



SINTEF

Prosjektnotat

Bærekraftige karbonsykluser

SINTEF Konsernstab
Postadresse:
Postboks 4760 Torgarden
7465 Trondheim
Sentralbord: 40005100
info@sintef.no

Foretaksregister:
NO 919 303 808 MVA

VERSJON

Versjon 1.3

DATO

2022-12-06

FORFATTERE

Kristin Jordal
Ragnhild Skagestad
Øyvind Langørgen

OPPDRAKSGIVER

SINTEF KL

OPPDRAKSGIVERS REFERANSE

Nils Røkke

PROSJEKTNUMMER

102026739

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

14 + Bilag/vedlegg

Notatet har til formål å belyse karbonsykluser fra et bærekraftperspektiv og å foreslå et overordnet faktabasert grunnlag innenfor området. Et slikt grunnlag skal muliggjøre en første vurdering av hvorvidt nye prosjektidéer hvor karbon fanges, brukes, transporteres og lagres kan være gunstige fra et klimapositivt/bærekraftig perspektiv.

Det finnes mange typer teknologiske karbonsykluser og -kjeder, og evaluering av disse er avhengig av systemgrenser, referanseprosesser for sammenligning og metode(r). Et fåtall karbonsykluser (for eksempel mineralisering med CO₂) skiller seg ut ved at de åpenbart muliggjør permanent fjerning av CO₂ fra atmosfæren. De fleste karbonsykluser er dog mer krevende å vurdere, inkludert å avgjøre hva som er relevant(e) referanseprosess(er) for vurderingen. LCA analyser er gode hjelpemidler og gir gode indikasjoner når de er riktig satt opp og gjennomført. Ofte kommer man også opp i dilemma for systemgrensene i LCA analyser slik at de ikke gir helt klare svar.

En enkel kvantitativ metode (energi- og massebalanser) er foreslått i notatet for initiell vurdering av karbonsykluser. Denne kan gjerne brukes sammen med kvalitative metoder for et mere helhetlig bilde.

I appendiks er det gjort en overordnet beskrivelse og vurdering av forskjellige typer teknologiske karbonsykluser: Mineralisering med CO₂; bruk av CO₂ for produksjon av drivstoff, karbonbaserte materialer og kjemikalier; bruk av CO₂ for økte avlinger i veksthus; samt kort om bruk av biomasse til produkter.

UTARBEIDET AV

Kristin Jordal

SIGNATUR

Kristin Jordal
Kristin Jordal (Jan 2, 2023 12:40 GMT+1)

GODKJENT AV

Nils Røkke

SIGNATUR

Nils A. Røkke
Nils A. Røkke (Jan 2, 2023 12:46 GMT+1)

PROSJEKTNOTAT NR

102026739-01

GRADERING

Åpen





SINTEF

Historikk

VERSJON	DATO	Versjonsbeskrivelse
Utkast	2022-04-01	Utkast for første review
Utkast 2	2022-04-27	Andre utkast innfor møte med styringsgruppa 28 april, mindre endringer
Versjon 1.0	2022-05-04	Versjon 1, til SINTEF KL
Versjon 1.1	2022-08-25	Oppdateringer og klargjøringer etter møte med KL 22-05-09
Versjon 1.2	2022-11-30	Gjennomgang av tekst og illustrasjoner før publisering av åpen versjon
Versjon 1.3	2022-12-06	Åpen versjon



Innholdsfortegnelse

1	Oppsummering	4
2	Innledning.....	4
3	Definisjoner og bakgrunn.....	5
4	Initiell vurdering av karbonsykluser	8
	4.1 Energi- og massebalanser for karbonsykluser	8
	4.2 Kvalitative metoder.....	10
5	Økt etterspørsel av fornybar kraft.....	11
6	Oppsummering og refleksjoner	12
A	Bruk av CO₂ til produkter	15
B	Bruk av biomasse i produkter	22
C	Eksempel på pågående relevante prosjekter hvor SINTEF er involvert.....	23



1 Oppsummering

Dokumentet har som hensikt å belyse ulike karbonkretsløp og å foreslå metoder for å vurdere bærekraft i karbonsykluser. Karbonsykluser omfatter i dette notatet teknologiske sykluser og kjeder hvor karbon og karbonholdige forbindelser brukes til å fremstille forskjellige produkter og/eller for å lagre karbon permanent. Det finnes mange typer teknologiske karbonsykluser, og en evaluering er avhengig av systemgrenser, referanseprosesser og metode(r).

- Et fåtall karbonsykluser skiller seg ut ved at de åpenbart muliggjør permanent fjerning av CO₂ fra atmosfæren (CCS, mineralisering og mest sannsynlig også tilførsel av biokarbon til jordsmonnet). De fleste karbonsykluser er dog mer krevende å vurdere fra et klima- og bærekraftperspektiv.
- Et flertall karbonsykluser eller kjeder innebærer resirkulering av CO₂ for å bygge opp nye materialer, som alternativ til bruk av fossile råvarer. Dette er energikrevende og det legges ofte til grunn at en bruker 100% fornybar kraft. Her bør en sammenligne ikke bare mellom forskjellige karbonsykluser, men også vurdere bruk av en typisk europeisk kraftmiks. Man kan tenke seg at man her også vil legge addisjonalitetsprinsippet til grunn slik det er gjort i EUs definisjon av ulike hydrogenbetegnelser. Addisjonalitet betyr at man dedikerer en ressurs til et spesielt formål, eksempelvis en vindpark uten eller meget regulert nettkobling.
- Det finnes og alternativer hvor en resirkulerer på et produktnivå, for eksempel bygningsmaterialer eller bygningselementer, plast eller andre karbonbaserte materialer. Fra et overordnet perspektiv, tatt i betraktning andre alternativer for resirkulering, virker det fornuftig å ikke spørre hvor stort markedet kan bli for CCU-produkter (resirkulering av karbon fra CO₂), men heller hvor lite som trengs og innenfor hvilke områder.
- En kvantitativ metode for vurdering av karbonsykluser er foreslått. For en mer helhetlig vurdering kan også kvalitative metoder tas i bruk.
- For å oppnå netto fjerning av CO₂ fra atmosfæren må karbon fanges fra biomasse, luft eller hav. Lagringen av fanget karbon må ha til hensikt å være permanent (for eksempel geologisk lagring av CO₂ eller i materialer som karbonater og biokarbon). Den totale mengden karbon som fanges og lagres må være større enn prosessutslippene, inkludert oppstrøms og nedstrøms utslipp som kan knyttes til karbonfjerningen.

Forfatterne av dette notatet har under arbeidets gang hatt gode diskusjoner med kollegaer i SINTEF: Richard Heyn, Vibeke Nørstebø, Camille Vandervaeren og Lilo Henke. Vi vil også takke referansegruppa: Nils Røkke, Duncan Akporiaye, Mimmi Throne-Holst, Terje Jacobsen og Kristin Fjellheim.

2 Innledning

Dette notatet har til formål å belyse karbonsykluser fra et bærekraftperspektiv. Ambisjonen med notatet er å foreslå et overordnet faktabasert grunnlag innenfor området bærekraftige karbonsykluser. Et slikt grunnlag skal muliggjøre en første vurdering av hvorvidt nye prosjektidéer hvor karbon fanges, brukes, transporteres og lagres kan være gunstige fra et klimapositivt/bærekraftig perspektiv. Dette inkluderer å



kunne kategorisere ulike verdikjeder hvorvidt de medfører normalt netto økte utslipp, reduksjon av utslipp, om de er utslippsnøytrale eller fører til netto fjerning av CO₂.

Videre bør en betraktning av bærekraftige karbonsykluser ta et perspektiv utover innvirkning på CO₂ i atmosfæren. For eksempel bør en i et bærekraftperspektiv være klar over at vi er nær, eller til og med over grensen for hva kloden/biosfæren tåler av "novel entities"^{1,2} (et samlebegrep for blant annet kjemikalier, plast og tungmetaller).

EU har i sin kommunikasjon "Sustainable Carbon Cycles"³ pekt på en reduksjon med 95 prosent i bruken av fossil energi. Man peker også på at karbon må resirkuleres fra avfallsstrømmer, fra bærekraftig biomasse og fra atmosfæren, og brukes som erstatning for fossilt karbon i de sektorer som fortsatt vil være avhengig av karbon. Videre peker man på at det for å nå klimamålene er behov for oppskalering av tiltak som fanger CO₂ for langtidslagring, enten i økosystemer eller gjennom teknologiske løsninger (f.eks. Carbon Capture and Storage, CCS).

Betraktninger av karbonsykluser og når de er bærekraftige kompliseres av at grunnstoffet karbon, med fire ledige plasser i det ytterste elektronskallet, har veldig lett for å danne forskjellige bindinger med flere andre grunnstoffer. Karbon finnes i alt materiale som er eller har vært levende, og har kommet inn i kretsløpet gjennom fotosyntesen, eller som skjelett fra døde mikroorganismer i havet i noen typer kalkstein samt gjennom forvitring⁴. Karbon finnes i dag også i utallige menneskeskapt kjemiske forbindelser og materialer.

Detaljerte betraktninger kan fort bli komplekse, og det er ikke alltid åpenbart hvordan systemgrenser skal settes når en skal studere karbonsykluser. I litteraturen varierer systemgrensen for studier av karbonsykluser avhengig av formålet med en studie, og avhengig om en studie er relatert til en prosess, en bedrift, en region, et land, eller globalt.

Dette notatet omfatter kun karbonsykluser innenfor SINTEF sine (teknologiske) virksomhetsområder, ikke naturlige karbonsykluser.

3 Definisjoner og bakgrunn

Bærekraftig utvikling er ifølge Brundtland-rapporten "Our Common Future"⁵ *en utvikling som tilfredsstillers dagens behov uten å ødelegge fremtidige generasjoners muligheter å tilfredsstillere sine behov*. FNs 17 bærekraftsmål frem mot 2030 ble definert i 2015. Bærekraftmålene er omfattende, men mer konkret enn den generelle definisjonen, som ser lenger frem i tid.

¹ Persson, L. et al. Outside the Safe Operating Space of the Planet Boundary for Novel Entities. Environmental Science and Technology, 2022, 56, 1510-1521.

² [Evlighetskjemikalier \(PFAS\) regner ned over hele kloden – NRK Trøndelag](#)

³ [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=COM\(2021\)800&lang=en](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=COM(2021)800&lang=en)

⁴ Hessen, Dag O., C – Karbon, En uautorisert biografi. CappelenDamm (2015)

⁵ Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (1987)

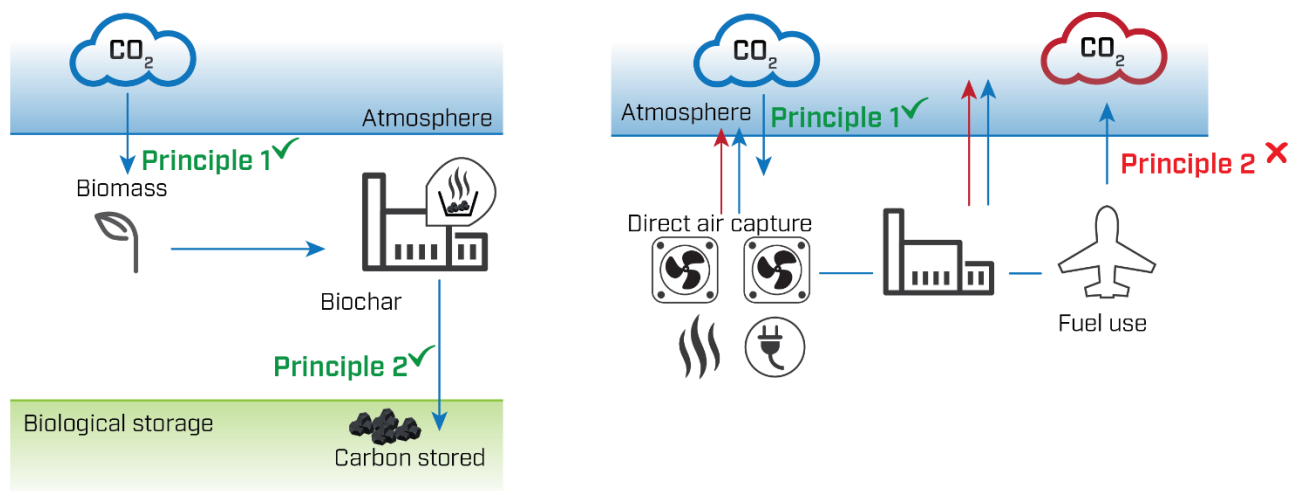


"Carbon Dioxide Removal" (CDR) eller "Carbon Removals" er en terminologi som er mye brukt i EU om prosesser som fjerner CO₂ fra atmosfæren. Et alternativt begrep er "Negative CO₂-utslipp", eller bare "negative utslipp" hvis en inkluderer også andre klimagasser. Klimapositive løsninger er et tredje uttrykk. Alle disse termene viser til det samme, det vil si prosesser og tiltak for å oppnå netto fjerning av CO₂, og i noen fall også andre klimagasser, fra atmosfære og hav.

Zero Emissions Platform (ZEP⁶) bruker forkortingen CDR i sine rapporter, hvor de baserer seg på definisjonen fra Tanzer og Ramirez⁷, med fire prinsipper:

1. Carbon dioxide is physically removed from the atmosphere.
2. The removed carbon dioxide is stored out of the atmosphere in a manner intended to be permanent.
3. Upstream and downstream greenhouse gas emissions, associated with the removal and storage process, are comprehensively estimated, and included in the emission balance.
4. The total quantity of atmospheric carbon dioxide removed and permanently stored is greater than the total quantity of carbon dioxide equivalent emitted to the atmosphere.

Bruk av prinsipp 1 og 2 gjør det mulig å raskt skille de prosesser som kan kvalifisere for CDR og de som definitivt ikke gjør det, gjennom å beskrive hvor karbon kommer fra og hvor CO₂ ender opp, se eksempel nedenfor. Uttrykket "in a manner intended to be permanent" i prinsipp 2 leder mange ganger til diskusjoner. Tanzer og Ramirez har med vilje unngått å definere hvilken tidsperiode som menes med "permanent". Mission Innovation for CDR har i sitt veikart definert at CDR innebærer at CO₂ skal fjernes fra atmosfæren i minst 100 år.



Figur 1. Eksempel på bruk av prinsipp 1 og 2 fra Tanzer and Ramirez. Biokarbon (til venstre) har potensial for å være et klimapositivt tiltak (realisere CDR), mens Direct Air Capture for produksjon av drivstoff (til høyre) ikke har det potensialet⁸. Blå piler illustrerer strømmer med atmosfærisk eller biogen karbon, røde

⁶ <https://zeroemissionsplatform.eu/>

⁷ Tanzer, S.E. and Ramires, A. When are negative emissions negative emissions? Energy and Environmental Science, 2019, 12, 1210-1218. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>

⁸ Figurer basert på ZEP-rapport "Europe needs robust accounting for carbon dioxide removal", Januar 2021.



piler illustrerer strømmer med fossilt karbon. Europeisk energimiks er antatt for de delprosesser hvor det er kraftbehov.

Det er spesielt prinsipp 3 som er komplekst og krever en full livsløpsanalyse (Life Cycle Assessment, **LCA**) for å skape et grunnlag for prinsipp 4 hvor man oppsummerer med tall hvorvidt mer CO₂ blir fjernet fra atmosfæren enn hva som blir sluppet ut under prosessens gang. Det finnes ikke noen standardisert eller generelt vedtatt praksis for hvordan livsløpsanalyser for karbonsykluser skal utføres, men temaet er oppe til diskusjon f.eks. i et forum med deltakere fra EU-finansierte prosjekter innenfor temaene CCUS og alternative drivstoff. En kan forvente at det fremover vil komme retningslinjer eller anbefalinger for LCA innenfor CCS og CCU.

Det er et stort sprang fra de kvalitative trinn 1 og 2 til det kvantitative og beregningstunge trinn 3. Forfatterne av dette notatet mener at en gjerne kan bruke et trinn "2,5" som gir en enklere, transparent, kvalitativ vurdering ("screening") av karbonsykluser før en eventuelt går videre til trinn 3. Et slikt trinn, hvis en god metodikk kan utvikles, kan gi en god forståelse av hvilken type aktiviteter SINTEF engasjerer seg i. Se kapittel 4.1 for forslag.

CO₂-håndtering: CCS, CCU, CCUS

CCS – CO₂ capture and storage, det vil si fangst, transport og permanent lagring av CO₂.

CCU – CO₂ capture and use, det vil si fangst, evt transport, og bruk av CO₂ i produkter.

Når det gjelder gjenbruk av CO₂ i produkter ble det i 2017 estimert at det er lite trolig at kjemisk omdannelse til produkter vil komme å bidra med mer enn 1 prosent av den CO₂ som må unngås å bli sluppet ut til atmosfæren grunnet menneskelige aktiviteter⁹. Arbeidsgruppen bak dette notatet mener at det tallet kan komme til å bli noe større, basert på nåværende industrielle ambisjoner. Likevel vil bruken av fanget CO₂ for produkter (CCU) med stor sannsynlighet forbli marginal sammenlignet med den mengde CO₂ som må lagres permanent gjennom CCS for å nå de internasjonale klimamålene frem mot 2050. Ofte ser en også **CCUS** brukt som en fellesbetegnelse på CCS og CCU (CO₂ capture, use and storage). En refleksjon er at CCUS må sees som et middel for å nå overordnede mål om en bærekraftig samfunnsutvikling og reduserte klimagassutslipp/klimapositive tiltak, og er ikke et mål *per se*.

En hensiktsmessig "3a" vurdering, som nevnt ovenfor, kan også brukes for vurdering av karbonsykluser selv om en umiddelbart ser at de ikke leder til CDR. Vurderingen vil da kunne brukes for å gi en første indikasjon på om syklusen kan ha potensiale for reduserte CO₂-utslipp sammenlignet med en referanseprosess.

Et generelt spørsmål i alle vurderinger av karbonkjeder og karbonsykluser er hva som er **referanseprosessen(e)**. For eksempel, hvis en vil studere bruken av CO₂ som råvare for å produsere en plastforpakning, vil da referanseprosessen være en prosess basert på fossile hydrokarboner for å lage en forpakning av samme type plast, eller er det produksjon av en forpakning med samme funksjon, men produsert fra biomasse? Eller er referanseprosessen en forpakning som produseres av resirkulert plast, som alternativ til å resirkulere CO₂? Som basis vil en referanseprosess normalt være den prosessen som brukes mest per i dag, som produserer den største tonnasje med den aktuelle plasten.

⁹ Mac Dowell, N., Fennel, P.S., Shah, N., Maitland, G.C. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. Nature Climate Change 7, 243-249 (2017)



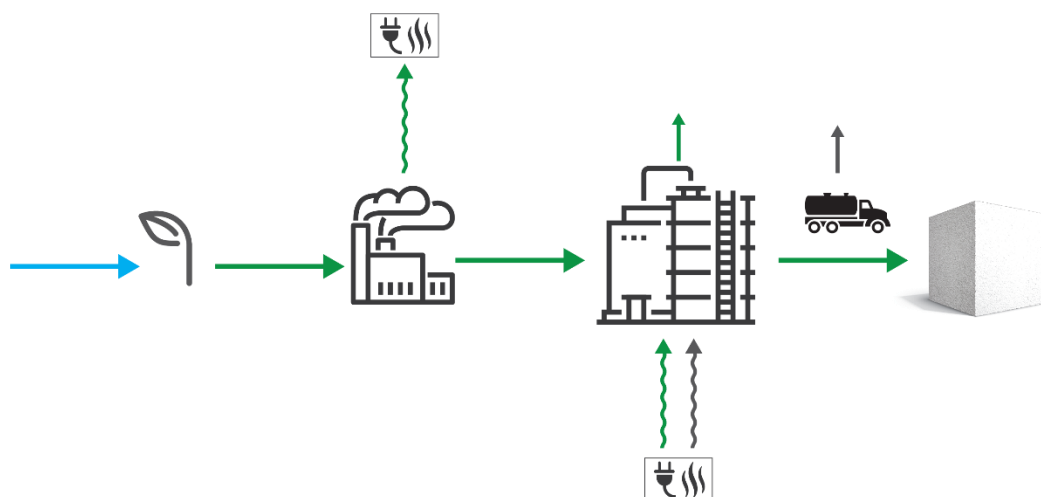
Sirkulær økonomi: et økonomisk system som har som utgangspunkt at alle ressurser har en anvendelse, og at det dermed ikke skapes avfall. Det er relevant å sammenligne resirkulering av CO₂ med sirkulærøkonomi hvor man tar frem produkter som kan resirkuleres med minimalt med utslipp. Dette kan for eksempel være bygningsmaterialer eller bygningselementer, eller plast og andre karbonbaserte materialer. Intuitivt burde resirkulering av godt designede bygningselementer, plastforpakninger etc. være det mest bærekraftige og minst energikrevende alternativet, sammenlignet med først å produsere rivningsbetong eller CO₂, og deretter bygge opp nye materialer.

4 Initiell vurdering av karbonsykluser

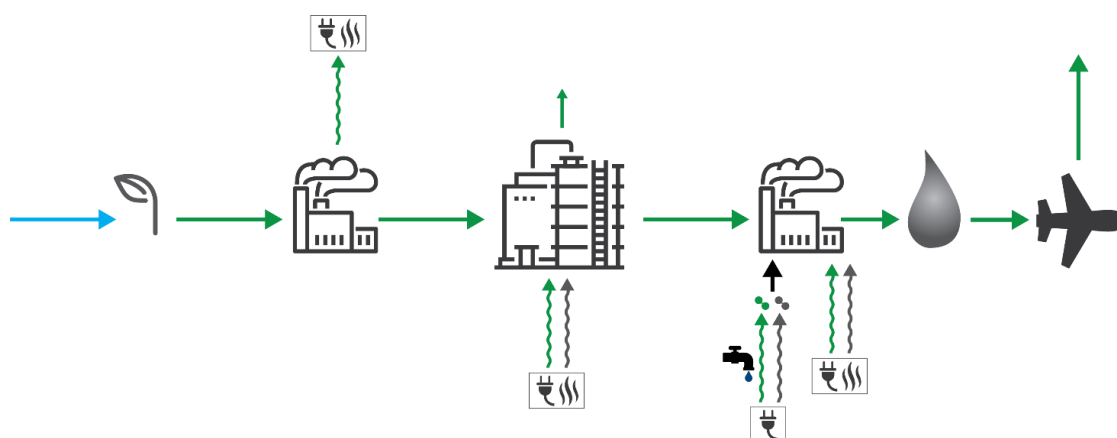
En grundig gjennomgang og vurdering av karbonsykluser fra et bærekraftperspektiv vil trenge en omfattende systemstudie, som typisk omfatter Life Cycle Assessment (LCA). En full LCA er ofte ikke realistisk å gjennomføre for eksempel i en prosjektutviklingsfase for å vurdere om en ny idé har potensiale til å bli en klimapositiv og bærekraftig løsning for samfunnet. For *initiell* evaluering, kan en for eksempel bruke energi- og massebalanser, og/eller bruke en kvalitativ tilnærming.

4.1 Energi- og massebalanser for karbonsykluser

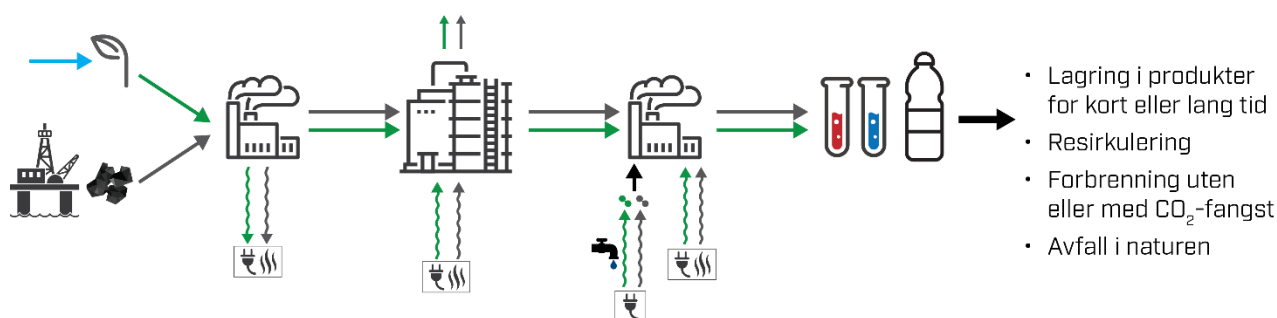
Vurdering av energi- og massebalanser vil mest sannsynlig være adskillig enklere enn LCA. Formål kan typisk være å *estimere energiforbruket for transformasjonene ett tonn karbon gjennomgår i en karbonsyklus*. Formålet vil ikke være å identifisere de beste karbonsykluserne, men å kunne luke ut de dårligste, før man går videre med mer detaljert forskning og utvikling som kan muliggjøre en LCA. Et startpunkt for metoden vil typisk være å tegne opp karbonets vei gjennom syklusen og hvor energi og karbon går inn/ut, eksemplifisert med tre alternative sykluser nedenfor.



Figur 2. Eksempel på karbonsyklus: Et kraftverk fyrt med biomasse med CO₂-fangst (BECCS). CO₂-fangsten krever energi (europeisk energimiks antatt for kraft). CO₂ brukes til karbonatisering, og blir dermed permanent fjernet fra kretsløpet. Det antas at bilen som frakter CO₂ fra fangst til karbonatisering slipper ut fossil CO₂ fra drivstoffet. Syklusen er med stor sannsynlighet klimapositiv. Karbonstrømmer illustrert med rette linjer, energistrømmer med bølgede linjer. Grønn er biogen CO₂ eller fornybar kraft, grå er fossil CO₂ eller fossilt basert kraft, blå er atmosfærisk CO₂.



Figur 3. Eksempel på karbonsyklus: Et kraftverk fyrt med biomasse med CO₂-fangst (BECCS). Fanget CO₂ brukes til produksjon av flybrensel (se Appendix A.2). Europeisk energimiks antas for all kraftbruk tilknyttet CO₂-fangst, hydrogenproduksjon og produksjon av drivstoff, og CO₂ slippes igjen ut til atmosfæren etter forbrenning. Grunnet den fossile komponenten i europeisk energimiks vil karbonsyklusen bidra til utslipp av fossilt CO₂, selv om råvaren er fra biomasse. Syklusen kan aldri bli klimapositiv. Karbonstrømmer er illustrert med rette linjer, energistrømmer med bølgede linjer. Grønn er biogen CO₂ eller fornybar kraft, grå er fossilt CO₂ eller fossilt basert kraft, blå er atmosfærisk CO₂. Grønne og grå prikker angir hydrogen produsert med elektrolyse fra europeisk energimiks.



Figur 4. Eksempel på bruk av CO₂ i kjemikalier og plast. Både biogen og fossil karbonkilde er illustrert. "Plast og kjemikalier" er et mangefasettert område, hvor karbon ender opp i en mengde produkter med varierende levetid, og hvor endelig destinasjon for karbonet vil variere som listet i kulepunktene til høyre. Det detaljerte bildet kan bli komplekst, selv med en enkel analysemetode. Karbonstrømmer illustrert med rette linjer, energistrømmer med bølgede linjer. Grønn er biogen CO₂ eller fornybar kraft, grå er fossilt CO₂ eller fossilt basert kraft, blå er atmosfærisk CO₂. Grønne og grå prikker angir hydrogen produsert med elektrolyse fra europeisk energimiks.

Som for LCA vil innhenting av datagrunnlag og konsistent definisjon av grensene for karbonsyklusen være viktig for å bestemme masse- og energibalansen. Datainnhenting bør i stor grad kunne gjøres basert på den åpne litteraturen for størst mulige transparens. Datagrunnlaget bør omfatte energibruk for den prosessen hvor karbon kommer inn i karbonsyklusen, energibruk/frigjort energi for industriprosessene hvor karbonet omdannes til CO₂ og energibruk/frigjort energi ved transformasjon av CO₂ til nytt produkt.

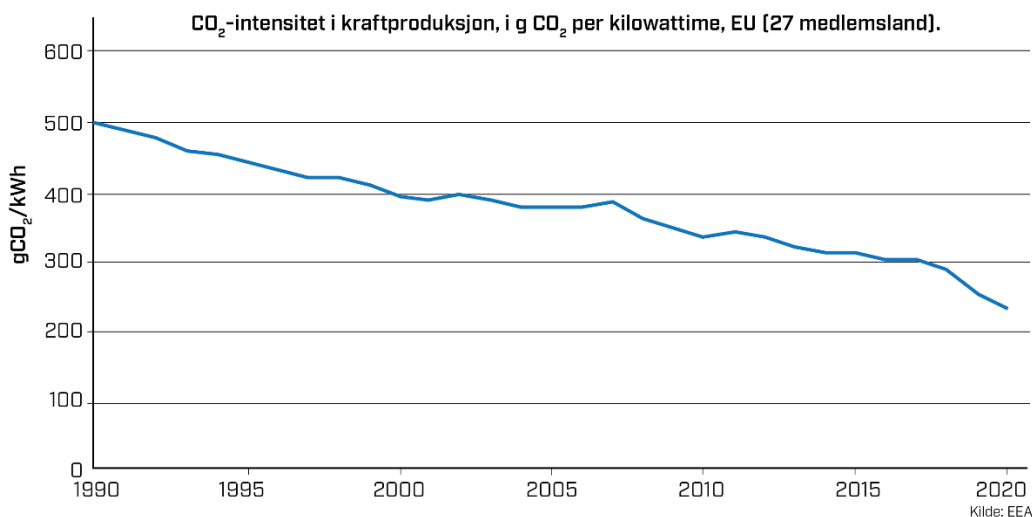


5 Økt etterspørsel av fornybar kraft

Fornybar kraft utgjorde litt under 30 prosent av den globale kraftproduksjonen i 2020¹¹. Vannkraft er den dominerende fornybare kilden, tett etterfulgt av sol- og vindenergi. Norge produserte 157 TWh i 2021, som er 14 TWh mer enn gjennomsnittet de siste 5 årene, og der hoveddelen er vannkraft og vindkraft.

Utviklingen i kraftmarkedet i Europa i årene fremover vil i stor grad bli drevet av klimapolitikk og teknologitvilling. Det er enighet rundt optimistiske mål for å erstatte produksjon og bruk av fossile energikilder med produksjon og bruk av fornybar kraft. Dette innebærer at kraftsektoren får flere produsenter og forhold utenfor kraftmarkedet får dermed enda større innvirkning på kraftmarkedet. I tillegg er mye av den fornybare kraften væravhengig og ikke regulerbar som f.eks. kullkraft og gasskraft, og det vil derfor kreve en enda større interaksjon mellom ulike kraftkilder for å opprettholde leveringsstabilitet. NVE har i sin langtidsanalyse¹² forutsatt at gasskraft, batterier og forbrukerfleksibilitet vil være viktige kilder til fleksibilitet i kraftsystemet i Europa i 2040. De skriver også at hydrogenkraftverk vil bidra noe til å dekke forbruket i perioder med lite vind- og solkraft, men at hydrogenpriser og CO₂-priser er usikre, og dette vil påvirke utviklingen av kraftproduksjonsnettverket i Europa.

Mange av tiltakene for å nå klimamålene baserer seg på rimelig, fornybar kraft, noe som er krevende når etterspørselen øker. Elektrifisering av industriprosesser, oppvarming og transportsektoren gjør at etterspørselen av kraft vil øke i Europa. Å bruke CO₂ som alternativ råvare til fossile kilder, noe som indikeres i "Sustainable Carbon Cycles" fra EU, vil være kraftkrevende, og kan bli utfordrende i stor skala. Det gjøres mye for å øke andelen fornybar kraft i Europa, men det er fortsatt et langt steg igjen for å få 100 prosent fornybar mix, hvis det i det hele tatt er mulig.



Figur 7. CO₂ intensitet i kraftproduksjonen i EU.¹³

¹¹ <https://ourworldindata.org/electricity-mix>

¹² [<https://www.nve.no/energi/analyser-og-statistikk/langsiktig-kraftmarkedsanalyse>]



EU har for tiden en utfordrende energisituasjon der de er avhengig av naturgass fra Russland. EU ønsker å redusere denne avhengigheten, og dette skal gjøres ved hjelp av en ny plan "REPowerEU". Planen, som ble presentert i mars 2022, kan oppsummeres slik: *Diversifying gas supplies, via higher Liquefied Natural Gas (LNG) and pipeline imports from non-Russian suppliers, and larger volumes of biomethane and renewable hydrogen production and imports; and, reducing faster the use of fossil fuels in our homes, buildings, industry, and power system, by boosting energy efficiency, increasing renewables and electrification, and addressing infrastructure bottlenecks. Full implementation of the Commission's 'Fit for 55' proposals would already reduce our annual fossil gas consumption by 30%, equivalent to 100 billion cubic metres (bcm), by 2030. With the measures in the REPowerEU plan, we could gradually remove at least 155 bcm of fossil gas use, which is equivalent to the volume imported from Russia in 2021. Nearly two thirds of that reduction can be achieved within a year, ending the EU's overdependence on a single supplier.*¹³

Utrulling av elektrifisering og fornybar kraft kan altså komme til å øke fremover. Et grunnleggende spørsmål er hvem som skal få tilgang til fornybar kraft i fremtiden – sannsynligvis den som kan betale mest.

Det er utfordrende å vurdere hvilken kraftmiks som skal legges til grunn når en vurderer ulike prosjekter, både med tanke på hva som er mulig å produsere og hva som er mulig å overføre. Norge er en del av et europeisk kraftsystem, og det finnes overføringskabler innen de ulike områdene i Norge og også til utlandet. NVE gjennomfører en klimadeklarasjon for fysisk levert strøm der det viser hvor strømmen brukt i Norge hovedsakelig kommer fra. Dette gir en oversikt over hvor store klimagassutslipp en kan regne med at norsk strøm har. For å garantere at strømmen en bruker er produsert fra fornybare kilder kan en enten være koblet direkte til et frittstående energiverk, f.eks. solceller eller vindkraft, eller en kan bruke strøm med opprinnelsesgarantier. Da gir kraftprodusentene en garanti om at kraften de selger til strømleverandørene er fornybar.

6 Oppsummering og refleksjoner

Bruk av CO₂ kan deles inn i fem kategorier av karbonsykluser:

- Mineralisering
- Produksjon av syntetiske drivstoff
- Produksjon av kjemikalier
- Produksjon av plast og andre karbonbaserte materialer
- Bruk i drivhus for økt plantevekst

Disse er beskrevet i appendiks A. Videre er biomasse som utgangspunkt for produkter kortfattet nevnt i appendiks B, sammen med biokull.

Mineralisering med CO₂ (Figur 2) har gode forutsetninger for å gi netto uttak av CO₂ fra atmosfæren. Bruk av fanget CO₂ til drivstoff vil, med referanse til Figur 3, ikke gi redusert CO₂-innhold i atmosfæren. Det vil heller ikke bruk av CO₂ i drivhus. Det kan vurderes om tilførsel av CO₂ kan lede til redusert arealbruk for

¹³ Ember: "Ember's Global Electricity Review 2020", March 2020.

¹³ REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy, press release 8 March 2022



matproduksjon, men en bør samtidig se på hvor mye (eller lite) CO₂ som tilføres veksthus som faktisk tas opp av voksende planter (under 10 prosent av tilført CO₂). Situasjonen for kjemikalier og plast er mer komplisert, som illustrert i Figur 4.

Det foreslås i dette notatet å ta i bruk enklere metoder enn komplett LCA for å kunne gjøre en innledende vurdering av bærekraftige karbonsykluser. En kvantitativ metode kan baseres på masse- og energibalanser for ett tonn karbon. Metoden kan/bør kompletteres med en kvalitativ tilnærming, for eksempel å vurdere karbonsykluser opp mot FNs bærekraftsmål eller gjøre noen overordnede kvalitative betraktninger i retning av en LCA.

Det er relevant å sammenligne resirkulering av CO₂ med det å resirkulere produkter og materialer som er tatt frem for å produsere minimalt med utslipp. Det kan for eksempel være å sammenligne plastflasker som resirkuleres, eller brukes i nye plastbaserte materialer, med plast som brennes i et anlegg med CO₂-fangst og hvor fanget CO₂ brukes til å produsere ny plast.

Et annet eksempel er bygninger, hvor en kan sammenligne rivning av hele bygninger, med å oppføre bygninger hvor det er mulig å erstatte skadde eller ubrukelige enkeltdeler av en bygning med godt designede bygningselement. Rivning av hele bygninger genererer rivningsbetong, som kan karbonatiseres med CO₂. Når man kun erstatter deler av en bygning vil CO₂-utslipp, material- og energibruk ved produksjon av sement vil bli redusert. Mengden rivningsbetong med potensial for å karbonatiseres vil dermed bli redusert, men totalt sett vill med veldig stor sannsynlighet netto CO₂-utslipp minske.

Det argumenteres fra flere hold at den type CCU som tar utgangspunkt i de to veldig stabile molekylene CO₂ og H₂O kan vise seg å være nødvendig for å dekke behov for fremtidens drivstoff, kjemikalier og plastmaterialer. Fra et overordnet perspektiv virker det fornuftig å ikke spørre hvor stort markedet kan bli for CCU-produkter, men heller hvor lite som trengs og innenfor hvilke områder. Mer spesifikt: Hvis en tar drivstoff som et eksempel, så er det ikke fornuftig å erstatte *alt* fossilt drivstoff med "e-fuel" (drivstoff produsert fra CO₂ og hydrogen, dvs. CCU). El og hydrogen er i seg selv relevante og mer energieffektive alternativer enn e-fuel for persontransport på vei¹⁴. For flytransport er det p.t. mer uklart hvordan fremtiden vil se ut, og det er flere initiativer på gang for å utvikle flydrivstoff fra CO₂ og hydrogen (for eksempel Nordic Electrofuel¹⁵). IEAGHG har presentert tall som viser at kraft tilsvarende dagens globale kraftproduksjon på 27 000 TWh (hvorav kun 26 prosent er basert på fornybar energi) vil trengs for å erstatte alt fossilt drivstoff som i dag blir brukt i tungtransport og fly med e-fuel¹⁶, noe som ikke virker gjennomførbart.

Man kan også reflektere over hvilke oppgaver/funksjoner mulige CCU-produkter har, og hva alternativene er. For eksempel; alternativ til "CCU-plast" kan være bedre design av plastforpakninger sånn at de kan resirkuleres, eller emballasje og kjemikalier fra biomasse som er biologisk nedbrytbare. Samtidig må en ta i betraktning at det er begrenset hvor stor andel biomasse og arealbruk som kan settes av for disse formålene, og at det kan komme i konflikt med for eksempel matproduksjon eller naturmangfold.

¹⁴ Novel carbon capture and utilisation technologies. Research and climate aspects. SAPEA Evidence review report No.2. DOI 10.26356/carboncapture

¹⁵ <https://nordicelectrofuel.no/>

¹⁶ CO₂ utilisation: Hydrogenation pathways. IEAGHG Technical Report 2021-03, November 2021.



SINTEF

Bærekraftige karbonsykluser kan betraktes fra flere perspektiver. Et vanlig perspektiv er at dette handler om å finne den mest mulig bærekraftige måten, alternativt en fossilfri måte, å fremstille et gitt produkt, som i sin natur inneholder karbon (kjemikalier, plast, drivstoff, bygningsmaterialer etc.).

Et annet perspektiv er å vurdere om dette produktet kan produseres på en mer bærekraftig måte ved bruk av karbon fra biomasse, luft eller hav sammenlignet med produksjon basert på fanget (og kanskje fossilt) karbon, eller om det fins faktorer, som for eksempel energi- eller arealbruk, som kan sette spørsmål ved dette.

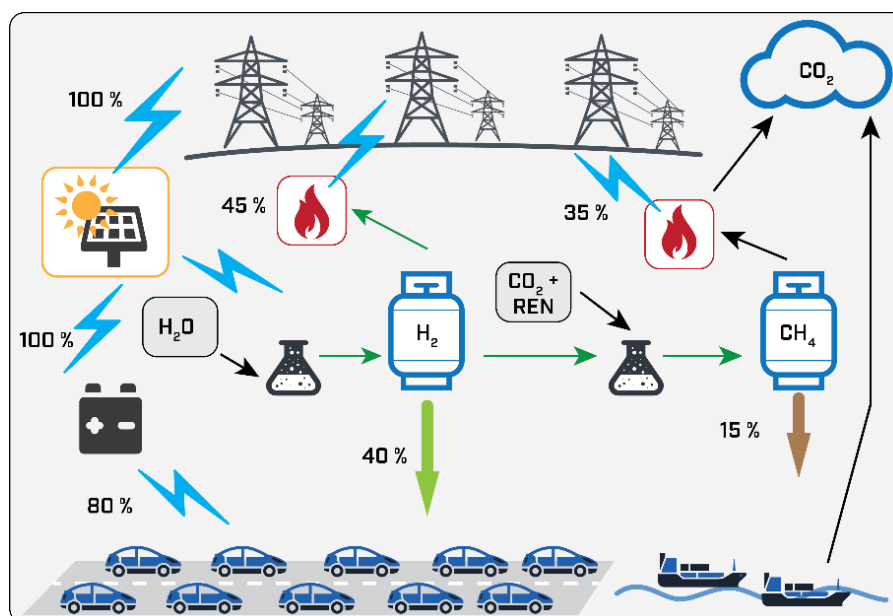
Et tredje perspektiv er å vurdere om det fins alternativer til produktet som kan løse samme oppgave, for eksempel når kan batterier erstatte drivstoff. Videre kan en her reflektere over hva som er fremtidens behov for mobilitet og hvilke former for mer bærekraftig mobilitet vi kan se for oss.



A Bruk av CO₂ til produkter

CCU sees ofte som en alternativ mulighet for å lage produkter som til vanlig lages av fossile råstoff (spesielt fra hydrokarboner, men til en viss grad også fra kalkstein).

Å bruke CCU for å erstatte fossile hydrokarboner innebærer å bruke CO₂ som er fanget fra industrielle punktutslipp eller fra atmosfæren og kombinere dette med hydrogen laget fra elektrolyse, noe som trenger vann og kraft. Vanligvis blir det i CCU-studier forutsatt at den kraften som brukes for elektrolyse og andre energikrevende prosesser er 100 prosent fornybar. Her må en ta i betraktning hva som er alternativene for bruk av fornybar kraft. *Figur 8* fra SAPEA (Science Advice for Policy by European Academies) gir omtrentlige anslag for virkningsgraden av strøm fra solceller, for leveranse av kraft til nettet og alternativ for å muliggjøre transport.



Figur 8. Oversikt over forskjellige måter for kraftproduksjon og mobilitet, basert på kraft fra solceller. Prosenttall er estimat av energieffektivitet for hele kjeden. Figuren er gjengitt basert på en rapport fra SAPEA¹⁴.

IEAGHG sin rapport på hydrogenation¹⁶ konkluderer med at kostnaden for CCU-produkter basert på CO₂ og hydrogen er adskillig høyere enn for tilvarende produkter basert på fossile råstoff. Dette er konstatert i studier som er utført før den siste tidens økende energipriser. Verdien for denne kategorien CCU-produkter ligger altså ikke i lavere kostnad, men baseres på argumentasjon rundt behovet med å unngå å utvinne og bruke fossilt karbon i produkter. Et annet argument for å produsere hydrokarboner fra CCU er at dette er en måte å lagre fornybar energi (kraft).

Å bruke CO₂ i produkter er en utfordring med tanke på energi. CO₂ er et veldig stabilt molekyl, og er ofte et restprodukt etter en forbrenning der målet er å gi energi, for eksempel når en brenner olje/ gass. Hvis vi skal reversere denne prosessen, er utgangspunktet CO₂ og H₂O. En må i en ideell reversibel prosess tilføre minst like mye energi for å lage drivstoff av CO₂ som frigjøres ved forbrenning, og i praksis må mer energi tilføres, grunnet irreversibiliteter. Energiens opphav er derfor essensiell, og det er også vesentlig om denne energien kan brukes på alternativ måte. Eksemplet som gis i *Figur 8* er innlysende – det å fremstille



syntetisk drivstoff av CO₂ er ikke et mål, men et middel for å muliggjøre transport. Transport kan også muliggjøres gjennom bruk av elektrisitet eller hydrogen.

A.1 Mineralisering med CO₂

Overordnet prinsipp: I mineralisering brukes CO₂ for å reagere med (typisk magnesium- og kalsiumbaserte) oksider, som derved danner stabile karbonater. Reaksjonen er eksoterm, dvs. gir fra seg varme. Mineralisering kan skje enten i en teknisk prosess, eller gjennom "enhanced weathering" eller "passive carbonation", hvor materialer som kan mineraliseres bevisst eksponeres for luft eller plasseres i havet og tar opp CO₂/danner karbonater.

Bruksområder: Mineralisering kan typisk brukes i bygningsindustrien, for herding av betong (carbon curing) eller tilsetningsmiddel i betong (aggregater, inkludert karbonatisert rivningsbetong) som så kan erstatte (deler av) den grus og sand som brukes i ny betong. IEAGHG spesifiserer syv typer av karbonatiserte materialer, og nevner at det også fins andre¹⁷. Karbonatisering kan også brukes for å stabilisere alkaliske tungmetaller i avfall.

Innsatsfaktorer: Innsatsfaktorene er CO₂ og mineraler som kan reagere med CO₂, det vil si karbonatiseres. Karbonatisering er typisk en eksoterm prosess, det vil si at den avgir varme, mens produksjonen av CaO, som en del av produksjonen av sement eller kalk er meget energikrevende.

Markedet for betong er cirka 30 Gton/år¹⁸. IEAGHG estimerer at det vil være mulig å oppnå reduksjon i CO₂-utslipp tilsvarende 100 Mton CO₂/år gjennom en kombinasjon av at mindre CO₂ trengs (grunnet herding med CO₂) og at CO₂ kan brukes i aggregater og karbonatisert rivningsbetong. Det ser ut til å være en stor aktivitet innenfor dette området i sementindustrien¹⁹ og en del varianter av teknologien fremstår som forholdsvis modne sammenlignet med andre CCU-teknologier¹⁸.

Kunder er typisk sementprodusenter og bygningsindustrien. Det fins flere selskaper på markedet, som CarbonCure, Solidia Technologies, Carbicrete, VITO/ORBIX, Carbon8, Neustark.

Karbonbalanse: Siden CO₂ bindes permanent i karbonater leder mineralisering til permanent fjerning av CO₂ fra atmosfæren. Det vil si at mineralisering er et klimapositivt tiltak.

En betraktning fra et videre, langsiktig bærekraftperspektiv er at det er å foretrekke å unngå mest mulig at det produseres rivningsbetong og annet avfall. Viktige aspekter her er å designe bærekraftige bygninger hvor skadede deler kan erstattes, gjennom å designe gjenbrukbare bygningselementer av for eksempel betong.

¹⁷ From Carbon Dioxide to Building Materials – Improving Process Efficiency. IEAGHG Technical report 2022-04, March 2022

¹⁸ CO₂ as a feedstock: Comparison of CCU pathways. IEAGHG Technical Report 2021-02, November 2021.

¹⁹ <https://www.globalcement.com/magazine/articles/1232-ccs-co2-capture-storage-in-cement>



A.2 Syntetiske drivstoff

Bruk av fossile hydrokarboner til brensel/drivstoff er den største kilden til antropogene CO₂-utslipp. Den aller største delen av fossil olje og gass som produseres går til drivstoff, oppvarming og kraftproduksjon. Totalt var det globale forbruket av olje og gass cirka 7200 millioner tonn oljeekvivalenter (Mtoe) i 2015²⁰, fordelt på 4300 Mtoe olje og 2900 Mtoe gass. Olje og gass til energiformål og transport er langt større (ca 89 prosent) enn det som brukes som råstoff. Syntetiske drivstoff vurdert av IEAGHG er syntetiske "middle distillate fuels" (tilsvarende flydrivstoff, diesel, bensin), syntetisk metan (som erstatning for naturgass), syntetisk DME, syntetisk etanol og syntetisk metanol.

IEAGHG-rapporten om Hydrogenation pathways¹⁶ observerer at produksjon av syntetiske drivstoff ligger an til å være dyrere en fossile drivstoff, både på kort (2020-årene) og lang (~2050) sikt. Kostnadsforskjellen kan reduseres på lang sikt hvis produksjon av grønt hydrogen blir billigere. Da må kraftprisene reduseres. En observasjon er at hvis CCU for å produsere drivstoff er kostbart er det ikke nødvendigvis denne typen prosesser som vil ha best betalingsevne for fornybar energi, med mindre betalingsevnen for produktet er høy.

Overordnet prinsipp: Syntetiske hydrokarboner produseres fra fanget CO₂ og hydrogen, det fins et antall prosesser, avhengig av type produkt som ønskes produsert. Det virker å være en generell antakelse i litteraturen at hydrogen for dette formålet er produsert med 100 prosent fornybar energi. Videre er det ikke nevnt i IEAGHG sin rapport om CCU at det medgår energi for å fange CO₂, dvs det er uklart om dette energiforbruket er tatt med i betraktningen. Energibruken for utvinning av hydrokarboner virker dog å være tatt med i sammenligningene.

Bruksområder: Som direkte erstatning for fossil olje og gass innenfor transportsektoren.

Innsatsfaktorer: CO₂ og Hydrogen. CO₂ fanges fra en røykgass eller direkte fra luft, noe som er energikrevende. Hydrogen produsert gjennom spalting av vann (elektrolyse) trenger kraft og vann som innsatsfaktorer. Produksjon av «Middle distillate fuels»²¹ (f.eks. drivstoff som bensin, flybrensel, diesel) fra CO₂ og hydrogen er estimert til å ha 15 ganger høyere energibehov og metan 20 ganger høyere energibehov enn tilsvarende produkter basert på fossile råvarer¹⁸. Videre er det anslått at 20 prosent av utslippene for fossile UK middle distillate emissions er "well-to-tank" (produksjon og distribusjon av drivstoff), mens 80 prosent er "tank-to-wheel" (bruk av drivstoff). Det er interessant for de 20 prosentene for well-to-tank å vurdere om man kan redusere utslipp med CCU-drivstoff. I tillegg må en fordeling gjøres av hvem som får tilgjodgjøre seg reduksjon av CO₂-utslipp mellom opprinnelig CO₂-klide, hvor CO₂ blir fanget, og CCU-drivstoffet som gjenbruker CO₂, men slipper det ut til atmosfæren. Denne fordelingen må være transparent for å unngå dobbelt bokføring av utslippsreduksjoner. For å kvantifisere mulige utslippsreduksjoner med drivstoff produsert fra CO₂ må det gjøres beregninger, men det er klart at reduksjonenes sannsynligvis blir større ved bruk av CO₂ fra biogene kilder eller luft (DAC) enn ved bruk av fanget fossil CO₂.

²⁰ USE OF OIL AND GAS PRODUCTS IN THE INDUSTRY, REPORT FOR THE NORWEGIAN OIL AND GAS ASSOCIATION, Endrava AS, oktober 2019.

²¹ [Distillate | McKinsey Energy Insights](#)

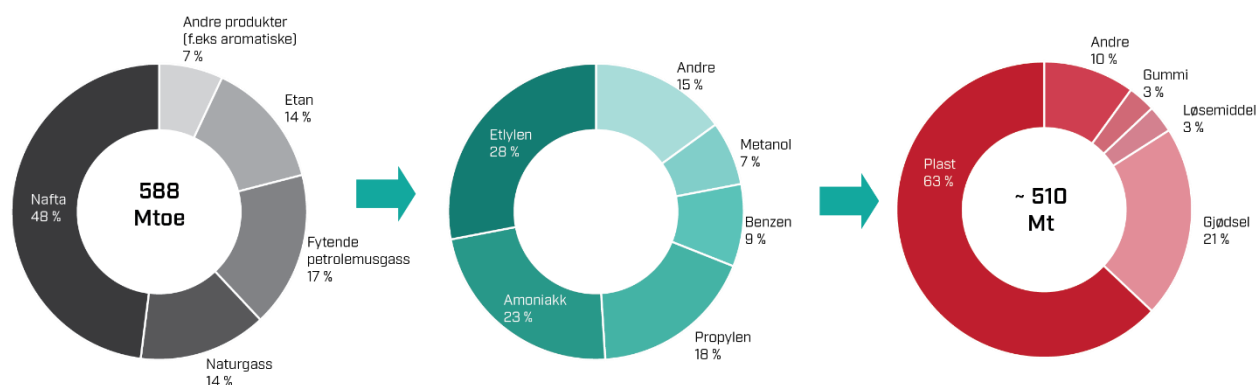


Marked/kunder: IEAGHG nevner at syntetiske drivstoffer produsert med CCU kan ha et potensial i nisjeområder hvor det kan være krevende å velge andre metoder for dekarbonisering¹⁸ (elektrifisering, hydrogen og biomasse). Mer spesifikt nevnes tungtransport, skipsfart og fly som bruksområder for syntetiske drivstoff. IEA indikerer at i 2070 kan syntetiske drivstoff ha 3 prosent av markedet for tungtransport og 40 prosent av markedet for flydrivstoff. Vattenfall har sammen med Shell New Energies og Lanzatech i juli 2022 fått bevilget midler fra EU sitt innovasjonsfond for produksjon av flydrivstoff fra CO₂ i Sverige (prosjektnavn HySkies). Under i et webinar organisert av Gassnova 21 april 2022 ble det nevnt at Vattenfall har planer på å produsere flydrivstoff fra CO₂ fanget fra avfallsforbrenningsanlegget i Uppsala. I Norge har Nordic Electrofuels planlagt byggestart i Porsgrunn i 2022 for en fabrikk med kapasitet på 10 millioner liter flydrivstoff/år, basert på gass fra Eramet i Porsgrunn som inneholder både CO og CO₂. I Mo industripark er det planlagt en fabrikk (Mo Industrial e-Fuels) som skal produsere metanol fra CO₂.

Karbonbalanse: CO₂ fra drivstoff blir sluppet ut i atmosfæren etter forbrenning i en stempelmotor eller jetmotor. Det er derfor åpenbart at karbonet fra produksjon av syntetiske drivstoff ender i atmosfæren, det vil si at dette aldri kan være et klimapositivt tiltak. CO₂ inn i produksjonen kan komme fra fossile kilder, biomasse eller luft (eller, teoretisk sett, fra sjøvann). Alle prosessene med CCU brukt for produksjon av drivstoff trenger energi. Den europeiske kraftmiksen tatt i betraktning vil disse prosessene alltid gi netto tilskudd i CO₂-utslipp til atmosfæren.

A.3 Kjemikalier

Kjemisk og petrokjemisk industri trenger karbon som nødvendig råstoff. Produktene kan stort sett ikke dekarboniseres på samme måte som energikilder til transport, kraft og varme, hvor fornybar energi og lav-karbon løsninger får økt anvendelse. Råstoff for kjemisk/petrokjemisk industri er i dag hovedsakelig olje og gass. Av et totalt globalt forbruk av olje og gass på ca 7200 millioner tonn oljeekvivalenter (Mtoe) i 2015²⁰, ble ca 11 prosent brukt som råstoff i industrien. Av dette gikk ca 74 prosent til kjemisk/petrokjemisk industri (basert på tall fra OECD-land), som tilsvarer 588 Mtoe. ENDRAVA har beregnet produksjonsflyten fra råstoff til produkt i den globale kjemiske/petrokjemiske industrien som vist i figuren nedenfor. Plast og gjødsel er de to største sluttproduktene.



Figur 9. Produksjonsflyt fra råstoff til produkt for kjemikalier, gjengitt basert på ENDRAVA-rapport laget for Norsk Olje og Gass^{Error! Bookmark not defined.}.

Kjemisk/petrokjemisk industri er energiintensiv og behøver fossile energikilder også til energiformål, ikke bare som råstoff. Sektoren var den største europeiske industrielle energiforbrukeren med et forbruk på ca



612 TWh (brenslers, strøm og fjernvarme) i 2014. Det tilsvarer da omtrent 19 prosent av all industriell energibruk i Europa (DECHEMA 2017²²). Det diskuteres ikke videre her da det vil dekkes opp av økt bruk av fornybar kraft, lav-karbon brenslers og eventuelt også syntetiske brenslers.

Overordnet prinsipp: En mer bærekraftig kjemisk/petrokjemisk industri må på sikt erstatte fossile råstoffer med andre karbon- og hydrogen-holdige råstoffer. Innenfor kjemisk industri er det bærekraftige karbonsykluser på forskjellig nivå: Produktresirkulering; Mekanisk resirkulering (prosessering og gjenbruk uten å endre kjemiske forbindelser); Kjemisk resirkulering (bryte opp langkjede forbindelser ved eksempelvis gassifisering eller katalytisk cracking); Bruk av fornybare råstoffer (produksjon basert på biomasse eller biogene avfallsstrømmer); CCU (produksjonsruter basert på å fange CO₂ og redusere denne med grønn hydrogen for så å lage nye kjemikalier via katalytiske prosesser). I et sirkulærøkonomisk perspektiv er produktresirkulering og mekanisk resirkulering viktigst²³. I tillegg fremholder DECHEMA²² industriell symbiose som et alternativ, der spesielt stålindustri har avgasser som kan være kilde til H₂, CO og CO₂.

Bruksområder: Kjemikalier produsert av kjemisk/petrokjemisk industri brukes som byggesteiner for tilnærmet alle organiske kjemiske produkter. De inngår i produksjon av plast, gummi, emballasje, bygningsmaterialer, tekstiler, ja i nær sagt alle produkter, samt at noen også kan benyttes direkte. Grønn produksjon av disse kjemikalier vil ha et tilsvarende stort bruksområde.

Innsatsfaktorer: For CCU-basert kjemikalieproduksjon trengs CO₂ som fanges fra røykgass eller industrielle avgasser. Fortrinnsvis en BECCS prosess, eller direkte fra luft. Videre trengs hydrogen som stort sett forsettes å være produsert ved elektrolyse av (rent) vann med fornybar elektrisitet. Hydrogenisering av CO₂ til metanol er vel etablert teknologi med TRL = 8²⁴. Fra metanol kan man videre produsere "grønn" etylen og propylen via en metanol-til-olefin prosess (MTO). Tilsvarende kan man produsere "grønn" benzen, toluen, og xylen fra grønn metanol via Mobil's metanol-til-aromater prosess.

Karbonbalanse: Karbonbalansen for "grønne" kjemikalier produsert fra CO₂ vil grovt sett avhenge av om karbonet som benyttes i produksjonen er biogent eller fossilt, og hvor karbonet havner når produktet er ferdig brukt. Bruk av fossilt karbon som kommer ut i atmosfæren når kjemikaliet/produktet brytes ned, representerer bare en tidsforsinkelse.

Ammoniakk produsert med hydrogen fra fornybar energi og metanol produsert fra CO₂ og fornybart hydrogen er nevnt som spesielt effektive for å oppnå lavere utslipp. Reduksjon i CO₂-utslipp er beregnet til henholdsvis 1,7 tonn og 1,5 tonn per tonn ferdig produkt for disse to prosessene sammenlignet med standard naturgassbaserte produksjonsruter²². DECHEMA estimerer at EU kjemisk industri kan redusere CO₂-utslipp med 210 Mt CO₂ per år i 2050 i max-scenariet²². Legger man til potensialet som sektoren har for å produsere syntetiske drivstoff og brenslers blir potensialet betydelig større. Det må poengteres igjen at det handler om *reduksjon* av utslipp grunnet gjenbruk av karbon fra CO₂. Spesielt vil CO₂ fanget fra store punktutslipp for bruk til kjemikalieproduksjon kunne bli fordelt over en stor mengde produkter, det vil si karbonet fra fanget CO₂ risikerer å bare bli sirkulert én gang.

²² Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, DECHEMA e.V., juni 2017.

²³ Taking the European chemical industry into the circular economy, Accenture 2017.

²⁴ IEAGHG, "CO₂ as a Feedstock: Comparison of CCU Pathways", 2021-02, November 2021.



Marked/kunder: Markedet for grønnere kjemikalier er stort da de kan direkte erstatte dagens kjemikalier. Eksempelvis er det anslått at eksisterende globalt marked for metanol som kjemisk mellomprodukt er rundt 80 Mt/år²⁴. I tillegg er det et globalt marked for olefiner på rundt 200 Mt/år hvor grønn metanol også kan spille en betydelig rolle gjennom MTO-prosessen. Metanol brukes også til drivstoffinnblanding med et marked på 35 – 170 Mt metanol avhengig av innblandingsgrad (3-15 prosent). Grønn metanol kan også brukes som drivstoff, enten direkte eller for alternative drivstoff som DME, med aktuelle markeder innen maritim sektor (200 Mtoe) og tunge kjøretøy (600 Mtoe). Svensk Perstorp fikk i juli 2022 innvilget 97 MEUR til sitt Project AIR av EU sitt innovasjonsfond. Prosjektpartnere er Uniper og Fortum, og følgende informasjon fins på Perstorp sin nettside: *Project Air is based on innovative usage of existing technology in a large-scale industrial application. To produce sustainable methanol, the facility utilizes significant amounts of CO₂ and other residue streams recovered from Perstorp's ongoing operations, biogas from new dedicated plants together with hydrogen from a new large electrolysis plant. Further, existing wastewater treatment will be utilized as feed water for the electrolysis. All electrical energy for the combined project will be renewable based. The ambition is to start up large-scale production by 2026.*²⁵

Viktigste barrierer er: Behovet for fornybar kraft hvor max-scenariet til DECHEMA²² anslår ca 4900 TWh for Europa i 2050, mens IEA anslår at 3400 TWh vil være tilgjengelig (NB! Dette er tall fra 2017 og IEA ETP 2015, og kan ha endret seg en god del siden da). Behov for alternative karbonholdige råstoff, fortrinnsvis biogene er en annen barriere. Og ikke minst betydelig økte kostnader. Produksjonskostnad for fossil metanol ligger i området 100 – 250 USD/tonn iflg IRENA-rapport²⁶ fra 2021. Samme rapport anslår produksjonskostnad for grønn e-metanol til 800 – 1600 USD/tonn antatt at CO₂ kommer fra bioenergi til en kostnad på 10-50 USD/tonn CO₂. DECHEMA²² fra 2017 estimerer produksjonskostnaden for fornybar metanol til ca 300 – 700 €/tonn hvor spennet skyldes forskjellig antatt pris på fornybar kraft.

Selv om barrierene er betydelige er dette et område som vokser. Flere store prosjekter er allerede i gang, eller på trappene: Perstorp Group med partnere Fortum og Uniper som vil erstatte bruk av 200 000 tonn fossil metanol på sine anlegg i Europa med grønn metanol. Ørsted og Liquid Wind AB sitt FlagshipONE e-metanol prosjekt som vil produsere 50 000 tonn grønn metanol per år. A.P. Moller - Maersk med partnere Reintegrate og European Energy vil etablere et dansk anlegg som skal produsere 10 000 tonn grønn metanol per år som A.P. Moller – Maersk vil bruke som drivstoff for verdens første metanoldrevne containerskip. Wacker Chemie AG og Linde sitt prosjekt RHYME hvor Wacker vil produsere grønt hydrogen og metanol som de skal bruke videre i sin kjemiske produksjon. Metanolkapasiteten er planlagt til ca 15 000 tonn per år.

A.4 Plast og andre karbonbaserte materialer

Overordnet prinsipp: CO₂ kan brukes til å produsere flere ulike typer karbonbaserte materialer, for eksempel plast og polymerer, og kan erstatte gass og olje som inngangsprodukter. Bruk av CO₂ i polymeriseringsprosesser kan utføres på ulike måter avhengig av CO₂-sin rolle i prosessen. CO₂ kan være en reaktant som blir til en strukturert enhet i polymerkjede via en ett-trinnprosess. CO₂ kan også brukes for produksjon av start- og mellomprodukter i den kjemiske forsyningskjeden til polymerproduksjon via flere-trinnprosess.

Produksjon av polykarbonater (PC) og polykarbonatpolyoler (PCP) ved bruk av CO₂ har de mest utviklede teknologiske løsninger. PC består av polymerkjeder som har karbonatester-bindinger i den repeterende

²⁵ https://www.perstorp.com/en/news_center/pressreleases/2022/project_air_funding

²⁶ IRENA AND METHANOL INSTITUTE (2021), Innovation Outlook : Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.



monomerenheten. PCP består også av polymerkjeder med karbonateter-bindinger og inneholder 2 eller flere aktive hydroksyl-grupper.

Bruksområder: Emballasje, bygningsmaterialer, leker, medisinsk bruk mm. Veldig mange bruksområder, og markedet for plast og andre karbonbaserte materialer er stort og variert.

Innsatsfaktorer: Hovedsakelig CO₂, H₂ og energi, men også andre tilsetningsstoffer basert på egenskaper materialene skal ha.

Marked: Det produseres enorme mengder plast/polymerer i dag- og bruk av CO₂ som innsatsfaktor i plast kan redusere bruk av fossile kilder som råvare i plastindustrien. Likevel skal det påpekes at det er mange utfordringer med bruk av plast i stor skala- og det arbeides med å finne alternative produkter som kan erstatte plast siden det brytes sakte ned i naturen og det er utfordringer rundt resirkulering av plastprodukter. Markedet for PC er rundt 5100 kt/år og inkluderer resin, plast og filmbelegg som hoved-applikasjonsområder. Det årlige markedet for polykarbonat er på over 4 Mt og Polyols for Polyurethane har i 2020 et årlig marked på ca 12 Mt²⁷.

Karbonbalanse: Om en kan erstatte olje/ naturgass med CO₂ når en skal produsere plast, vil dette bidra til utslippsreduksjon av CO₂ i form av at man utnytter eksisterende CO₂-kilder og følgelig minsker behovet for å bruke olje som karbonkilde. Som for kjemikalier gjelder det at CO₂ fanget fra store punktutslipp for bruk til kjemikalieproduksjon vil kunne bli fordelt over en stor mengde produkter, det vil si karbonet fra fanget CO₂ risikerer å bare bli sirkulert én gang.

Karbon lagres i plastproduktene, men det er stor variasjon i levetid for plastproduktene. Mye plast ender opp som mikroplast i havet, og der vil det til slutt legges på havbunnen. Noe plast kan resirkuleres og brukes i nye/andre produkter. I en LCA gjennomført av Norner i 2014, kan bruk av 1 kg CO₂ som råstoff til plastproduksjon redusere utslippene med 3 kg CO₂ om en bruker fornybar energi¹²⁷.

Råvarenes opprinnelse er en viktig faktor mtp bærekraft, altså om CO₂ er fjernet av CO₂ kretsløpet eller om det kommer fra forbrenning av fossilt materiale og om energien som trengs for konverteringen er fornybar eller ikke. Videre er det viktig å se på levetid på platen og hva som skjer med produktet ved levetidens slutt. I utgangspunktet er det sannsynlig at bruk av CO₂ som råstoff som erstatter fossile kilder som gass/ olje, vil føre til mindre karbonutslipp enn en tilsvarende prosess med olje/gass. Dette avhenger av om energien som er bruk er fornybar eller ikke, og hva produktet brukes til. Det viktigste klimatiltaket innen plast er vel å redusere plastbruk ved å fjerne unødig plastbruk, og videre gjenbruke platen slik at en forlenger brukstid.

A.5 CO₂ til veksthus og algeproduksjon

Bruk av CO₂ i veksthus og til algeproduksjon er i utgangspunktet ikke et klimapositivt tiltak. CO₂ som går inn i næringskjeden og blir til mat eller blomster vil komme ut i kretsløpet innen kort tid. Et unntak ville kunne være hvis makroalger blir brukt som basis for produksjon av biokarbon. Det kan finnes muligheter for å bygge en forretningsmodell her, som kan støtte realiseringen av CCS for en industri.

I Nederland er bruk av fanget CO₂ for økt produksjonstakt i veksthus et alternativ til å bruke naturgass. Dyrking av grønnsaker og planter/blomster i veksthus er stor industri i Nederland, men mer av et nisjeprodukt i Norge. Hvis det blir større etterspørsel på norskproduserte grønnsaker, vil markedet for CO₂

²⁷ Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO₂ as feedstock: insights from an industrial case study, Green Chemistry, issue 6 2014



til veksthus kunne øke. En bør dog være observant på at ikke all CO₂ som sendes til et veksthus vil bli tatt opp av planer eller blomster. Et nederlandsk prosjekt viser til at mer enn 90 prosent av den CO₂ som tilføres veksthus ikke tas opp av de planter og blomster som dyrkes, men går rett ut i atmosfæren²⁸. Ferrosilisiumverket i Finnfjord dyrker mikroalger for produksjon av fiskefor. Dette er ikke et klimapositivt tiltak, men kan ha andre fordeler fra bærekraftperspektiv, som lokalproduksjon av fiskefor som erstatter importert soya.

B Bruk av biomasse i produkter

I prinsipp kan biomasse brukes som erstatning for fossil råvare i veldig mange prosesser og produkter, inkludert metanol, etanol, bioolje, forpakkingsmaterialer og kjemikalier. Som erstatning for fossil råvare fins det en tydelig potensiell klimagevinst her, selv om mange av bruksområdene ikke leder til netto fjerning av CO₂ fra biosfæren/atmosfæren, med mindre man finner tiltak som kombineres med CCS. Videre er biokarbon et interessant område fra et klimapositivt perspektiv.

Biokarbon

Overordnet prinsipp: Tre pyrolyseres til biokarbon. Avhengig av pyrolysetemperatur vil karbonet ha en stabilitet som kan vare i hundrevis eller kanskje til og med tusenvis av år.

Bruksområder: Jordforbedring, metallurgiske prosesser (erstatning av fossilt karbon), evt. bygningsmaterialer (i betong)

Innsatsfaktorer: Biomasse, energi.

Marked/kunder: jordbruk, energiintensiv industri (biokarbon), bygningsindustrien (bygningsmaterialer),

Karbonbalanse: Noe av karbonet i råvaren blir til CO₂ under produksjonsprosessen. Ved storskala produksjon, nært en CCS-infrastruktur, kan en vurdere CO₂-fangst fra produksjonsprosessen. Lagring av denne CO₂-en vil være et klimapositivt tiltak.

En utfordring ved bruk av biomasser er arealbruk og naturmangfold. Råvaren bør være for eksempel avfall fra skogsindustrien eller landbruk eller komme fra havbruk. Høyverdig biomasse som sagtømmer bør fortrinnsvis brukes til andre formål, for eksempel bygninger.

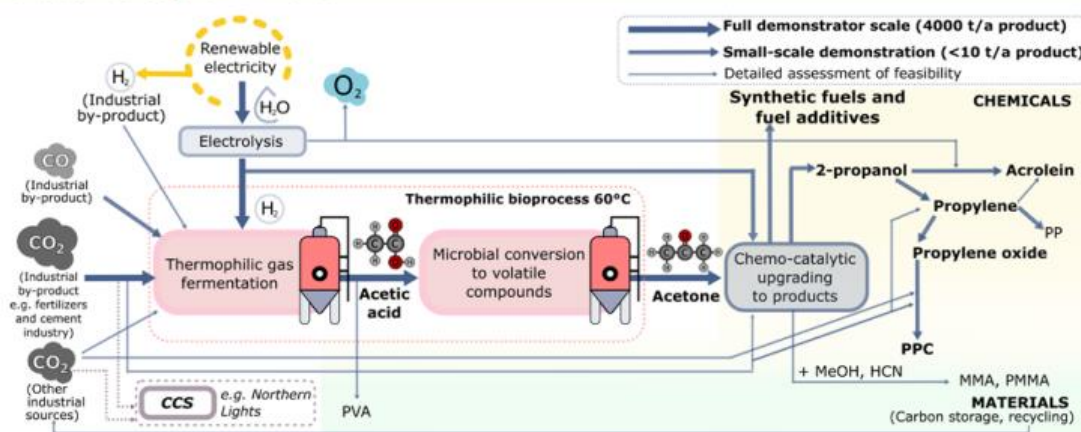
²⁸ [Towards Circular Greenhouse Horticulture - WUR](#)



C Eksempel på pågående relevante prosjekter hvor SINTEF er involvert

SINTEF jobber, og har jobbet med, mange prosjekter innen karbonsykluser og bruk av CO₂. Under har vi listet noen pågående prosjekter. Merk at dette ikke er en utfyllende liste:

- ACCESS – CO₂ fangst, transport og lagring i fire industrisektorer som helt eller delvis bruker biogen råvare (papir/masse, sement, avfallsforbrenning, bioraffinerier) og gjennomføring av en LCA for CCUS-kjeden. Prosjektet inkluderer demonstrasjon av CO₂-fangst fra avfallsforbrenning, papir/masse og sement samt demonstrasjon av mineralisering av rivningsbetong med CO₂.
- ALCOPOP- Prosjektet skal utvikle et nytt prosesskonsept for produksjon av organiske karbonater ved direkte reaksjon av CO₂ og alkohol eller diol. Organiske karbonater kan brukes som løsemidler, elektrolytter i batterier og utgangsstoffer til en rekke andre kjemikalier til nytte for agrokjemisk og farmasøytisk industri. Målet er en fullstendig sirkulær og bærekraftig produksjonsprosess.
- PyroCO₂ – Prosjektet er et SINTEF ledet EU Green Deal-prosjekt med et budsjett på 400 MNOK som skal se på bruk av CO₂ for produksjon av aceton ved hjelp av små organismer. Prosjektet skal bruke CO₂ som er hentet fra flere industrielle kilder og produsere aceton som igjen skal brukes til kjemikalie- og plastproduksjon. Ut ifra kriteriene for klimapositivitet, så er denne prosessen i beste fall karbonreducerende, men ikke klimapositiv eller klimanøytral. Dette er hovedsakelig fordi prosessen gjenbraker allerede produsert CO₂ og produserer hydrogen med fornybar energi som erstatning for tradisjonell produksjon med fossile innsatsfaktorer, noe som vil gi økt CO₂ utslipp.



Figur 10. Konsept for PyroCO₂.

- COZMOS – et EU-finansiert prosjekt som har som mål å utvikle banebrytende teknologi for konvertering av CO₂ til C3 drivstoff og kjemiske byggesteiner. Dette vil oppnås gjennom utvikling, demonstrasjon og utnyttelse av innovative katalysator- og prosesssteknologier som vil overvinne de termodynamiske begrensningene som ligger i bruken av CO₂ som en bærekraftig kilde for produktene.
- Flere prosjekter på avfallsforbrenning med CO₂-fangst (blant annet NewestCCUS og CAPE Waste)
- NCS C+ prosjektet er et kompetansebyggende prosjekt som skal se på klimapositive teknologier med CO₂ lagring. Prosjektet er en del av Grønn plattform-prosjektet LINCCS. NCS C+ omfatter DAC, bruk av alger og biomasse til hydrogenproduksjon med CCS, DOC (fangst av CO₂ fra vann) og fjerning av metan fra atmosfæren.
- Seaweed Carbon Solutions – JIP med SINTEF, DNV, Equinor og Lundin. Dette er verdens første pilotprosjekt for aktiv, naturbasert karbonfangst til havs. Prosjektet har som mål å utvikle metoder



som kan fange flere millioner tonn CO₂ årlig ved hjelp av taredyrking og lagring av karbon som biokull eller biomasse.

- BioCarbUp: Optimalisering av biokarbonverdikjeden for metallurgisk industri. Prosjektet omfatter produksjon av biokarbon av tilfredsstillende kvalitet for industrien, identifisering av foretrukken type skogråvare for produksjon av biokarbon, forståelse av hvordan bruk av biokarbon påvirker det metallurgiske produktet og studier av energibruk og kostnader.
- Fem prosjekter finansiert av SINTEFs klimafond:
 - Algae4clay - Algal biochar and carbon sequestration potential in quick clay stabilization
 - SeaweedCDR - Ocean Seaweed farming for CDR through large biomass production
 - BiOxyChar - Carbon-negative biochar production from renewable resources through smart exploitation of CO₂-rich flue gas from oxy-combustion
 - C&H₂AR - Biocarbon & Hydrogen for a climate positive metal production
 - eCDR- Equivalent Carbon dioxide removal