimapanel (IPCC) fast i deres seneste klimarapport. Klimarådet vurderer også, at Danmarks 70-procentsmålsætning kræver fangst af store mængder CO₂.¹

Nye teknologiers bidrag til klimamål vurderes i fremskrivninger

På globalt plan er det især Parisaftalen fra 2015, som sætter retningen for klimambitionerne. Aftalen forpligter FN-landene til at arbejde for at begrænse klodens temperaturstigning til mindre end to grader over det førindustrielle niveau og stræbe efter at begrænse temperaturstigningen til 1,5 grader. Denne målsætning omtales typisk 1,5-gradersmålet. IPCC laver løbende fremskrivninger af den globale drivhusgasudledning, hvor der holdes øje med, om målsætningen overholdes. Fremskrivningerne illustrer en række scenarier, som afspejler mulige politiktiltag og teknologiimplementeringer, der har betydning for den samlede drivhusgasudledning og dermed også klodens temperatur. Fremskrivningerne kan på den måde bruges til at holde øje med, om verdens lande reducerer deres drivhusgasudledninger i overensstemmelse med 1,5-gradersmålet. Fx vurderes betydningen af, at verdens økonomier gradvist udfaser brugen af fossile brændsler, mens blandt andet vind- og solenergi tager over. Dertil kommer betydningen af nye teknologier, som forventes at reducere drivhusgasudledningen, som fx CCS. Det gælder også nye klimavenlige byggematerialer såsom nye beton og stål varianter, samt teknikker

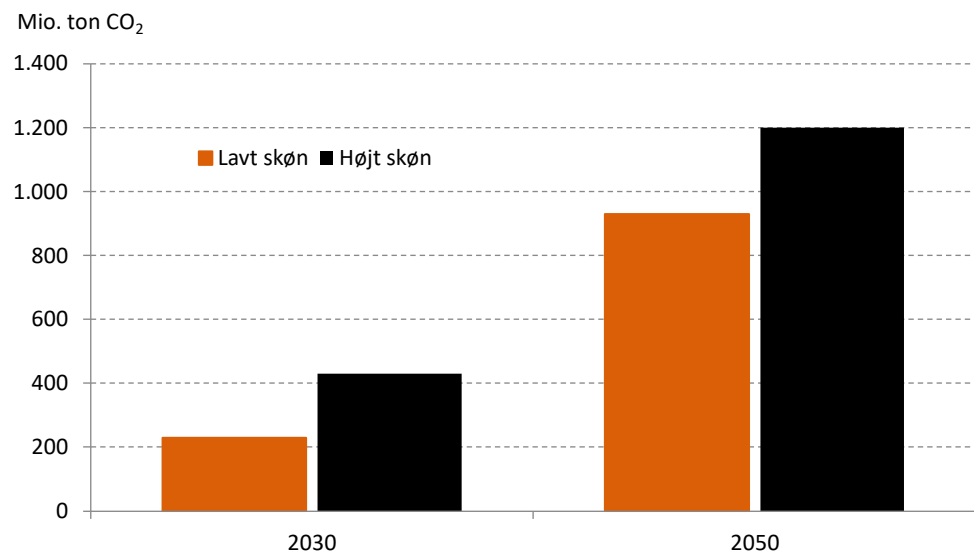
¹ IPCC (2022) og Klimarådet (2020).

til at reducere udledningerne fra landbruget. Fremskrivningerne giver således et bud på, hvor meget hver enkelt teknologi, herunder også CCS, forventes at bidrage til den samlede reduktion i drivhusgasudledningerne.

Massivt bidrag fra CCS er påkrævet, hvis EU skal nå Parisaftalens mål

Fremskrivningerne af drivhusgasudledningerne viser, at CCS's bidrag er afgørende for at nå Parisaftalens målsætninger. Det gælder både for EU-landene og på globalt niveau. figur 1 viser det omfang af CO₂-fangst blandt EU-landene, som skal til for at have retning mod Parisaftalens mål i år 2100. Tallene er baseret på en række fremskrivninger, hvor CCS bidrager i forskellig grad, men som alle opnår Parisaftalens målsætninger.² Omfanget af den årlige CO₂-fangst i disse fremskrivninger vil i 2030 udgøre mellem 230 og 430 mio. tons CO₂. I 2050 stiger det til mellem 930 og 1.200 mio. ton CO₂, jf. figur 1.

Figur 1 Påkrævet CO₂-fangst for at EU når Parisaftalens målsætninger (mio. ton CO₂)



Anm.: Det lave skøn er baseret på fremskrivninger, hvor bl.a. forbrugsadfærden blandt EU-borgerne bliver mere klimavenlig og hvor anvendelsen af fossile brændsler i industrien begrænses. Det høje skøn er baseret på et scenarie, hvor fossile brændsler fortsætter med at blive anvendt i et betydeligt omfang.

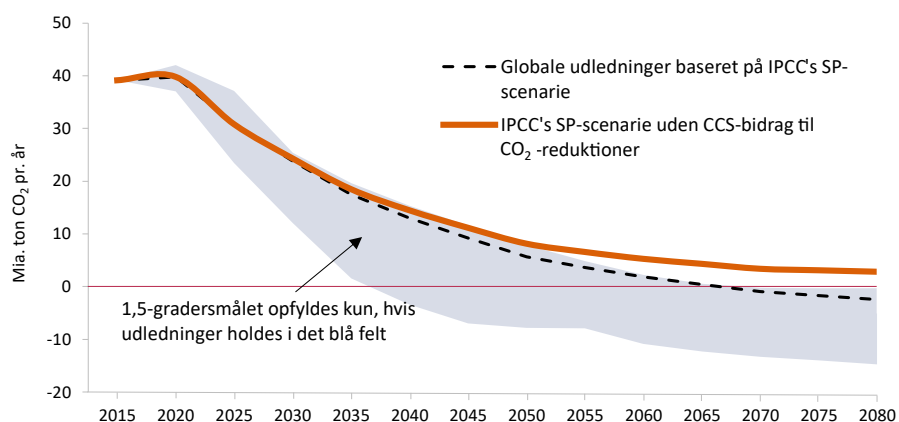
Kilde: Butnar et al. (2020).

Det bliver nødvendigt at fjerne CO₂ fra atmosfæren

CO₂-fangst vurderes altså at spille en central rolle i Europa. På globalt plan anses CCS er også som en vigtig del af løsningen på klimaudfordringerne. Det viser figur 2, som gennemgår IPCC's scenarier for den udvikling i de globale udledninger, der er nødvendig, for at globale klimaambitioner overholdes. Det lyseblå område i figur 2 illustrerer IPCC's vurdering af det spænd for de fremtidige globale CO₂-udledninger, som er foreneligt med 1,5-gradersmålet. Så længe verdens lande opnår udledninger inden for dette spænd, vurderer IPCC, at 1,5-gradersmålet vil blive opfyldt med mindst 50 procent sandsynlighed. Spændets bredde viser, at de globale udledninger fra 2065 og frem maksimalt må være nul, men det kan også være nødvendigt at opnå negative udledninger på ca. 12,5 mia. ton CO₂. Det betyder altså, at der med stor sandsynlighed skal fjernes CO₂ fra atmosfæren.

² (Butnar m.fl., 2020).

Figur 2 Fremskrivning af globale CO₂-udledninger som sikrer 1,5-gradersmålet (Mia. ton CO₂ pr. år)



Anm.: Det skraverede felt i figuren viser det spænd, som udledninger kan bevæge sig i, for at FN's klimapanel i deres scenarier for klimatilpasningen vurderer, at 1,5 gradersmålet kan opfyldes. Figurens kurver viser udviklingen i IPCC's SP-scenarie (shifting pathway), hvor man blandt andet vægter hensynet til for socioøkonomisk vækst højt. Den stiplede kurve angiver den forventede udvikling med bidrag fra CCS, mens den orange kurve viser den samme udvikling, men hvor bidraget fra CCS-teknologier er trukket fra.

Kilde: IPCC, IEA og egne beregninger.

Tages der højde for socioøkonomiske forhold på globalt plan, er CCS-nødvendigt for at nå klimamål

Den stiplede sorte kurve i figur 2 viser IPCC's bud på udledninger i et fremhævet scenarie, som både er foreneligt med 1,5-gradersmålet, og som tager højde for udviklingen i socioøkonomiske forhold.³ Her opnås klimamålet samtidigt med, at den globale levestandard og ulighed påvirkes mindst muligt i negativ retning, hvorfor vi anser dette som et af de mest relevante scenarier, da der sandsynligvis vil være større opbakning til de nødvendige tiltag heri. Tages alle bidrag, som stammer fra CCS, ud af dette scenarie, vil udviklingen følge den orange kurve. Den orange kurve ligger uden for det skraverede felt efter 2050, hvorfor klimamålet med mere end 50 pct. sandsynlighed ikke opnås.⁴ CCS er på den baggrund nødvendigt, hvis vi skal undgå at risikere alvorlige konsekvenser af global opvarmning og forringelse af økonomiske og sociale forhold.

³ Det såkaldte "SP-scenarie".

⁴ Se bilag 1 for flere detaljer.

Boks 1: Nødvendigheden af CCS

i. Klimaomstillingen går for langsomt

I mange sektorer af økonomien kan det være svært at opnå en tilstrækkelig hurtig omstilling til klimaneutralitet. Det er fx meget omkostningsfuldt, hvis et velfungerende kraftværk skal rives ned, alene fordi det har for høje CO₂-udledninger. Her kan det være fordelagtigt, at man installerer et CO₂-fangstsystem. CCS kan således være en transitions-teknologi, som sikrer, at de globale klimamål nås.

ii. Ikke alle udledningskilder kan blive CO₂-neutrale.

Det gælder for eksempel i landbruget og cementindustrien. For størstedelen af landbruget kan det være vanskeligt eller direkte umuligt at anvende CO₂-fangst. Cementindustrien kan heller ikke blive helt CO₂-neutral, da der under produktionen af cement frigives en stor mængde CO₂ direkte fra de materialer, som indgår. CCS kan sikre negative udledninger i andre sektorer og derved modsvare udledninger fra fx landbruget eller industrien.

iii. På længere sigt er det nødvendigt at fange CO₂ fra luften

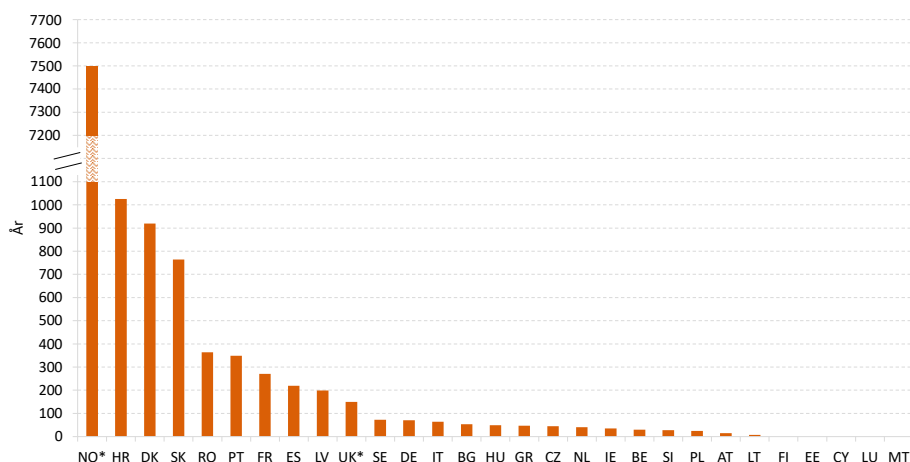
Endeligt er det afgørende, at verdens nettoudledninger af CO₂ på sigt bliver negative. Ellers kan Parisaftalens 1,5-gradersmål ikke opnås, hvilket vi beskriver i detaljer ovenfor og illustrerer i figur 2. Negative udledninger kan grundlæggende opnås ved CO₂-fangst fra luften (Direct Air Capture, DAC) eller fra fangstanlæg på biomassekraftværk (den såkaldte BECCS-teknik). Alternativt kan man opnå naturlig kulstofbinding i vegetation og skove.

Store forskelle på lagringskapacitet blandt lande i EU

4. Store forskelle på europæiske landes muligheder for egen CO₂-lagring

På tværs af europæiske lande er der store forskelle i muligheden for at lagre CO₂ i undergrunden. Nogle lande, heriblandt Danmark og Norge, har meget plads, mens andre lande som Tyskland, Polen og Finland har mindre eller ingen plads. Det fremgår af mønstret i figur 3, som viser hvor mange år, et land kan lagre sine CO₂-udledninger (på nuværende niveau) i egne underjordiske reservoirer.

Figur 3 Antal års CO₂-udledninger fra punktkilder, som et land kan lagre i sin egen undergrund (år)



Anm.: Søjlerne viser forholdet mellem et lands samlede CO₂-udledninger fra punktkilder og landets egen lagringskapacitet. Udledninger er estimeret for 2019, mens lagringskapacitet er baseret på seneste samlede opgørelse fra 2005. For Cypern, Finland, Irland, Malta, Portugal, Sverige og Østrig er data ikke fra GEUS, men indsamlet fra anden tredjepart (se anmærkning til tabel b.1).

*Indikerer et land uden for EU

Kilde: GEUS og egne beregninger.

Nogle lande har meget plads, andre har slet ingen

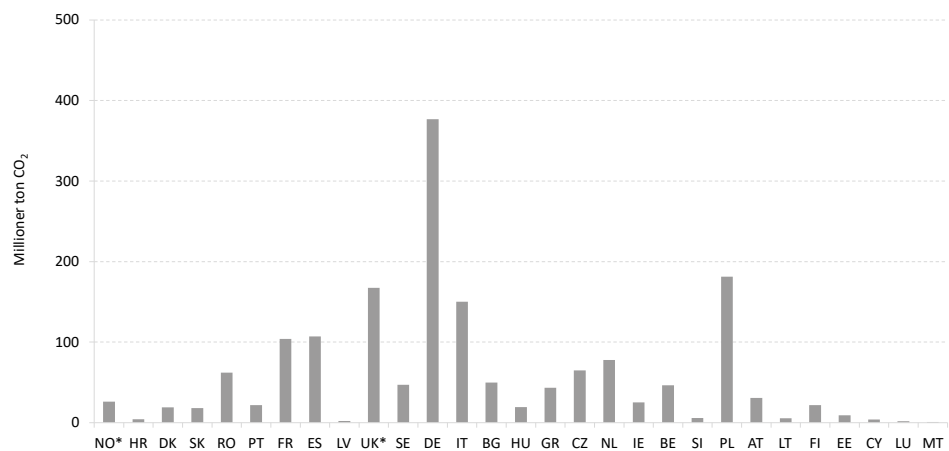
Som det fremgår af figur 3, er Norges lagringskapacitet størst, med plads til at lagre egne punktudledninger i knap 7.500 år. Danmark har også stor overkapacitet og kan ifølge beregningen lagre egne punktudledninger i over 900 år. Tallet er opgjort som det antal gange, de 19 mio. ton CO₂, som udledes fra danske punktkilder i 2019, kan lagres i den danske undergrund, hvor der i 2005 var opgjort plads til knap 17.500 mio. ton CO₂. De fleste lande har langt mindre lagringsplads end fx Danmark, og mange har næsten ingen plads. Helt i bund findes lande som Finland og Estland, hvor undergrunden slet ikke vurderes egnet til at lagre CO₂.⁵ I de lande med lidt eller ingen plads, skal man altså finde muligheder for lagring i andre lande.

Lande med stort lagringsbehov har ofte lidt eller ingen plads

Tyskland er på samme tid det land i Europa, som har det største CO₂-lagringsbehov. Det fremgår af figur 4, som illustrerer de europæiske landes samlede punktkildeudledninger. Tyskland udledte i 2019 knap 400 mio. ton CO₂ og Polen udledte knap det halve. Sammenlignes tallene i figur 4 med opgørelsen af lagringsplads i figur 3, ser man, at mange lande, som har lidt eller ingen lagringsplads, ofte har et stort potentielt lagringsbehov. Her træder særligt Polen frem. Mange lande udleder mindre CO₂, men vil stadig have et markant lagringsbehov, som de ikke selv kan opfylde.⁶

⁵ Shogenova m.fl. (2011).

⁶ Bemærk, at det ikke er alle punktkilde-udledningerne, som kan indfanges og lagres i undergrunden, og denne pointe uddybes senere i dette notat.

Figur 4 Punktkildeudledninger i europæiske lande (mio. ton CO₂)


Anm.: Udledninger fra punktkilder er opgjort for 2019. For detaljer se bilagstabel b.1.

*Indikerer et land uden for EU

Kilde: GEUS.

Der er også forskel på lovgivning og de politiske rammer

Der er store forskelle landene imellem, men mange lande har trods alt en vis lagringskapacitet, som det kan ses af figur 3. Her skal man dog være opmærksom på, at foruden de geologiske rammer spiller politiske forhold en måske endnu vigtigere rolle for hvert enkelt lands evne og villighed til at lagre CO₂. Et eksempel er Tyskland, hvor den nuværende lovgivning stærkt begrænser den samlede mængde CO₂, som må lagres, og samtidig ikke tillader lagring i de onshore-reservoirer, som udgør størstedelen af de tyske lagringsmuligheder.

Bred opbakning til CO₂-lagring i Danmark

I Danmark er der i modsætning Tyskland bred politisk opbakning til at udvikle CCS-værdikæden. For nylig har man udarbejdet rammevilkår for CO₂-lagring i Danmark, som skal muliggøre lagring i den danske undergrund fra 2025 (KEFM, 2022). Her diskuterer man også muligheder for støttepuljer til CO₂-fangst og lagring eller anvendelse (CCUS-puljen), at Danmark skal fungere som modtagerland for andre landes CO₂, samt muligheden for statsligt med-ejerskab af tilladelser til CO₂-lagring, hvilket kan hjælpe med at sprede risikoen ved de store investeringer, men sikrer, at en andel af gevinsten går til den danske stat.

Tyskland og andre store udledere kan lagre CO₂ i Danmark og andre lande

Hvis et land som Tyskland skal finde plads til sine store udledninger, men samtidig holder fast i ønsket om at undgå lagring i egen undergrund, vil det med stor sandsynlighed være nødvendigt, at de kan transportere CO₂ til lagring i et andet land. Her er det nærliggende at drage nytte af undergrunden i Nordsøen, da afstanden er kort, og hvor man har plads til samtlige tyske punktkildeudledninger de næste mange år. Sammenholdes lagringskapaciteten i Danmark med de samlede tyske punktudledninger målt på nuværende niveau, kan man lagre alle tyske punktudledninger i knap 50 år. I realiteten vil man kunne opfylde de tyske lagringsbehov i langt flere år, da de årlige udledninger som følge af den grønne omstilling løbende vil falde over tid, samtidig med at ikke alle punktudledninger i sidste ende vil kunne fanges og blive anvendt til lagringsformål.

Behov for et internationalt marked for CO₂-lagring

Tilbage står et billede af store internationale forskelle i mulighederne for at lagre CO₂. Hvis man ønsker at efterleve behovet for CO₂-lagring, kan hvert land altså ikke stå alene. Nogle lande vil ønske at sende CO₂ til lagring og andre lande kan med fordel fungere som modtagerlande og sælge deres kapacitet. Det kræver international koordination i form af et handelsnetværk, fælles monitorering og etablering af en fælles infrastruktur til transport

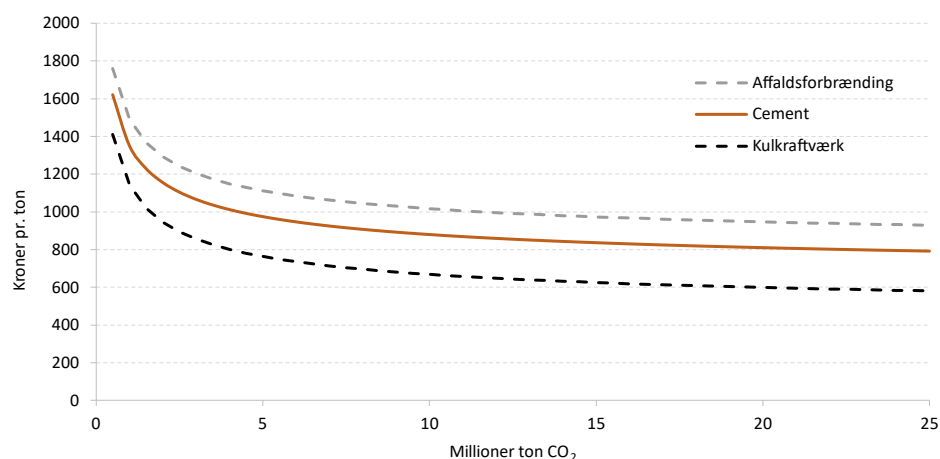
af CO₂. Hvis det internationale samarbejde på området når et passende niveau, så den handlede mængde CO₂ bliver tilpas stor, vil det samtidig have betydelige positive effekter på de økonomiske forudsætninger bag CCS, som vi uddyber i det næste afsnit.

5. CCS bliver billigere i takt med at markedet modnes

CCS er dyrt, men bliver billigere med tiden

CCS kræver en stor infrastruktur. Fangstanlæg på punktkilder skal monteres, transportinfrastruktur i form af rørledninger skal bygges, og lagringsfaciliteter skal opføres. Det er store investeringer, som skal overkommes i starten af implementeringen af CCS. Det betyder, at de første lagrede ton CO₂ er relativt dyre, men i takt med at markedet for lagring vokser, vil de gennemsnitlige omkostninger gradvist falde. Dette mønster illustreres i figur 5, som beskriver udviklingen i gennemsnitsomkostningerne pr. lagret ton CO₂.

Figur 5 Omkostningerne for fangst, transport og lagring af CO₂ (kr. pr. ton)



Anm.: I figuren opgøres tre forskellige omkostninger, som afhænger af, hvor CO₂'en fanges. Det er kun fangstomkostningen, som varierer mellem kurverne, mens transport via rørledning og offshore-lagring gælder for alle tre opgørelser.
Kilde: Energistyrelsen (2021c), Rubin et. al. (2015), Coulthurst (2021) og egne beregninger.

Fra cement-fabrikkens skorsten til Nordsøens undergrund

Bag beregningerne i figur 5 ligger en række antagelser om punktkilder, transportmetoder og lagerplacering, som har betydning for omkostningsberegningen. For at illustrere omkostningerne ved CCS er der her taget udgangspunkt i et scenarie, hvor fangsten af CO₂ foregår på en cementfabrik, hvorefter CO₂'en transporteres med rørledning ud i Nordsøen, hvor den lagres i udtømte oliedepoter. Lagringen er således forudsat at være i offshore-reservoirier. For at illustrere beregningens følsomhed over for andre forudsætninger, er der i figuren desuden vist omkostningskurver, hvor fangsten foregår på enten kulkraftværker eller affaldsforbrændingsanlæg.

Omkostningerne kan halveres

Omkostningsopgørelsen i figur 5 viser, at CO₂ fanget på en cementfabrik koster knap 1.600 kr. pr. ton at fange, transportere og lagre, hvis der årligt kun lagres 1 mio. ton. Hvis den årlige mængde øges til fx 25 mio. ton, vil omkostningen pr ton CO₂ være godt 800 kr. Omkostningen for at lagre et ton CO₂ kan således næsten halveres, hvis markedet bliver stort nok. Omkostningerne reduceres mest i starten, da fx rørledningerne gradvist bliver bedre udnyttet. I takt med at mængden stiger, vil infrastrukturen blive udnyttet som tiltænkt, hvorfor omkostningsreduktionerne gradvist aftager.

Danmarks udledninger er ikke tilstrækkelige til, at CCS bliver billigt nok.

Beregningerne viser, at der er behov for en betydelig mængde CO₂, før omkostningerne samlet set gør fangst og lagring af CO₂ meningsfuldt for den enkelte udleder. Udlederne kan enten vælge at fange og lagre CO₂ eller betale for CO₂-kvoter. Hvis CO₂-kvoterne er billigere end fangst og lagring, vil udlederne vælge at købe kvoterne og fortsætte deres udledninger. Først når fangst, transport og lagring samlet set er billigere end kvoterne, vil det give mening for udlederen at vælge den løsning i stedet. I det kvoteprisen i 2030 forventes at ligge mellem 800 og 1.300 kr., er der således påkrævet en væsentlig mængde CO₂, som er på størrelse med Danmarks årlige fangst af CO₂, som i 2030 som forventes at være omtrent 5 mio. ton CO₂.⁷ Hvis hele denne mængde lagres, kan omkostningen forventes at være ca. 1.000 kr. pr. ton.

Det er nødvendigt med internationalt samarbejde

Det er dog ikke sandsynligt, at hele den indfangede mængde CO₂ skal gå til lagring. CO₂ kan også anvendes til såkaldt "Power-to-X", og den danske regerings strategi for Power-to-X lægger op til, at en betydelig andel af den danske CO₂ skal anvendes til dette formål (KEFM, 2021). Hvis store mængder CO₂ reserveres til brug i Power-to-X, falder omfanget af dansk CO₂, som skal lagres, hvilket betyder at udgiften pr. lagret ton CO₂ kan blive relativt stor. For at sikre et lagringspotentialer, som er stort nok til at kunne drage nytte af skalafordelene beskrevet i figur 5, er det derfor helt afgørende, at man indleder et internationalt samarbejde, hvor infrastrukturen og lagringskapaciteten deles gennem et marked for CO₂.

Opstartsomkostningerne er lave for Danmark, fordi olieinfrastruktur kan anvendes

Det bemærkes, at ovenstående beregning tager udgangspunkt i tal, som indregner anvendelsen af allerede eksisterende platforme, som hidtil er anvendt til olieindvinding, men nu kan anvendes til lagring. Skal man anlægge lagringsfaciliteter helt fra bunden, vil omkostningerne ved små mængder således være højere.

Omkostninger for skibstransport er lavere ved små mængder

I eksemplet beregner vi transportomkostningerne for pipelines, hvor omkostningerne ved små mængder må formodes at være højere end for skibstransport. Det skyldes store initialomkostninger for pipelines. Ved små mængder er skibe en fleksibel løsning, hvor lagringsmængden hurtigere kan tilpasses, men for større mængder vil det være vanskeligt at opnå reduktioner i gennemsnitsomkostninger i den størrelsesorden, vi dokumenterer for brug af pipelines i figur 5.

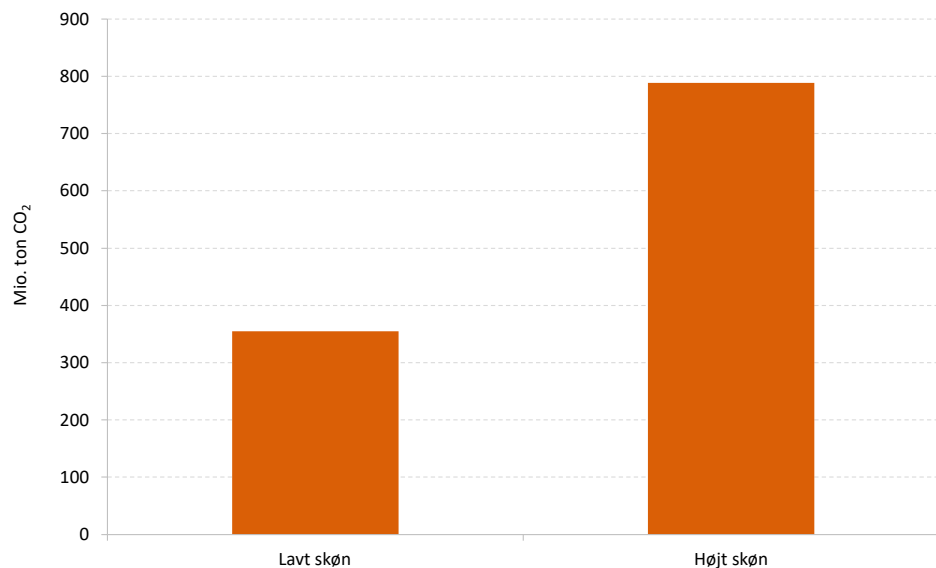
⁷ Forventede kvotepriser er beregnet pba. forudsætninger i Beck og Kruse-Andersen, 2020; Quemin and Trotignon, 2019; Perino og Willner, 2017 samt den gældende CO₂-kvotepris 31-januar 2023 på 90 euro, jf. bilag 5.

Mellem 360 og 790 mio. tons CO₂ kan indfanges blandt EU's medlemslande

6. Markedspotentialet for CCS i Europa

Potentialet for handel med CO₂ er stort, hvis Europa satser på CCS. Det fremgår af figur 6, som viser skøn over det samlede markedspotentiale i 2030 for de europæiske lande, som med rimelighed kan forventes at handle med CO₂. Markedspotentialet opgøres her med udgangspunkt i et lavt og et højt skøn på den mængde CO₂, som i hvert land forventeligt kan indfanges til lagring. I det lave skøn forventes ca. 360 mio. ton CO₂ at skulle lagres i 2030, mens et højt skøn over markedspotentialet er ca. 790 mio. ton. CO₂.

Figur 6 Markedspotentialet for CCS i Europa i 2030 (mio. ton CO₂)



Anm.: Markedspotentialet er opgjort som summen af fangspotentialet for alle lande i EU. Norge og Storbritannien antages selv at lagre egne udledninger. Vi anvender Energistyrelsens skøn over reduktioner i udledninger fra samtlige punktkilder og fangspotentialet (de estimerer både et højt og et lavt skøn, baseret på teknologiske vurderinger) fra disse punktkilder i Danmark for 2030. Vi antager, at øvrige lande har samme fangspotentiale.

Kilde: OECD, Energistyrelsen og egne beregninger.

Fangspotentialet indeholder kun de punktkilder, hvor fangst er muligt

Til forskel fra de samlede udledninger, som vi forholder os til i tidligere afsnit af dette notat, ser vi her på det faktiske fangspotentiale. Fangspotentialet er mindre end de samlede udledninger, fordi det ikke er teknisk muligt eller giver økonomisk mening at indfange alle punktkildeudledninger. I Danmark har Energistyrelsen beregnet et fangspotentiale, som svarer til, at mellem 26 og 57 pct. af alle punktkildeudledninger kan fanges til lagring eller anvendelse.⁸ Disse tal kan være lavere, hvis man afvikler punktkilder hurtigere end forventet. I denne forbindelse er det vigtigt at nævne, at vi ikke skelner mellem lagring eller anvendelse, når vi opgør markedspotentialet.⁹ Hvis en del af fangspotentialet reserveres til anvendelse, sænker det behovet for lagring. Den fremtidige udvikling i behov og betalingsvillighed for hver del vil afgøre, hvordan mængden til lagring og anvendelse fordeler sig.

⁸ Energistyrelsen (2021a). Bilag 1 beskriver detaljer bag beregningen.

⁹ CO₂-fangst og anvendelse (CCU) omfatter blandt andet dele af de såkaldte Power-to-X (PtX)-teknologier, hvor man gennem elektrolyse og videreførelse kan producere brændstoffer.

Vi differentierer ikke mellem biogene og fossile brændsler

Udnyttelse af det store potentiale kræver internationalt samarbejde

Det bør også bemærkes, at CO₂ i hovedtræk kan indfanges fra enten biogene eller fossile brændselskilder. Biogene udledninger kommer fra afbrænding af biomasse og biogas, mens fossile udledninger kommer fra afbrænding af kul, gas og olie. I dette notat adskiller vi ikke de to typer, men anerkender, at potentialet for CCS kan afhænge af, hvor bredt CCS anvendes på tværs af brændselstyper i hvert land.

Et markedspotentiale i den størrelsesorden, som vi her finder, kræver etableringen af et omfattende system for transport og lagring af CO₂. Det vil være nødvendigt at etablere mange lagringsfaciliteter i flere lande for at muliggøre lagring i denne skala. Samtidig kræver det store investeringer og internationalt samarbejde at etablere den infrastruktur, i form af rørledninger, opsamlingspunkter, skibsforbindelser, og meget andet, der skal til for at fragte CO₂.

7. Det økonomiske potentiale i handel med CO₂ i Europa

Nye arbejdspladser skal skabe værdikæden for CCS

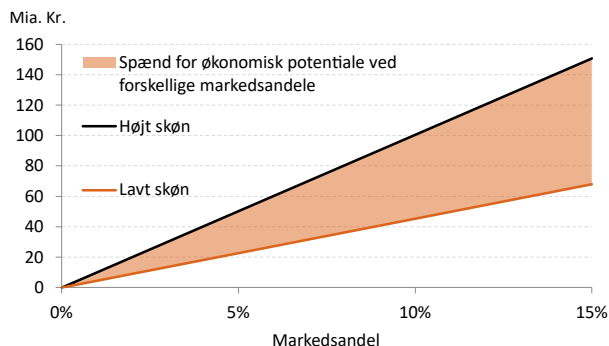
Hvis et europæisk marked for CO₂ opstår, vil det have væsentlig økonomisk betydning for de involverede lande. Først og fremmest vil en ny CCS-branche opstå, som vil kræve arbejdspladser inden for fangst, transport og lagring af CO₂. Det vil medføre beskæftigelse i sektorer indenfor montering og vedligehold af fangstanlæg, i forbindelse med konstruktion af rørledninger, eller havnearbejdere og besætningsmedlemmer til skibstransport af CO₂. Endeligt vil lagring involvere mange af de samme arbejdspladser på platforme, som ses i olieindustrien. Samtidigt påvirkes andre sektorer, som leverer materialer til CCS-branchen og bidrager til opbygningen af den. Fx vil konstruktion af rørledninger kræve byggematerialer, hvorfor byggematerialeleverandører også vil ansætte flere medarbejdere. Disse arbejdspladser tælles med nedenfor, når omfanget af arbejdspladser vurderes.

Det økonomiske potentiale for Danmark er stort

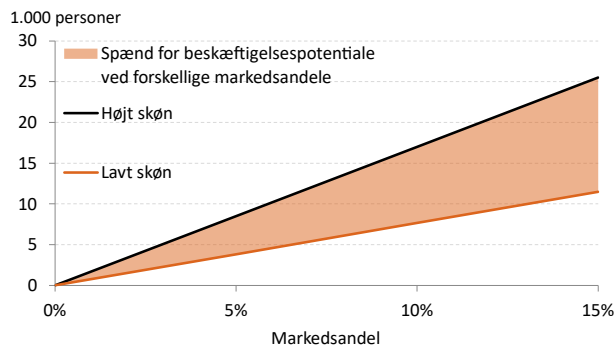
Det økonomiske potentiale er i figur 7 opgjort ved forskellige markedsandele – desto større markedsandel et land opnår, jo større er det økonomiske potentiale for det enkelte land. figur 7.a viser, at hvis Danmark fx opnår en andel på 5 pct. af det samlede europæiske marked, vil den økonomiske værdi heraf udgøre mellem 23 og 50 mia. kr. Det kan også omsættes til mellem 4.000 og 9.000 arbejdspladser, hvilket kan aflæses i figur 7.b. Det svarer til, at Danmark modtager mellem 18 og 39 mio. ton CO₂. Med udgangspunkt i de allerede annoncerede CCS-projekter i Danmark, hvor alene offshore-projekterne i Nordsøen vil lagre 13 mio. ton CO₂ fra 2030, vurderer vi, at en markedsandel i denne størrelsesorden er realistisk at opnå. Skulle Danmark opnå en endnu større markedsandel, vokser det økonomiske potentiale tilsvarende. Ved opnåelse af en markedsandel på 10 pct. vil den økonomiske værdi fra CCS-branchen udgøre mellem 45 og 100 mia. kr., og her udgør beskæftigelsen mellem 8.000 og 17.000 personer. Det svarer til, at der skal lagres mellem 35 og 80 mio. ton CO₂. Det er bør understreges, at der her ikke er taget stilling til, hvilken markedsandel, som anses for at være mest realistisk for Danmarks vedkommende. Det er ligeledes vigtigt at bemærke, at tallene kun viser, hvor stor CCS-branchen kan blive, og ikke effekten på den samlede beskæftigelse i Danmark.

Figur 7 Økonomisk og beskæftigelsespotentiale for CCS-branchen

Figur 7.a CCS-branchens økonomiske værdi (mia. kr.)



Figur 7.b Beskæftigelse i CCS-branchen (1.000 personer)



Anm.: De to kurver i figurene illustrer hhv. det lave og høje markedspotentialer fra afsnit 6 omsat til økonomisk værdi og beskæftigelse. Det skraverede område illustrer således de mulige potentialer mellem det høje og lave spænd, som kan realiseres for forskellige markedsandele.

Kilde: DST og egne beregninger.

Danmarks samlede beskæftigelse forventes ikke at blive påvirket

Det er vigtigt at gøre klart, at der *ikke* er tale om en beskæftigelsesstigning for samfundet som helhed. De arbejdspladser, som branchen kræver, vil sandsynligvis blive besat af personer, som kommer fra andre brancher. CO₂-markedet skaber blot en brancheforskydning. Der vil derfor næppe være en langsigtet beskæftigelsesstigning pba. CCS-branchen oprettelse, da beskæftigelsen på lang sigt er bestemt af udbuddet af arbejdskraft. Dog kan det give anledning til en velstandsstigning, hvis CCS-branchen er mere produktiv end de sektorer, hvor arbejdskraften oprindeligt kom fra. Det er på forhånd ikke muligt at vurdere, om det vil være tilfældet. Den økonomiske værdi fra CCS-branchen vil heller ikke nødvendigvis svare til en forøgelse af samfundet samlede produktion. Om det giver en virkning på den samlede produktion, afhænger af, om CCS-branchen bruger arbejdskraften samt investeringerne mere effektivt end andre sektorer, som branchen nødvendigvis må tage disse fra.

Beregningerne bygger på forhold i olie- og gasbranchen

Tallene er desuden behæftet med betydelig usikkerhed. Beregningerne er foretaget pba. af forholdene i branchen for indvinding af olie og gas i dag. Den er i udgangspunktet den mest realistiske branche at anvende, men den er også kendetegnet ved få arbejdspladser og stor infrastruktur. Om de samme forhold bliver gældende i CCS-branchen er ikke på forhånd sikkert. Der vil fx på kort sigt være mange arbejdspladser i CCS-branchen, imens den opbygges, men på længere sigt vil der være færre arbejdspladser, når de primære arbejdsopgaver består af vedligehold og administration. Det er når CCS-branchens infrastruktur er opbygget, at den mest vil ligne branchen for olie og gas. Det beregnede antal arbejdspladser og økonomisk værdi ovenfor kan således ses som et mere langsigtet niveau.

CCS-branchen kan bidrage med op mod 170.000 europæiske arbejdspladser

Tallene i figur 7 beror på en opgørelse af CCS-branchens samlede markedspotentialer, som er beregnet for det tilfælde, hvor landene satser mere eller mindre fuldt på CCS. Potentialer kan omregnes til CCS-branchens samlede økonomiske værdi og beskæftigelse. Det gøres med udgangspunkt i den omsætning, dvs. den handlede mængde CO₂ og den forventede pris. Det samlede markedspotentialer er opgjort for samtlige EU-lande, som alle vil få del i det økonomiske potentiale ved enten at bygge fangstanlæg, rørledninger eller lagringsfaciliteter. Derfor vil det samlede økonomiske potentiale være spredt ud over samtlige involverede lande. CCS-branchen vurderes til at kunne få en økonomisk værdi i størrelsesordenen mellem 450 og 1.000 mia. kr. Samtidigt vil branchen på europæisk plan

have potentiale til at ansætte i alt mellem 75.000 og 170.000 personer, fordelt på brancher direkte involveret med CCS og i andre sektorer, som påvirkes af tilstedeværelsen af til CCS-branchen.¹⁰ Beskæftigelseeffekten kan variere over tid, da konstruktion af infrastruktur mm. vil kræve flere arbejdspladser, end når infrastrukturen blot skal vedligeholdes og administreres.

Potentialet afhænger også af prisen på markedet

Den forventede omsætning er grundlaget for beregningerne og afhænger af to forhold, nemlig den producerede mængde og den forventede pris, som vil gælde på markedet. Den handlede mængde afgøres af markedspotentialet, som blev gennemgået i afsnit 6. Mht. prisen er der i beregningerne taget afsæt en forventet CO₂-kvotepris i 2030 på 1.000 kr. CO₂-kvoteprisen vurderes som en relevant markedspris, fordi en højere pris vil få CO₂-udledere til at købe CO₂-kvoter frem for at bruge CCS-markedet. Samtidigt vil udbyderen af CO₂-lagring ikke gå meget under kvoteprisen, fordi de ved, at CO₂-udledere kun har ét alternativ, nemlig kvoter. Dette er naturligvis behæftet med usikkerhed, da det vil afhænge af konkurrenceforholdene på CO₂-markedet.

Danmark er i konkurrence med bl.a. Norge og UK om markedsandele

Det økonomiske potentiale for CCS knyttet til fx Danmark afhænger af markedsandelen, som Danmark kan opnå. Markedsandelen afspejler dels hvor meget CO₂, som sendes til Danmark frem for fx Norge og England, og dels hvor meget af processen bag CCS, som Danmark står for. Fx skal Danmark sandsynligvis primært lagre CO₂, mens fangst og transport bliver en mindre del. Transport kan også blive en væsentlig del af Danmarks CCS-bidrag, hvilket dog afhænger af den konkrete model for transport til Nordsøen eller lagre på land.

Det kan være en fordel at deltage tidligt

Et vigtigt element for nye teknologier som CCS er, at man kan opnå markedsfordele ved at være blandt de første til at lagre CO₂. Fordelene kan være tidlig udvikling af know-how, tiltrækning af bestemte typer efterspurgt arbejdskraft eller tidlig etablering af dyr infrastruktur. Hvis man således opnår bestemte konkurrencefordele, kan markedsandelen blive påvirket i positiv retning.

8. Danmarks muligheder som en vigtig spiller forventes at stige

Danmark får mindre og mindre brug for sin kapacitet til lagring

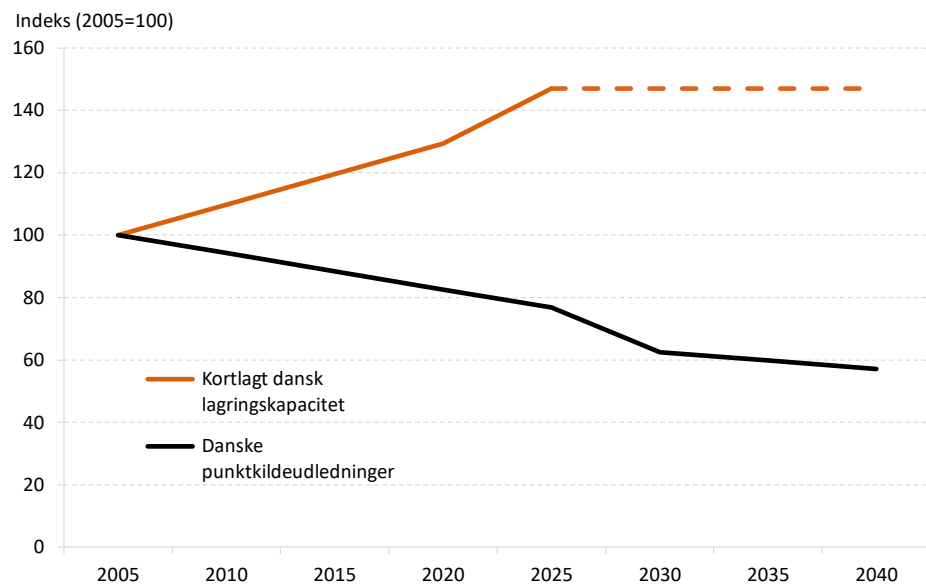
Som beskrevet i de foregående afsnit, har Danmark allerede i dag gode muligheder for at blive en central spiller på det internationale CO₂-marked. Disse muligheder forventes kun at stige i takt med, at danske udledninger falder som følge af den grønne omstilling. Det betyder, at Danmark i mindre og mindre grad selv skal bruge lagerkapaciteten, hvorfor den kan tilbydes andre lande. Dette forhold er illustreret af den sorte kurve i figur 8, som beskriver, at de danske punktkildeudledninger mellem 2005 og 2040 forventes at falde med 43 procent.

Lagerkapaciteten kan kun forventes at stige fremover

Den orange kurve i figur 8 viser, at der i de seneste 15-20 år gradvist er fundet flere og flere reservoirer i den danske undergrund, der er velegnede til CO₂-lagring. Fra 2005 til 2022 er den opgjorte lagringskapacitet steget fra 17,5 til 24,6 mia. ton CO₂ – en stigning på 47 pct. Man forventer kun at finde flere egnede reservoirer i fremtiden, men i figuren fastholdes nutidens niveau (den stiplede del af kurven), da omfanget af nye fund er usikkert.

¹⁰ Bemærk, at de samlede effekter, inklusive multiplikatorer, er beregnet efter danske forhold. Se bilag 4.

Figur 8 Udviklingen i Danmarks lagringskapacitet og punktkildeudledninger, 2005-2040 (indeks, 2005=100)



Anm.: De stiplede dele af kurven angiver et skøn over den fremtidige udvikling i lagerkapacitet i danske CO₂-reservoirer, jf. Kilde: GEUS og Energistyrelsen.

9. Litteratur

Anthonsen, K. L., Christensen N. P. (2021). *EU Geological CO₂ storage summary*. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2021/32

Beck, U., Kruse-Andersen, P.K. (2020). "Endogenizing the Cap in a Cap-and-Trade System: Assessing the Agreement on EU ETS Phase 4". *Environmental and Resource Economics*, 77, 781-811

Butnar, I., Cronin, J., Pye, S. (2020). "Review of Carbon Capture Utilisation and Carbon Capture and Storage in future EU decarbonisation scenarios". *Final Rep 57*

Carneiro, J.F., Boavida, D., Silva, R. (2011). "First assessment of sources and sinks for carbon capture and geological storage in Portugal". *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(3), 538-548.

Coulthurst, A., Lugal, L., Rowland, K. (2021). *CCUS Development Pathway for the EfW Sector*

EA Energianalyse (2020). *Notat om CCS-teknologier*

Energistyrelsen (2021a). *Punktkilder til CO₂ – potentialer for CCS og CCU*

Energistyrelsen (2021b). *CCS – Internationale erfaringer – Sikkerhed, natur og miljø*

Energistyrelsen (2021c). *Technology Data – Carbon Capture, Transport and Storage*

Energistyrelsen (2022a). *Klimastatus og – fremskrivning, 2022*

Energistyrelsen (2022b). *Klimastatus og -fremskrivning 2022 (KF22): CO₂-kvotepris*

FCT (2015). *CO₂ Capture and Storage in Portugal - A Bridge to a Low Carbon Economy*

Federal Ministry for Sustainability and Tourism (2020). *Long-Term Strategy 2050 - Austria*

Gerrard, A.M. (2000). "Guide to capital cost estimating" (Fourth edition). *Institution of Chemical Engineers*

GEUS (2021). *Fangst, lagring og anvendelse af CO₂ (CCUS) - Tekniske barrierer for CCUS i Danmark*.

Hänsel, M. C., Drupp, M.A., Johansson, D.J.A. m.fl. (2020). "Climate economics support for the UN climate targets". *Nature Climate Change*, 10, 781-789

Hansson, J., Hackl, R., Taljegard, M. Brynolf, S., Grahn, M. (2017). "The Potential for Electrofuels Production in Sweden Utilizing Fossil and Biogenic CO₂ Point Sources". *Frontiers in Energy Research*, 5.

IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2002). *Pipeline transmission of CO₂ and energy*. Report Number PH4/6

IPCC (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*

IEA (2020). *Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions. CCUS in Clean Energy Transitions.*

KEFM (2022). *Rammevilkår for CO₂-lagring i Danmark – Opfølgning på Danmarks CCS-strategi*. Klima, Energi og Forsyningsministeriet

KEFM (2021). *Regeringens strategi for Power-to-X*. Klima, Energi og Forsyningsministeriet

Klimarådet (2020). *Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion*

NORDICCS (2016). *Building Nordic Excellence in CCS*

OECD (2023). Greenhouse gas emissions.

https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_GHG (data hentet 30. januar 2023)

Perino, G., Willner, M. (2017). "EU-ETS Phase IV: allowance prices, design choices and the market stability reserve". *Climate Policy*, 17(7), 936-946

Poulsen, N., Holloway, S., Neele, F., Smith, N.A., Kirk, K. (2014). *CO₂StoP Final Report - Assessment of CO₂ storage potential in Europe*. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2014/56

Quemin, S., Trotignon R. (2021). "Emissions trading with rolling horizons". *Journal of Economics Dynamics and Control*, Vol. 125, 104099

Reiter, G., Lindorfer, J. (2015). "Evaluating CO₂ sources for power-to-gas applications – A case study for Austria". *Journal of CO₂ Utilization*, 10, 40-49.

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V. m.fl. (2018). "Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C". *Nature Climate Change*, 8, 325-332
Ea Energianalyse (2020)

Rubin, E.S., Davidson, J.E., Herzog, H.J. (2015). "The cost of CO₂ capture and storage". *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 40, 378-400

SEAI (2008). *Assessment of the Potential for Geological Storage of Carbon Dioxide for the Island of Ireland*

Shogenova A., Shogenov, K., Vaher, R. m.fl. (2011). "CO₂ Geological Storage Capacity Analysis in Estonia and Neighboring Regions". *Energy Procedia* (4), 2785-2792.

Tsilingiridis, G., Sidiropoulos, C., Pentaliotis, A. m.fl. (2010). "A Spatially Allocated Emissions Inventory for Cyprus". *Global NEST Journal*, 12(1), 99-107.

Van der Spek, M., Fernandez, E.S., Eldrup, N.H., Skagestad, R. (2017). "Unravelling uncertainty and variability in early stage techno-economic assessments of carbon capture technologies". *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 56, 221-236

ZEP (2011). *The Costs of CO₂ Storage – Post-demonstration CCS in the EU*

Bilag 1: nødvendigheden af CCS - Uddybning af figur og beregningen bag.

FN's Klimapanel (IPCC) laver løbende fremskrivninger af de globale CO₂-udledninger med det formål at vise mulige veje hen imod Parisaftalens målsætning om, at klodens temperatur kun må stige med 1,5 grad set i forhold til før industrialiseringen. Det gør de ved at lave scenarier for den globale CO₂-udledning, som med mere end 50 pct. sandsynlighed opnår 1,5-gradersmålet. Der er således både scenarier, som kun lige netop opnår målsætningen med 50 procents sandsynlighed, mens nogle scenarier opnår det med en større sandsynlighed. Det kunne fx være fordi, at nogle scenarier har flere virkemidler indarbejdet, såsom hurtigere udfasning af fossilebrændsler og hurtigere omstilling i landbruget. I figur 2 udgør det skraverede område et spænd for alle disse mulige kombinationer af virkemidler, som reducerer CO₂-udledningerne i et omfang, som opfylder 1,5-gradersmålet med mere end 50 pct.

Der er mange veje hen imod 1,5-gradersmålet, som hver især har forskellige egenskaber og hensyn. Fx tager nogle veje hensyn til, at fossilebrændsler helt skal udfases. Et sådant scenarie tager ikke højde for, at nogle lande kan have svært ved at omstille sig hurtigt nok, hvorfor et forbud mod fossilebrændsler vil skabe store økonomiske konsekvenser for de lande. Det vil betyde, at de lande næppe vil indgå i aftaler om sådanne forbud, og derfor er det usandsynligt, at en sådan vej er realistisk. Andre veje vægter både klimahensyn og socio-økonomiske forhold. Det er fx IPCC's "Shifting Pathway", hvor det i højere grad er befolkningens forbrugsvaner, som sikrer at CO₂-udledningerne bliver reduceret. Det er fx lavere efterspørgsel efter energi for husholdningerne, som kan tilvejebringes gennem bedre boliger eller ændringer i transportvaner. Samtidig er mange af CO₂-reduktionerne et resultat af forbedret energiforbrug i industrien. Der er således tale om et forløb, som udnytter nye teknologier i et stort omfang. Fordelen ved det er, at det ikke påvirker økonomisk aktivitet og sociale forhold. Det er dog vigtigt at understrege, at det stadig er blandt de mest ambitiøse veje at gå, men det samme gælder for alle de veje, som opnår parisaftalens målsætninger. "Shifting Pathways" vurderes dog til at være en måde, som flere lande vil have mulighed for at se sig selv i, da det ikke går ud over deres industri og arbejdspladser i samme omfang, som nogle af de andre veje. På den baggrund er det scenarie lagt til grund for den stiplede kurve i figur 2.

I IPCC's "Shifting Pathway" ligger der et bidrag til CO₂-reduktioner fra CCS. IPCC opgør bidrag fra CCS til 2,5 Gt CO₂ i 2050 (figur 3.15 i IPCC (2022), scenarie IMP-SP). IPCC opgør imidlertid ikke bidrag fra CCS for andre år, hvorfor vurderingen for udviklingen i årene 2030-2080 beror på andre kilder.

For at finde et beregningsteknisk niveau for CCS's reduktionsbidrag til den globale CO₂-udledning, tager beregningen afsæt i (IPCC, 2022) og (IEA, 2020). Begge viser, at CCS først rigtigt bliver relevant fra 2030 (IPCC, 2022, figur 3.7 og IEA, 2020, figur 2.2). Derfor antager vi en lineær indfasning af CCS-tallet fra IPCC (2022) fra 2030 til 2050, så de 2,5 Gt CO₂ opnås i 2050. For den videre udvikling ser vi på IEA (2020), som har lavet en fremskrivning af bidraget fra CCS til CO₂-reduktioner i energisektoren frem til 2070. Den relative udvikling fra 2050 til 2070 fra IEA's fremskrivning anvendes da på IPCC's niveau for 2050, hvilket giver en profil frem mod 2070. Derefter fastholdes IEA's udvikling fra 2050 til 2070 i årene 2070-2080.

Det er klart, at metoden er behæftet med betydelig usikkerhed, som det gælder alle fremskrivninger. Desuden beror beregningen på, at energisektorens anvendelse af CCS kan forlænges til andre sektorer, som i 2050 har valgt at bruge CCS i deres produktion.

I den akademiske litteratur bakkes hovedkonklusionerne fra IPCC op af blandt andet Hänsel m.fl. (2020) og Rogelj m.fl. (2018). I førstnævnte foretages beregninger af den optimale vej for CO₂-udledningerne for at opnå 1,5-gradersmålet. De finder på tværs af modelantagelser, at negative udledninger er centrale for at nå målet. I det andet papir har forskerne på linje med IPCC undersøgt forskellige veje til at holde temperaturstigningen på 1,5 grader. De finder, at CCS ikke bare er en nødvendighed, men at der er behov for kraftig eskalering af CCS-teknologien i de kommende år. Teknologien skal ifølge forfatterne hjælpe med at fjerne et sted mellem 4 og 30 års CO₂-udledninger, svarende til niveauet for udledninger i dag, fra atmosfæren i årene frem mod 2100. Det store spænd i kravet til CO₂-reduktioner skyldes, at der er usikkerhed omkring retningen for energisektoren. Samfundet kan f.eks. fortsætte længere med anvendelse af fossile brændsler, men så bruge CCS til at modgå disse. Det vil give et højere CCS-potentiale end hvis energisektoren og industrien omstiller sig hurtigere, men i alle tilfælde er CCS nødvendigt for at opnå Parisaftalens mål.

Bilag 2: Beregningstekniske principper for omkostninger ved CCS

Vores vurderinger af de samlede omkostninger ved CCS baserer sig på tre delkomponenter. De tre delkomponenter er fangst, transport og lagring. I det følgende er det beskrevet, hvordan hver delkomponent beregnes, samt de metodiske valg, som ligger til grund for beregningerne.

Den generelle beregningsmetode for omkostningerne baserer sig på beregningsmetoderne, som bliver beskrevet i ZEP (2011). I dette notat bliver omkostningerne annualiseret og så diskonteret tilbage ved hjælp af en diskonteringsrate på 8%. Det antages, at levetiden på et projekt er 30 år. Annualiseringen gør, at man får en række uniforme årlige cashflows med samme nutidsværdi som den initiale omkostning i periode 0.

Fangst

Omkostningen ved fangst af CO₂ varierer betydeligt på tværs af forskellige indfangningsmetoder (IEA, 2020). I vores beregninger har vi udvalgt tre specifikke fangstteknologier: cement, kraftværker og affaldsforbrænding. Det antages i beregningen, at prisen pr. ton indfanget CO₂ ikke afhænger af mængden af CO₂, som indfanges. Det skyldes, at man skal installere anlæg på tværs af mange punktkilder og under antagelse af et konstant teknologiniveau (dvs. man ikke på kort sigt har læringseffekter).

Fangst udgør den største del af de samlede omkostninger. Fangstomkostningen fra cementproduktion udgør 606 kr. pr. ton. (Ea Energianalyse, 2020). Der er dog betydelig variation i fangstomkostningen afhængigt af, hvor fangsten finder sted. Det afhænger især af, hvor stor mængde CO₂, der udledes fra den pågældende produktion. Fx er kulkraftværker kraftigt udledende mens affaldsforbrænding udleder mindre. Derfor udgør fangstomkostningen på kulkraftværker i gennemsnit 400 kr. pr. ton. (Rubin m.fl., 2015), mens udgiften er ca. 750 kr. pr. ton for affaldsforbrænding (Energianalyse, 2020; Coulthurst m.fl., 2021).

Når de forskellige fangstomkostninger illustreres i figur 5, er det for at vise det mulige spænd af omkostninger. Det er fx sandsynligt, at kulkraftværker på den korte bane vil bidrage betydeligt til CCS, mens de på sigt vil blive udfaset. På sigt vil cementproduktion og affaldsforbrænding derfor blive de primære kilder til CO₂-fangst, sammenlignet med i dag. Man forventer at brugen af affaldsforbrænding på et europæisk plan stiger i fremtiden. I fx Øst- og Sydeuropa bliver affald ofte deponeret, som ikke er holdbart over tid, hvorfor der må ske en omstilling henimod afbrænding.

De faktiske fangstomkostninger afhænger ikke blot af punktkilden, men også af selve fangstanlægget. Fx kan fangstanlæg blive eftermonteret på gamle fabrikker, hvilket vil være dyrere sammenlignet med fangstanlæg på nye fabrikker, hvor de installeres fra begyndelsen. Udnyttelsesgraden af anlægget vil desuden også spille en central rolle for omkostningen. Fx vil fangstanlæg på fabrikker med lange brændetider være mere effektive, end hvis fabrikken kun i kortere perioder udleder CO₂. Man skal således se omkostnings-estimerterne som gennemsnit, som kan variere betydeligt fra punktkilde til punktkilde.

Transport

Transportomkostningerne er baseret på Energistyrelsens omkostningskatalog for CO₂-fangst, transport og lagring (Energistyrelsen, 2021c). De primære transportudgifter udgøres af omkostninger til konstruktion af rørledningen og pumpestationer, mens omkostninger til strøm og daglig drift står for en lille del af de samlede udgifter. Rørledningerne er forbundet med en stor initial investering, hvilket medfører høje omkostninger for små mængder transporteret CO₂. I takt med at mængden stiger, vil rørledningerne blive udnyttet større omfang og dermed vil omkostningen falde.

Energistyrelsen har opgjort udgifterne til transport for hhv. en, tre og fem mio. ton CO₂ pr. år. For at estimere omkostningerne ved meget store mængder, er der i dette notat foretaget en beregningsteknisk vurdering af omkostningerne ved 50 mio. ton. Det giver samlet set fire skøn for transportomkostningen. Mellem disse punkter estimeres en sammenhæng, som beskriver udviklingen i omkostninger ved varierende mængder.

Vi beregner omkostning til transport ved hjælp af såkaldt eksponentiel estimation, som beskrevet i Gerrard (2000).

Den centrale ligning i beregningsmetoden er:

$$C = C_{ref} \left(\frac{Q}{Q_{ref}} \right)^n$$

hvor C er den ukendte omkostning for et kapitalgode (fx omkostningen ved rørledninger) med produktionskapaciteten Q . Produktionskapaciteten ved rørledninger er hvor meget CO₂, som skal føres igennem. På forhånd kendes C ikke for alle niveauer af Q og skal derfor estimeres. Det gøres med udgangspunkt i en kendt omkostning for rørledninger C_{ref} , for en bestemt produktionskapacitet på Q_{ref} . Det er et referencepunkt, som giver mulighed for at finde omkostningen ved andre produktionskapaciteter. n er en såkaldt skalerings-eksponent, som styrer, hvordan omkostningen udvikler sig ved skaleringen af produktionskapaciteten. For at kunne bruge denne metode kræves, at vi kender hhv. C_{ref} og Q_{ref} samt, at vi gør en antagelse omkring n .

C_{ref} findes ved først at beregne kapitalomkostningen ved anlæggelse af en rørledning med en årlig CO₂-transport på 2,5 mio. ton. Beregningen er baseret på en rørledning, som er 500 km lang og har en maksimal kapacitet på 300 ton CO₂ pr. time. Dertil kommer en pumpestation, som skal kunne holde trykket inde i røret. Den samlede omkostning bliver omregnet til en årlig omkostning ved metoden beskrevet ovenfor. Oveni kapitalomkostningen kommer også de årlige operationelle omkostninger samt strømudgifter.

Beregningen laves for forskellige flowniveauer. Det er her vi bruger eksponentiel estimation til at beregne rørledningens omkostning ved forskellige produktionsniveauer.

Et eksempel på beregning af prisen på en pipeline med årligt flow på 10 Mtpa er:

$$\text{Omkostning (10 Mtpa)} = 300 \text{ mio.} \times \left(\frac{10}{2,5}\right)^{0,6} = 689 \text{ mio. kr.}$$

Det lægges til grund i beregningen, at omkostninger til energi samt operationelle omkostninger afhænger lineært af flowet i systemet.

Metoden med eksponentiel estimering er velfundet i litteraturen og brugt flere steder. Udover i Gerrard (2000) bruges metoden også i Van der Spek m.fl. (2017) og IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2002). I forhold til valget af skaleringseksponent bruges normalt en værdi mellem 0,4-0,8 og typisk en værdi på 0,6 (Energistyrelsen, 2021c).

Lagring

Lagringsomkostningerne er ligesom transportomkostningerne baseret på energistyrelsens teknologikatalog. Her tages der udgangspunkt i omkostninger for offshorelagring, da de første projekter med CO₂-lagring for Danmarks vedkommende vil være i Nordsøen. Offshore lagring er dyre end onshore, da der er udgifter til platforme og skibe. Derudover er omkostningen for rørledning tæt på dobbelt så store, hvis de skal lægges i havet.

Energistyrelsen (2021c) opgør selv omkostningerne ved en, tre og fem mio. ton CO₂. Igen foretages en beregningsteknisk vurdering af, hvad omkostningerne ville være ved 50 mio. ton sammen med en estimation af sammenhængen mellem mængde og omkostninger. Det er især på lagringsomkostningerne, at der er store skalaeffekter. Lagring koster alene knap 700 kr. pr. ton, hvis lagringsmængden er 0,5 mio. tons CO₂ årligt. Ved fx 50 mio. ton vil omkostningerne falde til 78 kr. pr. ton. Det er således helt afgørende, at mængden af indfanget CO₂ bliver stor nok for at opnå denne omkostningsreduktion.

I beregningen af lagringsomkostningerne bruger vi fire punkter for udgifter ved forskellige mængder, hvorefter vi estimerer en tendenslinje mellem punkterne, hvor tendens er valgt til at være en potensfunktion. Denne tendenslinje bruger vi til at beregne omkostningerne ved forskellige de mellemliggende mængder.

De første tre punkter er omkostningen til lagring ved et niveau på hhv. en, tre og fem mio. ton pr. år. Disse omkostninger er taget stort set direkte fra Energistyrelsen (2021c). Vi har dog været nødt til at lave en række justeringer ift. platforme og brønde. Det er gjort for at udglatte de store kapitalinvesteringer, som er påkrævet ved en mængde på mere end fem Mt. Uden en beregningsteknisk udglatning ville omkostningsfunktionen have været ujævn og svær at tolke på.

Til sidst har vi lavet en teoretisk beregning af omkostningerne ved lagring af 50 mio. ton pr år. Denne beregning er lavet vha. eksponentiel estimation. Det er af Energistyrelsen lagt til grund, at lagerinfrastrukturen kan anvendes i 30 år. Derfor er den indfangede mængde 1500 mio. ton over 30 år. Energistyrelsen laver en beregning for fem mio. ton CO₂ pr. år, dvs. 150 mio. ton CO₂ fanget over 30 år. De 150 mio. ton CO₂ er således referencemængden. Hertil knyttes en samlet referenceomkostning på ca. 12 mia. kr. Da vi ønsker at finde omkostningen ved 50 mio. ton årligt indfanget CO₂, er der således tale om en samlet mængde over 30 år på 1500 ton CO₂. Endeligt bruges en skaleringsfaktor på 0,6, som også forudsættes i Energistyrelsen (2021c). Beregningen giver således en samlet omkostning over 30 år på 47,5 mia. kr.:

$$\left(\frac{1500 \text{ ton CO}_2}{150 \text{ ton CO}_2}\right)^{0,6} * 12 \text{ mia. kr.} = 47,5 \text{ mia. kr.}$$

Bilag 3: Beregning af fangst- og markedspotentiale for CCS i Europa

Beregning af markedspotentialet beskrives nedenfor med udgangspunkt i tallene fra tabel b.1. Der foreligger ikke samlede, internationale tal for udviklingen i udledninger fra punktkilder, samt fangspotentialet fra disse, og derfor anvender vi tilgængelige tal for Danmark (Energistyrelsen, 2021a) og antager, at udviklingen i de andre lande i analysen følger den forventede udvikling i Danmark. Tallene udgør derfor et indikativt bud på markedspotentialet, men vurderes repræsentativt, da nogle lande kan forventes at opleve et højere eller lavere fald i punktkilder eller forventet fangspotentiale, men der foreligger ikke solid viden som peger på, at det skulle afvige markant fra udviklingen eller forventningen i Danmark.

For at opgøre et tidssvarende skøn, estimerer vi fangspotentialet for år 2030. Det kræver, at de eksisterende opgørelser justeres for faktiske og forventede udviklinger siden den seneste sammenlignelige opgørelse, som stammer fra 2005. For at finde frem til fangspotentialet, tager vi afsæt i rå værdier for den årlige udledning fra punktkilder i 2005 fra GEUS (Anthonsen m.fl., 2021) og fremskriver værdien til 2019, ved at antage, at hvert lands punktkildeudledninger over perioden er reduceret med samme forhold som landets samlede CO₂-udledninger (OECD, 2023). For at finde den forventede udledning fra punktkilder i 2030, anvender vi tal fra Energistyrelsen (2021a) som estimerer, at man mellem 2019 og 2030 vil have reduceret punktkildeudledningerne i Danmark med 8 procent.

Fangspotentialet er vanskeligt at estimere, særligt på tværs af lande, da det kræver en kortlægning af fangspotentialet på hvert enkelt af de mange tusinde punktkilder. Dertil kommer, at forskellige typer punktkilder forventes at blive afviklet, nedskaleret eller bestå i forskellig grad på tværs af lande. Fx kan man i industritunge lande som Tyskland forvente store reduktioner i udledninger fra punktkilder i industrien over tid, mens man på den anden side kan forvente en stigning i andre typer punktkilder, som vedrører fx affaldsforbrænding. Data på dette niveau er ikke tilgængeligt, hvorfor vi antager at det lave og høje skøn, som Energistyrelsen har lavet for fangspotentialet fra danske punktkilder, svarer til fangspotentialet i de øvrige lande i analysen (Energistyrelsen, 2021a). Det høje skøn over fangspotentialet som andel af udledningen i 2030 er 57,1 procent, mens det lave skøn er 25,7 procent.

Bemærk, at tallene for kapacitet i undergrunden iflg. GEUS kan være behæftet med en vis usikkerhed. Opgørelsen vurderes stadig som det bedst sammenlignelige grundlag til en samlet opgørelse på tværs af lande.

Norge og Storbritannien inkluderes ikke i beregningen af det europæiske markedspotentiale, da de allerede er langt med egne CCS-projekter, og derfor ikke forventes at ville eksportere CO₂ til Danmark eller andre potentielle modtagerlande.

Tabel b.1 Punktkildeudledninger, fangstpotentiale og samlet CO₂ lagringskapacitet i udvalgte lande

	Årlig CO ₂ -udledning fra punktkilder i 2019	Forventet årlig CO ₂ - udledning fra punktkilder i 2030	Fangstpotentiale, højt skøn	Fangstpotentiale, lavt skøn	Opgjort lagringskapacitet
----- Mt CO ₂ pr. år -----					
Belgien	46	43	24	11	1.392
Bulgarien	50	46	26	12	2.665
Cypern*	4	4	2	1	0
Danmark	19	18	10	5	17.482
Estland	9	8	5	2	0
Finland*	22	20	11	5	0
Frankrig	104	96	55	25	28.144
Grækenland	43	40	23	10	2.006
Holland	78	72	41	18	3.130
Irland*	25	23	13	6	872
Italien	150	138	79	36	9.604
Kroatien	4	4	2	1	4.256
Letland	2	2	1	0	404
Litauen	5	5	3	1	37
Luxemburg	2	2	1	0	0
Malta*	1	1	0	0	0
Norge	26	24	14	6	194.845
Polen	181	167	95	43	4.286
Portugal*	22	20	11	5	7.560
Rumænien	62	57	33	15	22.600
Slovakiet	18	17	10	4	13.842
Slovenien	6	5	3	1	159
Spanien	107	99	56	25	23.439
Sverige*	47	43	25	11	3.400
Tjekkiet	65	60	34	15	2.896
Tyskland	377	347	198	89	26.330
UK	167	154	88	40	24.922
Ungarn	19	18	10	5	950
Østrig*	31	28	16	7	455

Anm.: De årlige CO₂-udledningninger fra punktkilder i 2019 er beregnet på baggrund af punktkildeudledningen i 2005, som ganges med forholdet mellem de samlede CO₂-udledningninger i 2005 og 2019 i det enkelte land. De forventede CO₂-udledningninger i 2030 er beregnet som udledningen fra punktkilder i 2019 justeret for en forventet reduktion frem til 2030 på 8% (tallet baserer sig på Energistyrelsen forventning for Danmark som anvendes for alle lande). Det høje og lave skøn for fangstpotentiale baserer sig på Energistyrelsen (2021a). Data for lande markeret med (*) stammer ikke fra GEUS, men fra følgende kilder: Hansson m.fl. (2017), NORDICCS (2016), Tsilingiridis m.fl. (2009), Shogenova m.fl. (2011), Reiter & Lindorfer (2015), Federal Ministry for Sustainability and Tourism (2020), SEAI (2008), Anthonson & Christensen (2021), Carneiro m.fl. (2011) og FCT (2015).

Kilde: GEUS, OECD, Energistyrelsen og egne beregninger.

Bilag 4: Beregning af det samlede økonomiske potentiale

Det økonomiske potentiale er beregnet med udgangspunkt i såkaldte input/output (IO)-tabeller. IO-tabeller er en del af nationalregnskabet og holder styr på, hvilke inputs en branche anvender, herunder arbejdskraft, kapital og tjenesteydelser fra andre brancher. Samtidigt viser tabellerne også hvor meget af en branches produktion, dvs. output, går til andre brancher. Tabellerne giver derfor et billede af økonomiens interaktion på tværs af brancher og hvor meget brancherne afhænger af hinanden.

Når en branche øger sin produktion, så kan man via IO-tabellerne se hvor mange flere inputs, den branche skal bruge for at nå det nye produktionsniveau. Fx skal den ansætte flere medarbejdere og skal bruge flere services og kapital fra andre brancher. Det giver den direkte effekt på hhv. beskæftigelse og produktion. Der kommer desuden også en ekstra effekt fra, at når branchen udvider sin produktion og øger efterspørgslen hos andre brancher, så skal de andre brancher også øge deres produktion og ansætte flere personer, som giver en yderligere effekt på beskæftigelse og BNP. Det er den såkaldte multiplikatoreffekt.

En tredje effekt kan i nogle tilfælde indregnes, men er udeladt her. De flere beskæftigede var i udgangspunktet ledige og har fået en højere indkomst som beskæftiget. Det betyder, at de øger deres forbrug og derefter øges produktionen yderligere. Denne effekt er taget ud i beregningerne fordi der antages en konstant strukturel beskæftigelse, når der er tale om efterspørgselsdrevne økonomiske ændringer. CCS-markedet efterspørger flere beskæftigede, mens udbuddet er uændret. Derfor er der i beregningerne forudsat, at de beskæftigede i CCS-markedet allerede er i arbejde og derfor potentielt har en begrænset (hvis overhovedet) økonomisk gevinst ved at blive ansat i CCS-branchen.

Danmarks Statistik opgør multiplikatorer for hhv. BNP og beskæftigelse opgjort ved IO-tabellerne. Der er taget udgangspunkt i multiplikatorerne for branchen "indvinding af olie og gas", og det er den "simple multiplikator", som er anvendt. Det er netop den multiplikator, som tager højde for den ekstra efterspørgsel efter andre sektorer's produktion, som meromsætningen i olie og gas branchen medfører, men udelader virkningen fra øget beskæftigelse på privatforbruget. Multiplikatoren for BNP er opgjort til 1,28, dvs. hvis produktionen stiger med 1 mio. kr. i branchen for indvinding af olie og gas, vil det øge BNP med 1,28 mio. kr. På tilsvarende vis er multiplikatoren for beskæftigelse opgjort til 0,216, dvs. når produktionen stiger med 1 mio. kr., vil det øge beskæftigelsen med 0,216 beskæftigede. Der skal altså produceres ca. 5 mio. kr. ekstra, før beskæftigelsen i branchen stiger med én. Multiplikatoren findes også for fuldtidsbeskæftigelse, hvor den er opgjort til 0,18. Det er dog ikke et udtryk for antal stillinger, hvorfor der er beregnet på beskæftigelsen målt i hoveder. Multiplikatorerne er opgjort for året 2019.

Bilag 5: Beregning af CO₂-kvoteprisen

Fremskrivninger af CO₂-kvoteprisen kan foretages på baggrund af en klassisk Hottelling tilgang. En sådan fremskrivning baserer sig på, at prisen på et aktiv udvikler sig med den gældende realrente. Intuitionen er, at en ejer af en CO₂-kvote har mulighed for at sælge nu, eller vente til næste år. Hvis ejeren sælger i dag, kan pengene lægges i investeringer, som giver et afkast svarende til realrenten. Ejeren beholder kvoten, hvis den forventede prisstigning er større end afkastet på at sælge og investere i dag. Hvis kvoten beholdes trækkes den ud af markedet og udbuddet af kvoter falder. Det øger prisen i dag, som reducerer den forventede prisstigning (da prisen næste år ikke har ændret sig). Når den forventede pris-

stigning lige netop svarer til afkastet på at sælge kvoten og investere i dag, vil ejeren være lige tilfreds med enten at sælge eller beholde kvoten. Markedet er derfor i ligevægt.

I artiklerne af Beck og Kruse-Andersen (2020), Quemin og Trotignon (2019) og Perino og Willner (2017) forudsættes forskellige realrenter, hhv. 5 pct., 3 pct. og 10 pct., som forudsættes at være retvisende for fremskrivning af kvoteprisen. Med en kvotepris målt d. 31. januar 2023 til 675 kr., vil prisen ved indregning af de tre realrenter i 2030 udgøre hhv. 950kr, 830kr. og 1.315kr.¹¹ Da 1.000 kr. ligger rimelig gennemsnitligt i det spænd, er det beregningsforudsætningen bag markedspotentialet.

¹¹ Kilde (besøgt 31. januar 2023):

<https://www.eex.com/en/market-data/environmentals/spot#%7B%22snippetpicker%22%3A%2252%22%7D>