

ROLF GOLOMBEK*Seniorforsker, Frischsenteret***MADS GREAKER***Professor, Handelshøyskolen ved OsloMet***SNORRE KVERNDOKK***Seniorforsker, Frischsenteret*

Hva er framtiden for CCS?¹

Karbonfangst og lagring (CCS) har i mange studier blitt framhevet som en viktig teknologi for å nå klimamålsettingene i Parisavtalen på en kostnadseffektiv måte. Likevel har utviklingen og implementeringen av CCS-teknologier nesten stått stille i flere år. Dette kan eksemplifiseres ved Stoltenberg-regjeringens månelandingsprosjekt fra 2007 som nå, 12 år etter, ennå ikke har ført til et fullskalaanlegg for CCS i Norge. I denne artikkelen drøfter vi årsaker til spriket mellom dagens beskjedne bruk av CCS og denne teknologiens store potensial for å realisere globale samfunnsøkonomiske gevinster. Vi framhever markedsimperfeksjoner og bruk av mange virkemidler i energi- og klimapolitikken som mulige forklaringer på spriket. Hvis klimamålene for 2030 og 2050 blir realisert, kan mye mer CCS-teknologi bli fasett inn, men antagelig på et senere tidspunkt og i et mindre omfang enn det som ville vært samfunnsøkonomisk optimalt hvis klimaproblemet hadde blitt tatt på alvor for noen tiår siden.

INNLEDNING

I sin nyttårstale i 2007 lanserte statsminister Jens Stoltenberg et av Stoltenberg-regjeringens største prestisjeprosjekter; et CO₂-reanseanlegg for gasskraft på Mongstad. Selv kalte han det for Norges månelandingsprosjekt. Målet var å få på plass teknologi for å rense klimagassutslippene fra kraftverket innen sju år. I dag, 12 år senere, står vi igjen med et testanlegg på Mongstad, mens planen om

et fullskalaanlegg havarete under Stoltenberg-regjeringen i 2013. Prislappen for testanlegget ble flere milliarder, men norske politikere har likevel ikke gitt opp karbonfangst og lagring.

Solbergregjeringen har over en lengre periode utredet muligheter for å iverksette et demonstrasjonsprosjekt for fangst, transport og lagring av CO₂ i Norge. Det er utredet tre fangstprosjekter; på NORCEMs sementfabrikk i Brevik, på ammoniakfabrikken til Yara i Porsgrunn, og på Fortum Oslo sitt energigjenvinningsanlegg på Klemetsrud i Oslo. All CO₂ skal transporteres med skip til Kollsnes, for derfra å sendes i rør til lagring i Nordsjøen. Mens planen for Mongstad var å skille ut karbon fra naturgass som

¹ Dette prosjektet er muliggjort gjennom CREE – Oslo Centre for Research on Environmentally friendly Energy som finansieres av Norges forskningsråd. Vi er takknemlige for kommentarer fra Ragnhild Haugli Bråten, Michael Hoel, Jo Wiklund, Ståle Aakenes og en anonym konsulent. Alle forfatterne er også med i PLATON («PLATform for Open and Nationally accessible climate policy knowledge») finansiert av Norges forskningsråd.

skulle benyttes til å produsere elektrisitet, skal nå utslipp fra industrielle prosesser og søppelforbrenning fanges og lagres. I 2018 bestemte Regjeringen seg for å tilby støtte til å gjennomføre et forprosjekt i Brevik og Oslo, samtidig som Yara-prosjektet ble avsluttet, se Olje- og energidepartementet (2018). Planen er igjen å få til ett fullskala-prosjekt.

Også internasjonalt har det gått trått med satsingen på karbonfangst og lagring (CCS)²: Global CCS Institute (2018) melder at det nå er 18 kommersielle storskalaanlegg i verden. Selv om dette er mer enn ingenting, er det likevel et stort sprik mellom faktisk utbygging av fullskalaanlegg for karbonfangst og det som flere internasjonale studier mener er samfunnsøkonomisk lønnsom utbygging. I IPCCs (FNs klimapanel) scenarier for to gradersmålet er bruk av CCS på kraftverk og industrielle prosesser tungt inne allerede fra 2020. Dette senker kostnadene ved å nå to gradersmålet betydelig.³ Lederen av IEAs (Det internasjonale energi-byråets) Energy Demand Technology Unit gikk enda lenger da han uttalte at bruk av CCS-teknologier er nødvendig hvis verden skal ha mulighet til å nå togradersmålet (null nettutslipp): «we can't get there without CCS», se Forbes (2017). Jo mer vekt verden legger på togradersmålet, jo mer øker med andre ord den samfunnsøkonomiske verdien av å bruke CCS (ZEP, 2017).

Hva skyldes spriket mellom det som ekspertene i IPCC og IEA anbefaler og faktisk utbygging av fullskalaanlegg for karbonfangst og lagring? Hensikten med denne artikkelen er å drøfte årsaker til den manglende suksessen for CCS til tross for at teknologien blir regnet som essensiell for å løse klimautfordringen.

CCS omfatter tre aktiviteter; fangst, transport og lagring.⁴ Teknologiene under de ulike aktivitetene er i utgangspunktet ikke nye da CCS har pågått en del år allerede. Norge har allerede opparbeidet seg mer enn tjue års erfaring med lagring. Naturgassen som hentes opp flere kilometer under havbunnen, kan ha et høyt innhold av CO₂.

² CCS står for Carbon Capture and Storage.

³ Se f.eks. Tabell SPM.2 i Summary for Policymakers i IPCC (2014). Den viser at hvis man ønsker å stabilisere CO₂ i atmosfæren på 450 ppm innen 2100, noe som tilsvarer togradersmålet, vil kostnadene, i gjennomsnitt basert på de modellene som er brukt, stige med 138% uten CCS. Ved en stabilisering på 550 ppm, vil kostnadene bli 39% høyere. I dag er konsentrasjonen ca. 410 ppm. For interesserte lesere gir Budins m.fl. (2018) en god oversikt over modellanalysene som denne IPCC-rapporten bygger på.

⁴ Nedenfor bruker vi tallmateriale fra IEA for karbonfangst. I likhet med IEA har vi derfor en vid definisjon av karbonfangst; alle aktiviteter som innebærer at karbon fjernes, uavhengig av formål og lønnsomhet, er inkludert.

Hvis CO₂-konsentrasjonen overstiger 2,5 prosent, slik som på Sleipnerfeltet i Nordsjøen, må CO₂ fjernes for at naturgassen skal være salgbar. Etter at CO₂-avgiften ble innført i Norge i 1991, ble det lønnsomt for Equinor (tidligere Statoil) å lagre CO₂ istedenfor å slippe den ut i luften. I 1996 startet de derfor lagring av CO₂ fra Sleipnerfeltet i Utsira-formasjonen. Senere har det blitt lagret CO₂ på Snøhvitfeltet.

Det fins tre ulike teknologier for *karbonfangst* fra kraftverk: pre-combustion, post-combustion og oxy-fuel, se for eksempel Leung m.fl. (2014) eller Jonassen (2018). De to første er prosesser som tar bort CO₂ enten før eller etter forbrenningsprosessen (pre-combustion versus post-combustion), mens med den siste teknologien blir det fossile brensel brent med rent oksygen istedenfor luft. Post-combustion teknologien kan brukes i eksisterende kraftverk og industrieanlegg, mens de to andre teknologiene kun kan brukes i nybygde (eller helt ombygde) anlegg.

Kostnadene ved karbonfangst er fremdeles høye. Post-combustion med absorpsjonsteknologi er den mest modne av teknologiene, og er derfor den løsningen som i dag er mest aktuell ifm. et fullskalaanlegg⁵. CCS-teknologi bygger i stor grad på petroleumsselskapenes kompetanse; olje- og gasselskaper er involvert i hele 17 av de i alt 18 pågående fullskala-prosjektene som vi kjenner til internasjonalt. Kun to av prosjektene henter ut CO₂ fra en forbrenningsgass. De andre skiller ut CO₂ fra prosessgasser, se f.eks. CleanTechnica (2019).⁶

Det andre trinnet i CCS er å *transportere* CO₂ til lagringsstedet. Transport kan skje med skip eller i rør. For Norcems sementfabrikk i Brevik, er planen å bruke skip til å transportere CO₂ til et mellomlager på Vestlandet (Kollsnes) før gassen føres i rør til en geologisk formasjon i Nordsjøen for permanent lagring. Det har imidlertid vært mye motstand mot CO₂-lagring både i USA og Europa, bl.a. på grunn av frykt for lekkasje (van der Zwaan and Gerlagh, 2016). I Norge har det vært liten motstand, da lagring er tenkt å skje i Nordsjøen, langt fra der folk bor, og så dypt som to-tre kilometer under havbunnen. Equinor har gode erfaringer med CO₂-lagring fra Sleipnerfeltet, mens lagring ble et problem på Snøhvit, se Teknisk Ukeblad (2011). Formasjoner i Nordsjøen har kapasitet til å ta imot CO₂ fra hele Europa i en årrekke, og lagring av CO₂ kan derfor bli

⁵ Med denne teknologiske løsningen kommer røykgassen i kontakt med en væske som fanger CO₂.

⁶ Mens en prosessgass er rik på metan, hydrogen eller CO, inneholder en forbrenningsgass mye oksygen, nitrogen og støv.

en ny inntektskilde for Norge. For øyeblikket peker geologiske formasjoner sørvest for Trollfeltet (Smeaheia) seg ut som spesielt gunstig

Det kan være flere årsaker til at CCS ikke har lyktes i like stort omfang som man trodde for 10-15 år siden. Kostnadene ved implementering av CCS kan være høyere enn det som ble lagt til grunn i modellanalysene fra IEA, IPCC og andre. Alternativt kan kostnadene til andre nullutslippsteknologier, som vind og sol, ha falt mer enn opprinnelig antatt. På den annen side fortsetter bl.a. IEA å lage scenarier hvor CCS spiller en avgjørende rolle for å nå togradersmålet selv om man nå vet mye mer om kostnadene til CCS og andre nullutslippsteknologier.

Usikkerhet om framtidig politikk, f.eks. om landene kommer til å sette inn tilstrekkelige tiltak for å nå målene i Parisavtalen, kan bety mer for CCS-investeringer enn for fornybarinvesteringer. Dette støttes av Walsh mfl. (2014) som viser at store karbonprisfluktasjoner, noe vi har opplevd i det europeiske kvotemarkedet, ikke er gunstig for CCS-investeringer; et regime med CO₂-avgifter ville vært bedre.

Durmaz (2018) understreker også at valget av politikkinstrumenter som brukes for å nå klimamålene er en viktig faktor for investeringer i CCS. I tillegg poengterer han at CCS-teknologien er for dyr gitt prisene på utslipp av CO₂. Usikkerheten rundt investeringskostnadene ved CCS påpekes videre av Lohwasser og Madlener (2012) som en viktig grunn til lite spredning av teknologien. Andre grunner som nevnes for at CCS ikke har lyktes er manglende lagringsmuligheter, mangel på fagfolk da CCS i stor grad konkurrerer med olje- og gassnæringen om arbeidskraften (en næring med høye lønninger), juridiske forhold, samt motstand mot lagring og lekkasjer (Herzog, 2011; van der Zwaan and Gerlagh, 2016; Budins mfl., 2018).

Vi vil ikke gå nærmere inn på disse grunnene i denne artikkelen, men isteden trekke fram to andre mulige grunner som har vært mindre belyst. En mulighet er at det kan være ukorrigerte markedsimperfeksjoner i de tre markedene som utgjør CCS-systemet (fangst, transport og lagring), som kan ha hemmet utbyggingen av CCS. Dette drøfter vi i kapittel 4. Videre kan CCS bli rammet av dagens virkemiddelbruk i klimapolitikken (kapittel 5). Myndighetene benytter mange virkemidler for å nå togradersmålet, f.eks. CO₂-prising (avgifter eller omsettbare kvoter), subsidier på fornybar energi og direkte reguleringer. For gitte mål, påvirker ett sett med virkemidler størrelsen på de andre

virkemidlene som må implementeres for å nå målsettingene. Hvis det f.eks. er utstrakt satsing på fornybar energi, vil dette senke CO₂-prisen som må til for å nå utslippsmålene, og de finansielle insentivene til industrien for å investere i CCS svekkes.

Til slutt i artikkelen (kapittel 6) drøfter vi hvorvidt CCS kan bli en varig løsning eller om det bare vil være en midlertidig løsning. Hvis det er en varig løsning, vil teknologien være viktig både for å nå og stabilisere utslippene slik at de på veldig lang sikt harmonerer med togradersmålet. Hvis CCS kun er en midlertidig løsning, bør CCS inngå i teknologipakken på vei mot togradersmålet, men ikke være del av en varig løsning for å holde togradersmålet. Etter vår mening er dette bare et viktig spørsmål dersom samfunnet må kanalisere mye midler til forskning og utvikling (FoU) før CCS kan tas i bruk.

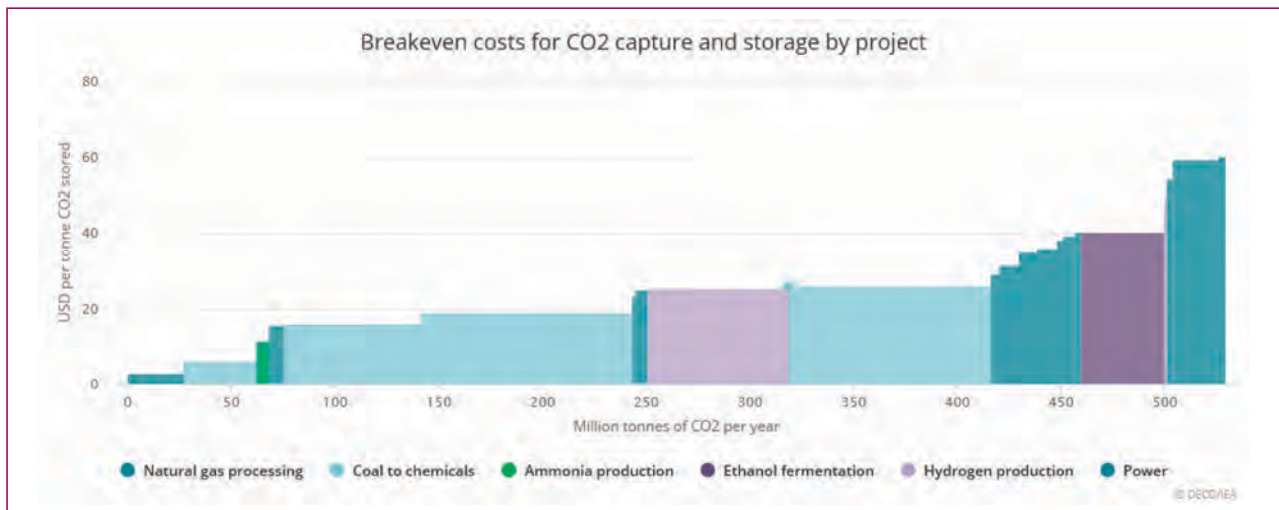
TEKNOLOGISTATUS

Som nevnt har CCS har vært i bruk i en rekke år. Det globale omfanget av CO₂-fangst var 13 millioner tonn i 2000, se IEA (2018a). Etter 2000 var fangsten nesten konstant i 10 år, mens den deretter steg til 31 millioner tonn i 2017. Akkumulert fjerning av CO₂ fra naturgass utvunnet på Sleipner-feltet er nå ca 20 Mt CO₂. All CO₂ derfra har blitt lagret i Utsira-formasjonen.

I kraftsektoren var det ved utgangen av 2017 bare to CCS-anlegg i drift; ett i USA og ett i Canada. Begge anleggene er kullkraftanlegg med ettermontert post-combustion teknologi. Samlet fangstkapasitet var 2,4 millioner tonn CO₂ per år. Globalt er det syv CCS-prosjekter innen kraftsektoren som nå er i en tidlig utviklingsfase, inkludert ett i Europa (Storbritannia). Samlet fangstkapasitet for de syv anleggene er ca 10,5 millioner tonn CO₂ per år. Det er imidlertid flere CCS-innovasjonsprosjekter på gang, bl.a. ett i USA der CO₂ skal brukes i et gasskraftanlegg med en oxy-fuel prosess, se IEA (2019).⁷

I 2018 var det innenfor industri og energitransformasjon 16 CCS-anlegg i drift globalt. Disse hadde en samlet fangstkapasitet på 28 millioner tonn CO₂ per år; omtrent 80% av denne kapasiteten er innenfor petroleumsutvinning. Det er en rekke pågående FoU-prosjekter i Japan, Tyskland, Nederland og Island, bl.a. forsøk på å produsere

⁷ Ifølge IPCC (2014), Figure SPM.9, vil stabilisering i intervallet 430 til 530 ppm CO₂-ekvivalenter innen 2100 øke årlige globale investeringer i CCS i perioden 2010-2029 med noe mer enn 100 milliarder dollar.



Figur 1: Karbonpris og økt CCS-fangstkapasitet innenfor industri og energitransformasjon.

Kilde: IEA (2018b)

metan fra hydrogen og CO₂, samt eksperimenter med å produsere jern med beskjedne CO₂-utslipp. Andre prosjekter omfatter bl.a. et kullbasert kjemisk anlegg i Kina og Chevrons gigantiske CCS-prosjekt i tilknytning til et LNG-anlegg (flytende naturgass) i Australia, se IEA (2019).

SCENARIOER FOR CCS

Er eksisterende og forventet CCS-kapasitet i tråd med nødvendig kapasitet for å nå togradersmålet? IEA har utviklet et scenario, Sustainable Development Scenario (SDS), som angir en konsistent, kostnadseffektiv bane som er forenlig med Paris-avtalen, bærekraftig vannforbruk og målsettinger om luftkvalitet, se IEA (2018a). I SDS er andelen av samlet energiproduksjon som er fossilbasert, fallende over tid; fra 81% i 2017 til 60% i 2040. Samtidig øker andelen fossilbasert energiproduksjon som har CCS-teknologi fra 0% i 2017 til 10% i 2040.

I SDS er fangstkapasiteten i kraftsektoren 350 millioner tonn CO₂ i 2030 og 1500 millioner tonn i 2040. Fram til 2040 er omtrent 80 prosent av fangsten knyttet til kullkraftanlegg, primært ettermonterte-fangstfasiliteter. For gasskraftanlegg har omtrent en sjettedel av produksjonskapasiteten i 2040 fangstanlegg. Fangsttallene i SDS er himmelhøyt over den nåværende årskapasiteten i kraftsektoren på 2,4 millioner tonn CO₂, se kapittel 2 over. Også innenfor industri og energitransformasjon er det et klart misforhold mellom dagens kapasitet (28 millioner tonn, se

ovenfor) og SDS-kapasiteten i 2030 (500 millioner tonn) og 2040 (1600 millioner tonn).⁸

Fangstkapasiteten kan økes gjennom investeringer, som kan bli utløst hvis de er lønnsomme, for eksempel fordi det pålegges en tilstrekkelig høy pris på CO₂-utslipp. Dette er studert i IEA (2018a) for utslipp fra *petroleumssektoren*. Analysen er knyttet til New Policies Scenario, som angir energi- og utslippsutviklingen gitt all politikk som ble vedtatt senest sommeren 2018, samt sannsynlige effekter av annonsert politikk, inkludert NDCs (Nationally Determined Contributions) meldt til Paris-avtalen. Utslippet fra den globale petroleumssektoren øker i New Policies Scenario fra 2900 millioner tonn CO₂ i 2017 til 3600 millioner tonn i 2040. Hvis det imidlertid pålegges en utslippsskatt på 50 USD per tonn CO₂, reduseres utslippet med ca. 1000 millioner tonn i 2040. Omtrent 200 millioner tonn skyldes CO₂-fangst; den øvrige reduksjonen avspeiler bl.a. bruk av fornybare ressurser til å elektrifisere sektoren, mindre brenning av petroleum på feltene, samt effektivitetsgevinster.

IEA (2018b) gir kortfattet informasjon om hvordan en karbonskatt innenfor industri og energitransformasjon kan utløse investeringer som i neste omgang øker CCS-fangstkapasiteten. Hvis karbonskatten er 40 USD per tonn CO₂, kan fangstkapasiteten øke med rundt 500 millioner

⁸ IEA har tidligere utarbeidet et stabiliseringsscenario ("450-scenariet"). Her er det lagt opp til en utbygging av CO₂-fangst som svarer til 4000 Mongstad-prosjekter i løpet av 20 år, se Mohn (2016).

tonn CO₂, se figur 1. Legg merke til at de norske satsingsområdene søppelforbrenning og sementproduksjon ikke er inkludert blant de kostnadseffektive aktivitetene i figur 1.

Tidligere internasjonale rapporter

Konklusjonen i IEA (2018a) om at utviklingen i CCS-fangstkapasitetene er langt bak det som er påkrevet for å nå Paris-målene, er i tråd med tidligere internasjonale rapporter. I Energy Technology Perspectives 2012 krever realisering av 2 gradersmålet at CCS bidrar med 14% av den akkumulerte utslippsreduksjonen mellom 2015 og 2050, se IEA (2012). Her sammenlignes utslippsbanen som gir 2 graders temperaturøkning, med en business-as-usual bane som ville ha økt temperaturen med 6 grader. I banen som gir 2 graders økning, finner omtrent halvparten av CO₂-fangsten sted i industrisektoren; omfanget av CCS er spesielt høyt innenfor produksjon av stål, sement og kjemikalier. Store deler av karbonfangsten skjer utenfor OECD. For eksempel er Kinas andel av akkumulert CO₂-fangst i perioden mellom 2015 og 2050 ca. en tredel.

Også IPCC (2014) gir informasjon om betydningen av CCS-teknologier for å nå togradersmålet. De bygger på publiserte arbeider som har benyttet 31 modeller og 1184 scenarier (Kriegler mfl., 2014). Ifølge Figure 4.1 i denne rapporten, vil de årlige utslippene i kraftsektoren i 2100 være nær null hvis CCS ikke benyttes, mens de er negative (-11 Gt CO₂-ekvivalenter) hvis CCS, spesielt bio-CCS, benyttes.⁹ I begge tilfeller er det lagt til grunn at utslippskonsentrasjonen er rundt 450 ppm CO₂-ekvivalenter innen 2100, noe som antas å være konsistent med togradersmålet. I samme rapport angir Figure 4.2 i Summary for Policymakers at hvis konsentrasjonen ligger mellom 450 og 500 ppm CO₂-ekvivalenter innen 2100, og det er «høy» energietterspørsel, vil global produksjon av kullkraft med CCS være ca 2800 TWh i 2050, mens global produksjon av gasskraft med CCS vil være rundt 7200 TWh (i 2050).¹⁰ I dag er det bare to kullkraftanlegg med CCS, se ovenfor, mens det ikke fins gasskraftproduksjon med CCS.

I modellsimuleringene som refereres i IPCC (2014), vil det i gjennomsnitt være store samfunnsøkonomiske gevinster ved å bruke CCS for å nå togradersmålet. Lignende konklusjoner basert på andre klimamålsetninger finnes i flere publiserte arbeider av Reyer Gerlagh og Bob van der

⁹ Mens standard CCS-verk renser omtrent 90 prosent av utslippene, kan utslippene med bio-CCS bli negative.

¹⁰ Et kraftverk med 1 MW kapasitet og som er i drift i 75% av årets timer, har en årlig produksjon på 6,5 TWh.

Zwaan, for eksempel Gerlagh og van der Zwaan (2006). van der Zwaan og Gerlagh (2009) finner at CCS vil være lønnsomt, selv med CO₂-lekkasjer som ligger over det som antas som sannsynlig. Videre konkluderer van der Zwaan and Gerlagh (2016) at selv om det er dyrere å lagre CO₂ under havbunnen enn på land, vil klimakonsekvensene av lekkasjer være større på land. Nyere foreløpig upubliserte studier som også støtter opp under rollen til CCS for å nå togradersmålet er Farrell mfl. (2019) og Weitzel (2019).

IPCCs 1,5 graders rapport

IPCC publiserte høsten 2018 en spesialrapport med fire utslippsbaner (scenarier) fram til 2100 med forventet temperaturstigning på 1,5 grader over førindustrielt nivå, se IPCC (2019). De fire utslippsbanene spriker langs en rekke sosioøkonomiske dimensjoner, se tabell 1. Merk at beskrivelsen av de fire banene i tabell 1 er kun en oversettelse av den engelske teksten i IPCC (2019) – vi har ikke klart å finne en mer presis, teknisk definisjon. Det er f.eks. ikke gitt opplysninger om banenes effektivitetssegenskaper.

Kapittel 2 i rapporten inneholder informasjon om produksjon av elektrisitet og samlet energiproduksjon etter teknologitype for årene 2030, 2050 og 2100 (Figur 2.16, s. 135). I én av de fire scenariene anvendes ikke CCS-teknologier. I de øvrige tre scenariene har fossilbasert kraft med CCS en markedsandel (i det «globale kraftmarkedet») på inntil 10% i 2050, mens markedsandelen er enten nær null eller null i 2030 og 2100. I to scenarier har biomassekraft med CCS en markedsandel (i det globale kraftmarkedet) i størrelsesorden 5% i 2100, mens markedsandelen er betydelig lavere før 2100. Dette er beskjedene tall, men biomasse koblet til CCS er mye viktigere for å redusere utslippene i de øvrige energisektorene. Tabell 1 gir informasjon om akkumulert fangst med CCS i de fire scenariene, både samlet fangst og fangst med bio-CCS, fram til 2100. Merk at i 2017 var global fangstkapasitet 0,028 GT CO₂.

Mens virkemidler ikke er diskutert i IEAs Sustainable Development Scenario (SDS), er det gitt noe informasjon i IPCC (2019) om karbonskatter som er påkrevet for å generere de fire scenariene, se tabell 2. Vi ser at for hvert av de fire utvalgte årene 2030, 2050, 2070 og 2100 er det en enorm variasjon i de modellbestemte anslagene for karbonskatter. Det er f.eks. opplyst at i scenarier som er konsistente med en og en halv gradersmålet, varierer karbonskatten i 2050 mellom 245 og 14.300 USD₂₀₁₀ per tonn CO₂. Det tilsvarende intervallet for scenarier som er konsistente med togradersmålet, er karbonskatter i intervallet 45 til 1050 (i 2050).

Tabell 1: Akkumulert fangst med CCS (GT CO₂) fram til 2100

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Samlet fangst med CCS	0	348	687	1218
Fangst med bio-CCS	0	151	414	1191

Scenario 1: Omfattende innovasjoner innenfor økonomi, samfunn og teknologi reduserer etterspørselen etter energi fram til 2050 samtidig som global levestandard bedres. Maksimal temperaturøkning overstiger aldri 1,6 grader og er lavere enn 1,5 grader i 2100.

Scenario 2: Bærekraftig utvikling innen bl.a. energiintensitet, bruk av teknologier og konsummønster, kombinert med lav sosial aksept for bio-CCS. Maksimal temperaturøkning overstiger aldri 1,6 grader og er lavere enn 1,5 grader i 2100.

Scenario 3: Sosial og teknologisk utvikling i tråd med historiske trender. Utslippsreduksjoner realiseres primært gjennom endret sammensetning av energiteknologier, mens det er begrenset reduksjon i etterspørselen etter energi. Maksimal temperaturøkning overstiger aldri 1,6 grader og er lavere enn 1,5 grader i 2100.

Scenario 4: Høy energiintensitet og høy økonomisk vekst leder til en lite klimavennlig livsstil globalt. Utslippsreduksjoner realiseres primært gjennom teknologiske løsninger, særlig bruk av bio-CCS. Maksimal temperaturøkning overstiger 1,6 grader, men er lavere enn 1,5 grader i 2100.

Kilde: IPCC (2019), Summary for Policymakers, s. 16.

Karbonskattene i tabell 2 er hentet fra en rekke tidligere modellkjøringer. Rapporten gir ingen inngående drøfting av hvorfor intervallene er så vide, men nøyer seg langt på vei med å konstatere at «The wide range of values depends on numerous aspects, including methodologies, projected energy service demands, mitigation targets, fuel prices and technology availability», s. 152. IPCC (2019) opplyser heller ikke om hvilke karbonskatter som gjelder for hver av de fire scenarioene. Alt i alt tilsier tabell 2 at de karbonskattene som er nødvendige for å nå togradersmålet, må i 2030 trolig være langt høyere enn dagens EU ETS-priser (prisene i EUs kvotehandels system), samt stige kraftig fram mot 2100. En karbonskatt som skal sikre 1,5 gradersmålet, kan ifølge tabell 2 lett bli høyere enn 1000 USD₂₀₁₀ per tonn CO₂ i 2100.

Tabell 2: Karbonskatter (2010 USD per tonn CO₂) i IPCCs 1,5 graders rapport

	2030	2050	2070	2100
1,5 graders økning ¹	135-6050	245-14300	420-19300	690-30100
2 graders økning ²	15-220	45-1050	120-1100	175-2340

¹ Scenarioer der sannsynligheten for at høyeste temperaturøkning før 2100 er mindre enn 1,5 grader er mellom 50 og 66 prosent.

² Scenarioer der sannsynligheten for at høyeste temperaturøkning før 2100 er mindre enn 2 grader er mellom 50 og 66 prosent.

Kilde: IPCC (2019) s.152.

Som vi har vist i dette kapitlet, er det stort sprik mellom faktisk utbygging av fullskalaanlegg med CCS og det som flere internasjonale studier mener er en

samfunnsøkonomisk lønnsom utbygging. I de neste to kapitlene drøfter vi hva dette spriket kan skyldes.

MARKEDSIMPERFEKSJONER

Manglende suksess for CCS kan skyldes markedsimperfeksjoner. Positive læringseksternaliteter er én type markedsimperfeksjon. Gjennom fullskalautprøving av umodne teknologier vil man som regel stadig oppdage muligheter til å forbedre teknologien. Det betyr at kostnaden per fangst og lagret enhet CO₂ faller ettersom man bygger flere anlegg. Så lenge produsenter av CCS-teknologi vil lære fra et hvert anlegg som bygges uavhengig av om de bygger anlegget selv, har vi positiv læringseksternaliteter.

Ved hjelp av produksjons- og kostnadsdata kan man estimere læringskurver for umodne teknologier. Funksjonsformen som gir best tilpasning til data, gir ofte som resultat at en dobling av akkumulert produksjon gir en bestemt prosentvis reduksjon i enhetskostnaden til teknologien. Læringskurver har blitt anvendt i flere empiriske arbeider innenfor energi og klima. For det første er det gjennomført økonomiske studier på historiske data som viser at enhetskostnadene i sol- og vindkraft faller mellom 5 og 20 prosent for hver dobling av akkumulert produksjon (se f.eks. IEA, 2000). En nyere studie viser at produksjon av litiumbatterier til elbiler også viser sterk grad av læring. Gitt at produksjonen fortsetter å øke, kan kostnadene falle med rundt 75 prosent fram til 2025, se Hensley et al. (2012).

Selv om de enkelte delene i CCS-prosessen består av kjente teknologier, har man lite erfaring med å sette sammen

delene på en effektiv måte. Ta for eksempel post-combustion-fangst av CO₂. Man kjenner til ulike metoder for hvordan man kan skille ut CO₂ fra en varm røykgass. Det er likevel ikke enighet om hvilken metode som vil fungere best sammen med et kraftverk eller en sementfabrikk, slik at energitapet minimeres. Det er derfor sannsynlig at jo flere post-combustion-anlegg som bygges, jo lavere vil kostnadene bli ettersom erfaring akkumuleres. Vi mistenker at scenarioene til både IEA og IPCC forutsetter betydelig læring innenfor CCS. Figur 1 viser for eksempel at en karbonpris på US\$ 60 vil utløse store CCS investeringer i flere sektorer. De tre fangstprosjektene som er utredet i Norge, har imidlertid kostnader per fanget tonn CO₂ på fra omtrent US\$ 170 til 360 avhengig av omfanget av satsningen (Oslo Economics, 2016).

Siden det er bygget få CCS-anlegg, er det vanskelig å anslå læringsraten for CCS. Det er derfor vanskelig å anslå hvor mange anlegg som må bygges før CCS kan bli et konkurransedyktig rensalternativ. Rubin et. al. (2007) baserer seg på læringsrater fra lignende teknologier; SO₂-rensing, NO_x-rensing, gasskraftverk, kjeler til kullkraftverk, LNG-produksjon, samt oksygen- og hydrogenproduksjon. De bruker læringsratene fra disse studiene på et kraftverk med CO₂-håndtering og finner at elektrisitetskostnadene for tradisjonelle kull- og gasskraftverk med «post combustion CO₂-fangst» har en forventet læringsrate på 3 prosent. Dette kan virke lite, men gjenspeiler at læringspotensialet for selve kraftverket eksklusive fangst delen langt på vei er uttømt. Ser man på fangst delen alene, er læringsratene høyere. IEA (2012) bruker åtte prosent reduksjon i kapitalkostnadene og fire prosent reduksjon i energitapet pr. dobling i antall CO₂-håndteringsanlegg.

På 1980-tallet ble de næringsøkonomiske implikasjonene av læringskurver studert. Spence (1981) viste at et monopol vil ta hensyn til egen læringskurve, og monopolisten vil initialt prise lavere enn marginalkostnaden for å bevege seg nedover læringskurven raskere. Monopolisten vil derfor ta innover seg at dersom hun produserer mer i dag, får hun lavere kostnader i framtiden. Spence viste videre at denne effekten avhenger av markedsstrukturen, og at i situasjoner med flere bedrifter og høy grad av kunnskapsoverføring mellom bedrifter, vil bedriftene ikke prise like aggressivt. Fra et samfunnsøkonomisk synspunkt kan dette gi for lav markedsdiffusjon av den nye teknologien. Det kan tenkes at potensielle leverandører av CCS-teknologier er forbeholdne med å investere egne midler i CCS-anlegg da de ikke forventer at de alene skal kunne dra nytte av erfaringene som bygges opp. I slike tilfeller kan det være ønskelig

at myndighetene subsidierer CCS-anlegg i en startfase for å få fortgang i erfaringsoppbyggingen. Dette er også så langt vi har forstått en viktig grunn til at norske politikere ønsker å støtte fangstanlegg på Norcems sementfabrikk i Brevik og ved søppelforbrenningsanlegget på Klemetsrud i Oslo. Håpet er at disse investeringene skal spore til investeringer andre steder i Europa, og at kostnadene ved CCS dermed skal begynne å falle.

Det fins også andre markedsimperfeksjoner. En investors vurdering av gevinsten ved å investere i CO₂-fangst avhenger av om det fins et system for transport og lagring av CO₂. Innenfor fagterminologien betyr det at fangst av CO₂ er et «gode» med indirekte nettverkseksternaliteter, dvs. jo flere som kjøper godet, jo høyere nytte har hver kjøper av godet. For CCS-fangstanlegg kan mekanismen være som følger: Dersom flere investorer satser på CO₂-fangst, kan det bli lønnsomt å bygge ut et bedre transportnettverk for CO₂. I så fall kan det bli lønnsomt for flere potensielle investorer å satse på CO₂-fangst, osv. Også for CCS-lagring er det stordriftsfordeler; prosjektering av mottaksterminal og overvåking av deponiet er eksempler på faste kostnader som nærmest er skalauavhengige. Resultatet blir at jo flere som investerer i CO₂-fangst, jo lavere blir lagringskostnaden for hver enkelt.

Greaker og Midttømme (2016) utviklet en stilisert modell med nettverkseffekter hvor det er en ren og en skitten teknologi, f.eks. én sementfabrikk med og én sementfabrikk uten fangstanlegg for CO₂. Modellen er dynamisk. I hver periode er det en viss andel av den eksisterende realkapitalen som må kasseres og erstattes med ny teknologi. Myndighetene setter en skatt på den skitne teknologien tilsvarende livstidsutslippet fra denne teknologien. Forfatterne finner at i tilfellet med nettverkseksternaliteter skal den optimale skatten på det skitne godet ikke bare ta hensyn til forventet forurensning som følger fra bruk av teknologien. Skatten skal også ta høyde for at hver gang noen investerer i den skitne teknologien, minsker sannsynligheten for at neste mann som står for tur til å investere velger den rene teknologien. Investorene i skitten teknologi skal derfor skattlegges for mer enn sin egen forurensning. Med andre ord, den rene teknologien trenger et ekstra puff for å kunne etablere seg i markedet.

Resultatet i Greaker og Midttømme (2016) baserer seg på at det ikke finnes et egnet instrument for å korrigere for nettverkseksternaliteter, men at det skjer gjennom beskatning av den skitne teknologien. For å overvinne potensielle nettverkseksternaliteter ved CCS, bør myndighetene i

EU imidlertid forsøke å finne frem til et virkemiddel som treffer nettverkseksternaliteten direkte. En mulighet som bør utredes er å garantere investorer i fangstanlegg avsetning for den fangede CO₂-gassen. Myndighetene kan f.eks. peke ut områder i nærheten av Nordsjøen hvor det vil være enkelt å bygge ut et transportnettverk for lagring av CO₂. Videre kan myndighetene forplikte seg til å ta ansvaret for all fanget CO₂ mot en pris som tilsvarer forventet framtidig kostnad ved transport og lagring. Inntil en kritisk masse fangstanlegg er bygget opp vil myndighetene antagelig se seg tjent med å kun kjøpe EU ETS kvoter for all fanget CO₂. Det betyr at all fanget CO₂ slippes ut inntil myndighetene ser seg tjent med å bygge ut et nettverk for transport og lagring. Potensielle investorer vil uansett med et slikt opplegg stå ovenfor de rette incentivene til å bygge fangstanlegg.

Dersom myndighetene ikke forsøker å korrigere for nettverkseksternaliteter ved CCS, men satser på at kvoteprisen i EU ETS etter hvert skal gi et tilstrekkelig incentiv til å investere i fangstanlegg, kan samfunnet komme til å ende i en situasjon som Farell og Saloner (1986) betegner som «excess inertia». Det betyr at det fins en teknologi som potensielt kan øke velferden, men som det blir investert for lite i på grunn av nettverkseksternaliteter. Greaker og Midttømme (2016) illustrerer ved hjelp av et numerisk eksempel hvordan dette kan skje med miljøteknologier selv om kostnadene fra utslippene til de skitne teknologiene er fullstendig internalisert gjennom en skatt.

BRUK AV FLERE VIRKEMIDLER

Hvilke og hvor mange virkemidler som brukes i klima- og energipolitikken, har også betydning for insentivene til å investere i CCS-anlegg. Anta at vi er på en bane mot togradersmålet. Det er mange virkemidler som kan være konsistente med denne banen, f.eks. karbonprising, fornybarsubsidier eller direkte reguleringer. Et viktig resultat fra samfunnsøkonomisk teori er at man bør bruke like mange virkemidler som antall mål.

Korrigerende av markedsimperfeksjoner, som kostnadsfritt utslipp av klimagasser og lærings- og spillovereffekter i innovasjonsmarkedet, er én type målsetting. Hvis myndighetene har nok virkemidler, kan klimapolitikken utformes uavhengig av innovasjonspolitikken. Hvis imidlertid ikke alle virkemidlene er tilgjengelige, vil den (nest beste) optimale størrelsen på klimavirkemidlene bli påvirket av hvilke andre virkemidler som er tilgjengelige og doseringen av disse. For eksempel kan det være grunn til å innføre

en høy pris på utslipp av CO₂ hvis ikke alle innovasjonsvirkemidlene er tilgjengelige fordi en høy CO₂-pris kan stimulere til utvikling og bruk av ny teknologi, se Greaker og Midttømme (2016) som omtalt over, men også Kverndokk og Rosendahl (2009), samt Gerlagh mfl. (2014).

Togradersmålet kan nås på ulike måter. Man kan for eksempel ha massiv bruk av fornybar energi i kraftproduksjonen, eller man kan produsere kraft med fossile brenslere og CCS. Fornybar energi vil dermed være et substitutt til CCS i kraftmarkedet. Men selv om det fins flere baner mot togradersmålet, er ikke alle banene like kostnadseffektive. Fornybar energi er heller ikke et substitutt til CCS i industrielle prosesser. Her kan det imidlertid på sikt være mulig med andre prosesser som kan gi mindre utslipp.

For å illustrere hvordan ulike virkemidlene kan påvirke hverandre i klimapolitikken, har Aune og Golombek (2018) studert hvordan den nye klima- og energipakken til EU fra 2018 påvirker karbonprisen, som er det viktigste finansielle insentivet til å investere i CCS. I avtalen mellom de tre EU-institusjonene kommisjonen, parlamentet og rådet, ble det fastsatt tre mål: (i) klimagassutslippene skal være 40% lavere i 2030 enn i 1990,¹¹ (ii) fornybarandelen i sluttbruken av energi skal være 32%, og (iii) forbedringen i energieffektiviteten skal være 32.5% (sammenliknet med en referansebane).

I utgangspunktet er det vanskelig å se hvorfor EU har vedtatt tre målsettinger siden begrunnelsen for både høy fornybarandel og bedret energieffektivitet er å redusere klimagassutslippet. Én grunn kan være at flere målsettinger vil gi flere bindinger for de nasjonale beslutningstakerne, slik at sannsynligheten for at en klimavennlig politikk gjennomføres økes.¹²

Aune og Golombek (2018) bruker den numeriske likevektsmodellen Libemod til å vise at hvis EU oppfylder de to siste målsettingene, vil klimagassutslippene reduseres med 50% i forhold til 1990-nivå, dvs. mer enn EUs 40%

¹¹ Kravet er spesifisert som at ETS-utslippene skal være 43% lavere enn i 2005, mens non-ETS utslippene skal være 30% lavere. ETS står for Emissions Trading System og er EUs kvotehandelssystem. Omtrent 45% av utslippene i EU dekkes av kvotehandel; kraftsektoren, høyutslippssektorer i industrien og petroleumsutvinning. Non-ETS er de sektorene som ikke er med i kvotehandelssystemet. Disse inkluderer transport, oppvarming i bygg, avfall, landbruk og bruk av fluorholdige gasser.

¹² Det er imidlertid mulig at fornybar- og energieffektiviseringsmålet også skal fange opp andre prioriteringer, bl.a. redusert import av energi. En standardrespons fra en neoklassisk økonom er at det bør brukes egne virkemidler for å nå disse tilleggsmålene, se diskusjonen ovenfor.

målsetting. Resultatet er i samsvar med EU-kommisjonens egne beregninger; 2030-pakken vil redusere utslippene med 45%, se European Commission (2018). Når utslippsreduksjonen er høyere enn utslippsmålet, blir prisen på kvoter null. Realiseringen av de to målsettingene krever imidlertid store subsidier til fornybar energi og høye avgifter på energibruk. Den oppnådde utslippsreduksjonen (50%) kunne alternativt vært realisert utelukkende gjennom en felles karbonpris, noe som ville ha vært kostnadseffektivt.

For CCS er null karbonpris dårlig nytt fordi da forsvinner det finansielle insentivet til utvikling og investering. Men bildet er ikke helsvart for CCS: Hvis EU hadde valgt å nå utslippsmålet i 2030 utelukkende gjennom prising av utslipp, viser Libemod-kjøringer at CCS-kraft hadde fått en markedsandel på nær 5 prosent i et regime med en utslippspris på 62 euro per tonn CO₂.¹³ Det er målsettingene om høy fornybarandel og bedret energieffektivitet som «ødelegger» for CCS.

EU kommer sikkert ikke til å fjerne 2030-målsettingene om fornybarandel og bedret energieffektivitet. Imidlertid er det meget mulig at EU vil stramme til sitt 2030-utslippsmål, samt opprettholde at utslippsreduksjonen i 2050 blir minst 80%. Modellkjøringer med Libemod tilsier at da vil CCS kapre markedsandeler; bare utslippsmålet blir tilstrekkelig strengt, vil det være samfunnsøkonomisk lønnsomt med innfasing av CCS. Spørsmålet er ikke om CCS blir faset inn, men når og i hvilket omfang.

VIL CCS BARE VÆRE EN MIDLERTIDIG LØSNING?

En innvending som har vært reist mot CCS, er at denne teknologien bare vil være en midlertidig løsning. Studier som Grimaud mfl. (2011), Kalkuhl mfl. (2015) og Durmaz og Schroyen (2019) finner for eksempel at CCS kan være aktuelt i en overgangsperiode mot fornybarhetssamfunnet. Mange synes å mene at det vil være bedre å «hoppe» direkte til «fornybarsamfunnet», og at CCS unødig forlenger fossilalderen. Synspunktet gjelder spesielt for kraftverk med CCS, men er ikke like sterkt for industrien hvor det er færre åpenbare alternativer til dagens produksjonsprosesser. Vi mener uansett at resonnetet må nyanseres.

For det første er det usikkert hvor godt et kraftsystem som baserer seg kun på ikke-regulerbar kraft, vil fungere.

¹³ Også Renner (2014) gir anslag på hvor stor karbonprisen bør være for at CCS skal være lønnsomt. Ifølge denne studien krever dette en CO₂-pris på 115 €/tCO₂ i EU ved lagring til havs, 45 €/tCO₂ i Kina ved lagring til havs, samt 35 €/tCO₂ i Kina ved lagring på land.

Jacobson et al (2015) hevder i en artikkel i PNAS at fornybare kilder kostnadseffektivt kan stå for all energiforsyning i USA. Jacobson et al (2015) møter kraftig motbør fra Clack et al. (2017) som hevder at forutsetningene som gjøres med hensyn til billig lagring av elektrisitet er urealistisk. Sinn (2017) analyserer mulighetene i Tyskland for et kraftsystem med kun ikke-regulerbar kraft, men finner at det er svært vanskelig å øke andelen ikke-regulerbar kraft til mer enn 50 prosent.

For det andre har CCS-anlegg en begrenset fysisk levetid. Selv med fortsatt kraftige forbedringer i fornybarteknologier og alternative industriprossteknologier, vil CCS-anlegg som er lønnsomme i dag, antagelig ikke bli ulønnsomme før de når sin maksimale fysiske levealder. Som vist i Golombek et al. (2011) vil CCS-investeringene dermed bidra til økt velferd i perioden anleggene er i drift fordi kostnadene ved å kutte CO₂-utslippene blir lavere enn de ellers ville ha vært. Dette gjelder selvfølgelig selv om det kommer noe «bedre» senere.

Golombek et al. (2011) finner at CCS vil ta en stor markedsandel i det europeiske kraftmarkedet i 2030 dersom prisen for en EU ETS-kvotepriis hadde vært (betydelig) høyere enn i dag. CCS gir da både lavere totale produksjonskostnader for elektrisitet og høyere konsumentoverskudd i elektrisitetmarkedet enn tilfellet uten bruk av CCS-teknologier. Som beskrevet i forrige kapittel, kan prisene på ETS-kvoter være lave dels pga. subsidier til fornybar kraft. Med lave CO₂-priser blir det ulønnsomt å investere i CCS. Men selv med en relativ høy kvotepris kan nettverkseksternaliteter, som ikke er inkludert i Golombek et al. (2011), forhindre diffusjon av CCS fordi det først blir lønnsomt å benytte CCS dersom tilstrekkelige mange velger det, se kapittel 4. I så fall burde myndighetene støtte etablering av et transport- og lagringsnettverk for å realisere de potensielle gevinstene ved CCS, se igjen kapittel 4.

Argumentet om at man ikke skal satse på CCS fordi dette systemet ikke er en langsiktig løsning, kunne etter vår mening like gjerne ha vært brukt mot landbaserte vindmøller. Disse har flere ulemper; de utgjør en visuell forurensning, de krever bygging av flere veier, fugler blir drept, mm. Flytende vindmøller langt til havs har ikke de samme ulempene, så hvorfor ikke hoppe over landvindmøllene å gå rett på de flytende? Svaret er at det er kostnadseffektivt å bruke landvindmøller i en overgangsperiode, mens vi venter på at flytende vindmøller skal bli billigere.

Hvis vi derimot må gjennomføre store FoU-investeringer for at CCS-teknologien skal bli kostnadseffektiv, er situasjonen noe annerledes. Det offentlige støtter FoU fordi kunnskapen som skapes i FoU-prosessen, vil komme samfunnet til nytte gjennom en større framtidig kunnskapsbase. Det er naturlig å tenke seg at det fins flere kunnskapsbaser. Acemoglu et al. (2012) antar at det fins én kunnskapsbase for fossilbaserte teknologier og en annen kunnskapsbase for utslippsfrie teknologier. Greaker et al. (2018) viser at myndighetene skal prioritere FoU-støtte til teknologier som er knyttet til kunnskapsbaser som forventes å være viktige i framtiden.

Dette resultatet tilsier at myndighetene ikke bør støtte FoU rettet mot fossilbaserte teknologier i samme grad som FoU rettet mot rene teknologier. For å nå togradersmålet må vi fase ut de fossilbaserte teknologiene, og dermed blir det lite behov for FoU på slike teknologier i framtiden. Man kan hevde at CCS tilhører den fossilbaserte kunnskapsbasen, og at CCS dermed burde få mindre FoU støtte. På den annen side kan man også mene at CCS er et eksempel på at skottene mellom kunnskapsbasene ikke er helt tette. Greaker et al. (2018) viser at dersom kunnskapsbasene delvis overlapper, blir det mindre viktig å rette FoU-støtten mot rene teknologier.

Flere av studiene referert til over, tyder på at CCS kan bli viktig i hele dette århundret; kanskje spesielt koblet til biomasse i kraftsektoren, for prosessindustrien og muligens for direkte fangst av CO₂ fra luften. Offentlig FoU-støtte til CCS vil dermed kunne lede til kunnskap med *betydelig verdi* langt framover i tid, se Greaker et al. (2019).

AVSLUTNING

I denne artikkelen har vi forsøkt å se på hvorfor det er et stort sprik mellom den faktiske satsingen på CCS og det som framstår som samfunnsøkonomisk optimalt hvis vi skal nå togradersmålet. Spesielt har vi framhevet markedsimperfeksjoner og bruk av mange virkemidler i klimapolitikken som årsaker til dette misforholdet.

Etter vår mening er det en viss overregulering i EUs klima- og energipolitikk ved at det er målsettinger både for fornybarandel, energieffektivitet og klimagassutslipp. Ved å beholde målsettingen for klimagassutslipp, samt avvikle det ene eller begge de to andre målene, ville man fått en mer kostnadseffektiv klimapolitikk. Det ville ha bedret rammevilkårene for CCS.

Når det gjelder markedsimperfeksjoner, bør man se alle markedene for CCS, dvs. fangst, transport og lagring, i sammenheng. Hvis det er en imperfeksjon i ett av markedene, vil det kunne påvirke investeringene i de andre markedene. Selv med en politikk som korrigerer for læringseffekter i fangstanleggene, er det ikke sikkert at investeringene i disse anleggene vil finne sted hvis det er imperfeksjoner, f.eks. nettverkseksternaliteter, i markedet for transport av CO₂.

Selv om satsingen på CCS i dag neppe er tilstrekkelig for å nå klimamålene på en kostnadseffektiv måte, tror vi likevel at CCS kan bli faset inn i et stort omfang i framtiden. Det er vanskelig å se at dette ikke vil tvinge seg fram hvis verden tar Parisavtalen på alvor.

Vi har ikke gått nærmere inn på at ulike sektorer kan ha ulike utfordringer. Det kan for eksempel hende at produksjon av kraft, sement og petroleumsprodukter vil kreve ulike virkemidler for å ta i bruk CCS-teknologier. Dette er interessante spørsmål for framtidig forskning. Det samme gjelder forskjeller mellom land; ulike institusjonelle forhold kan kreve ulik virkemiddelbruk.

Oslo Economics og Atkins gjennomførte en kvalitetssikring (KS1) av regjeringens utredning om fullskala demonstrasjonsanlegg for fangst, transport og lagring av CO₂ med de tre alternativene for fangst (NORCEMs semenstfabrikk, YARAs ammoniakfabrikk og Fortum Oslo sitt energigjenvinningsanlegg i Oslo), se Oslo Economics (2018).¹⁴ I sitt basialternativ konkluderte de med at samtlige prosjekter ga negativ nytte hver for seg og samlet. Utslippsreduksjonene ble verdsatt ved hjelp av en prognose for fremtidige EU ETS priser. Videre ble læringsgevinstene av tiltaket ikke verdsatt i basialternativet. I en sensitivitetsanalyse ble det brukt priser som var konsistente med togradersmålet, og læringsgevinstene ble forsøkt verdsatt. Likevel kom ingen av alternativene ut med positiv nytte. Det var stordriftsfordeler i lagring av karbon, slik at det samfunnsøkonomiske tapet ble lavest hvis alle de tre prosjektene hadde blitt gjennomført. Med enda flere prosjekter kunne derfor nytten av tiltaket blitt positiv så fremt utslippsreduksjonene fortsatt ble verdsatt utfra CO₂-priser som er konsistente med togradersmålet.

Greaker et al. (2019) tar til ordet for at de nordiske landene bør samarbeide om å drive utvikling og demonstrasjon av CCS. Ifølge denne studien har samtlige nordiske

¹⁴ En av forfatterne av denne artikkelen (Mads Greaker) bisto utredningen.

land en ambisiøs klimapolitikk, men politikken er ikke koordinerte. Hvert land planlegger for eksempel å importere biodrivstoff i store mengder for å redusere utslippene i transportsektoren. Dette kan bli et dyrt tiltak med liten global klimaeffekt. Landene satser også til dels ulikt når det gjelder FoU av rene teknologier, og Norge er alene om å satse på CCS. Sammenlignet med å oppfylle dyre nasjonale utslippsmålsetninger, kunne landene antagelig ha fått til større globale utslippsreduksjoner ved å samarbeide om å utvikle teknologi som resten av verden kunne dra nytte av. Etter vår mening peker CCS seg ut som et slikt eksempel.

Mange synes å være redd for at CCS vil forlenge olje- og gassalderen. CCS kan imidlertid bli en bro til lavutslipps-samfunnet gjennom bruk av hydrogen: Denne gassen kan bli viktig for å løse en rekke transportbehov hvor antagelig batteridrift er mindre hensiktsmessig (tungtransport på vei, fiskebåter og hurtigbåter). Hydrogen kan lages fra elektrisitet, men kanskje vil det være billigere å fremstille hydrogen fra naturgass med CO₂-fangst og lagring.¹⁵ Prosessen som benyttes kalles «steam-reforming», og selve fangsten av CO₂ er så vidt vi forstår uproblematisk rent teknisk. På den annen side må den fangede CO₂-gassen transporteres og lagres. En velutviklet infrastruktur for CCS kan derfor gjøre det lettere å ta i bruk hydrogen i stor skala.

REFERANSER

- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn og D. Hemous (2012). The Environment and Directed Technical Change, *American Economic Review* 102, 131-166.
- Aune, F. R. og R. Golombek (2018). Carbon prices are redundant in the 2030 EU climate and energy policy package, CREE Working Paper nr. 10.
- Budins, S., S. Krevor, N. Mac Dowell, N. Brandon og A. Hawkes (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential, *Energy Strategy Reviews*, 22: 61-81.
- Clack C. T. M., S. A. Qvist, J. Apt, M. Bazilian, A.R. Brandt, K. Caldeira, S. J. Davis, V. Diakov, M. A. Handschy, P. D. H. Hines, P. Jaramillo, D. M. Kammen, J. C. S. Long, M. G. Morgan, A. Reed, V. Sivaram, J. Sweeney, G. R. Tynan, D. G. Victor, J. P. Weyant, og J. F. Whitacre (2017). Evaluation of a proposal for reliable low-cost grid power with 100% wind, water and solar, *PNAS*, 114:6722-6727.
- CleanTechnica (2019). <https://cleantechnica.com/2019/04/21/carbon-captures-global-investment-would-have-been-better-spent-on-wind-solar/>. Lastet ned 9.8.2019.
- Durmaz, T. (2018). The economics of CCS: Why have CCS technologies not had an international breakthrough?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95: 328-340.

¹⁵ For et alternativt syn, se Nel (2019).

- Durmaz, T. og F. Schroyen (2019). Evaluating Carbon Capture and Storage in a Climate Model with Endogenous Technical Change, foreløpig upublisert artikkel.
- European Commission (2018). Speech by Commissioner Miguel Arias Cañete at the High Level Stakeholder Conference: The EU's Vision of a modern, clean and competitive economy. Brussels, July 10, 2018. http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-18-4447_en.htm
- Farrell, J. og G. Saloner (1986). Installed Base and Compatibility: Innovation, Product Preannouncements, and Predation. *American Economic Review* 76, 940-955.
- Farrell, J., J. Morris, H. Khesghi, H. Thomann, S. Paltsev og H. Herzog (2019). The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation, Massachusetts Institute of Technology, upublisert.
- Forbes (2017). <https://www.forbes.com/sites/jeffmcmahon/2017/06/28/the-world-has-to-develop-carbon-capture-iea-warns-and-its-not/#577375a71b51>. Lastet ned 12.2.2019
- Gerlagh, R., S. Kverndokk og K. E. Rosendahl (2014). The Optimal Time Path of Clean Energy R&D Policy When Patents Have Finite Lifetime, *Journal of Environmental Economics and Management* 67(1), 2-19.
- Gerlagh, R. og B. van der Zwaan (2006). Options and Instruments for a Deep Cut in CO₂ Emissions: Carbon Dioxide Capture or Renewables, Taxes or Subsidies?, *The Energy Journal*, 27(3): 25-48.
- Global CCS Institute (2018). Global Status Report, <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>.
- Golombek R., M. Greaker, S. A. C. Kittelsen, O. Røgeberg og F. R. Aune (2011). Carbon capture and storage technologies in the European power market, *Energy Journal* 32, 209-238.
- Greaker M. og K. Midttømme (2016). Optimal Environmental Policy with Network Effects: Will Pigovian Taxation Lead to Excess Inertia?, *Journal of Public Economics* 143, 27-38.
- Greaker M., T. R. Heggedal og K. E. Rosendahl (2018). Environmental Policy and the Direction of Technical Change, *Scandinavian J. of Economics*, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sjoe.12254/epdf>
- Greaker M., R. Golombek og M. Hoel (2019). "Global impact of national climate policies in the Nordic Countries", *Nordic Economic Policy Review*. Spesialnummer om Climate Policies in the Nordics, 160-206.
- Grimaud, A., G. Lafforgue og B. Magné (2011). Climate change mitigation options and directed technical change: A decentralized equilibrium analysis, *Resource and Energy Economics*, 33: 938-962.
- Hensley, R., J. Newman og M. Rogers (2012). Battery technology charges ahead. *McKinsey Quarterly*.
- Herzog, H. J. (2011). Scaling up carbon dioxide capture and storage: From megatons to gigatons, *Energy Economics*, 33: 597-604.
- IEA (2000). Experience Curves for Energy Technology Policy, OECD/IEA, Paris, France.

- IEA (2012). *Energy Technology Perspectives 2012*, OECD/IEA, Paris, France.
- IEA (2018a). World Energy Outlook 2018, IEA/OECD. Paris, France.
- IEA (2018b). <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/policiesandinvestment/>. Lastet ned 18.2.2019.
- IEA (2019). <https://www.iea.org/tcep/>. Lastet ned 18.2.2019.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA
- IPCC (2019). *Global warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]
- Jacobson M. Z., M. A. Delucchi, M. A. Cameron and B. A. Frew (2015). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *PNAS*, 112:15060-15065.
- Jonassen, Ø. (2018). En innføring i CCS, *Energi og Klima*, 3. mai, <https://energiogklima.no/to-grader/en-innforing-i-ccs/>.
- Kalkuhl, M., O. Edenhofer og K. Lessmann (2015). The Role of Carbon Capture and Sequestration Policies for Climate Change Mitigation, *Environmental and Resource Economics*, 60: 55-80.
- Kverndokk, S. og K. E. Rosendahl (2009). Sammenhenger mellom klima- og FoU-politikk, *Samfunnsøkonomen* 7, 10-17.
- Kriegler, E., J. P. Weyant, G. J. Blanford, V. Krey, L. Clarke, J. Edmonds, A. Fawcett, G. Luderer, K. Riahi, R. Richels, S. K. Rose, M. Tavoni og D. P. van Vuuren (2014). The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies, *Climatic Change*, 123(3-4): 353-367.
- Leung, D. Y. C., G. Caramanna og M. M. Maroto-Valer (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 426-443.
- Lohwasser, R. og R. Madlener (2012). Economics of CCS for coal plants: Impact of investment costs and efficiency on market diffusion in Europe, *Energy Economics*, 34: 850-863.
- Mohn K. (2016). IEA sine energiutsikter: Bibel eller blendverk? *Samfunnsøkonomen* 2, 44-60.
- Nel (2019): Q1 2019. https://nelhydrogen.com/assets/uploads/2019/05/Nel-ASA_Q1-2019_presentation.pdf, Lastet ned 11.8.2019.
- Olje- og energidepartementet (2018). CO₂-håndtering i Norge, <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/co2-handtering/co2-handtering/id2601471/>.
- Oslo Economics (2016). Kvalitetssikring (KS1) av KVV om demonstrasjon av fullskala fangst, transport og lagring av CO₂. Rapport nummer Do14a. Utarbeidet av Oslo Economics og Atkins.
- <https://www.regjeringen.no/contentassets/f967f4d7533a4boaf75fe9bad3d1910/rapport-ks1-co2-handtering-003.pdf>. Lastet ned 23.8.2019.
- Oslo Economics (2018). Kvalitetssikring (KS2) av demonstrasjon av fullskala fangst, transport og lagring av CO₂. Rapport fase 1 og 2. Statens prosjektmodell. Rapport nummer Do50b. Utarbeidet av Oslo Economics og Atkins, <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/rapport-om-fullskalaprojekt-for-karbonfangst/id2592527/>. Lastet ned 23.8.2019.
- Renner, M. (2014). Carbon prices and CCS investment: A comparative study between the European Union and China, *Energy Policy*, 75: 327-340.
- Rubin E.S., S. Yeh, M. Antes, M. Berkenpas og J. Davison (2007). Use of experience curves to estimate the future cost of power plants with CO₂ capture, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1(2), 188-197.
- Sinn H-W. (2017). Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution. *European Economic Review* 99: 130-150.
- Spence M. A. (1981). The learning curve and competition, *Bell Journal of Economics*, 12, 49-70.
- Teknisk Ukeblad (2011). <https://www.tu.no/artikler/snohvit-co2-sprnegger-reseroaret/250034>. Lastet ned 9.8.2019.
- van der Zwaan, B og R. Gerlagh (2009). Economics of geological CO₂ storage and leakage, *Climatic Change*, 93: 285-309.
- van der Zwaan, B og R. Gerlagh (2016). Offshore CCS and ocean acidification: a global long-term probabilistic cost-benefit analysis of climatic change mitigation, *Climatic Change*, 137: 157-170.
- Walsh, D. M., K. O'Sullivan, W. T. Lee og M. T. Devine (2014). When to invest in carbon capture and storage technology: A mathematical model, *Energy Economics*, 42: 219-225.
- Weitzel, M., B. Saveyn og T. Vandyck (2019). Including bottom-up emission abatement technologies in a large-scale global model for policy assessment, European Commission, Joint Research Centre.
- ZEP (2017). CCS and Europe's Contribution to the Paris agreement - Modelling least-cost CO₂ reduction pathways, ZEP, Brussels, <https://www.aktuellhallbarhet.se/wp-content/uploads/2017/03/zep-report-me5-march-2017-final.pdf>.