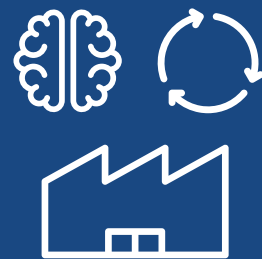


# Ny prosessteknologi med redusert karbonavtrykk inkl. CCU

Prosess21 ekspertgrupperapport



# Prosess21

Prosess21 er norsk prosessindustri sitt strategiarbeid, og ble etablert av Nærings- og fiskeridepartementet 25. april 2018. Hovedoppgaven er å gi strategiske råd og anbefalinger om hvordan Norge best kan få til en utvikling i retning av minimale utslipp fra prosessindustrien i 2050 og samtidig legge til rette for at virksomheter i prosessindustrien har bærekraftig vekst i denne perioden.

Denne rapporten er den syvende i rekken av delrapporter fra ekspertgruppene innen Prosess21, og omhandler lavutslipp prosesssteknologier og utnyttelse av prosessgass (CCU). Rapporten har til hensikt å identifisere og prioritere teknologier og prosesser som gir reduksjon i direkte utslipp fra norsk prosessindustri, samt de muligheter utnyttelse av prosessgass gir som klimatiltak.

Arbeidet er utført av ekspertgruppen som ble etablert sommeren/høsten 2019 og startet arbeidet i oktober. Gruppen er bredt sammensatt av sentrale industri- og FoU representanter innen prosessindustrien; Aasgeir Valderhaug (Elkem), Trine Kopperud (Yara), Geir Henning Wintervoll (Finnfjord), Gudbrand Rødsrud (Borregaard), Christian Rosenkilde (Hydro), Harry Salvesen (Alcoa), Rolf Olaf Larsen (Herøya Industripark), Tore Løland (Equinor), Hilde Venvik (NTNU), Gabriella Tranell (NTNU), Ulrik Thisted (NORCE) og Eli Ringdalen (SINTEF). Gruppas sekretariat består av Anita Fossdal (Enova), Ole Jørgen Marvik (Innovasjon Norge), Henrik Gade (Miljødirektoratet), Katja Synsfjell (Miljødirektoratet) og Henrik Norgaard (Miljødirektoratet). Svein Ingar Semb (Gassnova) er observatør. Gruppen er ledet av Nina Dahl fra SINTEF.

Takk til alle i ekspertgruppen for godt samarbeid og uvurderlig innsats i arbeidet.

Oslo, 9.11.2020

**Nina Dahl**

*Leder av ekspertgruppen*

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>4</b>
<b>Executive Summary</b>	<b>6</b>
<b>Innledning</b>	<b>8</b>
Prosessindustrien i lavutslippssamfunnet	8
Forutsetninger og rammebetingelser	13
Industrien står ofte sterkere sammen, gjennom klynger og industriparker	15
EU og norsk prosessindustri	15
<b>Prosessteknologi med redusert karbonavtrykk Landbasert kjemisk prosessindustri</b>	<b>17</b>
Raffinerier	18
Bioraffinerier	22
Petrokjemisk industri	24
Mineralgjødning	28
<b>Prosessteknologi med redusert karbonavtrykk Metallurgisk industri</b>	<b>35</b>
Aluminium	36
Silisium og ferrosilisium	44
Mangan og manganlegeringer	54
Annen metallurgisk industri	60
<b>Utnyttelse av karbon i prosessgass (CCU)</b>	<b>64</b>
Hva er CCU?	64
CCU og næringsutvikling	64
CCU som klimatiltak	65
Regulering og rammebetingelser	69
Oppsummering og anbefalinger knyttet til CCU	75
<b>Hydrogen – en forutsetning for omstilling</b>	<b>76</b>
<b>Oppsummering og ekspertgruppens anbefalinger</b>	<b>78</b>
<b>Vedlegg I: Bidragsyttere</b>	<b>82</b>
<b>Vedlegg II: Referanser</b>	<b>84</b>
<b>Vedlegg III: Mandat</b>	<b>86</b>

# Sammendrag

Prosess21 er norsk prosessindustri strategiarbeid og ble etablert av Nærings- og fiskeridepartementet 25. april 2018. Hovedoppgaven er å gi strategiske råd og anbefalinger om hvordan Norge best kan få til en utvikling i retning av minimale utslipp fra prosessindustrien i 2050 og samtidig legge til rette for at virksomheter i prosessindustrien har bærekraftig vekst i denne perioden. Denne rapporten er den syvende delrapporten fra ekspertgruppene innen Prosess21 og omhandler ny teknologi og prosesser med null eller sterkt redusert karbonavtrykk – teknologier som er nødvendige i et lavutslippssamfunn og som må til for at norsk prosessindustri skal fortsette å være konkurransedyktig i lavutslippssamfunnet.

Ekspertgruppens mandat er å beskrive, vurdere og prioritere de viktigste teknologiske drivkreftene, mulighetene og barrierene for å ta i bruk ny teknologi i prosessindustrien for å redusere utslipp av klimagasser, og dermed redusere det totale karbonavtrykket. Dette skal sees i lys av fremtidens industristruktur og forventet etterspørsel etter materialer og produkter. Tema for denne ekspertgruppen er helt sentralt i Prosess21 sin visjon: "Økt verdiskaping med nullutslipp i 2050".

Prosessindustrien er en viktig næring for Norge og skaper store verdier og eksportinntekter for landet. Samtidig er prosessindustrien en betydelig kilde til klimagassutslipp. Globalt representerer industrien cirka 32 prosent (21 prosent direkte og 11 prosent indirekte) av de totale klimagassutslippene. Med utslipp av rundt tolv millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2019, representerer norsk prosessindustri i dag mer enn 21 prosent av Norges totale klimagassutslipp. Dette til tross for at prosessindustrien fra 1990 til 2019 reduserte klimagassutslippene sine med i overkant av 40 prosent, samtidig som verdiskaping økte med 43 prosent. Utslippsreduksjonene er gjort mulig gjennom betydelig industriell satsing på investeringer og FoU.

Utgangspunktet for arbeidet er nye prosesser innen den norske prosessindustrien som i dag har de største punktutslippene av klimagasser. Det vil si de sektorer, bransjer og prosesser hvor potensialet for reduksjoner i utslippene er størst. Dette gjelder kraftforedlende og kraftintensiv industri; raffinerier, mineralgjødsel, petrokjemi og metallurgisk industri (aluminium, silisium, mangan og titandioksid).

## Tema for denne ekspertgruppen er helt sentralt i Prosess21 sin visjon: "Økt verdiskaping med nullutslipp i 2050".

Basert på vurdering av ulike teknologier, der et sett teknologiske, klima- og miljømessige, og økonomiske kriterier er lagt til grunn, er det gitt anbefalinger om prioriteringer og hva som må til for å nå målene som er satt.

Norsk landbasert prosessindustri er i dag i verdensklasse når det gjelder energieffektivitet og produksjon med lave utslipp. Men for flere av dagens prosesser nærmer man seg nå teoretisk minimum med hensyn til direkte utslipp av CO<sub>2</sub>. Prosessene vil fortsette å produsere klimagasser så lenge fossilt karbon brukes som energikilde eller råmateriale. Nullutslipp vil derfor i de fleste tilfeller bety helt nye prosesser og prosessteknologi, overgang til fornybare energikilder og råmaterialer, og eventuelt i kombinasjon med løsninger for karbonfangst, -utnyttelse og -lagring.



Hvis Norge skal lykkes i sin omstilling og nå målene satt i Parisavtalen, må utvikling av nullutslippsteknologi prioriteres. Omstilling til nullutslipp i prosessindustrien krever avansert teknologiutvikling og store investeringer, med omfattende planlegging og lang nedskrivningstid. Det blir viktig med en kombinasjon av virkemidler som både i) stimulerer forskning, utvikling og kompetansebygging rettet mot teknologi og råvarer og gir ii) markedsinsentiver og stabile rammebetingelser som stimulerer industrielle investeringer i de strategisk viktige utviklingsløpene er avgjørende.

Det er for tidlig å si noe om hvilken nullutslippsteknologi som vil vinne fram i ulike industrielle segmenter. Mange av teknologiene og prosessene som er identifisert og vurdert er på et nivå som krever mer forskning og utvikling før endelig retning bestemmes. Dette gjelder spesielt for metallurgisk industri, som i dag bruker fossilt karbon som råmateriale i sine prosesser. For andre bransjer og sektorer, for eksempel mineralgjødselproduksjon, finnes moden teknologi tilgjengelig, men her er det store investeringer og kostnader som er den viktigste barrieren.

Trolig vil det i framtiden bli en kombinasjon av flere ulike løsninger. Virkemiddelbruk må derfor ikke innrettes for å "plukke vinnere", men for å "skape vinnere". Dette må gjøres gjennom et samordnet sett av virkemidler som gir risikoavlastning gjennom hele utviklings- og realiseringsløpet, tilpasset den fasen som en teknologi til enhver tid er i.

Videre utvikling av relevante norske kompetansemiljø i universitets- og instituttsektoren er derfor et viktig premiss. Prosessindustri og nullutslipp må få en mer synlig plass i virkemiddelapparatets satsinger. Eksisterende virkemiddelapparat dekker ikke prosessindustriens behov for fundamental forskning, kompetansebygging og piloteringsmuligheter i tilstrekkelig grad. Et dedikert nullutslippsprogram for prosessindustrien i Forskningsrådet, "Prosess 2050", på lik linje med de bransjeorienterte programmene Petromaks, Maroff og EnergiX, vil avhjelpe dette.

De fleste aktører i norsk prosessindustri opererer i et globalt marked der konkurrenter i varierende grad jobber med tiltak for å redusere sine utslipp av CO<sub>2</sub>, og ofte under helt andre rammevilkår. Det betyr at økte klimainvesteringer og kostnadsnivå kan gi norske aktører en konkurranseulemp. Det er derfor viktig å innrette nasjonal virkemiddelbruk (inkludert tilskudds- og låneordninger, regelverk, skatter, avgifter og øvrige insentiver) på en slik måte at industrien kan prioritere strategier for

omstillingen til lavutslippssamfunnet. Ekspertgruppen anbefaler flere tiltak for å imøtekomme dette. Tilgang på fornybar kraft og hydrogen er en forutsetning og en kritisk viktig ressurs i de fleste teknologiene som er omtalt i denne rapporten. En av ekspertgruppens viktige konklusjoner er at et grønt skifte og omstilling til nullutslipp i prosessindustrien forutsetter betydelig mer fornybar kraft enn det prosessene bruker i dag.

Mange av de foreslåtte klimatiltakene er også basert på tilgang på fornybart biologisk råstoff. Dette er en begrenset ressurs og ekspertgruppens klare anbefaling er å utarbeide en nasjonal strategi for karbonforvaltning. Det innebærer et samspill mellom i) bedre prosesser som reduserer utslipp, ii) økt og smartere produksjon av biomasse (karbon er nødvendig i mange prosesser), iii) resirkulering av CO<sub>2</sub> som verdifullt råstoff i industriell produksjon (CCU), og iv) permanent lagring av CO<sub>2</sub> (CCS).

En viktig del av arbeidet med denne rapporten har vært å se på muligheten for hvordan prosessindustrien kan utnytte CCU (carbon capture and utilization) som et supplerende klimatiltak. Grappa konkluderer med at CCU kan representere en god mulighet for en betydelig reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp, samtidig som det vil skape ny og lønnsom industri på forholdsvis kort sikt. Selv om mange CCU-teknologier er i tidlig fase, er flere prosjekter basert på industrielt modne CCU-prosesser i gang og under vurdering i Norge. Norges viktigste fortrinn er mulighetene for tilgang på fornybar energi og utslippsfri hydrogen til en relativt rimelig pris. Ekspertgruppen anbefaler at støtteordninger for pilotering, demonstrasjon og oppskalering også omfatter CCU prosjekter. En viktig forutsetning er at disse kan dokumentere klimaeffekt eller andre bærekraftsfordeler i et livsløpsperspektiv og har godt potensiale for å kunne bli lønnsomme på sikt.

# Executive Summary

Process 21 is the Norwegian process industry's strategy work and was established by the Ministry of Trade, Industry and Fisheries on 25 April 2018. The main objective is to provide strategic advice and recommendations on how Norway can best achieve a development towards minimal emissions from the process industry in 2050 and at the same time facilitate that companies in the process industry have sustainable growth during this period. This report is the seventh sub-report from the expert groups within Process 21 and deals with new technology and processes with zero or significantly reduced carbon footprint - technologies that are necessary in the future and that are necessary for the Norwegian process industry to remain competitive in a low-emission society. Zero emission technologies are in the core of Proses21's vision: "Increased value creation with zero emissions in 2050".

The expert group's mandate is to describe, assess and prioritize the most important technological drivers, opportunities and barriers to develop and implement new technology in order to reduce greenhouse gas emissions and thereby reduce the total carbon footprint. This must be seen in light of the industrial structure of the future and envisage future material needs.

The process industry is one of the most important Norwegian industrial sectors and creates important value and export revenues. At the same time, the process industry is a major source of greenhouse gas emissions. Globally, the industry sector represents approximately 32 prosent (21 prosent directly and 11 prosent indirectly) of total greenhouse gas emissions. With emissions of around twelve million tonnes of CO<sub>2</sub> equivalents in 2019, the Norwegian process industry today represents more than 21 prosent of Norway's total greenhouse gas emissions. This is despite the fact that the process industry from 1990 to 2019 reduced its greenhouse gas emissions by more than 40 prosent, while at the same time increasing value creation by 43 prosent. The emission reductions have been made possible through significant industrial investments and R&D.

The focus for the work described in this report is new processes in sectors within the Norwegian process industry that today have the largest point emissions of greenhouse gases, i.e. the sectors, industries and processes where the potential for reductions in emissions is the greatest. This applies to the power-intensive

## **Zero emission technologies are in the core of Proses21's vision: "Increased value creation with zero emissions in 2050".**

industries: refineries, mineral fertilizers, petrochemicals and the metallurgical industries (aluminum, manganese, silicon and TiO<sub>2</sub>/iron). Based on a set of technological, climate, environmental and economic criteria, the various technologies were assessed, and recommendations are given on priorities for what is needed to achieve zero or close to zero emissions.

The Norwegian land-based process industry is today world-class in terms of energy efficiency and low-emission production. However, for several of today's processes, the theoretical minimum with regard to direct emissions of CO<sub>2</sub> is now approaching and the processes will continue to produce greenhouse gases as long as fossil carbon is used as an energy source or raw material/reductant. Zero emissions will therefore in most cases require entirely new processes and new technology with complete transition to renewable energy sources and raw materials, and possibly in combination with solutions for carbon capture, utilization and permanent storage.

If Norway is to succeed in its transition to a green economy, and reach the goals set in the Paris Agreement, the development of zero-emission technologies must be a priority. Reaching the goal of zero emissions in the process industry requires advanced technology development and significant investments, with extensive planning and a long depreciation period. A combination of instruments that i) stimulate technology research, development and competence building with ii) market incentives that stimulate industrial investments in strategically important technology innovation processes is crucial.

Many of the technologies and processes that have been identified and evaluated in this work are immature and require more research and development before additional industrialization steps can be initiated. This is especially valid for the metallurgical industry, which today uses fossil carbon as a raw material. For other industries and sectors, such as mineral fertilizer production, mature low emission technologies are available. For these sectors significant investments and accompanying costs are important barriers.

In the future there will probably be no “single” zero emission solution or not be just one zero emission solution for a production process, but rather a combination of various solutions. The use of public instruments must therefore not be designed to “pick winners”, but to “create winners”. This should be implemented through a coordinated set of tools that provide reduction of risk throughout the development and realization process, adapted to the maturity of a technology at a given time.

Further development and strengthening of relevant Norwegian competence in the university and institute sectors is an important prerequisite for success in implementing low emission technologies, and the process industry must be highly visible and have priority in the public policy framework system. Current R&D funding tools are not adequate for the current technology development needs of process industry in terms of fundamental research, competence building and technology piloting opportunities. A dedicated zero-emission program for the process industry, “Process 2050” within the Norwegian Research Council, in line with the industry-oriented programs Petromaks, Maroff and EnergiX, is recommended as an efficient remedy.

Most players in the Norwegian process industry operate in a global market where competitors work with measures to reduce their CO<sub>2</sub> emissions, often under completely different and more favourable operating conditions. This means that increased green investments

and subsequent cost increases can pose a market challenge for Norwegian players. It is therefore important to arrange the national policy instruments (including subsidy and loan schemes, regulations, taxes, fees and other incentives) in such a way that industry can prioritize the transition to a low-emission society. The expert group recommends several measures to meet these challenges.

Access to renewable energy and hydrogen is a prerequisite and a critically important resource in most of the technologies discussed in this report. A green shift and conversion to zero emissions in the process industry is not possible without significant increased availability of renewable energy.

Many of the proposed climate measures are also based on access to biomaterials, both in the form of biocarbon and other biomass resources. This is a limited resource and recommendations from the expert group is to prepare for a national strategy for carbon management. This strategy should involve i) better processes that reduce emissions, ii) increased and smarter production of biomass (carbon is needed in many processes), iii) recycling of CO<sub>2</sub> as a valuable raw material in industrial production (CCU), and iv) permanent storage of CO<sub>2</sub> (CCS).

An important part of the work with this report has been to look at the possibility of how the process industry can utilize captured carbon (CCU-carbon capture and utilization) as a supplementary climate measure/action. The group concludes that CCU can represent a good opportunity for a significant reduction in CO<sub>2</sub> emissions, at the same time as it can create new and profitable industry on a relatively short term. Although many CCU technologies are in the early stages, several projects based on industrially mature CCU concepts are ongoing and under consideration in Norway. Norway’s most important advantage is the opportunities for access to renewable energy and emission-free hydrogen at a reasonable cost. The expert group recommends that support schemes for piloting, demonstration and upscaling also include CCU projects. An important prerequisite is that these projects can document climate effects or other sustainability benefits in a life cycle perspective and have good potential to become profitable in the long run.

# Innledning

Prosess21<sup>1</sup> er etablert av Nærings- og fiskeridepartementet (NFD) og har som hovedoppgave å gi strategiske råd og anbefalinger om hvordan Norge kan nå målet om minimale utslipp fra prosessindustrien i 2050 og samtidig legge til rette for bærekraftig vekst i prosessindustrien i denne perioden.

Prosessindustrien er tradisjonelt definert som kraftforedlende industri og den norske prosessindustrien kan inndeles i landbasert kjemisk industri, metallurgisk industri, mineralisk industri og treforedling.

Denne rapporten, som er den syvende i rekken av delrapporter fra Prosess21, tar for seg ny teknologi og prosesser som kan føre til null eller sterkt redusert karbonavtrykk. Slike teknologier vil være nødvendige i et lavutslippssamfunn og er en forutsetning for at norsk industri skal være konkurransedyktig under fremtidige politiske rammebetingelser og markedsmessige forhold.

## Prosessindustrien i lavutslippssamfunnet

Prosessindustrien er en viktig næring for Norge, og skaper store verdier og eksportinntekter. Samtidig er prosessindustrien en betydelig kilde til klimagassutslipp. Globalt står industrisektoren for cirka 32 prosent av de totale klimagassutslippene (21 prosent direkte og 11 prosent indirekte utslipp)<sup>2</sup>. I Norge er situasjonen omtrent den samme, med utslipp av rundt tolv millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2019, tilsvarende 21 prosent av Norges totale klimagassutslipp. Dette til tross for at prosessindustrien fra 1990 til 2019 reduserte klimagassutslippene sine med i overkant av 40 prosent, samtidig som verdiskapingen økte med 43 prosent. Utslipsreduksjonene er gjort mulig gjennom betydelig industriell satsing på investeringer og FoU.

For flere av de relevante prosessene nærmer man seg nå teoretisk minimum med hensyn til direkte utslipp av CO<sub>2</sub>. Prosessene vil fortsette å produsere klimagasser så lenge fossilt karbon brukes som energikilde eller råmateriale. Nullutslipp vil derfor i de fleste tilfeller bety helt nye prosesser og prosessteknologi, overgang til fornybare energikilder og råmaterialer, og eventuelt i kombinasjon med løsninger for karbonfangst, -utnyttelse og -lagring.

Dette er helt i kjernen av Prosess21 sin visjon om "økt verdiskaping med nullutslipp i 2050" og bakgrunnen for etableringen av ekspertgruppen som har utarbeidet denne rapporten.

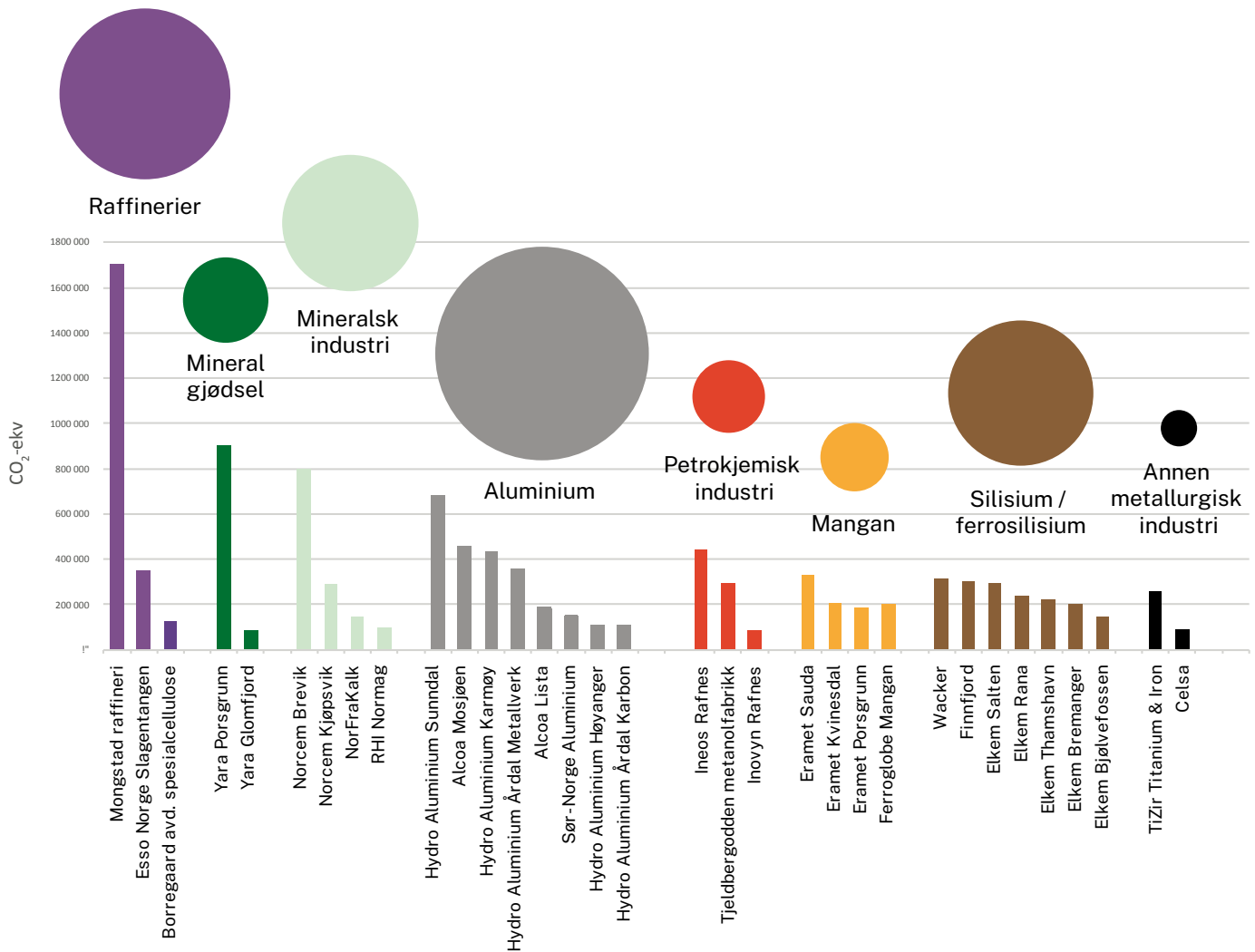
Prosess21 ønsker med denne rapporten å gi en oversikt over mulighetene for ny prosessteknologi med null eller redusert karbonavtrykk, både teknologier og prosesser som i dag er på forskningsstadiet og har et langsiktig perspektiv, og modne verifiserte teknologier som er klare for implementering. Rapporten tar også for seg de muligheter som ligger i utnyttelse av prosessgass (Carbon Capture and Utilisation, CCU) som klimatiltak i et livssyklusperspektiv.

Utgangspunktet for arbeidet er knyttet til de bransjene som i dag har de største punktutslippene og det største potensialet for signifikante utslipsreduksjoner; raffinerier, mineralgjødsel, petrokjemi, aluminium, mangan- og silisiumlegeringer og noe annen prosessindustri (Figur 1). Mineralisk industri, dominert av sementproduksjon, er med i oversikten i Figur 1, men ikke vurdert videre i dette arbeidet, da det her er antatt at karbonfangst og -lagring vil være løsningen som blir valgt.

<sup>1</sup> <https://www.prosess21.no/>

<sup>2</sup> <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/Fig-1.07-01-2.png>

**Figur 1:** Norsk landbasert prosessindustri med de største prosessutslippene i 2019. Kilde: Miljødirektoratet



Anbefalingene om tiltak og teknologiske prioriteringer som må til for å oppnå nullutslipp i 2050 er basert på en kvalitativ vurdering etter et sett med teknologiske, klima-, miljømessige og økonomiske kriterier. Gruppen har blant annet vurdert påvirkning på klimagassutslipp, og om effekten er direkte (i selve prosessen) eller indirekte gjennom eksempelvis endringer i energibruk eller råvarer. Videre er det vurdert om prosessen kan ha påvirkning på andre miljøaspekter i positiv eller negativ retning, og om det er muligheter for synergier med annen aktivitet, eksempelvis gjennom utveksling av energi eller materialer med annen, nærliggende industri. Teknologisk sett har gruppen vurdert blant annet hvor moden teknologien er i dag, om det er kjente hindre for oppskalering, og i hvor stor grad prosessen fremstår som ressurseffektiv og tilpasset en lavutslippsfremtid med høy grad av sirkularitet. Gruppen har også på et overordnet nivå vurdert om teknologiene fremstår som økonomisk realistiske alternativer, hvor store utviklingskostnader som ventes å være nødvendig før den kan tas i bruk kommersielt, samt i hvilken grad fremtidige

insentiver, krav og reguleringer kan ventes å påvirke den økonomiske attraktiviteten, og innenfor hvilken tids-horisont. Norsk kompetanse på feltet og overførbarhet til eksisterende norsk industri er også tatt med i betraktningen.

### Norsk industri er i førersetet på energi- og klima-effektivitet

Prosessindustrien har, som nevnt over, i en årrekke jobbet med utslippsreduksjoner i sine eksisterende prosesser. Det er lagt betydelig arbeid ned i energieffektivisering og innovative prosessforbedringer. Et eksempel er Hydros pilotanlegg på Karmøy, som demonstrerer verdens mest klimavennlige og energieffektive aluminiumsproduksjon (Bilde 1) basert på langvarig utvikling av Hall-Heroult elektrolyseteknologi.

Mye av de fundamentale og grunnleggende problemstillingene knyttet til FoU i prosessindustrien foregår i dag i forskningssentre som SFI og FME, for eksempel





**Bilde 1:** Hydro demonstrerer verdens mest klimavennlige og energieffektive aluminiumsproduksjon på Karmøy

© Hydro

SFI Metal Production<sup>3</sup>, SFI ICSI<sup>4</sup>, FME HighEFF<sup>5</sup> og FME Bio4Fuel<sup>6</sup>. Denne typen langsiktige forskningssamarbeid mellom industri, UoH-sektoren og forskningsinstituttene, har sammen med kompetansebyggende prosjekter (KPN/KSP-type) vært avgjørende for arbeidet med prosessforbedringer i de fleste områder av prosessindustrien.

Prosessindustrien arbeider også med å gjennomføre ressurseffektivisering, bedre avfallshåndtering, utnyttelse av sidestrømmer, resirkulering og sirkulære prosesser. Dette blir i stor grad omtalt av Prosess21-rapporten Sirkulærøkonomi<sup>7</sup>. Sementproduksjon er som nevnt et eksempel på en bransje der karbonfangst og – lagring er hovedstrategi for reduksjon av utslipp. Dette utredes i Prosess21-rapporten Karbonfangst<sup>8</sup>. Mineralsk industri behandles derfor ikke spesifikt her.

Videre er krafttilgang og gode rammebetingelser knyttet til kraft meget viktig for prosessindustrien. Dette omhandles i detalj i Prosess21-rapporten Kraftmarkedet<sup>9</sup>.

### Fremtidig konkurransekraft og nye muligheter

Norge har et godt utgangspunkt når det gjelder utvikling og implementering av teknologier for utslippsreduksjon og utfasing av fossilt karbon. Industriens posisjon og fortrinn er blant annet basert på:

- God tilgang på fornybar kraft
- Solide teknologi- og kompetansemiljøer, noen av dem verdensledende
- Høyt kompetansenivå på alle nivåer i bedriftene
- Godt samspill mellom industri, FoU og virkemiddelapparat, ofte betegnet som den norske trekantmodellen for samarbeid innen FoUol (forskning og utvikling og innovasjon)
- Stabile samfunnsforhold og handlingsrom i nasjonaløkonomien

Lederskap innen lavutslippsteknologier kan skape konkurransefortrinn for eksisterende produkter med lav karbonintensitet, etter hvert som internasjonale markeder innfører nye krav til karbonfotavtrykk.

<sup>3</sup> <https://www.ntnu.edu/metpro/cr-met-prod-uctio>

<sup>4</sup> <https://www.ntnu.edu/icsi>

<sup>5</sup> <https://www.sintef.no/projectweb/higheff/>

<sup>6</sup> <https://www.sintef.no/prosjekter/bio4fuels-nasjonalt-krafttak-for-barekraftig-biodrivstoff/>

<sup>7</sup> [https://www.prosess21.no/contentassets/90d6c3c0ae9f43e684252610398a8ce1/p21\\_sluttrapport\\_sirkularokonomi.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/90d6c3c0ae9f43e684252610398a8ce1/p21_sluttrapport_sirkularokonomi.pdf)

<sup>8</sup> <https://www.prosess21.no/om-prosess-21/ekspertgrupper-og-workshops/karbonfangst-og-lagring/>

<sup>9</sup> [https://www.prosess21.no/contentassets/37807b8b744d4675b3cdd6aaf603e08d/nf\\_prosess21\\_ekspertgrupperapport\\_kraftmarkedet\\_def\\_131020.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/37807b8b744d4675b3cdd6aaf603e08d/nf_prosess21_ekspertgrupperapport_kraftmarkedet_def_131020.pdf)

Utvikling av lavutslippsteknologi representerer også et betydelig potensial for økt norsk verdiskaping, gjennom salg av utstyr, teknologi og tjenester i et globalt marked. Eksempler på slike teknologier finnes blant annet innen vannkraft, vindkraft, hydrogenproduksjon, batterier og energigjenvinning og -utnyttelse. Slike muligheter vil bygge videre på våre sterke kompetansemiljøer, både i prosessindustrien og i forskningsinstitutter og akademia.

Et framtidig lavutslippssamfunn kan også skape muligheter for nye industrier i Norge, for eksempel eksport av hydrogen til Europa og som vertskapsnasjon for bedrifter som vil etablere seg i Norge (Prosess21-rapporten Vertskapsattraktivitet<sup>10</sup>). Interessen fra utenlandsk industri er særlig knyttet til tilgangen på fornybar kraft. Tilgangen på fornybar kraft kan videre skape grunnlag for helt nye typer kraftintensiv industri, eksempelvis utnyttelse av prosessgass som karbon-råstoff, dels til erstatning for fossil produksjon og dels som supplement til bioproduksjon. Et annet eksempel er ammoniakk og hydrogen produsert ved elektrolyse eller med karbonfangst og -lagring. Dette er to energibærere som kan bli fremtidens drivstoff for utslippsfri skipsfart og der Norge som maritim nasjon har spesielt gode forutsetninger for å ta en sentral posisjon.

Omstillingen til lavutslippsindustri vil imidlertid kreve store mengder fornybar kraft, og at den er tilgjengelig der det er behov for den.

### **Hvordan ser industrisektoren ut og hva produserer industrien i 2050?**

Forventninger til framtidig industristruktur må legges til grunn ved planlegging og utvikling av nye teknologier, prosesser og prosjekter. Ifølge FN<sup>11</sup> vil verdens befolkning øke til cirka ti milliarder i 2050, og med det kommer en generell økt etterspørsel og behov for materialer, gjerne koblet med nye forretningsmodeller og tjenester for bedre ressursutnyttelse. I tillegg til å redusere utslipp fra dagens nivå må dermed "det grønne skiftet" også ses i sammenheng med behovet for vekst og velferdsutvikling i en periode med global befolkningsøkning.

Det vil åpenbart være stor usikkerhet knyttet til markeder og konkurranseforhold flere tiår frem i tid, men det synes rimelig å anta at de landbaserte næringene vil bli viktigere i forhold til dagens olje- og gassvirksomhet på norsk sokkel. Landbasert prosessindustri har skapt store samfunnsverdier i over 100 år, og kan nå stå foran en ny vekstperiode i lys av det grønne skiftet.

Det legges til grunn at verdens konsumenter i økende grad vil stille klima- og miljøkrav til produkter som etterspørres, det vil si produkter produsert på klimavennlig måte og som har lavt klimaavtrykk også i bruksfasen. Det er også knyttet forventning til at konsumenter vil akseptere høyere pris på grønne produkter.

Prosessindustrien produserer materialer som vil få økende betydning i et lavutslippssamfunn, for eksempel innen verdikjedene for produksjon og lagring av fornybar kraft og i verdikjeder for produksjon av lavutslipp-produkter (Figur 2). Konstruksjonsmaterialer med lave klimafotavtrykk ventes å bli viktig framover. Behovet for sement forventes å øke, men utfordres av trenden med økt bruk av tre og andre biobaserte byggematerialer. En forventet økt etterspørsel etter kritiske konstruksjonsmaterialer som stål og aluminium vil drive etterspørselen for ferrolegeringsindustriens mangan- og silisiumlegeringer, som også utgjør innsatsfaktorer i fremstillingen av for eksempel solceller og elektronikk. Silisium er videre et viktig råstoff i aluminiumslegeringer. Også innen andre produktkategorier ventes klimafotavtrykk å bli en driver framover. Etterspørselen etter petrokjemikalier og polymerer forventes å øke, men vil gradvis erstattes av biobaserte kjemikalier. Alle disse bransjene må lykkes med løsninger som reduserer klimautslipp i sine prosesser og verdikjeder, eventuelt i kombinasjon med fangst, utnyttelse og lagring av karbon.

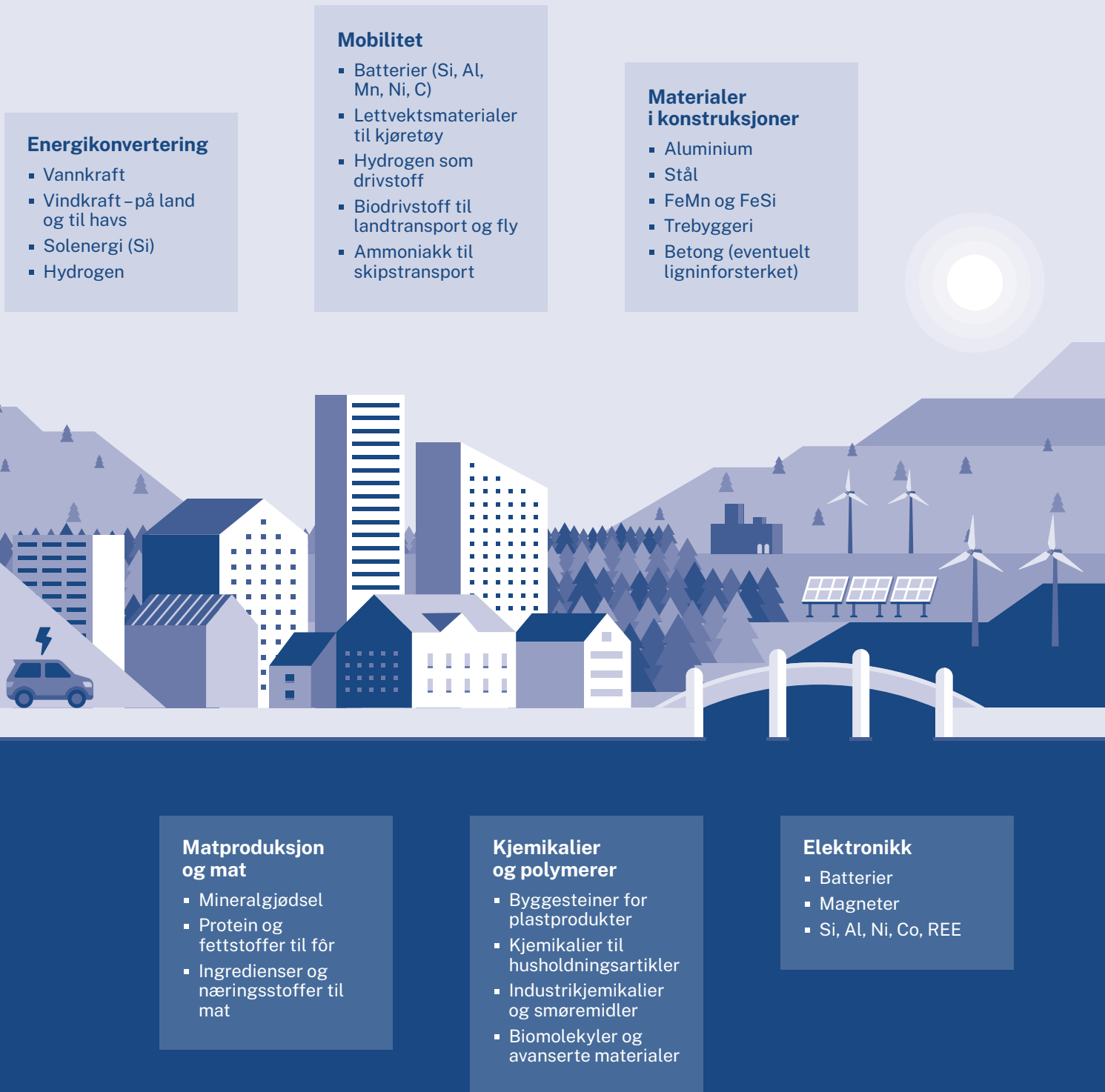
Global etterspørsel etter gjødsel forventes å øke i takt med stipulert befolkningsøkning. I Norge ventes mineralgjødselproduksjonen å holde seg stabil eller svakt økende. I 2050 er naturgass som innsatsfaktor i ammoniakkproduksjon trolig byttet ut med hydrogen basert på elektrolyse for at mineralgjødsel skal bli ytterligere bærekraftig i en lavkarbonøkonomi.

I tillegg til nye produkter og eksisterende produkter med vesentlig lavere karbonfotavtrykk, vil sirkulærøkonomi utgjøre en viktig del av lavutslippssamfunnet, med mer gjenbruk, gjenvinning og resirkulering. Dette gir både utfordringer og muligheter for norsk industri. Allikevel, på et overordnet nivå vil de fleste store næringene i Norge trolig fortsatt spille en betydelig rolle også mot 2050.

<sup>10</sup> <https://www.prosess21.no/contentassets/3dc454f8d67b4f8d8de8cc617172d3ca/200827-prosess21-vertskapsattraktivitet-endelig.pdf>

<sup>11</sup> <http://www.un.org/>

**Figur 2:** Prosessindustrien produserer materialer til produkter som lavutslippssamfunnet etterspør – her vist med noen eksempler





## Forutsetninger og rammebetingelser

### Forskning og utvikling

En konkurransedyktig og klimanøytral industri vil kreve økt satsing på innovasjon og teknologiutvikling. Imidlertid vil slike innovasjonsprosesser typisk ta flere tiår, fra tidlige laboratorietester, gjennom piloter og skalering til fullskala bruk. Dette betyr at hvis en ny teknologi skal være i bruk i 2050, så må utviklingen starte nå med tydelige milepæler frem mot industrialisering (Figur 3).

Få bedrifter har insentiver og økonomi til å gjøre slike langsiktige og kapitalintensive FoU-investeringer alene. Et system med tilpassede rammebetingelser og virkemidler for risikoavlastning og støtte i de ulike deler av teknologiutviklingen er derfor viktig. For utvikling av ny og forbedret teknologi har det offentlige virkemiddelapparatet en særlig sentral rolle i de tidlige fasene av utviklingen, hvor kompetansebygging, idégenerering og utvikling skjer. Kompetansebyggende prosjekter og langsiktige, store forskningsprosjekter i samarbeid mellom industri, UoH-sektoren og forskningsinstituttene har lagt til rette for at norsk industri er i front på klima- og energifeltet. Prosjektene har bidratt til kunnskapsbygging om forhold som er viktig for grønn omstilling av næringslivet og instituttsektoren og til rekruttering av kandidater med relevant bakgrunn til industrien. De store framtidige teknologiløftene vil være minst like avhengig av denne typen strategiske prosjekter, om ikke mer.

Skal prosessindustrien oppnå suksess i sin omstilling til nullutslipp, er prioritet og synlighet i virkemiddelapparatet nødvendig. Dagens ordning der prosessindustrien i hovedsak kan søke midler i Forskningsrådets BIA-område (porteføljestyret for industri og tjenesteneringer) dekker ikke behovet for fundamental forskning, kompetanseoppbygging, langsiktighet og PhD-utdanning,

da BIA i stor grad prioriterer innovasjonsprosjekter. Forskningsrådets KSP-søknadstype (Kompetansebyggende prosjekt for næringslivet) er generelt et viktig virkemiddel for forskningssamarbeid mellom næringsliv og academia. For prosessindustrien i Norge har KSP (tidligere KPN) prosjektene bidratt til å sette fokus på langsiktige og fundamentale problemstillinger. Hverken i 2019 og i 2020 var Industri og tjenesteneringer inkludert som en av målgruppene for KSP/KPN utlysningen. Dette er svært uheldig for det langsiktige arbeidet med reduksjon av klimagassutslippene fra norsk prosessindustri, og bør endres.

Videre representerer oppskalering og verifisering av teknologi en finansiell barriere, der det er særlig viktig med offentlig risikoavlastning. Insentivordninger, politikk, retningslinjer og forskrifter blir viktig etter hvert som utviklingen nærmer seg kommersialiseringsfasen. Her må risikoavlastningen være tilpasset industriens behov, både når det gjelder nivå og langsiktighet.

### Marked og markedsutvikling

Offentlige midler til teknologiutvikling vil ikke være tilstrekkelig for å drive den nødvendige omstillingen. For at det skal være attraktivt å innovere, er det avgjørende at det eksisterer et sluttmarked for de produkter eller tjenester som innovasjonen skal levere. Innenfor nye energi- og klimasektorer hvor det ikke er etablert et betalingsvillig marked, er det nødvendig at myndighetene bidrar til å etablere etterspørsel i en tidlig fase. Eksempler på dette er innblandingspåbud, CO<sub>2</sub>-kvoter, reguleringer og forskrifter.

**Figur 3:** Illustrasjon av tidslinje for et typisk teknologiløp (figur inspirert av Ida Kero (SINTEF)/KPN Reduced CO<sub>2</sub>-prosjektet)



Et slikt kunstig skapt marked har mange egenskaper som man finner i et naturlig marked, men baserer seg på politiske vedtak og introduserer politisk risiko. Markedsstimulerende tiltak med begrenset varighet eller med liten grad av forutsigbarhet, vil være dårlig tilpasset de lange innovasjonsløpene som er nødvendige for helt ny prosess teknologi. I enkelte land har hele marked brått forsvunnet når politiske vedtak har blitt endret. For mange investorer medfører dette en uakseptabel politisk risiko.

Det forventes imidlertid også at markedene vil endre seg gjennom egen dynamikk, eksempelvis gjennom at kunder og andre interessenter setter krav om, og er villige til å betale for, et lavere karbonfotavtrykk for industrielle produkter. Dette er i liten grad tilfelle i dag, men det finnes eksempler på at slik endring er i startfasen. Eksempelvis annonserte London Metal Exchange i juni 2020 en plan for å opprette en omsetningsplattform for aluminium med lavt fotavtrykk. I Frankrike stilles det krav til fotavtrykket til solcellepanelene ved utlysning av anbud for fornybar kraftproduksjon fra virkemiddelaktøren ADEME. Her kan Norges høye fornybarandel i elektrisitet smiksen gi et fortrinn.

### Rammebetingelser og forutsigbarhet

En grunnleggende forutsetning for omstillingen som ligger foran oss er at rammebetingelsene for industrien er forutsigbare, og ikke gir norsk industri ulemper som internasjonale konkurrenter ikke må forholde seg til. Kraftpriser, nett-tariffer og avgifter er eksempler på rammebetingelser som sterkt påvirker industriens konkurransedyktighet, og som må være tilstrekkelig attraktive og langsiktige til at industrien våger å sette i gang de lange teknologiske utviklingsløpene.

Prinsippet om at forurenser skal betale står sterkt, og forventninger om fremtidig økte avgifter og priser for utslipp vil være en viktig driver for omstilling. Feil bruk av avgiftsøkninger og utslippstak kan imidlertid føre til at ellers lønnsomme bedrifter må legge ned i Norge, uten at det fører til nevneverdig reduksjon i totale globale utslipp. Denne typen virkemidler bør derfor balanseres med positiv markedsstimulering.

### Klimarisiko påvirker tilgangen på kapital

Kapitalmarkedene forventes å spille en sentral rolle i omstillingen. Store investeringer er nødvendig for transformasjon til nullutslipp, og kapital er følgelig en helt avgjørende innsatsfaktor. Dersom kapitalmarkedet vektlegger klimaendringer som en risikofaktor vil det kunne påvirke pris og tilgang til kapital i positiv retning.

Selv om klimarelatert risiko kanskje er et av de største fremtidige risikoelementene, er det også et av de områdene innen risikoanalyse som er minst kjent og forstått. Klimaendringer skaper allerede nå forstyrrelser i verdikjeder og handelsmønstre, både for hele bransjer og for enkelt selskaper. Endret klima påvirker økonomi, levekår og velferd, og dermed forbruksmønstre og etterspørsel.

Verdens forståelse av klimarisiko som finansiell risiko er i støpeskjeen og man skiller gjerne mellom;<sup>12</sup>

- Den fysiske risikoen: skader i biosfæren og på eiendeler ved klimaendringer og ekstremvær.
- Overgangsrisiko: endringer i politikk som for eksempel strammere klimamål, reguleringer, forbud/påbud, karbonpris/karbonmarked, endringer i andre markeder, disruptive scenarioer, tilgang på råvarer, leverandører, nye teknologier og ikke minst omdømme, endring i preferanser og kundeadferd, økt stigmatisering og «stranded assets».
- Ansvarsrisiko: risiko for søksmål.

Hvordan slik risiko skal vurderes, prises og rapporteres på er fremdeles umodent. Imidlertid kan man se en begynnende utvikling der prisen på lånefasiliteter knyttes til klimastrategi og konkret måloppnåelse av ambisjoner for reduksjoner av klimagassutslipp fra bedriften. Tilsvarende har flere store banker og investeringsfond begynt å stigmatisere og trekke seg ut av sektorer som forbindes med høy klimarisiko, eksempelvis kullindustri eller olje og gass. For investorer vises en økende forskjell i interesse og prisutvikling for grønne kontra tradisjonelle obligasjoner. EU har nylig publisert et sett med anbefalinger for bærekraftige investeringer basert på et omfattende rammeverk av kriterier (Taxonomy for financing a Sustainable European Economy)<sup>13</sup>. Policy for bærekraftige investeringer er et område der det ventes betydelig utvikling de kommende årene.

<sup>12</sup> <https://www.fsb-tcfd.org/>

<sup>13</sup> [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business\\_economy\\_euro/banking\\_and\\_finance/documents/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_en.pdf)

## Industrien står ofte sterkere sammen, gjennom klynger og industriparker

Prosessindustrien har i løpet av de siste ti årene etablert en god samarbeidskultur gjennom etablerte klyngeorganisasjoner, som Eyde-klyngen (base i Agder), Arctic Cluster Team (base i Nordland) og Industrial Green Tech (base i Telemark), samt etableringen av Future Materials Katapult senter. Det er utarbeidet egne veikart for reduksjon av klimagassutslipp i klyngene. Videre er den norske ferrolegeringsindustrien kjent for godt FoU-samarbeid, som drives via Ferrolegeringsindustriens Forskningsforening (FFF).

Etablerte industristeder har gode forutsetninger for å utvikle nye prosesser og teknologier i et allerede godt utviklet industrielt miljø. Fra de forskjellige industri-bedriftene i klyngene vil det være mulig å hente relevante ressurser under hele innovasjonsprosessen. Denne klyngetilhørigheten sikrer lett tilgang på nødvendig industriell kompetanse og erfaring og bidrar til å legge til rette for gode innovasjonsprosesser. Etablerte industristeder har også en godt utviklet infrastruktur og tilgang på en rekke hjelpemidler, som bidrar til å legge til rette for kostnadseffektive utviklingsprosesser.

Videre vil godt utviklede klynger bestå av både leverandører og produsenter, slik at man sikrer optimalt fokus på at de rette teknologier og produkter utvikles. De nevnte klyngene skaper gode muligheter for sirkulær økonomi i praksis ved at det legges til rette for at biprodukter og eksempelvis overskuddsvarme fra en bedrift kan brukes som råmateriale eller til oppvarming hos nabo-bedriften. Klyngetilhørighet og industriell symbiose vil kunne bidra til å redusere det totale karbon-fotavtrykket og er spesielt viktig i forbindelse med mulighetene for nye industrielle verdikjeder knyttet til utnyttelse av karbon i prosessgass (CCU).

## EU og norsk prosessindustri

Europa er viktig for norsk prosessindustri, både som marked, som premissgiver for rammebetingelser, virkemidler og politikk, og som forskningspartner. Prosessindustrien er den største industrisektoren i EU og i mars 2020 lanserte EU-kommisjonen en ny industri-strategi knyttet til European Green Deal<sup>14</sup>, der omstilling til klimanøytralitet i prosessindustrien er et viktig tema. Denne omstillingen vil i hovedsak skje med EUs Innovasjonsfond og Horizon Europe som virkemidler.

ETS Innovation Fund (EUs Innovasjonsfond) er et av verdens største finansieringsprogrammer for demonstrasjon av innovative lavkarbon-teknologier. EUs klimavotesystem står for inntektene til Innovasjonsfondet, som vil være på rundt 10 milliarder euro for perioden 2020-2030. Midlene vil distribueres gjennom årlige utlysninger i en periode på ti år med start i 2020. Norge har fulle rettigheter til å benytte seg av fondet, og norske selskaper kan søke på lik linje som medlemslandsbedrifter.

Horizon Europe (2021-2027) er EUs neste program for forskning og innovasjon med et foreslått budsjett på 100 milliarder euro. Programmet overtar for Horizon 2020 som har vært viktig for norske bedrifter og norske universiteter og FoU institutter. Flere større prosjekter med norsk deltagelse og ledelse er pågående og flere er gjennomført (noen eksempler: EU-prosjekter hos Borregaard<sup>15</sup>, PreMa<sup>16</sup>, SecREEs<sup>17</sup>, SisAl-pilot<sup>18</sup> og ALSiCal<sup>19</sup>). FoUol prosjektutlysningene i EU muliggjør store prosjekter som dekker større deler av TRL-skalaen fra fundamental forskning til demonstrasjon av produksjon og metoder i industrielt miljø. Dette er krevende i det norske virkemiddelapparatet slik det er i dag.

I Horizon 2020 har prosessindustrien i Norge vært aktive gjennom SPIRE<sup>20</sup> med blant annet SINTEF og Elkem representert i SPIRE-styret. SPIRE er et såkalt co-financed Private Public Partnership, der de viktigste europeiske bedriftene deltar. I Horizon Europe vil SPIRE bli en del av People4Planet (P4Planet). P4Planet og SPIRE sine satsingsområder er meget relevante for de bransjer, prosesser og teknologier vi omhandler i denne rapporten og SPIRE vil fortsette å være et meget viktig forum for norsk prosessindustri.

<sup>14</sup> [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en)

<sup>15</sup> <https://www.borregaard.no/Nyheter/EU-midler-til-Borregaard-35-millioner-i-forskerstoette>

<sup>16</sup> <https://www.sintef.no/en/projects/prema/>

<sup>17</sup> <https://www.sintef.no/projectweb/secreets/>

<sup>18</sup> <https://gemini.no/2020/01/miljovennlig-metallfremstilling-far-eu-stotte/>

<sup>19</sup> <https://www.alsical.eu/>

<sup>20</sup> <https://www.spire2030.eu/>





# Prosessteknologi med redusert karbonavtrykk

# Landbasert kjemisk prosessindustri

Landbasert kjemisk prosessindustri omfatter oljeraffinering, petrokjemisk industri, produksjon av mineralgjødsel og bioraffinering.

Tradisjonelle raffinerier leverer produkter til ulike energimarkeder, samt forsyner petrokjemisk industri med utgangsmateriale for kjemikalier og polymerer. Med få unntak er dette produkter som inneholder fossilt karbon. Utslippsreduksjoner vil derfor på den ene siden dreie seg om prosessstekniske forbedringer som reduserer utslipp fra produksjonsprosessene, og på den annen side den store utfordringen knyttet til å erstatte fossilt råstoff i produktene med annet utslippsfritt karbonråstoff.

Bioraffinerier benytter fornybart råstoff fra fotosyntese, i norsk sammenheng for det meste trevirke eller marint råstoff. Begrepet brukes litt forskjellig i ulike miljøer og land. I USA er bioraffinering gjerne ensbetydende med produksjon av biodrivstoff (etanol fra mais), mens vi i Norge typisk tenker på videreforedling av verdifulle biomolekyler til produkter av relativt høy verdi. I prinsippet kan bioraffinering levere råstoff til dagens petrokjemiske industri, men tilgjengelighet og pris setter i dag grenser for en slik utvikling.

# Raffinerier

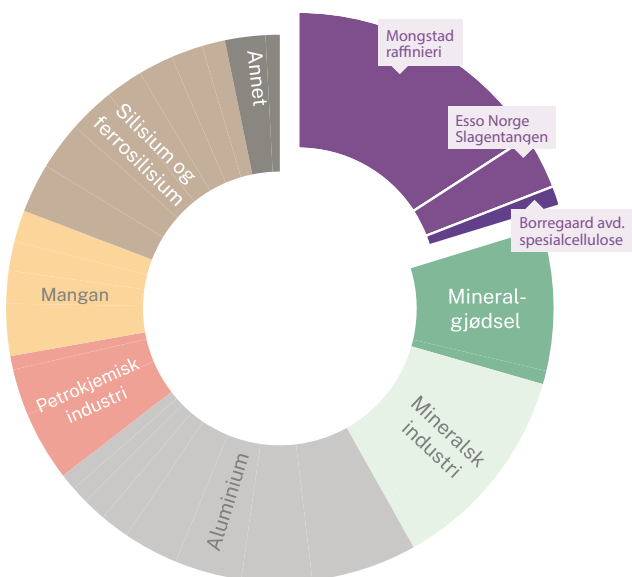
## Status

Tradisjonelle raffinerier omdanner råolje til petroleumsprodukter ved å bryte oljen ned i forskjellige komponenter. Dette blir til produkter som drivstoff for transport, asfaltering av veier, koks til metallurgisk industri og som råstoff til petrokjemisk industri.

Alle raffinerier er forskjellige, men felles for dem alle er at produksjonsprosessene er energi- og utslippsintensive. Det typiske utslippet er i området fra 100 til 200 kg CO<sub>2</sub> per tonn råolje.

Det finnes i dag to fullskala raffinerier i Norge (Figur 4); Equinor sitt anlegg på Mongstad og Esso sitt anlegg på Slagentangen.

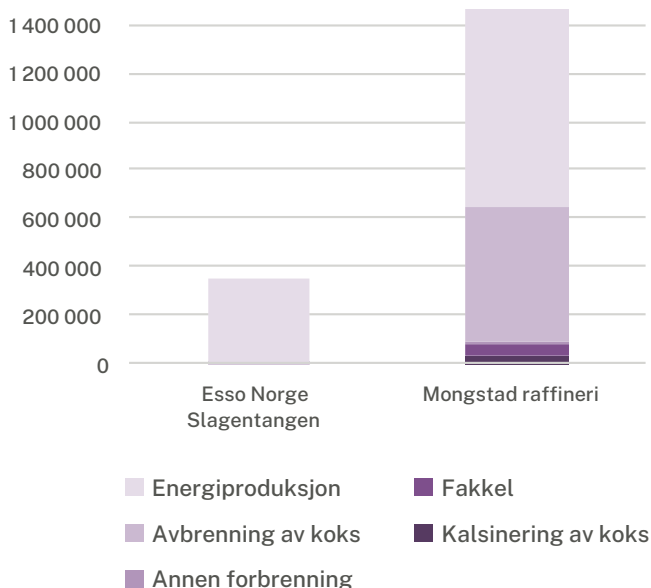
**Figur 4:** Raffinerier og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet.



Raffineriet på Mongstad har i dag en kapasitet på mellom 12 og 14 millioner tonn råolje i året, og hadde i 2019 et utslipp på 1,7 millioner tonn CO<sub>2</sub>. Slagentangen har en kapasitet på 5 til 6 millioner tonn råolje i året, og et utslipp på rundt 350 000 tonn CO<sub>2</sub>.

Raffinerier har tre grunnleggende trinn, destillasjon, konvertering og behandling. Destillasjon skjer ved å varme opp råoljen. Den separeres da i tunge fraksjoner og lette fraksjoner (ulike væsker og gasser). Etter destillasjon kan de tunge fraksjonene fra destillasjonsenhetene bearbeides videre til lettere produkter som normalt har høyere etterspørsel. Kjemisk konvertering foregår via mellomkomponenter til ferdige produkter. Såkalt cracking er den mest brukte konverteringsmetoden. Det brukes et nettverk av reaktorer, ovner, varmevekslere og andre enheter for å styre konverteringen i parallelle og konsekutive trinn.

**Figur 5:** Kilder til utslipp av CO<sub>2</sub> fra raffineriene. Kilde: Miljødirektoratet





Finpussen skjer under sluttbehandlingen. For å lage ulike salgbare produkter kombineres en rekke strømmer fra de ulike behandlingseenhetene. Miljøkrav, oktannivå, damptrykkverdier og andre spesielle hensyn bestemmer hvordan sluttproduktene skal være.

Ettersom raffineribransjen er karakterisert ved at produktene er karbonforbindelser, er det viktig å skille mellom teknologi og tiltak som reduserer karbonutslipp under fremstillingsprosessen og muligheter for å erstatte fossilt karbon med fornybart eller utslippsfritt karbon i produktene.

## Mulige teknologier for fremtiden

### Prosesstekniske utslippsreduksjoner og tiltak

Raffineriene i Norge har de samme utfordringene med å redusere utslipp som resten av raffineriene i Europa. Felles er at de vil kunne redusere sine utslipp av CO<sub>2</sub> gjennom en kombinasjon av driftsmessige tiltak og målrettede investeringer. Hva som er aktuelle alternativer vil variere fra sted til sted og av faktorer som eksisterende konfigurasjon, beliggenhet og nærhet til andre bransjer.

Raffineribransjen i Europa har derfor sammen sett på hvordan de kan redusere utslippene. Kort beskrevet vil raffineriene kunne:

- Investere i operasjonelle tiltak for å maksimere energieffektiviteten.
- Redusere forbrenning til oppvarming og rutinemessig fakling.
- Utnytte lavverdig varme fra andre raffinerioperasjoner for å produsere strøm til intern og ekstern bruk (for eksempel varmepumpe-teknologi for å oppnå høyere temperaturer).
- Elektrifisering der det er mulig, for eksempel av dampdrevne roterende maskiner eller fyrte ovner.
- Koble CCS til bruken av fossil energi, eksempelvis naturgass eller hydrogen i prosessstrinn der elektrifisering er vanskelig.
- Samarbeide tettere med andre bransjer, for eksempel petrokjemi, som ofte befinner seg i samme industriknutepunkt. Dette gir også flere alternativer for energieffektiviserings tiltak for å optimalisere bruken av varme, damp og kraft.

### Erstatning av fossilt råstoff (karbon i produktene)

På sikt vil fossilt råstoff til karbonbaserte produkter gradvis måtte erstattes av annet råstoff som gir lave eller minimale netto utslipp. Fornybart bioråstoff er et aktuelt alternativ, men utfordringen er at mengdene som er tilgjengelig er små sammenlignet med forbruket i et raffineri som Mongstad. Dette er beskrevet nærmere i Prosess21-rapporten Biobasert Prosessindustri<sup>21</sup>. Tabell 1 som er hentet fra denne rapporten, viser at mulig økt avvirkning av norske skogressurser vil kun tilsvare 2,2 prosent av råstoffbehovet ved Mongstad, og selv om alt tilgjengelig norsk treråstoff ble benyttet vil det likevel ikke utgjøre mer enn cirka 15 prosent av råstoffbehovet. Gitt mengdebegrensningene, er det flere teknologier under vurdering i Norge med sikte på å lage biodrivstoff. Som forbehandling til videre raffinering kan gassifisering av trevirke eventuelt i kombinasjon med resirkulert karbonholdig avfall, for eksempel plast, etterfulgt av en Fischer-Tropsch prosess som lager langkjedede hydrokarboner, vært en aktuell mulighet.

Marint bioråstoff kan også bli aktuelt. Dyrkning av tare har vært foreslått som en potensiell stor norsk kilde til bioråstoff. I rapporten «Verdiskaping basert på produktive hav i 2050»<sup>22</sup>, antydes det en ambisjon om produksjon av 20 millioner tonn (sukker-)tare i 2050. Dette vil tilsvare cirka 80 prosent av verdensproduksjon av tare. Tare inneholder imidlertid cirka 80 prosent vann, slik at tørrvekten vil utgjøre 4 millioner tonn, det vil si mindre enn tilgjengelig trebasert biomasse. Det vil imidlertid være store utfordringer knyttet til det faktum at taren ikke kan høstes hele året og det høye vanninnholdet gjør at mye energi vil gå med til tørking. Skotske miljøer satser på tare til biogassproduksjon (anaerob fermentering), men dette er fortsatt på pilotstadiet. Et annet alternativ er «hydrotermal liquefaction», som kan utnytte vannholdig råstoff. Dette er en amerikansk teknologi som er under utprøving for prosessering av trevirke hos Silva Green Fuel på Tofte. For ti år siden vurderte Statoil (Equinor) tare som en kilde til andre-generasjons sukker for fermentering. Dette ble imidlertid skrinlagt blant annet på grunn av kostnadene ved dyrkning og prosessering, og problemene knyttet til sesongvariasjoner.

21 [https://www.prosess21.no/contentassets/8fdf5202cb224ce0bb2cf1aa1a9a9384/prosess21\\_biobasert-prosessindustri\\_ekspertgruppe-rapport\\_def.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/8fdf5202cb224ce0bb2cf1aa1a9a9384/prosess21_biobasert-prosessindustri_ekspertgruppe-rapport_def.pdf)

22 [https://www.sintef.no/globalassets/upload/fiskeri\\_og\\_havbruk/publikasjoner/verdiskaping-basert-pa-produktive-hav-i-2050.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/fiskeri_og_havbruk/publikasjoner/verdiskaping-basert-pa-produktive-hav-i-2050.pdf)

Biogass har blitt vurdert som alternativ til fossil naturgass. Imidlertid representerer også dette små mengder. Nord-Europas største biogassanlegg, Biokraft på Skogn, utnytter spillvann fra Norske Skogs anlegg sammen med restråstoff fra marin sektor (nitrogenkilde). Deres årsproduksjon er 25 millioner Nm<sup>3</sup> metan, som tilsvarer 17 000 tonn.

Det er derfor vanskelig å se for seg at biobasert eller resirkulert karbonavfall alene kan erstatte fossilt råstoff i de volumer som kreves, selv om raffinerikapasiteten skulle reduseres fra dagens nivå. Alternativt råstoff måtte komme fra flere kilder og fremtidig regelverk vil bestemme hvilke typer og omfang av råstoff som vil være aktuelt.

I lys av dette bør man også vurdere fortsatt bruk av fossilt råstoff og bedre utnyttelse av dagens raffinerifraksjoner, men da koblet til CCS som kompenserer for nye fossile uttak. Fossilt råstoff har mange fordeler, for eksempel lavt innhold av oksygen, og det vil gjøre det mulig å utnytte dagens industrielle infrastruktur uten store investeringer. Internasjonalt er det en økende diskusjon rundt begrepet «karbonforvaltning», der bioråstoff,

resirkulering, CCU og fortsatt bruk av fossilt karbon kompensert med CCS, vurderes i et helhetlig bærekraftperspektiv. Dette diskuteres nærmere i CCU-kapitlet senere i rapporten.

### Teknologier for karbon-nøytrale raffinerier

Det er mulig å se for seg flere utviklingsveier hvor avfall og bioråstoff kombineres for å sikre føde til petrokjemisk industri. Her er noen eksempler, som også omtales nærmere i CCU kapitlet:

#### Anaerob fermentering:

Tare og våtorganisk avfall utnyttes til biogassproduksjon. Metan kan videre prosesseres til metanol. Dette er kjent teknologi. Utfordringen er knyttet til mengde og konkurranse i forhold til å bruke biogassen som drivstoff.

#### Gassifisering:

Plast og annet tørt karbonholdig avfall kan gassifiseres ved høy temperatur og syntesegassen omdannes til metan eller direkte til metanol. Teknologien for å gjøre om syntesegassen til metanol er kjent og operativ i dag.

Tabell 1: Oversikt over tilgjengelig tømmer volum i Norge

Tilgjengelig tømmer volum	Avvirkning (1)		Mengden råolje dette kan erstatte <sup>(2)</sup> , millioner tonn	Andelen av råolje forbrukt ved norske oljeraffinerier dette kan erstatte <sup>(3)</sup>	Kommentar
	millioner fm3	millioner tonn tørrstoff			
Mulig økning i avvirkning	2	0,8	0,4	2,2 prosent	Dette kan bli tilgjengelig, mest furu og bjørk. Planlagte ekspansjoner i biomassebasert industri i Norden vil ta unna mer enn dette volumet.
All eksport og økning i avvirkning	5,6	2,24	1,12	6,1 prosent	Det forventes økende etterspørsel etter eksporttømmer og flis, lite sannsynlig at biomasse som føde til oljeraffinerier vil være konkurransedyktige.
Alt tilgjengelig tømmer høstet i Norge inkl. økningen i avvirkning	13	5,2	2,6	14,1 prosent	Leveranse av tømmer til alle norske sagbruk og treforedlingsbedrifter, samt eksport, vil måtte opphøre.

(1) Volumer hentet fra sluttrapporten til Ekspertgruppen Biobasert Prosessindustri i Prosess21<sup>21</sup>

(2) Konvertere tre til bio-olje har i beste fall 70-80prosent utbytte. Denne bio-oljen inneholder mye oksygen, og dermed et lavere energiinnhold. Videre må oljeraffineriet bruke hydrogen for å oppgradere den. Derfor har vi som et optimistisk anslag anslått at 1 tonn biomasse kan erstatte 0,5 tonn råolje, altså en ekvivalent på 0,5.

(3) Mongstad og Slagentangen forbruker til sammen mellom 17 og 20 millioner tonn råolje per år, vi har brukt 18,5 millioner tonn som et snitt.



En slik prosess kunne med fordel kobles til dagens metanolfabrikk på Tjeldbergodden. I et slikt scenario vil behovet for teknologiutvikling være knyttet til sortering og gradering av avfallet for å sikre en stabil føde og robust drift av gassifiseringsprosessen, samt håndtering av forurensning som dannes under gassifiseringen. Gassifisering vil imidlertid medføre CO<sub>2</sub>-utslipp når deler av råstoffet forbrennes for å øke temperaturen. Dette kan eventuelt kompenseres med CCS.

Syntesegassen kan også omdannes gjennom en Fischer-Tropsch prosess til langkjedede hydrokarboner, som kan raffineres til drivstoff eller byggestener i petrokjemisk industri. Pyrolyse, som er en termisk konvertering ved noe lavere temperatur (i fravær av oksygen) kan lage tilsvarende oljer og tjæreprodukter, som kan videreforedles i et raffineri. Teknologien for å utnytte Fischer-Tropsch eller pyrolyseprodukter i et raffineri er kjent og operativ i dag. Det samme gjelder teknologi for foredling av metanol til olefiner eller bensinkomponenter.

Alternativt kan syntesegassen utnyttes i en mikrobiell produksjon til etanol eller propanol. Dette vil være byggesteiner som kan videreforedles i et raffineri som Mongstad eller direkte utnyttes av petrokjemisk industri, for eksempel Ineos. Gassfermentering er delvis industrialisert av det amerikanske selskapet Lanzatech, men kan trolig videreutvikles i kombinasjon med utslippsfri hydrogen.

Ulike typer bioråstoff som inneholder karbohydrater (sukker) for eksempel trevirke og tare, kan i prinsippet også utnyttes gjennom andre bioteknologiske prosesser. For eksempel kan sukkeret gjøres tilgjengelig gjennom en forbehandling med enzymer, etterfulgt av fermentering til etanol ved hjelp av gjær. Teknologien er kjent og er i kommersiell produksjon i moderat skala ved Borregaard.

**Det er derfor vanskelig å se for seg at biobasert eller resirkulert karbonavfall alene kan erstatte fossilt råstoff i de volumer som kreves.**

## Anbefalinger

På samme måte som for resten av raffineribransjen i Europa, vil det for de norske raffineriene på kort til mellomlang sikt være mest effektivt å fokusere innsatsen på å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene ved selve produksjonsprosessene og å anvende prinsippene i sirkulær økonomi for å øke andelen råstoff fra avfall og gjenbrukte produkter.

Co-prosessering med massebalanseprinsipp av ulike typer avfallsmaterialer som plastavfall og husholdningsavfall er områder hvor raffineringindustrien kan bidra med sin kunnskap og ekspertise til utvikling av alternative løsninger til deponering eller forbrenning.

I overgangen til lavutslippssamfunnet vil raffineringene måtte:

- Fjerne utslippene fra egne produksjonsprosesser gjennom elektrifisering, energi-optimalisering, bruk av fornybar energi og CCS.
- Gjennomføre en gradvis omlegging til utslippsfritt råstoff ved å erstatte råolje med biogent føde og co-prosessering med massebalanseprinsipp av ulike typer avfallsmaterialer.
- Vurdere fortsatt bruk av fossilt råstoff i kombinasjon med CCS fra ulike punktutslipp der karbonprodukter forbrennes.
- Integreres med annen industri for optimal utnyttelse av energi og ressurser, samt for stordriftsfordeler for CCS.

## Barrierer

Storskala raffinering er en av de mest kapitalintensive landbaserte industriene som finnes. For å kunne investere i storskala lav-og nullutslipps raffinering er det nødvendig med stabile rammebetingelser over en lang tidshorison, både i Norge og i de land vi samarbeider med. Selv om forbruket av diesel og bensin reduseres og petrokjemiføde i fremtiden i all hovedsak vil komme fra biobasert råstoff, vil ulike smøremidler og asfalt for eksempel være vanskeligere å erstatte fullt ut. Raffineriene vil kunne reduseres i størrelse og antall, men vil mest sannsynlig øke i kompleksitet. Målet om nullutslipp vil kreve store langsiktige investeringer innenfor forutsigbare rammebetingelser.

# Bioraffinerier

Bioraffinerier tar typisk utgangspunkt i et gitt råstoff og dets egenskaper. De utnytter verdien i komplekse biologiske forbindelser ved å unngå å bryte hydrokarbonene ned til enkle byggesteiner. Mengdene er tilpasset en begrenset råvaretilgang og etterspørsel. På den annen side kan slike bioraffinerier være meget sofistikerte når det gjelder å utnytte alt råstoff i en integrert energioptimalisert produksjon med mange biprodukter. Eksempel på slike anlegg er Borregaards bioraffineri i Sarpsborg basert på trevirke og Duponts anlegg i Haugesund som utnytter høstet stortare.

Trebasert prosessindustri og tidligere nedlagte treforedlingsanlegg har betydelig erfaring med håndtering av biomasse fra tømmer, godt utbygd infrastruktur og logistikk, og er derfor i en utmerket posisjon til å utvikle og iverksette produksjon av biobaserte kjemikalier, plast og biodrivstoff. Norsk treforedlingsindustri er beskrevet i *Prosess21*-rapporten *Biobasert Prosessindustri*.

Borregaards anlegg i Sarpsborg er det største integrerte bioraffineriet i drift i Norge. Det er også et av verdens mest avanserte bioraffinerier basert på biomasse fra skog, og produserer omtrent 320 000 tonn biobaserte kjemikalier (cellulose, lignin, vanillin og etanol), som erstatter og konkurrerer med oljebaserte kjemikalier. Borregaard har et utslipp på rundt 125 000 tonn CO<sub>2</sub>, i hovedsak knyttet til energiforbruk og produksjon. Energikildene er vannkraft som el-kilde, og termisk energiproduksjon fra varme-gjenvinning, søppelbrenning, egen biogassproduksjon og topplast med naturgass.

## Mulige teknologier for fremtiden

Teknologier for konvertering av biomasse til kjemikalier, plast, biodrivstoff og proteiner deles ofte opp i biokjemiske prosesser og termokjemiske prosesser. Begge teknologitypene fører til prosessutslipp, men det foregår en rivende teknologiutvikling for å effektivisere slike prosesser i store deler av verden, også i Norge.

Termokjemiske prosesser er robuste og kapitalkrevende. De bryter hele biomassen ned til små molekyler, ofte syntesegass (CO+H<sub>2</sub>), som så kan konverteres videre med kjente teknologier fra petrokjemien.

Biokjemiske prosesser prosesserer biomassen mer skånsomt for eksempel gjennom bruk av enzymer. Trevirke består av omtrent 2/3 cellulose og hemicellulose, som er sukkerforbindelser. Første trinn består gjerne av en enzymatisk behandling som bryter sukkerkjedene ned til enkeltsukker, som så kan utnyttes i en fermenteringsprosess. Gjennom fermentering kan man lage et bredt spekter av kjemiske stoffer, inkludert byggestener for polymerer, avhengig av hvilken mikroorganisme som benyttes. Sukkerkjedene kan også omdannes kjemisk til interessante produkter, inkludert mikrofibres og kjemiske derivater. Fordi anvendelsesmulighetene er så store kalles dette ofte "sukkerplattformen".

Lignin utgjør den resterende 1/3 delen av trestokken. Lignin har en naturlig struktur som gjør den spesielt egnet til å konverteres til aromater, men dette har foreløpig vært teknisk krevende. Ligninet har derfor for det meste vært benyttet til forbrenning og energiproduksjon i treforedlingsindustrien. Ny teknologi kan imidlertid gjøre lignin til en fremtidig kilde til biokjemikalier som kan erstatte fossile byggesteiner som benzene, toluene og xylene (BTX). Et eksempel er amerikanske Anellotech, men det finnes også en rekke andre teknologier under utvikling.

Det er flere muligheter for å redusere utslipp i overnevnte prosesser, først og fremst ved å elektrifisere der det er mulig. Noen prosesser, for eksempel fermentering, vil gi CO<sub>2</sub>-utslipp. Selv om dette er utslipp fra fornybart råstoff og slik sett kan regnes som klimanøytralt, kan det også kobles til CCU eller CCS og dermed ha en karbonreducerende effekt.

# Tømmerbaserte klimaløsninger fra Borregaard

Borregaards innovative løsninger kan spille en viktig rolle i arbeidet med å løse verdens viktigste utfordringer knyttet til bærekraftig utvikling i tiden fremover; befolkningsvekst og klimaendringer.

Befolkningsvekst og klimaendringer skaper ekstraordinær etterspørsel etter klimavennlige løsninger innen infrastruktur, boligbygging, energi, sysselsetting og matproduksjon. Ved bruk av tømmer som råvare, produserer Borregaard avanserte og biobaserte løsninger til en rekke anvendelser innen blant annet landbruk og fiskeri, byggeindustri, farmasi og kosmetikk, næringsmidler, batterier og biodrivstoff.

Livsløpsanalyser (LCA) bekrefter at miljø- og klimapåvirkningen fra Borregaards produkter har blitt mindre over tid og gir bedre miljøytelse enn alternativene i nesten alle miljøkategorier. Måltrettet forskning og utvikling har gjort at selskapet har redusert sine direkte CO<sub>2</sub>-utslipp med nærmere 40 prosent i løpet av de siste ti årene. Målet er å kutte disse utslippene med 100 prosent innen 2050, noe som blant annet vil kreve betydelig teknologitvilling.

Borregaard har i løpet av de siste årene oppnådd svært gode miljøvurderinger i viktige analysemiljøer. Det internasjonalt ledende systemet for klima- og miljørapportering, CDP, har trukket frem Borregaard som en global leder innen klimatiltak og miljøpåvirkning. To år på rad har selskapet oppnådd en plass på CDPs prestisjetunge A-liste for klimaendringer.



Borregaard

## Anbefalinger

Det anbefales at det legges til rette for utvikling av flere bioraffinerier som kan erstatte produkter basert på fossilt karbon eller lage helt nye produkter med spennende egenskaper:

1. Biodrivstoff til anvendelser der det er vanskelig å elektrifisere eller bruke hydrogen, for eksempel fly og tungtransport.
2. Erstatning for fossile karbonbaserte kjemikalier eller materialer, for eksempel herdeplaster (det vil si ikke termoplast), som ikke så lett lar seg resirkulere.
3. Bidra til produksjon av fôr og mat, for eksempel ved å lage gjærprotein.

## Barrierer

Mange teknologier har kommet til pilotstadiet og må testes i større skala før de er klare til fullskala investeringer. Oppskalering innebærer fortsatt høy teknologisk risiko samtidig som det er den kapital-krevende delen av et utviklingsløp.

Et bioraffineri er komplekst og må produsere mange produkter ut av samme råvare for å få høy råvare-utnyttelse og god lønnsomhet. Det er krevende å utvikle mange produkter samtidig innenfor forskjellige og gjerne umodne markeder. Bioraffinering har derfor ofte høy markedsrisiko. Uten nødvendig tålmodig kapital og markedskompetanse kan det være vanskelig å realisere teknologien i full kommersiell skala. Risikoen ved å være førstemann ut omtales gjerne som "pioneering penalty" og er en viktig innovasjonsbarriere.

# Petrokjemisk industri

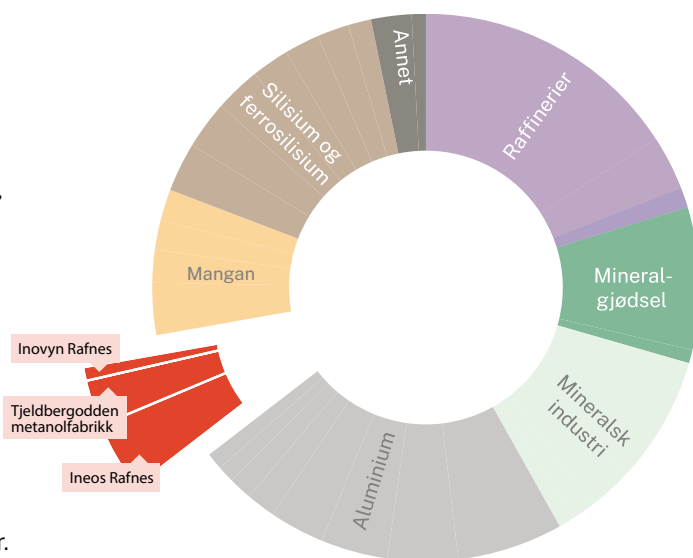
## Status

Petrokjemisk industri foredler mellomprodukter fra olje- og gassraffinerier til kjemikalier som videre prosesseres til et bredt spekter av produkter, som for eksempel plast, maling, lim, medisiner og kosmetikk.

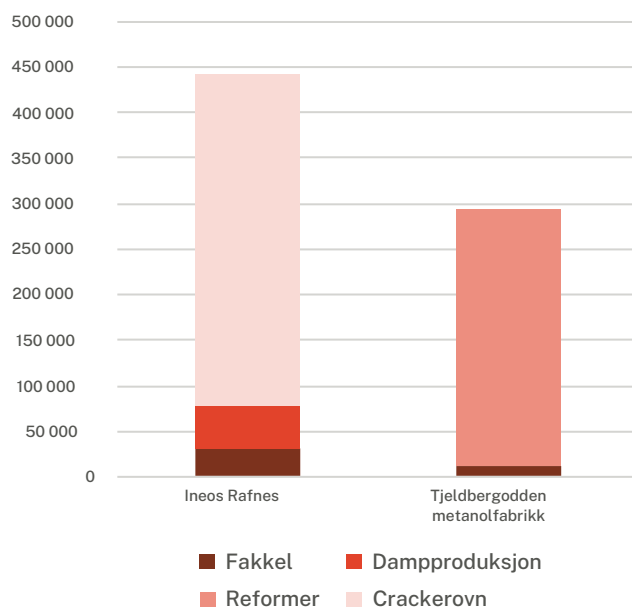
Dette er en globalisert industri der alle aktører konkurrerer i et internasjonalt marked. Innsatsfaktorene er forholdsvis få, og spekteret av bulk-kjemikalier er lite. Dette medfører at lønnsomheten tidlig i verdikjeden er meget følsom for energivirkningsgrad og -kostnad, effektiv utnyttelse av råvarene og kostnader knyttet til utslippsrensing. Volumene er store og eksisterende teknologi er typisk mest effektiv i stor skala. Dette fører igjen til betydelig risiko og lang horisont på investeringer.

I Norge utgjør INEOS sitt anlegg på Rafnes i Grenland og Equinor's metanolfabrikk på Tjeldbergodden de største utslippspunktene (Figur 6).

INEOS produserer etylen og propylen, også kalt olefiner, fra etan og propan (alkaner) i naturgass. De har et årlig utslipp på i overkant av 400 000 tonn CO<sub>2</sub>. De største utslippene kommer fra cracking av alkaner ved høy temperatur i ovner der gassbrennere sørger for hurtig oppvarming. Globalt bruker en betydelig andel av crackerne nafta som råstoff, spesielt eldre anlegg i Europa. Nafta gir et noe høyere CO<sub>2</sub>-utslipp enn naturgass per mengde produkt, men også en annen fordeling av etylen, propylen og biprodukter. Olefinene produsert ved Rafnes videreføres til polyetylen (PE) og PVC i henholdsvis INEOS og Inovyns (som eies av INEOS) anlegg på Rafnes og Herøya.



Figur 6: Petrokjemisk industri og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet



Figur 7: Kilder til utslipp av CO<sub>2</sub> i kjemisk industri. Kilde: Miljødirektoratet

Anlegget på Tjeldbergodden er Europas største metanol-fabrikk, med sin kapasitet over på 900 000 tonn metanol per år. Ved anlegget omformes naturgass til metanol gjennom flere prosesserstrinn. Gassen reagerer med damp og oksygen til syntesegass i en reformer, som igjen blir komprimert og konvertert i metanolsyntesen. Råmetanolen blir til slutt destillert for å fjerne vann og biprodukter. De største utslippene kommer fra forbrenning i reformeren for å tilføre nødvendig varme til reaksjonene der. Årlige utslipp er på rundt 300 000 tonn CO<sub>2</sub>.

De viktigste direkte produktene fra metanol omfatter formaldehyd, innblandingkomponenter i drivstoff, olefiner og eddiksyre, men disse inngår videre i et stort antall verdikjeder. Selv om det meste av metanolen går til eksport er Dyneas anlegg på Lillestrøm for produksjon av formalin (formaldehyd vandig løsning) og videre foredling til resiner, lim og belegg, eksempel på lokal utnyttelse. Dynea angir at en overgang til fornybar metanol er i prinsippet enkelt og det mest kritiske med hensyn til klimaavtrykk, da produksjonen i seg selv kun bruker elektrisitet og restvarme. Resiner til trevareindustri og trekonstruksjoner utgjør det viktigste produktet fra metanol, og en framtidig betalingsvillighet for klimasertifiserte resiner kan ikke utelukkes.

## Mulige teknologier for fremtiden

### Prosesstekniske utslippsreduksjoner og tiltak

Som for raffinerier vil petrokjemisk industri kunne redusere sine direkte utslipp av CO<sub>2</sub> gjennom en kombinasjon av operasjonelle tiltak og målrettede investeringer. Hva som er praktisk tilgjengelige alternativer vil variere med faktorer som eksisterende konfigurasjon, beliggenhet og nærhet til andre bransjer.

Et viktig tiltak for utslippsreduksjoner vil være å erstatte karbonholdige energikilder med fornybar energi. Dette vil gjelde energikilder som dekker både elektrisk og termisk energibehov i dag. Dette kan gjøres gjennom direkte elektrifisering, eller gjennom å ta i bruk teknologi og energibærere som kan levere fornybar varme ved høyere temperaturer enn det som er mulig i dag. Hydrogen som energibærer kan være viktig for å dekke varmebehov ved høye temperaturer.

Tiltakene for å redusere direkte utslipp fra eksisterende petrokjemisk industri vil typisk innebære å

- Investere i operasjonelle tiltak for å maksimere energieffektiviteten.
- Redusere forbrenning til oppvarming
- Utnytte lavverdig varme fra andre raffinerioperasjoner for å produsere strøm til intern og ekstern bruk. Dette kan innbefatte bruk av varmepumpeteknologi for å oppnå høyere temperaturer.
- Samarbeide tettere med andre bransjer, for eksempel raffinerier, som ofte befinner seg i samme industriknutepunkt. Dette gir også flere alternativer for energieffektiviseringstiltak for å optimalisere bruken av varme, damp og kraft.
- Elektrifisere ved å erstatte dampdrevne roterende maskiner og fyrte ovner med elektriske.

### Eksempel:

#### Elektrifisering av syntesegassanlegg og cracker

Produksjon av både syntesegass og olefiner krever tilførsel av varme ved høy temperatur. Dette løses tradisjonelt ved å brenne en andel av hydrokarbon-føden samt å gjenvinne og bruke restvarmen i andre deler av anlegget, noe som gjøres mest effektivt i stor skala. Imidlertid har det blitt sett på hvorvidt varmetilførselen kunne løses ved bruk av elektrisk energi, gitt selvsagt at denne er tilgjengelig som fornybar. Slike løsninger vil kunne gi 20-40 prosent reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp ved bruk av fossil føde og brenngass, og vil kunne være viktig i overgangen til fornybar føde. Den viktigste tekniske utfordringen knytter seg til omdanning av elektrisitet til varme ved resistiv varming eller andre konsepter som i liten grad har vært utforsket i stor skala.

Haldor Topsøe AS (Danmark) har lansert en elektrisk varmet reformerteknologi for produksjon av syntesegass<sup>23</sup>. Arbeidet har vært presentert for ekspertgruppen og andre interesserte. Teknologien skal piloteres i Danmark i et biogassanlegg, der teknologien i tillegg muliggjør utnyttelse av CO<sub>2</sub> i biogassen. Dessuten reduseres størrelsen til reformeren betydelig sammenlignet med konvensjonell fyringsbasert reformer med samme kapasitet, noe som (potensielt mer enn) kompenserer de økte investeringskostnadene knyttet til de nye tekniske løsningene. Haldor Topsøe hevder å ha, i samarbeid med blant annet Danfoss, kommet langt med de tekniske løsningene for elektrisk oppvarming.

Elektrifisering av cracker-prosesser er umoden teknologi, og det er først i den senere tid at aktører med nafta-crackere har begynt å se på elektrifisering. Man forventer ikke å se elektriske crackere i stor skala før mellom 2035 og 2040.

#### **Eksempel:**

##### **Løsninger for å utnytte lavtemperaturvarme**

Utslippsreduksjoner er avhengige av at energistrømmer utnyttes effektivt. Løsninger for oppgradering av lavtemperaturvarme til anvendbare temperaturer eller til elektrisitet vil være vesentlig for økt energiutnyttelsesgrad. Høytemperaturvarme produsert med elektrisk oppvarming eller med bruk av hydrogen som energibærer må utvikles og tas i bruk. Det vil være behov for betydelig utviklingsarbeid for å industrialisere slike løsninger.

##### **Prosessintegrasjon og industriell symbiose**

Som for raffinerier vil industriell symbiose være vesentlig for optimal energibruk. Det er også allerede vist i praksis at prosessintegrasjon har stor betydning for lønnsomhet og utslipp. Det muligens best integrerte anlegget i verden befinner seg i Ludwigshafen, Tyskland, eies av BASF<sup>24</sup> og produserer en rekke kjemikalier. De oppnår kostnadsbesparelse, lavere energiforbruk, mer effektiv rensing (vann, biprodukter, etc.) og lavere utslipp relativt til en verdikjede med separate anlegg for hvert produkt. Imidlertid er anlegget utviklet i en evolusjonær prosess og med en eier, og det er ikke enkelt å vedta, planlegge og bygge noe liknende «fra scratch», da hver prosess må tilpasse seg «partnerne» framfor å optimaliseres for egen del.

Det er grunn til å anta at slike fordeler øker ved implementering av CCS og/eller CCU. Et stort integrert anlegg vil kunne resirkulere energi, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, så langt det er mulig for til slutt å lagre «rest-CO<sub>2</sub>» som samlet likevel utgjør tilstrekkelig volum for en lagringsløsning. Et første utgangspunkt for slik utvikling måtte være et lagringspunkt for CO<sub>2</sub>, og betydningen av volum, teknisk løsning og stedsvalg er diskutert i Prosess21-rapporten Karbonfangst.

##### **Nye eller vesentlig endrede prosesser**

Med utgangspunkt i at både råstoffer og produkter skal inneholde karbon, er det i liten grad behov for helt nye prosesser, det viktigste vil være kilden til karbonet og tilgang på fornybar energi.

Det foreligger dog en serie konsepter som har vært undersøkt over lang tid fordi de vil gi radikale forbedringer. Disse tar primært utgangspunkt i fossilt råstoff og var opprinnelig motivert av lønnsomhet. Ved et eventuelt gjennombrudd vil de imidlertid kunne gi betydelige utslippsreduksjoner (globalt), og i tillegg kunne anvendes på for eksempel biogass eller andre fornybare ressurser. Slike konsepter er ofte knyttet til å unngå å konvertere via syntesegassproduksjon eller cracking grunnet disses høye investeringskostnader og energiintensivitet.

Eksempler er reaksjon av metan og oksygen direkte til metanol, konvertering av metan direkte til flytende hydrokarboner og hydrogen, samt bruk av etan direkte til plastproduksjon. Grunnen til at de store gjennombruddene lar vente på seg på dette området er at det er vanskelig å få termodynamikken og kjemien til «å spille på lag». På grunn av potensialet er det grunnlag for å anbefale en videre satsing på forskning på feltet. Det er per i dag imidlertid ingen teknologier som utmerker seg med tanke på en målrettet satsing, muligens med unntak av Haldor Topsøes tilnærming (som beskrevet over). Forskning på dette feltet vil kunne dekkes av et bredt anlagt FoU-program under Forskningsrådet.

##### **Kostnadsreduksjoner gjennom nye støtteprosesser**

En ny prosessløsning kan også utløses ved at det gjøres gjennombrudd innen diverse støtteteknologier for kjemisk prosessering, for eksempel kompresjon eller separasjonsløsninger. Et prominent eksempel er separasjonen av oksygen og nitrogen (luftseparasjon). Tilgang på rent oksygen kan flytte varmeproduksjonen i syntesegassproduksjonen fra «utsida» til «innsida» av reaktoren (dampreformering erstattes av autoterm reforming på fagspråket), og dette gjøres delvis allerede av andre årsaker.

<sup>23</sup> [https://www.prosess21.no/contentassets/52fc2f61d22f484aa4c205ef423c6e07/haldor-topsoe\\_--esmr.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/52fc2f61d22f484aa4c205ef423c6e07/haldor-topsoe_--esmr.pdf)

<sup>24</sup> <https://www.basf.com/global/en/investors/calendar-and-publications/factbook/basf-group/verbund.html>



Men den kryogene separasjonen (kjøling ned mot  $-190^{\circ}\text{C}$ , litt avhengig av trykk) er igjen energi- og kostnadsintensiv. Gjennombrudd innen for eksempel membran-teknologi kan endre dette bildet, og også hvordan investerings- og driftskostnader skaleres med størrelse – mindre metanolanlegg kan for eksempel bli lønnsomme.

### Skifte til fornybart karbon i produkter

Produkter fra kjemisk landbasert industri vil være viktige også i framtiden. Dels vil de være vanskelige å erstatte av funksjonelle grunner og dels ut fra miljø eller ressurs-hensyn, for eksempel ved å erstatte plast med metall eller glass. Dette er imidlertid produkter som per definisjon inneholder karbon og vil kunne føre til utslipp dersom karbonet ikke resirkuleres ved slutten av produktets livssyklus.

Det fossile råstoffet kan erstattes med fornybare bioressurser, såfremt det ikke fører til rovdrift på naturmiljøer eller er i direkte konkurranse med matproduksjon. Begrensningene i tilgangen på bioråstoff er omtalt under (olje)raffinerier ovenfor og av Prosess21's ekspertgruppe for Biobasert Prosessindustri. Et annet poeng er at bioråstoff ofte inneholder verdifulle komplekse molekyler som bør utnyttes mest mulig direkte. Eksempler på dette er omtalt ovenfor under bioraffinerier.

Resirkulering av karbon fra røykgasser eller gassifisering/pyrolyse av tørt organisk avfall, for eksempel plastemballasje, bildekk eller trebaserte komposittmaterialer («sponplater»), vil være et godt alternativ for å erstatte nye fossile uttak til bulk-kjemikalier som olefiner og korte alkoholer. Teknologi og prosesser for slik resirkulering er omtalt både under raffinerier og i CCU kapitlet.

Overgangen til biogent råstoff eller resirkulering skaper nye verdikjeder og potensielt nye synteseveier der norske fortrinn kan utnyttes, for eksempel tilgang på fornybar energi og hydrogen. Dette kan skape grunnlag for ny petrokjemisk industri i Norge. Internasjonal konkurranse er imidlertid hard og mellomprodukter som metanol, etanol eller sukkermolekyler må konkurrere i forhold til globale priser på slike nøkkeltkemikalier.

Utfordringene ved karbonresirkulering er ikke primært knyttet til teknologi, men ligger på systemnivå. I dag foreligger det få ordninger og insentiver som gjør avfalls-fraksjoner tilgjengelig i tilstrekkelige volum og med den forutsigbarhet som en eventuell tilpasning av et petrokjemisk anlegg eller prosess fordrer.

Det bør også sies at fossilt råstoff ofte er bedre egnet til petrokjemisk produksjon enn bioråstoff, som inneholder mye oksygen. Det vil derfor være en betydelig energi-kostnad både ved bruk av biogent råstoff og ved resirkulering. Dette er argumenter for at noe av råstoffet til petrokjemiske verdikjeder fortsatt kan være fossilt (i hvert fall i en overgangsfase), men da kompensert med CCS slik at netto utslipp blir null.

### Anbefalinger

Mulighetene som er skissert over krever, med noen unntak, ikke spesifikke tekniske gjennombrudd knyttet til en ny prosessløsning. Dette skiller petrokjemisk industri fra for eksempel aluminiumsindustrien, der det foreligger prosesskonsepter på forsknings- og pilotskala for nullutslippsteknologi, men det gjenstår betydelige utfordringer knyttet til teknisk utvikling og oppskalering til industriell skala.

De primære utfordringene for utslippskutt fra petrokjemisk industri per i dag er særlig knyttet til skala og kostnader. Energitap, biprodukter, og økte investeringer, ved å gjøre utslipps-reducerende investeringer i eksisterende anlegg påvirker både lønnsomhet og miljøgevinst. Innfasing av utslippsreducerende teknologi her ventes å kunne utløses av kvotemarkedet for  $\text{CO}_2$  på sikt.

Imidlertid er det identifisert noen utviklingsløp som vil være sentrale muliggjørere for enten direkte eller indirekte utslippskutt fra sektoren: Mye av dette vil kunne dekkes gjennom å legge til rette for større, langsiktige FoU-løp der både industrien, UoH-sektoren og forsknings-instituttene samarbeider, eksempelvis i SFI/FME/KSP-type prosjekter.

### Barrierer

De største barrierene for utslippskutt i petrokjemisk industri er knyttet til sikker tilgang og kostnader på fornybar energi og bioressurser. Videre er barrierer vedrørende investerings- og driftskostnader vurdert som mer utfordrende enn teknologiutvikling, mens FoU-framskritt, prosessintegrasjon og implementering er sterkt avhengig av kompetanse.

# Mineralgjødning

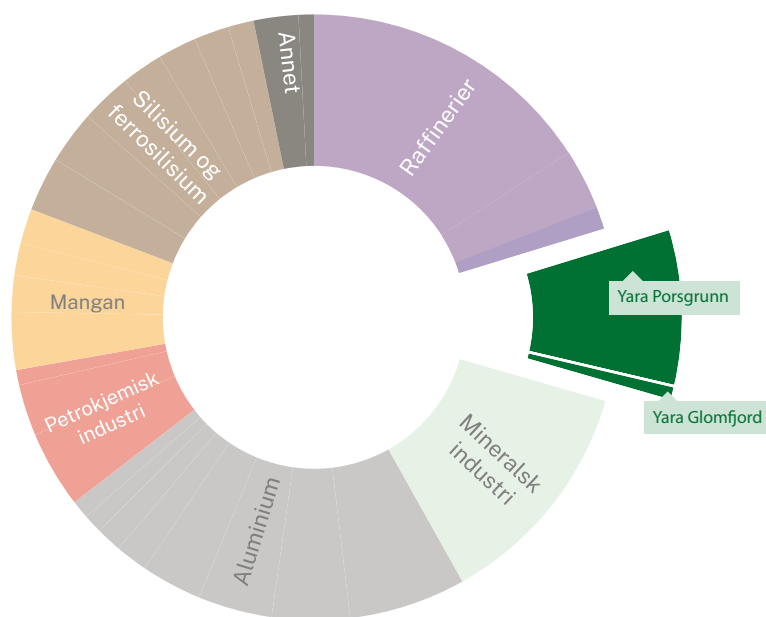
## Status

Produksjon av mineralgjødning i Norge startet i 1905 for å bidra til å hindre den fremvoksende hungersnøden i Europa.

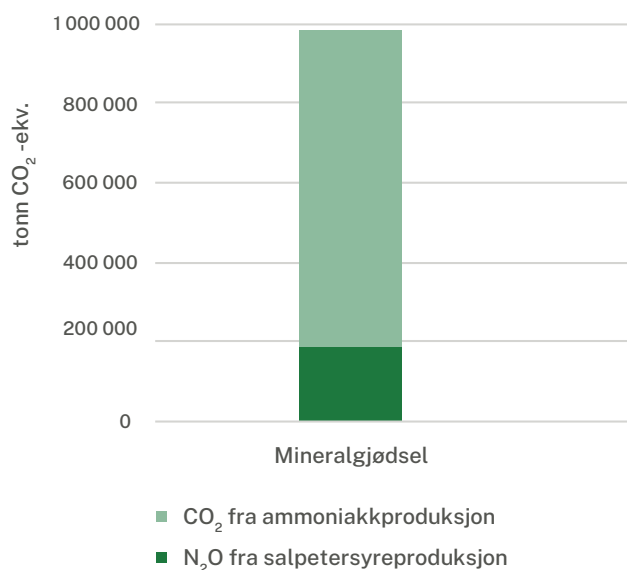
Yara er det eneste selskapet som produserer mineralgjødning i Norge. Produksjonen skjer ved to fabrikker, Yara Porsgrunn og Yara Glomfjord. Nær 75 prosent av utslippene fra Yaras virksomhet i Norge er relatert til bruk av etan til ammoniakkproduksjonen på Herøya (Figur 9). De resterende utslippene er i vesentlig grad lystgassutslipp ( $N_2O$ ). Annen bruk av fossile brenslere, utenom til ammoniakkproduksjon, er faset ut og bruk av damp er i hovedsak produsert fra eksoterme kjemiske reaksjoner. I noen tilfeller benyttes elektrisk dampkjel.

Yaras anlegg på Herøya (Yara Porsgrunn) er et integrert produksjonssystem for nitrogenbaserte produkter, og har Europas og Yaras største produksjonskapasitet for NPK<sup>25</sup> fullgjødning basert på nitrofosfatmetoden. På Herøya er det en ammoniakkfabrikk, fire salpetersyrefabrikker og en kalksalpeterfabrikk. Fabrikkene produserer et bredt sortiment av NPK (fullgjødning) og KS (kalksalpeter). Omkring 70-75 prosent av produksjonen på Herøya går til oversjøiske markeder og resterende 25-30 prosent til europeiske markeder. Ammoniakk-, salpetersyre- og gjødselproduksjonene produserer også et bredt spekter av gasser og kjemikalier til industribruk.

<sup>25</sup> NPK-gjødsel er et tresidig gjødsel som består av en blanding av hovedstoffene nitrogen (N), fosfor (P) og kalium (K)

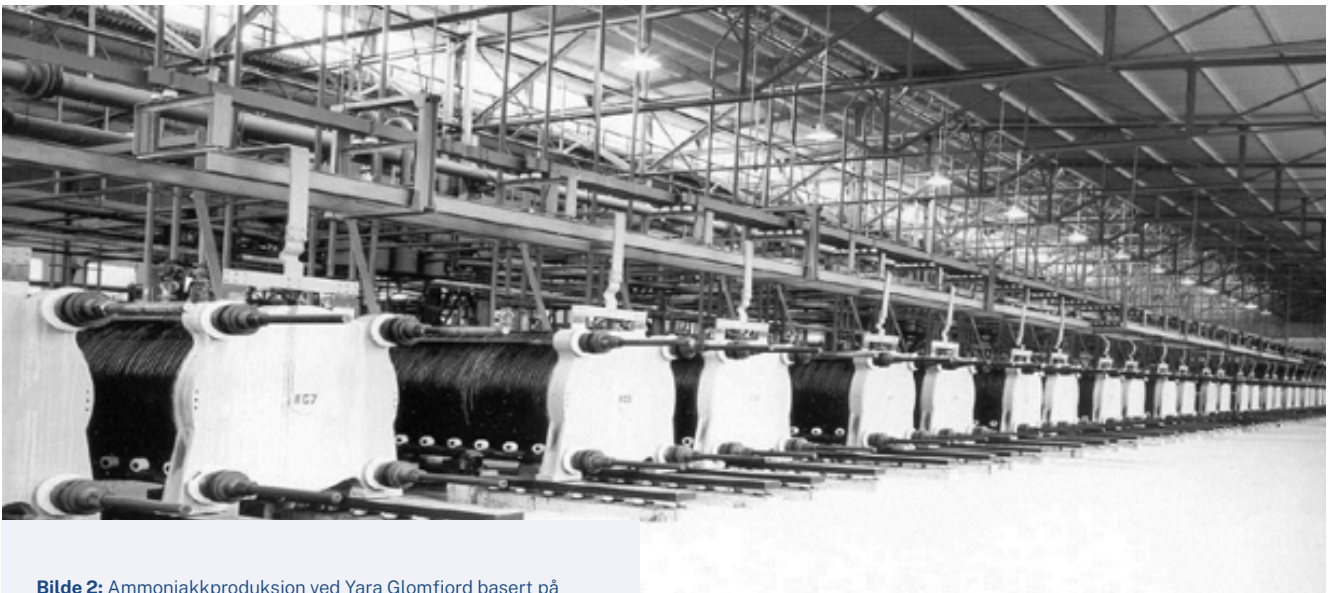


Figur 8: Anlegg for produksjon av mineralgjødning og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet



Figur 9: Utslipp av CO<sub>2</sub> og N<sub>2</sub>O fra mineralgjødselproduksjon. Kilde: Miljødirektoratet





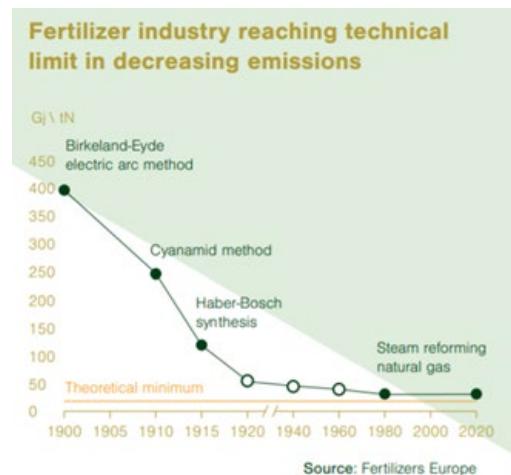
**Bilde 2:** Ammoniakkproduksjon ved Yara Glomfjord basert på elektrolyseteknologi (nedlagt 1993). Kilde: Yara

Yaras anlegg i Glomfjord har to salpetersyrefabrikker, én fullgjødsselfabrikk og en kalksalpeterfabrikk. Cirka 30 prosent av produksjonen i Glomfjord selges til det norske markedet, omkring 70 prosent går til europeiske og oversjøiske markeder. Produksjonen i Glomfjord er basert på importert ammoniakk, men var inntil 1993 basert på egenprodusert ammoniakk fra vannelektrolyse ved bruk av fornybar elektrisitet (grønn ammoniakk). Produksjon av grønn ammoniakk er i dag ikke lønnsom sammenlignet med produksjon basert på fossilt råstoff.

Europeiske gjødselprodusenter har redusert energi-behovet betraktelig, og investeringer i dagens teknologi vil kun føre til marginale forbedringer. Yaras ammoniakkfabrikk på Herøya er til tross for sine 50 år en av verdens mest energieffektive ammoniakkfabrikker og nærmer seg teoretisk minimum energiforbruk innen dagens BAT (Best Available Technology) for ammoniakkproduksjon basert på fossilt råstoff, såkalt steam reforming (Figur 10). Yaras ammoniakkfabrikk har videre en lav karbonintensitet sammenlignet med konkurrenter grunnet bruk av elektriske motorer til å drive energikrevende deler av prosessen.

Utslipp av  $N_2O$  fra Yaras prosessanlegg i Norge er redusert med over 90 prosent ved bruk av egenutviklet katalysatorteknologi (sekundær  $N_2O$  reduksjonskatalysatorteknologi).  $N_2O$  dannes hovedsakelig som et biprodukt i salpetersyrefabrikken på Herøya og Glomfjord under oksidasjonen av ammoniakk til nitrogendioksid.

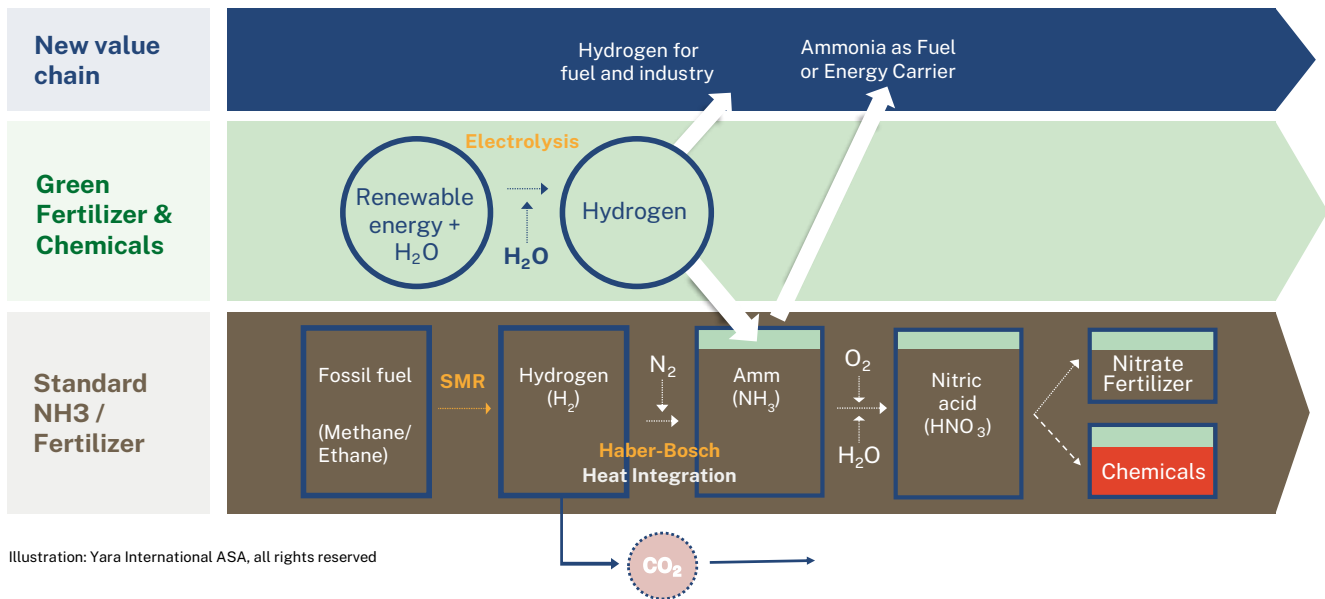
**Figur 10:** Utviklingen i energiforbruk ved gjødselproduksjon fra Birkeland-Eyde til dagens Steam Reforming (SR)-prosess



$N_2O$  har et Global Warming Potential (GWP) på 298 (det vil si at 1 tonn  $N_2O$  tilsvarer 298 tonn  $CO_2$ ).

FN<sup>26</sup> anslår at i 2050 vil verdens befolkning nå nesten ti milliarder mennesker og at matbehovet vil øke i takt med dette. Mineralgjødsel er viktig for matproduksjon og må produseres bærekraftig slik at man får økt produksjonsutbytte fra landbruk uten tilsvarende økning i belastning av naturressurser i prosessen.

**Figur 12:** Hvordan grønt hydrogen gradvis kan erstatte hydrogen produsert fra dampreforming. Kilde: Yara



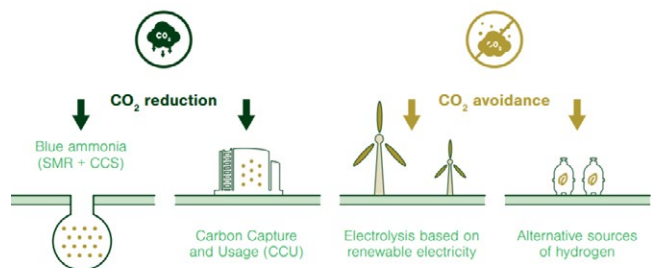
## Mulige teknologier for fremtiden

Yara har en ambisjon om å bli klimanøytral innen 2050. Første skritt mot dette målet ble satt i 2019 da Yaras klimagass-program for 10 prosent reduksjon i klimagass-intensitet ble lansert<sup>27</sup>. Reduksjoner inkludert i dette programmet er allerede under implementering eller planlagt i Porsgrunn og Glomfjord for å bringe utslippene av N<sub>2</sub>O til et minimum (cirka 98 prosent reduksjon fra opprinnelig nivå uten katalysatorteknologi). Inkrementelle forbedringer fra energieffektivisering og prosess-optimalisering vil også gi reduksjon fra dagens nivå.

Det er flere mulige tiltak for videre reduksjon av utslippene av klimagasser fra Yaras fabrikker i Norge, men dette innebærer bruk av nye teknologier (Figur 11)<sup>28</sup> samt utviklingsløp innen energiinfrastruktur, pris-konkurransesevne for grønn energi og markeder for produkter med lite karbonfotavtrykk.

Ved 100 prosent bruk av grønn (eller blå) hydrogen til ammoniakkproduksjon samt videre optimalisering av reduksjon av lystgass vil gjødselproduksjonen i Norge være tilnærmet dekarbonisert. Figur 12 illustrer hvordan grønt hydrogen gradvis kan erstatte hydrogen produsert fra dampreforming og på sikt erstatte produksjon ved bruk av fossilt råstoff.

**Figur 11:** Nye teknologier for videre reduksjon av klimagasser fra mineral-gjødselproduksjon. Kilde: Yara



## Produksjon av ammoniakk med CO<sub>2</sub> håndtering og lagring (blå ammoniakk)

Blå ammoniakk er ammoniakk produsert fra fossile råstoffer som naturgass (eller etan som på Herøya) med CO<sub>2</sub>-håndtering og permanent lagring av CO<sub>2</sub>.

De dominerende kildene til utslipp av CO<sub>2</sub> fra dagens produksjon av ammoniakk er CO<sub>2</sub> fra råstoffet (etan) fra steam reforming (SR) til produksjon av syntesegass og CO<sub>2</sub> i røykgassen fra fossil gass som benyttes til fyring av reformeren. CO<sub>2</sub> fra råstoffdelen separeres delvis ut fra prosessen i dag og denne CO<sub>2</sub>-mengden selges blant annet til mineralvann. Det er mulig å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra råstoffdelen og lagre denne.

<sup>27</sup> <https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/capital-markets-day/2019/capital-markets-day-2019-with-reader-notes.pdf>

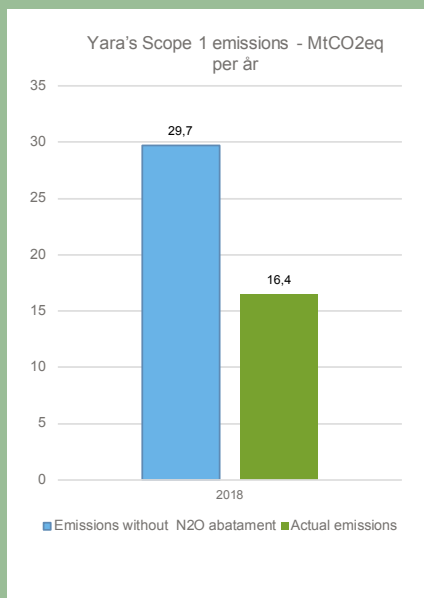
<sup>28</sup> <https://www.fertilizerseurope.com/paving-the-way-to-green-ammonia-and-low-carbon-fertilizers/>

## Yaras katalysator-teknologi reduserer klimagassutslipp med cirka 30 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter hvert år

Nitrogendioksid, N<sub>2</sub>O, er en gass med en global oppvarmingseffekt som er cirka 300 ganger høyere enn CO<sub>2</sub>. N<sub>2</sub>O er et biprodukt i produksjon av salpetersyre, som er et mellomprodukt for ulike typer nitratgjødsel. Allerede på 1980 tallet forutså Yara at klimagassutslipp ville bli en utfordring, og dermed startet et forskningsarbeid og utvikling av en produksjonsmetode for å produsere de-N<sub>2</sub>O katalysator for installasjon i sine salpetersyrefabrikker. Yara har over lang tid investert betydelig i utvikling av katalysatorteknologi og har fortsatt fokus på videreutvikling.

Yaras utslipp av N<sub>2</sub>O er nå redusert med mer enn 90 prosent i sine europeiske fabrikker (fabrikker utenfor Europa vil nå også oppnå tilsvarende reduksjon som et ledd i Yaras klimamål for 2025). I Yaras salpetersyrefabrikker i Porsgrunn er det i 2019 oppnådd en reduksjon på 1,3 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år sammenlignet med 2005. Yaras direkte utslipp på konsernnivå er som følge av installert N<sub>2</sub>O katalysatorteknologi redusert med cirka 13 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år. Til sammenligning er utslippet fra norsk sokkel cirka 14 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år.

Yaras N<sub>2</sub>O katalysatorteknologi er kommersielt tilgjengelig utenfor Yara og er installert i flere salpetersyrefabrikker globalt, utslippsreduksjonen er derfor estimert til om lag 30 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Dette eksempelet viser at en bedrifts satsing på teknologiutvikling for å møte fremtidige utslippskrav kan bidra til global spredning av teknologi, samt kommersiell positiv forretningsutvikling for bedriften og sine partnere.



**Knowledge grows**



**Bilde 3:** Yara og Nel samarbeider om å produsere karbonfritt hydrogen for gjødselproduksjon, avtale signert august 2019. Kilde: Yara

Det vil redusere utslippene fra ammoniakkproduksjonen med opptil 60 prosent (inkludert CO<sub>2</sub> som i dag selges). CO<sub>2</sub>-innholdet i røykgassen er såpass lavt at det ikke ses som hensiktsmessig å investere i teknologi for å redusere dette utslippet sammenlignet med andre alternativer.

### Produksjon av ammoniakk med hydrogen fra vann-elektrolyse (grønn ammoniakk)

Elektrolyseteknologi for produksjon av hydrogen fra vann gjøres hovedsakelig ved to teknologier som er kommersielt tilgjengelig på markedet i dag; alkalisk elektrolyse (AEL) og polymer-elektrolytt membran (PEM) elektrolyse. Begge teknologiene er relativt modne, men med fortsatt rom for videre utvikling. Det finnes også andre metoder som fortsatt er på forsknings- og utviklingsstadiet, men som kan få stor betydning i framtiden, eksempelvis SOEC (Solid Oxide Electrolysis-high temperature elektrolysis).

I dag er AEL minst CAPEX intensiv, PEM har et vesentlig høyere CAPEX nivå enn AEL, men anses å kunne reduseres betraktelig innen 2030. SOEC teknologien er lite moden og CAPEX nivået er i dag meget høyt (Figur 13), men det antas å kunne reduseres betraktelig og SOEC kan være en "vinner" i 2030/2050.

De ulike elektrolyseteknologiene har ulike styrker når det kommer til kostnadsbilde, levetid og fleksibilitet, og hvilken teknologi som vinner fram vil trolig være spesifikt til den enkelte applikasjon.

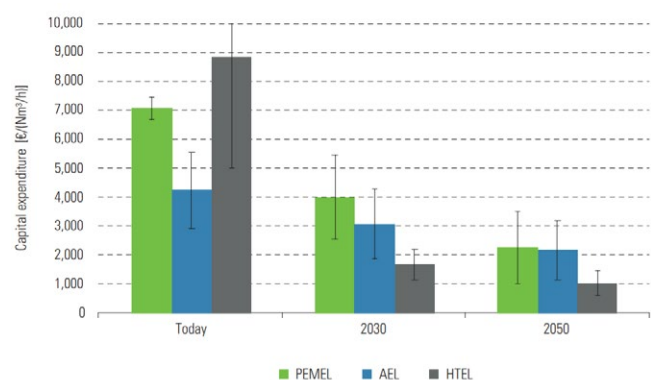
Det henvises til kapittelet om hydrogen for omtale av bruk av hydrogen i prosessindustrien.

Dekarbonisering av ammoniakkproduksjonen er et fokusområde for Yara. Yara og Nel har eksempelvis signert et samarbeid der Nel skal levere en elektrolysør til grønn hydrogen-produksjon på 5 MW som skal testes ved ammoniakkanlegget i Porsgrunn (Bilde 3). Dette vil medføre en reduksjon på cirka 8 000 tonn CO<sub>2</sub> per år. Prosjektet er støttet gjennom Pilot-E, et samarbeid mellom Forskningsrådet, Innovasjon Norge og Enova.

### Andre teknologier

N2 Applied<sup>29</sup> har utviklet en plasmareaktor-teknologi for å produsere nitrogengjødsel gjennom fiksering av nitrogen fra luft og reaksjon med ammoniakk i flytende husdyrgjødsel eller husdyrmøkk. Denne reaksjonen stopper ammoniakktapene som ellers finner sted og øker nitrogeninnholdet i husdyrgjødsel slik at denne blir mer næringsrik. Plasmareaktoren installeres på den enkelte husdyrbruk hvor husdyrmøkk resirkuleres og næringsstoffene beholdes. Denne teknologien anses ikke som en teknologi som kan erstatte den globale produksjonen av nitrogengjødsel, men denne teknologien gir bedre utnyttelse av husdyrgjødsel og bidrar til reduksjon i bruk av kunstgjødsel på gårdsbruk med husdyrhold.

**Figur 13:** CAPEX-intensitet for elektrolyseteknologiene PEMEL, AEL og HTEL i dag, og antatt nivå i 2030 og 2050. Kilde: Fraunhofer



<sup>29</sup> <https://n2applied.com/>

## Anbefalinger

Produksjon av mineralgjødning basert på grønn ammoniakk er den anbefalte løsningen for å dekarbonisere gjødningproduksjonen i Norge. I tillegg kan grønn ammoniakk gi en løsning for dekarbonisering av skipsfart, og posisjonere Norge som en frontløper for grønn ammoniakk som skipsdrivstoff.

I overgangen til grønt, kan reduksjon av CO<sub>2</sub> fra eksisterende anlegg (CO<sub>2</sub> fra råstoffdelen) med utnyttelse av CCS-mulighetene som oppstår nært ammoniakkanlegget på Herøya utforskes som en midlertidig løsning. Evaluering av investeringskostnader vil være en drivende suksessfaktor og basis for investeringsbeslutninger for blå og grønne ammoniakkprosjekter.

Det er ikke en anbefalt løsning å benytte CO<sub>2</sub> fra ammoniakkproduksjonen til CCU prosjekter (for eksempel produksjon av urea eller andre produkter) av følgende årsaker:

- CO<sub>2</sub> fra urea vil slippes ut ved bruk av produktet og kan derfor ikke resirkuleres
- CO<sub>2</sub> fra ammoniakk-produksjon til produksjon av andre produkter (ved bruk av CCU) vil kunne forsinke overgangen til produksjon av grønn ammoniakk
- CO<sub>2</sub> fra røykgass i ammoniakkproduksjonen vil ikke bli dekarbonisert uten vesentlig store investeringer som ikke ses hensiktsmessig

## Barrierer

Utslippsfri hydrogen produsert i tilstrekkelig mengde med konkurransedyktig pris er en forutsetning for at grønn ammoniakk skal bli konkurransedyktig sammenlignet med dagens teknologi. Elektrolyseteknologi for produksjon av hydrogen er kommersielt tilgjengelig i små enheter, men en oppskalering til industriskala er i dag lineær og kapitalintensiv. Dagens kvotepriser for CO<sub>2</sub> forsvare ikke investering i grønt hydrogen over hydrogen fra naturgass.

Strømprisen er den dominerende faktoren for pris på hydrogen fra elektrolyse. Det medfører at hydrogenproduksjon vil kreve tilgang til lavere pris for fornybar elektrisitet for å bli et konkurransedyktig råstoff til ammoniakkproduksjon. Foreløpig er det ingen indikasjoner i markedet på økt betalingsvilje for blå eller grønn ammoniakk eller gjødseltyper produsert fra blå/grønn ammoniakk, og ingen signifikant markedsverdi kan derfor i dag tas med i utvikling av investeringsunderlag. Det antas imidlertid at grønne produkter kan bli en drivkraft i fremtiden.

Støtteordninger for investerings- og driftskostnader vil derfor være nødvendig for overgang til blå/grønn ammoniakk teknologi før betalingsvillighet i markedet gjennom matvareverdikjeden eller andre verdikjeder er til stede.



The background image shows a large industrial facility, likely a steel mill, with a glowing furnace in the foreground. A large blue circle is overlaid on the image, containing the main title and a smaller circular graphic of a tree map of Norway.

# Prosessteknologi med redusert karbonavtrykk





# Metallurgisk industri

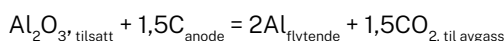
Metallurgisk industri i Norge omfatter produksjon av aluminium, silisium, ferrosilisium og manganlegeringer. I Norge har vi også produksjon av sink, titandioksid, nikkel, kobber og kobolt, og resirkulert stål. Totalt produseres det i underkant av tre millioner tonn metaller i Norge per år. Mesteparten av dette eksporteres. Produksjon av metaller og metall-legeringer krever mye energi og prosessene bruker ofte fossilt karbon som råmateriale eller til oppvarming og får med det store CO<sub>2</sub>-utslipp. I dette arbeidet tar vi for oss sektorer med de største utslippene; aluminium, silisium, mangan og titandioksid, og vurderer mulige teknologier med redusert karbonavtrykk og nullutslipp.

# Aluminium

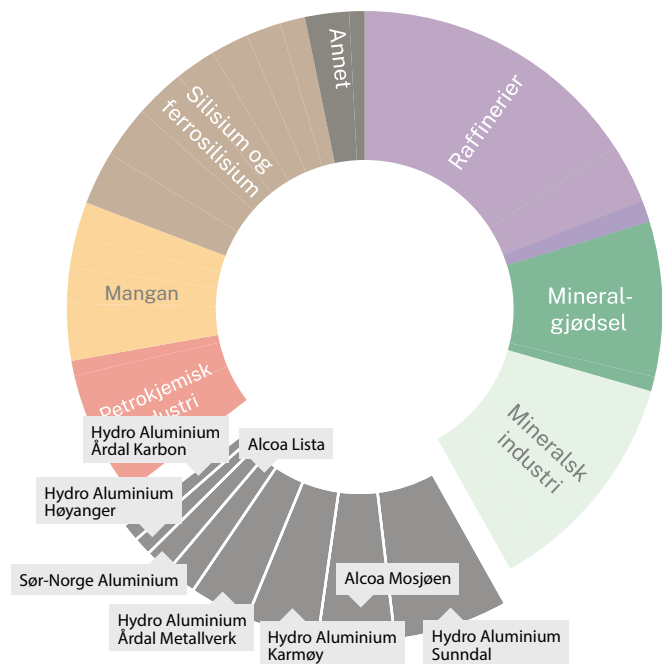
## Status

Den velkjente Hall-Héroult-prosessen har vært enerådende for produksjon av aluminium siden Charles Martin Hall og Paul Héroult fant den opp uavhengig av hverandre i 1886. Prosessen kjennetegnes ved at aluminiumoksid spaltes til flytende aluminium og CO<sub>2</sub> i en elektrolysecelle med karbonanoder. Spenningen som kreves for denne spaltningen er for høy til at man kan bruke vannbaserte elektrolytter og man er nødt til å ty til en eksotisk saltsmelte bestående hovedsakelig av kryolitt, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, for å få tilstrekkelig oppløsning av aluminiumoksidet. Prosessen foregår ved cirka 960 °C. Aluminiumoksid produseres fra bauksitt ved Bayer-prosessen.

Selv om prosessen i seg selv er gammel, har den gjennom årene gjennomgått en enorm utvikling når det gjelder produktivitet, energieffektivitet og miljøbelastning. Dagens elektrolyseprosess forbruker cirka 13 kWh per kg produsert aluminium, med de beste anlegg under 12 kWh per kg aluminium. CO<sub>2</sub>-utslippet skyldes som nevnt reaksjon mellom karbonanodene og oksid fra det tilsatte aluminiumoksidet. Nettoreaksjonen i elektrolysecellen er



Teoretisk minimumsutslipp av CO<sub>2</sub> i henhold til denne reaksjonen er 1,22 kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium produsert. I virkeligheten er utslippene en del større, typisk nærmere 1,5 kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium, på grunn av noe brenning av karbonanoden i kontakt med luft og CO<sub>2</sub>, samt noen sidereaksjoner på anoden. I tillegg til CO<sub>2</sub> kan det også dannes andre klimagasser, såkalte perfluorerte karboner (PFK). Disse er langt mer potente klimagasser enn CO<sub>2</sub>, og selv små utslipp vil gi betydelig økning i utslipp av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter (GWP er mellom 7 000 og 10 000 ganger høyere enn CO<sub>2</sub>). Utslipp av PFK henger sammen med hvordan elektrolysecellene driftes, spesielt hvordan tilførsel av aluminiumoksid gjøres. I løpet av de senere tiår har utslippene av PFK falt svært mye, men fortsatt



Figur 14: Anlegg for aluminiumsproduksjon og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet

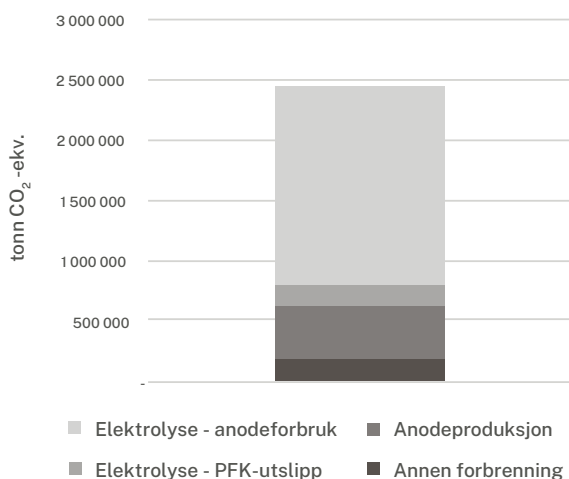
bidrar PFK med flere prosent av det totale utslippet av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter fra elektrolyseprosessen.

Avgassen fra elektrolysecellen passerer gjennom et forholdsvis sofistikert renseanlegg før det slippes ut til atmosfæren. Faktisk brukes aluminiumoksidet som skal tilføres cellene som rensmiddel. Oksidet har den egenskapen at det absorberer de fleste fluoridforbindelser som damper av cellen. På den måten blir disse fluoridene ført tilbake til elektrolysecellen. Men CO<sub>2</sub> og PFK absorberes ikke og ender opp i atmosfæren. Denne renseteknologien forutsetter en forholdsvis lav temperatur på avgassen. Blant annet derfor blandes avgassen med store mengder luft for å kjøle den. Dagens elektrolyseceller er konstruert slik at de slipper inn mye luft i cellenes øvre del. Avgassen i det den forlater anoden er bortimot 100 prosent ren CO<sub>2</sub> ved nesten 1 000 °C. Ut av cellen etter blanding med luft er den noe over 100°C og inneholder typisk rett under 1 prosent CO<sub>2</sub>. Denne lave konsentrasjonen gjør den utfordrende å fange.



**Figur 15:** Utslippskilder fra norsk aluminiumsindustri.

Kilde: Miljødirektoratet



Et særdeles viktig element i diskusjonen om CO<sub>2</sub>-utslipp fra aluminiumsproduksjon er utslipp knyttet til elektrolysens kraftbehov. I for eksempel Norge og Canada er elektrisitetsproduksjonen nesten fri for CO<sub>2</sub>-utslipp. Da vil utslippene fra elektrolysen ligge rundt 1,5 kg CO<sub>2</sub>/kg Al, kraftproduksjon medregnet. Hvis elektrisiteten derimot produseres fra kull uten CO<sub>2</sub>-rensing, vil utslippene øke med over 10 kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium. Det er åpenbart at klimagassutslipp knyttet til aluminiumproduksjon globalt reduseres mer ved å erstatte kullbasert elektrisitet med grønn elektrisitet sammenlignet med å eliminere utslippene fra selve elektrolysen. Men selv om norsk elektrisitet er grønn, er CO<sub>2</sub>-utslippene fra norsk aluminiumsproduksjon betydelige (Figur 15), og industrien jobber aktivt for å redusere dem.<sup>30</sup>

Selv om Hall-Héroult prosessen er enerådende har det opp gjennom årene kommet forslag på alternative prosesser som kan bøte på noen av dens svakheter. Svakheterne er en svært høy investeringskostnad, behov for å produsere og bytte anoder som forbrukes, høy temperatur og et forholdsvis høyt energiforbruk. Flere alternative prosesser har gjennomgått utviklingsløp til mange hundre millioner kroner opp til pilotskala, men ingen har så langt erstattet Hall-Héroult prosessen. Drivkraften for tidligere forsøk har vært rent drifts-økonomiske. I den senere tid er klima kommet til som en ytterligere pådriver, og det kan være riktig å se på noen av de tidligere forsøkene på nytt.

Disse beskrives i det etterfølgende. I tillegg vurderes det hva som kan gjøres med selve Hall-Héroult prosessen for å redusere klimagassutslipp, f.eks. CCS.

## Mulige teknologier for fremtiden

### Karbotermisk aluminium

Aluminium kan produseres ved direkte reduksjon med karbon. Potensielt kan det utvikles en prosess med betydelig lavere krav til areal, rundt 25 prosent av dagens Hall-Héroult-prosess. Det vil også være et lavere investeringsbehov per tonn aluminium, men dette er ikke tallfestet. Prosessen er imidlertid teknisk utfordrende, hovedsakelig på grunn av de svært høye temperaturene som kreves, til dels over 2 000 °C. Det medfører betydelig avdampning av flere aluminiumkomponenter. Dessuten har aluminium høy løselighet av karbon ved disse temperaturene. Karbonet må skilles fra produsert aluminium før videre prosessering. Håndtering av disse utfordringene er svært krevende. Det har i løpet av de siste 50 år vært flere seriøse forsøk på å kommersialisere denne prosessen, senest av Alcoa i perioden 2000-2016 med pilotovn installert ved Alcoa Lista, men alle forsøk er avsluttet på utviklingsstadiet.

Nettoreaksjonen er  $Al_2O_3 + 3C = 2Al + 3CO$  og prosessen medfører dermed dannelse av CO. Ved direkte utslipp av CO vil det omsettes til CO<sub>2</sub> og kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium vil dobles sammenliknet med dagens elektrolyse og prosessen har ingen klimafordel. Men konsentrasjonen av CO i avgassen er høy, mellom 80 og 90 prosent, og hvis den forbrennes kan CO<sub>2</sub> som dannes være såpass konsentrert at den er godt egnet for fangst og lagring.

### Inerte anoder

Helt siden dagens Hall-Héroult-prosess for aluminium ble patentert på 1880-tallet har man innsett at anoder som produserer oksygen istedenfor CO<sub>2</sub> kan gi betydelige fordeler. Med slike anoder vil aluminiumoksid som tilføres elektrolysecellene spaltes til aluminium på katoden, som i dag, og oksygen på anoden;  $Al_2O_3 = 2Al + 1.5O_2$ . Til å begynne med, lenge før CO<sub>2</sub> ble ansett som en betydelig klimagass, var fordelene hovedsakelig knyttet til at en oksygenproduserende anode ikke vil forbrukes på samme måte som en karbonanode. Således ville man kunne konstruere celler som krever mindre oppfølging og som er mer energieffektive og produktive. Når man på toppen av dette kan legge til et potensiale for betydelig reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp, fremstår inerte anoder som en svært attraktiv løsning.

30 [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2018/02/15/carbon\\_footprint\\_technical\\_support\\_document\\_v1\\_published.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2018/02/15/carbon_footprint_technical_support_document_v1_published.pdf)

Den store utfordringen har hele tiden vært å finne et anodemateriale som er tilstrekkelig stabilt under de ekstremt krevende betingelsene som råder i en aluminium-elektrolysecelle. Materialet skal i tillegg være tilstrekkelig elektrisk ledende og også være kjemisk bestandig. Det finnes anodematerialer som kan produsere oksygen, men enten korroderer de altfor fort eller så medfører korrosjonen uakseptabel forurensning av det produserte metallet, og ofte begge deler.

Siden 1990-tallet har flere av de store aluminiumprodusentene hatt betydelige FoU-programmer for å utvikle og ta i bruk inerte anoder. Men så langt uten suksess. I de senere år har imidlertid Alcoa og RioTinto Aluminium gått sammen om et selskap, Elysis, som skal utvikle og selge inert anodeteknologi. Deres plan er å gjøre teknologien tilgjengelig for lisensiering i 2024. Rusal har også nylig annonsert at de snart skal implementere egenutviklede inerte anoder i ganske store testceller. Dette er spennende prosjekter som, hvis de lykkes, vil kunne revolusjonere aluminiumsindustrien. Men det vil ikke skje over natten. Teknologien vil medføre betydelige endringer av dagens celledesign og det vil kreve investeringer på høyde med nye verk med Hall-Héroult teknologi å konvertere dagens teknologi til ny inert teknologi. Man vil derfor sannsynligvis se en gradvis konvertering som vil gå over mer enn ett tiår.

Et annet svært viktig element er at teknologien trolig forutsetter grønn kraft for å gi en klimagevinst. Produksjon av oksygen istedenfor CO<sub>2</sub> på anoden er mer energikrevende, og elektrisitetsforbruket forventes å øke noe fra dagens nivå. Teoretisk krever spalting til oksygen cirka 9,2 kWh per kg aluminium, mens dagens prosess krever cirka 6,2 kWh.<sup>31</sup> Forskjellen på 3 kWh per kg aluminium vil, hvis den produseres fra kullkraft, medføre cirka 2,5 kg ekstra CO<sub>2</sub> per kg aluminium, altså mer enn de cirka 1,5 kg CO<sub>2</sub> fra selve elektrolysen. Imidlertid vil forskjellen mellom inert og tradisjonell teknologi kunne bli lavere enn 3 kWh per kg aluminium dersom celler med inerte anoder kan bli mer energieffektive enn dagens celler.

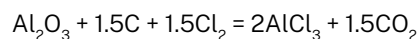
Men først må altså teknologien utvikles, og det er fortsatt usikkert om prosjektene nevnt over når helt frem til kommersialisering. Her står vi foran noen spennende år.

### Kloridelektrolyse for aluminium med CO<sub>2</sub>-gjenvinning

Et reelt industrielt alternativ til elektrolyse av aluminium-oksid oppløst i kryolittbaserte saltsmelter er elektrolyse av aluminiumklorid, AlCl<sub>3</sub>, oppløst i en kloridbasert saltsmelte. Alcoa utviklet teknologien og bygget en fabrikk i Texas på 70-tallet. Fabrikken var i produksjon i cirka ti år før den ble lagt ned midt på 80-tallet. I utgangspunktet er ikke denne prosessen bedre enn dagens når det gjelder CO<sub>2</sub>-utslipp, men ved å modifisere den kan utslippene bortimot elimineres. Denne prosessen studeres i dag av Norsk Hydro i et prosjekt støttet av Gassnova (CLIMIT). Prosjektet, LowCO2Al, skal gi en tekno-økonomisk vurdering av konseptet. Sintef og NTNU er partnere.

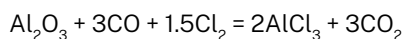
I denne elektrolyseprosessen spaltes aluminiumklorid til flytende aluminium på en grafitkatode og til klorgass på en grafitanode. Klorgassen resirkuleres til produksjon av aluminiumklorid. Prosessens store fortrinn er et betydelig lavere energiforbruk enn dagens elektrolyse. Alcoa rapporterte et energiforbruk på under 9,5 kWh/kg Al. I tillegg var hver celle betydelig mer produktive enn dagens. Det ble rapportert en celleproduksjon på 13 tonn per døgn, mens dagens store celler ligger på under 5 tonn per døgn. Den økte celleproduktiviteten gjør at elektrolysen trenger mindre plass. Disse forbedringen skyldes i stor grad at hverken anode eller katode forbrukes under elektrolysen. Man står derfor mye friere til å designe en energioptimal celle.

Alcoa rapporterte at selve elektrolysen av aluminiumklorid gikk bra. Derimot slet de med produksjonen av aluminiumklorid. Elektrolysen krever aluminiumklorid helt fritt for vann. Det finnes ikke naturlig og er krevende å lage. Den eneste kjente metoden egnet for industriell skala er såkalt karboklorering. Karboklorering er reaksjon med en blanding av karbon og klor. Alcoas prosess fulgte reaksjonen



31 <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/energieffektivisering-cat/aluminium-inerte-anoder-hall-heroult/>

Reaksjonen foregikk ved cirka 700 °C i spesielle reaktorer. Klor, Cl<sub>2</sub>, til denne reaksjonen kommer fra elektrolysetrinnene. Det var problemer knyttet til stabil drift av disse reaktorene, samt dannelse av klorerte hydrokarboner (CHC), som visstnok førte til at Alcoa la ned fabrikkene i Texas. CHC er svært potente miljøgifter. Men utgangspunkt i Alcoas problemer og det faktum at det slippes ut like mye CO<sub>2</sub> fra karbokloringsprosessen som fra Hall-Héroult prosessen, kan man spørre seg om hvorfor dette kan være en mulighet for å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til aluminiumproduksjon. Til det er det to svar. For det første kan flere av Alcoas utfordringer løses ved å bruke CO-gass istedenfor karbon til karboklorering, altså



Det er kjent at bruk av CO istedenfor karbon nærmest eliminerer dannelsen av CHC. I tillegg er det rapportert at reaksjonen også er raskere. En åpenbar utfordring er at mengden CO<sub>2</sub> som produseres dobles ved bruk av CO:

3CO<sub>2</sub> per Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for CO mot 1.5CO<sub>2</sub> for karbon.

En løsning på det siste problemet er å fange produsert CO<sub>2</sub> og bruke det til å produsere CO. Reduksjon av CO<sub>2</sub> til CO er allerede kjent teknologi og det jobbes aktivt med forbedringer siden reduksjonen er et sentralt trinn i flere CCU-prosesser. Reduksjon med hydrogen er mest utbredt, men det jobbes også med direkte elektrolytisk reduksjon. Hvis resirkulering av CO<sub>2</sub> til CO integreres i prosessen vil netto utslipp av CO<sub>2</sub> bli nær null.

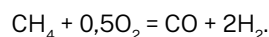
En viktig fordel med karbokloringsprosessen beskrevet over er at konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i avgassen er bortimot 100 prosent. Det er ikke behov for fangst.

Reduksjon av CO<sub>2</sub> er energikrevende og vil medføre økt behov for elektrisk kraft, enten til produksjon av hydrogen eller til elektrolytisk reduksjon. Det er anslått at behovet øker med 4-5 kWh/kg Al. Total vil prosessen kreve 13-15 kWh/kg Al, altså opptil 15 prosent mer enn dagens prosess. Men da er altså prosessen bortimot fri for CO<sub>2</sub>-utslipp.

Også for denne prosessen er tilgang på grønn kraft en forutsetning, iallfall til reduksjon av CO<sub>2</sub>. Bruker man elektrisitet fra fossile brenslere vil økning i CO<sub>2</sub>-utslippene fra produksjonen av kraft overstige besparelsene i selve prosessen.

### Kloridelektrolyse for aluminium med CO fra naturgass, H<sub>2</sub>-produksjon og CCS

Med utgangspunkt i samme prosess som beskrevet over kan det lages en variant hvor CO til karbokloreringen produseres fra naturgass. Det finnes flere måter å lage CO fra naturgass. Den mest lovende for dette formålet er partiell oksidering, såkalt POX. Da vil det i tillegg til CO også produseres betydelig mengder hydrogen. Med metan som eksempel på naturgass er POX-reaksjonen

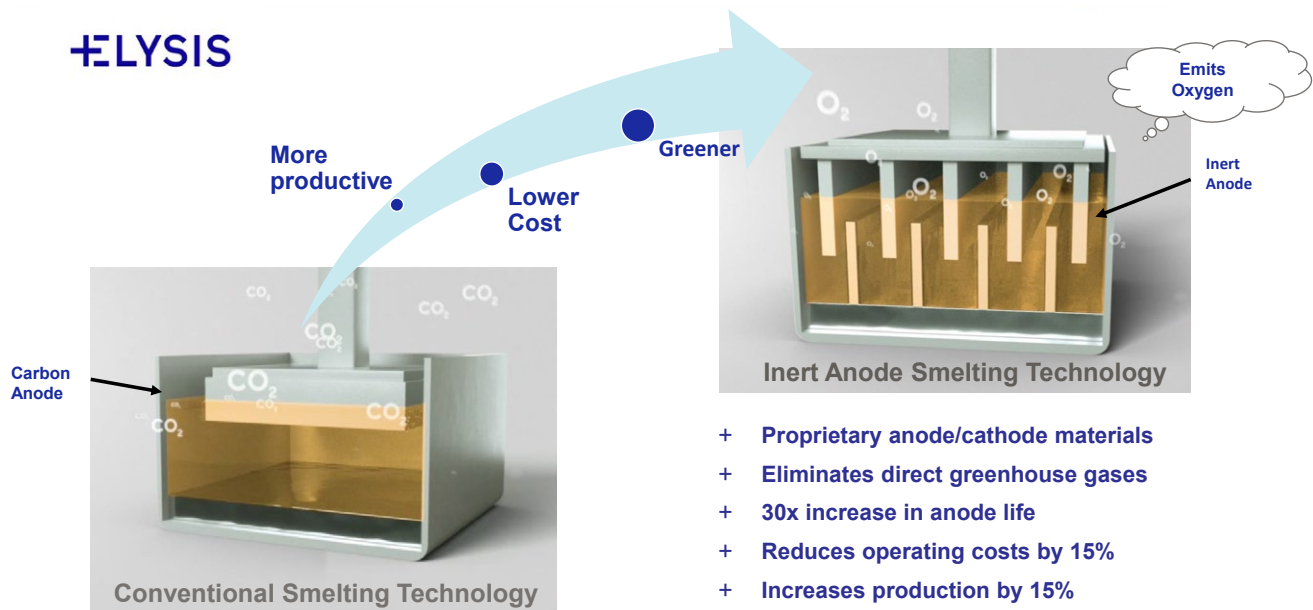


Når CO til karbokloringsprosessen er produsert med POX vil det samtidig produseres cirka 0,2 kg hydrogen for hvert kg aluminium. Dette hydrogenet kan gjøres tilgjengelig for andre formål.

Prosessen vil med bruk av naturgass til CO gi et betydelig netto CO<sub>2</sub>-utslipp, cirka 2,5 kg CO<sub>2</sub>/kg aluminium produsert. Denne CO<sub>2</sub> må lagres. Igjen er det en betydelig fordel at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i avgassen er nesten 100 prosent. Dette konseptet krever mindre elektrisk energi enn konseptet med resirkulering av produsert CO<sub>2</sub> siden POX-reaksjonen er eksoterm. Det er anslått at kraftbehovet er cirka 10 kWh/kg Al, altså betydelig lavere enn i dagens prosess. Dette konseptet inngår også i LowCO<sub>2</sub>Al-prosjektet beskrevet i foregående underkapittel.

### Resirkulering av aluminium

Aluminium er svært egnet for resirkulering og det resirkuleres i dag store mengder. Resirkulert aluminium kan erstatte mye primeraluminium i de fleste produkter. Primeraluminium er produsert fra bauksitt via aluminiumoksid og elektrolyse. Aluminium resirkuleres ved at metallet sorteres fra annet avfall. Deretter smeltes det ned og brukes til å lage nye aluminiumslegeringer. Resirkulert metall etter sortering er i dag mer forurenset enn primærmetall og kan derfor sjelden brukes alene i nye produkter. Det må blandes med rent primærmetall. Resirkuleringsprosessen krever langt mindre energi enn produksjon av primærmetall, typisk bare 5 prosent. Det i seg selv gir reduserte CO<sub>2</sub>-utslipp, spesielt dersom kraften er produsert fra fossile brennstoff. Men også der kraften er grønn gir resirkulering reduserte CO<sub>2</sub>-utslipp siden man unngår CO<sub>2</sub>-utslipp fra aluminiumoksidproduksjon og fra elektrolyseprosessen.



Elysis (et samarbeid mellom Alcoa og RioTinto) utvikler inerte anoder konsept for aluminiumproduksjon ©Alcoa

Hydro lanserte for et par år siden legeringer som består av minst 75 prosent resirkulert aluminium, CIRCAL75. Dette produktet har et sertifisert CO<sub>2</sub>-fotavtrykk på rundt 2 kg CO<sub>2</sub>/kg. Primæraluminium som er produsert med grønn kraft i elektrolysen har et fotavtrykk på litt under 4 kg CO<sub>2</sub>/kg.

En svært effektiv måte å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til produksjon av aluminium er derfor å øke andelen resirkulert metall. Dette kan først og fremst oppnås ved bedre innsamling av brukt aluminium og bedre sortering av innsamlet metall, men nye metallraffineringsprosesser, nye legeringer som bedre håndterer forurensninger og nye produkter og produktdesign som tolererer høyere innslag av resirkulert metall vil også bidra. Imidlertid er det begrenset hvor mye av etterspørselen som kan dekket av resirkulert materiale. Grunnen er at mange aluminiumsprodukter har lang levetid og derfor ikke blir tilgjengelig for resirkulering før etter flere titalls år. Med den generelle veksten i bruk av aluminium blir det et betydelig gap mellom etterspørsel og tilgjengelig skrapmengde. I dag kan bare cirka 35 prosent av verdens behov dekket av skrap.

### Anoder laget av biokarbon

Som nevnt er størstedelen av CO<sub>2</sub>-utslippene fra dagens aluminiumelektrolyse knyttet til forbruk av karbonanodene. Anoden produseres fra fossilt karbon, som oftest basert på restprodukter fra oljeraffinering. Dersom karbonet istedenfor kommer fra en fornybar kilde vil ikke CO<sub>2</sub>-utslippet regnes som klimagass. Derfor har det vært gjort forsøk med bruk av biokarbon (trekull) i anodene. Forsøkene har så langt ikke vært vellykkede. Trekullbaserte anoder har ikke gitt akseptabel drift. Det er også for lave mengder biomateriale tilgjengelig til at biokull kan bli løsningen for aluminiumsindustrien. Bare i Norge trenger bransjen bortimot 1 million tonn karbon om året.

Likevel er det fortsatt interesse for biobasert kull. Selv en begrenset reduksjon i klimagassutslipp som kan oppnås ved å erstatte noe av det fossile anodekarbonet med biokarbon er til hjelp. En mulig vei er å tilføre bioolje til eksisterende oljeraffinerier. Oljen vil da behandles som råolje og den resulterende biokoksen vil ha omtrent samme egenskaper som petrokoksen som brukes i dag. Biokarbon kan trolig også gå inn i andre deler av anodeproduksjon, og således bidra til reduserte CO<sub>2</sub>-utslipp.

## Anbefalinger

De forskjellige teknologier beskrevet over er oppsummert i tabellen under.

**Tabell 2:** Oversikt over teknologier for aluminiumproduksjon

Teknologi	Behov for fossilt karbon CCS	Pågående aktivitet (hvem og hvor)	Lab eller pilot	Retrofit <sup>1)</sup>
<b>Inerte anoder</b>	Nei	Elysis (Canada) Rusal (Russland)	Pilot	Delvis
<b>Kloridelektrolyse for Al med CO<sub>2</sub>-gjenvinning</b>	Nei	Hydro, Norge. FoU prosjekt Hydro, SINTEF og NTNU	Lab	I liten grad
<b>Kloridelektrolyse for Al med CO fra naturgass, H<sub>2</sub>-produksjon og CCS</b>	Ja, men mulig med noe biokarbon	Hydro, Norge	Lab	I liten grad
<b>Karbotermisk Al</b>	Ja, men mulig med noe biokarbon	Ingen, men ganske nylig stor aktivitet av Alcoa i Norge	Pilot	Nei
<b>Biokarbon i anodeproduksjon</b>	Nei	Alcoa, Hydro, SINTEF (Norge)	Lab	Ja
<b>Biokarbon-anoder</b>	Nei	Noe, bl.a. studier av bruk av biologiske oljer i olje- raffinering som kan gi biobasert koks (Equinor), samt noe FoU-aktivitet v SINTEF i FME HighEFF og KPN BioCarbUp	Lab/Pilot	Ja
<b>Resirkulering</b>	Nei	Nesten alle aluminiumsprodusenter samt flere FoU-prosjekter	NA	Nei

1) Retrofit betyr gjenbruk av eksisterende infrastruktur (bygg, utstyr mm)

Det er ingen åpenbar beste teknologi, noe som illustreres tydelig ved at det er, eller har vært, betydelig aktivitet for alle teknologier hos de store aluminiumsprodusentene. Det er ingen absolutte teknologiske hindre for noen av prosessene, det er demonstrert at de kan produsere aluminium. Hovedanbefalingen er derfor at alle alternativer fortjener seriøs behandling og at det fortsatt er for tidlig å peke på en vinner.

Likevel fremstår inerte anoder som den mest attraktive teknologien for å bortimot fjerne CO<sub>2</sub>-utslipp fra aluminiumproduksjon. Dersom man klarer å utvikle et anodemateriale som har tilstrekkelig levetid, lav kostnad og ikke bidrar til betydelig økt energiforbruk, har man oppnådd en prosess som knapt inkluderer karbon overhodet. En prosess basert på inerte anoder vil riktignok kreve betydelig ombygging av eksisterende aluminiumsverk, men en del av infrastrukturen kan også brukes videre. Imidlertid er det fortsatt for stor usikkerhet knyttet til et gjennombrudd for inerte anoder til at man kan satse alt på at pågående prosjekter lykkes. Anbefalingen er at disse prosjektene følges så godt som mulig og at vi i Norge posisjonerer oss for å være blant de første, om ikke den første, for å industrialisere teknologien dersom den bli tilgjengelig.

Kloridprosessen med gjenvinning av CO<sub>2</sub> har også et betydelig potensial. Teknologisk er prosessen mindre utfordrende enn inerte anoder, den består av delprosesser som alle er demonstrert på TRL 6 eller høyere, men investerings- og driftskostnader kan være for høye. En ulempe med prosessen er at nesten ingen eksisterende infrastruktur kan brukes. Det pågår nå et arbeid for å fremskaffe kostnadstall. Er de tilstrekkelig lave anbefales det å arbeide videre med prosessen med pilotering.

Et par av prosessene, karbotermisk og kloridprosess med CO fra naturgass, forutsetter bruk av fossile karbonkilder og vil derfor kreve CCS for å gi null utslipp av CO<sub>2</sub>. Noe av karbonet til disse prosessene kan riktignok komme fra biomasse, men mengde biomasse tilgjengelig ansees ikke som tilstrekkelig for å dekke hele karbonbehovet. I hvilken grad disse prosessene kan lykkes henger derfor i stor grad sammen med tilgjengelighet og kostnad for CCS på mellomlang og lang sikt (2035 og fremover).

Tilgjengelighet av CCS forventes å være ganske god i Norge, men en svært krevende konvertering av aluminiumindustrien bør ha et betydelig potensial også utenfor Norge. Det anbefales at disse teknologien også behandles som reelle alternativer, men at de må ses i sammenheng med utvikling av CCS nasjonalt og internasjonalt.

Erstatning av fossilt karbon med biokarbon er kanskje teknologien med den laveste tekniske barrieren. Det er også teknologier som kan implementeres uten store ombygninger av dagens verk og som derfor trolig kan tas i bruk raskest. Det er imidlertid lite sannsynlig at det blir nok biokarbon til at det kan erstatte alt fossilt karbon i aluminiumsproduksjonen. Men selv et begrenset bruk vil gi reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp. Det kan være interessant å bruke biokarbon i en overgangsfase til helt CO<sub>2</sub>-fri teknologi blir tilgjengelig og implementert, noe som kan ta flere tiår. Det anbefales derfor at det bør arbeides med teknologier som kan gi bærekraftig bruk av biokarbon i aluminiumsproduksjonen.

**Det er ingen åpenbar beste teknologi, noe som illustreres tydelig ved at det er, eller har vært, betydelig aktivitet for alle teknologier hos de store aluminiumsprodusentene. Det er ingen absolutte teknologiske hindre for noen av prosessene, det er demonstrert at de kan produsere aluminium. Hovedanbefalingen er derfor at alle alternativer fortjener seriøs behandling og at det fortsatt er for tidlig å peke på en vinner.**

### Barrierer

Som nevnt over er det ingen absolutte teknologiske barrierer for å bruke de nevnte teknologiene til å produsere aluminium. Barrierene er snarere økonomiske, riktignok i de fleste tilfeller koblet sterkt mot teknologien. Valget står ikke mellom svart og hvitt, det er heller snakk om gråtoner. Alle prosessene som er nevnt er allerede vurdert økonomisk og funnet tilstrekkelig interessante -gitt visse forutsetninger. Pågående og fremtidig arbeid må konsentrere seg om å verifisere eller falsifisere disse antagelsene.

Barrierene nevnt over er ganske generelle. Mer konkret har aluminiumindustrien noen sentrale barrierer for konvertering til en produksjonsprosess uten utslipp av CO<sub>2</sub>:

- Rene tekno-økonomiske barrierer. Det er ikke uten grunn at Hall-Héroult prosessen er den foretrukne etter mer enn 130 år. En ny CO<sub>2</sub>-fri produksjonsteknologi kan ikke være mye mer kostbar
- Investeringsbehov for nye anlegg og levetid på eksisterende anlegg. Nye produksjonsanlegg krever svært store investeringer og derfor har anlegg blitt bygget med en forventet levetid på mange tiår. Teknologier som tillater liten ombygning av eksisterende anlegg (retrofit) vil kunne implementeres langt raskere enn teknologier som krever stor eller full ombygning. For full ombygning eller bygging av nye anlegg basert på ny teknologi vil det ta flere tiår å konvertere eksisterende produksjon
- Typisk bransjetall for bygging av aluminiumsverk er cirka 7 000 USD/årstonn, Skal hele den norske aluminiumsproduksjonen konverteres til ny teknologi uten retrofit og det antas en liknende investeringskostnad som i dag vil det kreves 70 000 NOK/årstonn. 1 300 000 tonn/år = 91 milliarder kroner. Ved 1,5 kg CO<sub>2</sub>/kg Al gir det en investeringskostnad på 47 000 NOK/årstonn CO<sub>2</sub>.
- Tilgjengelige FoU-midler. Utvikling av ny teknologi er krevende og svært kostbart. Et ganske ferskt eksempel er Elysis for å utvikle inert anodeteknologi. Prosjektet går i Canada og kom i stand etter betydelig finansiell støtte fra Canadiske myndigheter (flere hundre millioner og stor støttegrad)
- Tilgang på biomasse til å produsere biokarbon. Selv om biokarbon teknologisk sett kan erstatte mye av dagens fossilt baserte karbon ligger det en begrensning i tilgang på biokarbon. Det er kamp om tilgjengelige bærekraftige ressurser, og det er ikke gitt at bruk i aluminiumsproduksjonen er beste bruk av biokarbon
- Betalingsvilje i markedet for aluminiumsprodukter med lavt CO<sub>2</sub>-fotavtrykk vil hjelpe på introduksjon av ny teknologi. Erfaringen så langt er at det er en viss vilje i enkelte markeder, men markedet alene vil i overskuelig fremtid ikke klare å betale merprisen som trolig kreves for å konvertere til teknologi med null CO<sub>2</sub>-utslipp.



# Hydro med ambisjoner om CO<sub>2</sub>-fritt aluminium

## Grønnere kraft



## Grønnere produksjon



## Grønnere produkter



Stadig mer av dagens aluminiumsproduksjon globalt skjer med kullbasert kraft. Kraftproduksjon er den største kilden til utslipp fra produksjon av aluminium, og dermed kan man si at industrien beveger seg i feil retning. Men i den utfordringen man står ovenfor, ligger det også muligheter.

For å gripe denne muligheten, har Hydro lansert en ny klimastrategi. Målet er å redusere utslipp gjennom hele verdikjeden. Ambisjonen for 2030 er et kutt på 30 prosent. Dette skal skje med kutt på 36 prosent i egen produksjon og 22 prosent i indirekte utslipp gjennom kraftproduksjon.

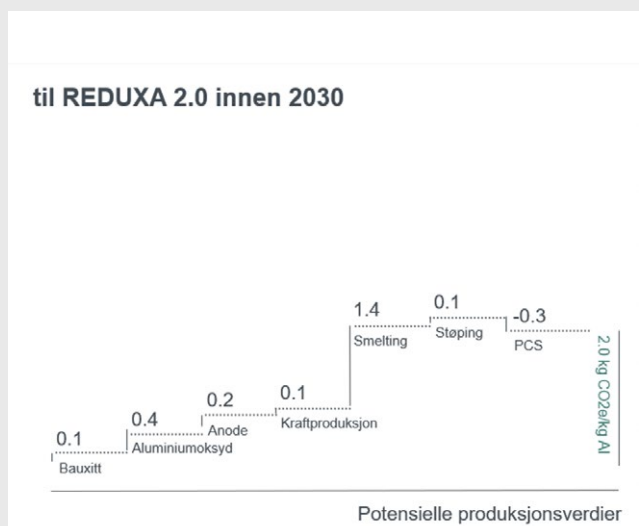
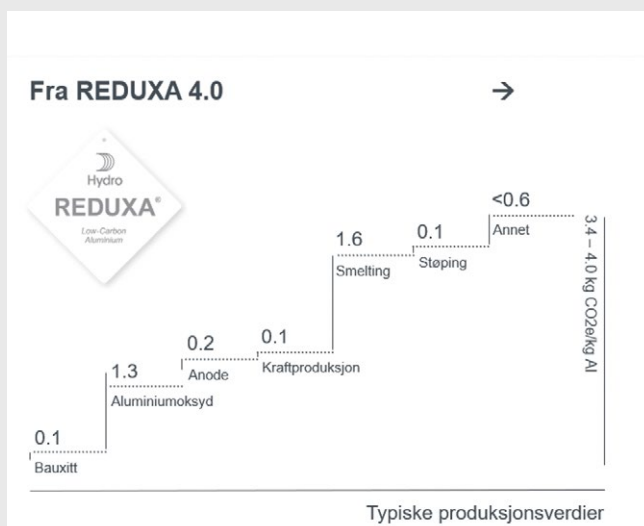
Gjennom produktet CIRCAL 75R, som består av 75 prosent gjenvunnet aluminium, er det vist at det er betalingsvilje i markedet for lavutslippsaluminium. Framover satses det derfor på produktet REDUXA, som er lavutslippsproduksjon av primær aluminium. REDUXA 4.0 er allerede sertifisert og leveres i dag. Dette produktet har et utslipp på under 4 kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium. Det er en fjerdedel av gjennomsnittlig produksjonsutslipp på verdensbasis.

Gjennom klimastrategien skal dette produktet videreutvikles til REDUXA 3.0 i 2025 og REDUXA 2.0 i 2030.

Om man ser videre, mot 2050, jobbes det videre med tre mulige veier til lavutslippsteknologi:

- Karbonfrie prosesser
- Karbonfangst og -lagring
- Biobaserte anoder

## Redusere egne utslipp i verdikjeden mot 2030 og videre



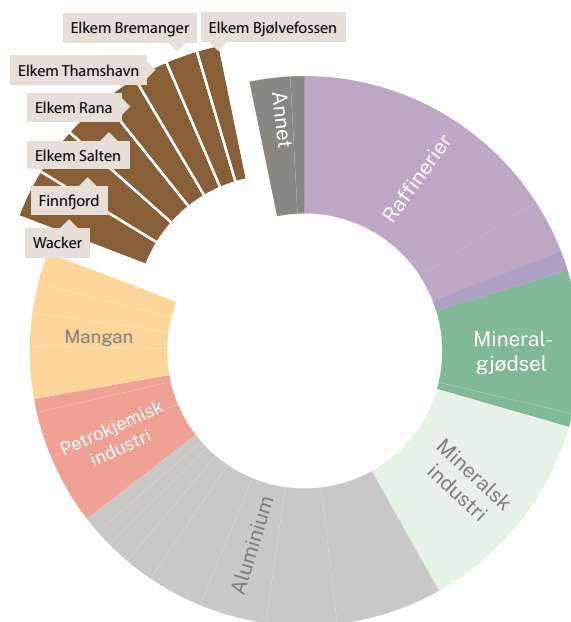
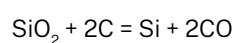
# Silisium og ferrosilisium

## Status

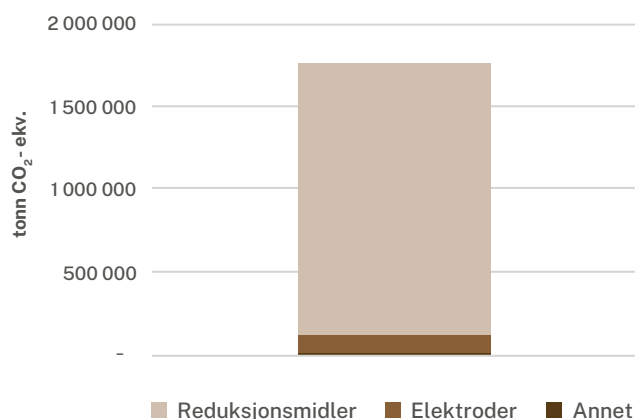
Globalt produseres metallurgisk silisium og ferrosilisium i dag utelukkende ved karbotermisk reduksjon av kvarts i elektriske smelteovner. Dette er en prosess som er forbedret og videreutviklet i over 100 år. Sammenlignet med alternative (teoretiske) produksjonsmetoder, er den i dag uovertruffen med hensyn på energiforbruk, materialeffektivitet og produksjonskostnader. Imidlertid kan dette bildet endre seg i et 2050-perspektiv, hvor produksjonen skal nærme seg klimanøytral.

Norge er en betydelig global produsent av silisium og ferrosilisium. De norske produsentene Elkem, Wacker og Finnfjord er internasjonalt ledende med hensyn på produktivitet, material- og energieffektivitet og miljøutslipp. Det norske kompetansemiljøet i industrien og ved universiteter og forskningsinstitusjoner, er verdensledende innenfor FoU på silisium og ferrosilisium. Produksjon av silisium og ferrosilisium skjer i store elektriske smelteovner, der kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) smeltes og reduseres til silisium (Si) ved hjelp av karbon (karbotermisk reduksjon). Karbonet som benyttes i smelteovnene er hovedsakelig kull og koks, men det brukes også biokarbon i form av treflis og trekull, opp til rundt 25 prosent på enkelte ovner.

Karbonmonoksid (CO) er et uunngåelig produkt i denne produksjonen. Totalreaksjonen ved 100 prosent materialutbytte er:



Figur 16: Anlegg for silisium- og ferrosilisiumproduksjon og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet



Figur 17: Utslippkilder fra norsk produksjon av silisium og ferrosilisium. Kilde: Miljødirektoratet

Produksjonen krever store mengder elektrisk energi. Energiforbruket for å produsere silisium er rundt 11 000 kWh per tonn, mens det for ferrosilisium er rundt 8 500 kWh per tonn. Smelteovnene er åpne, og CO fra reaksjonene forbrennes til CO<sub>2</sub>. Forbrenningen av prosessgassen inneholder mye energi i form av varme, og energigjenvinningsanlegg er installert på flere av de norske smelteovnene.

Det direkte utslippet av CO<sub>2</sub> fra silisiumproduksjon fra de norske verkene er rundt fem kilo CO<sub>2</sub> per kg silisium (Figur 18)<sup>32</sup>. Det spesifikke utslippet er avhengig av materialeffektiviteten i prosessen. De siste 10 til 15 årene har de norske produsentene forbedret sin materialeffektivitet på mellom 5 og 10 prosent, og dette har redusert det spesifikke utslippet av CO<sub>2</sub> tilsvarende.

Det høyere energiforbruket gjør at utslipp av CO<sub>2</sub> fra kraftproduksjonen blir en vesentlig bidragsyter til det totale utslippet av CO<sub>2</sub> fra silisiumproduksjon. Dersom produksjonen skjer med elektrisitet fra kullkraftverk vil utslippet mer enn tredobles sammenliknet med vannkraft.

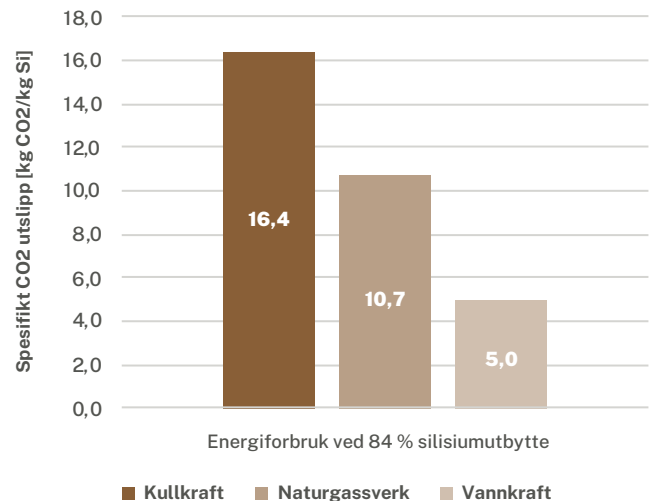
### Mulige teknologier for fremtiden

Det finnes flere mulige måter for å redusere karbonavtrykket fra produksjon av silisium og ferrosilisium. I det videre vil ikke ferrosilisium bli nevnt spesielt, da metodene som er aktuelle for silisiumproduksjon også vil være aktuelle for denne produksjonen.

#### Lukket ovn

I motsetning til andre ferrolegeringsprosesser i Norge, ble ikke silisiumovnene lukket på 1970- og 1980-tallet for å kunne utnytte uforbrent prosessgass. Dersom man lukker silisiumovnene, og forhindrer at prosessgassene forbrenner, vil CO kunne utnyttes. Dersom CO-gassen går til et brennkammer for å produsere elektrisk kraft, vil dette tiltaket ikke redusere CO<sub>2</sub>-utslippene fra silisiumproduksjonen, men man vil få noe bedre virkningsgrad i energigjenvinningen sammenliknet med energigjenvinningsanlegg på dagens smelteovner. Alle silisiumovner har i dag tilførsel av luft ved ovns-overflaten, som gjør at all prosessgassen forbrennes fullstendig.

Figur 18. Spesifikt CO<sub>2</sub>-utslipp for ulike kraftkilder



Det var, og er fortsatt, to hovedårsaker til at åpne ovner benyttes:

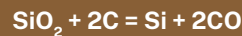
Kondensasjon av en silisiumholdig prosessgass (SiO) i ovnen virker som et lim på råmaterialene, og det må gjøres en regelmessig mekanisk staking av ovns-overflaten for å sikre at råmaterialene synker ned i ovnen. En lukket ovn gjør denne stakingen vanskelig. Den uforbrente prosessgassen har en sammensetning (CO, SiO og hydrokarbonforbindelser) som gjør at den vil kondensere og tette igjen ovnsens avgassanlegg dersom den ikke forbrennes. Dette vil også kunne gi avsetninger av polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH). En lukket silisiumprosess med uforbrent prosessgass kan ikke oppnås med dagens ovnsteknologi. Det vil kreve en betydelig forskningsinnsats, med utstrakt testing av prosessmoduler i pilotanlegg, for å kunne utvikle en ny prosesssteknologi som har et jevnt synk av materialer og som leverer uforbrent prosessgass.

32 A.Valderhaug: Sustainable production of silicon by reducing fossil CO<sub>2</sub> emissions. China Int Silicon Conference. 2016.

# Elkems mål:

## – Karbonnøytral produksjon av silisiumlegeringer i 2050

Produksjon av silisiumlegeringer skjer ved at kvarts ( $\text{SiO}_2$ ) smeltes og silisium (Si) frigjøres ved hjelp av karbon.



Karbonmonoksid (CO) er et uunngåelig resultat i denne prosessen. Smelteovnene er åpne, og CO fra reaksjonene forbrennes til  $\text{CO}_2$  som slippes ut.  $\text{CO}_2$  utslippene fra Elkems smelteovner er 1.7 millioner tonn [MT]  $\text{CO}_2$ , hvorav de norske utslippene utgjør 1.2 MT.

Økt materialutbytte i produksjonen er viktig for å redusere klimaavtrykket. Det direkte utslippet av  $\text{CO}_2$  fra silisiumproduksjon er rundt fem kilo  $\text{CO}_2$  per kg silisium, og det er sterkt avhengig av materialutbyttet i prosessen. Det siste tiåret har Elkems smelteovner forbedret dette med mellom 5 og 10 prosent, noe som har redusert det spesifikke utslippet av  $\text{CO}_2$  tilsvarende.

Bruk av fornybart biokarbon som reduksjonsmiddel i ovnene er en effektiv måte for å redusere karbonavtrykket fra silisiumproduksjon. Elkem har satt seg ambisiøse mål for å redusere de fossile  $\text{CO}_2$  utslippene ved å øke bruken av biokarbon:

### 2020:

20 prosent av utslippene fra de norske smelteverkene kommer fra fornybare biokarbon kilder

### 2030:

40 prosent av utslippene fra de norske smelteverkene skal komme fra fornybare biokarbon kilder

### 2050:

Karbonnøytral produksjon av silisiumlegeringer fra alle Elkems smelteverk.

Dagens produksjon av trekull medfører store tap av karbon i trevirket først i produksjonsprosessen og senere ved transport og bruk av materialet. Økt etterspørsel og begrenset tilgang vil kreve en mer effektiv biokarbonproduksjon der karbonet i trevirket utnyttes på en best mulig måte. Elkem har sammen med ulike forskningspartnere gjennom flere år forsket på hvordan denne prosessen kan forbedres med hensyn på å redusere tapene av karbon, og å få et sterkere biokarbon som tåler bedre mekanisk håndtering. I tillegg vil biprodukter i form av gass og væske bli utnyttet, slik at produksjonskostnadene blir ytterligere redusert.

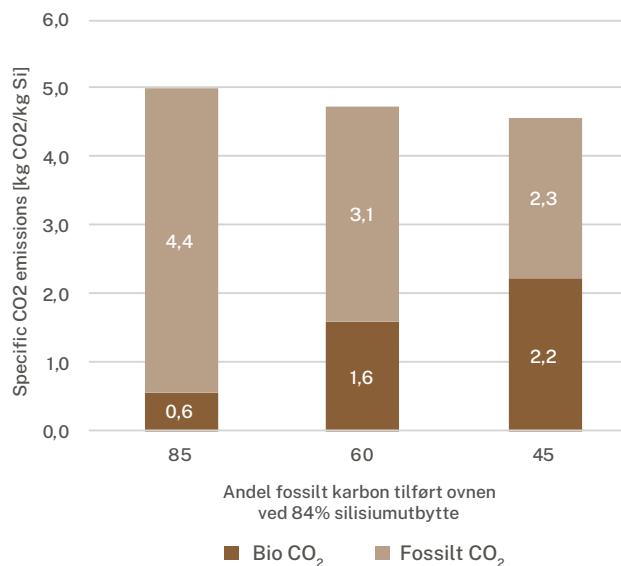
Elkem har gjennom dette arbeidet, utviklet en banebrytende teknologi for produksjon av biokarbon som er skreddersydd for bruk i smelteovner og som gir et betydelig høyere karbonutbytte og reduserte kostnader. Elkem har besluttet å investere 180 MNOK for å bygge et pilotanlegg for biokarbonproduksjon ved smelteverket i Chicoutimi i Canada. Her vil det bli gjennomført omfattende undersøkelser av den nye produksjonsprosessen og det nye produktet for å danne grunnlag for design av industrielle produksjonsanlegg. Det planlegges å bygge industrielle produksjonsanlegg for å dekke Elkems behov for biokarbon de neste årene og ulike lokasjoner i Norge er aktuelle.



### Biokarbon som reduksjonsmiddel

Biokarbon, i form av trekull og -flis, kan benyttes som reduksjonsmiddel i silisiumproduksjon. I Norge er andelen i enkelte anlegg i dag opp til 25 prosent. Elkem har som mål at mer enn 20 prosent av utslippene av CO<sub>2</sub> fra deres produksjon skal være fra biokarbon i 2020 og mer enn 40 prosent i 2030. I Sør-Amerika, hvor det er tilgang på trekull, finnes det anlegg som utelukkende benytter biokarbon i sine prosesser.

Figur 19: Spesifikke CO<sub>2</sub>-utslipp ved overgang fra kull til bærekraftig trekull



Trekull er et svært reaktivt material, og økt trekullandel vil ha en positiv effekt på materialutbyttet i smelteovnen. Men det er også et kostbart reduksjonsmiddel, sammenlignet med fossilt kull. Alt trekull som forbrukes i Norge i dag er importert.

Ved å optimalisere pyrolyseprosessen, kan man framstille et biokarbon skreddersydd silisiumprosessen. Dette vil utnytte bioressursene bedre, gi et bedre reduksjonsmiddel og muliggjøre utnyttelse av gassen som produseres under pyrolysen. Det er i dag flere forskningsprosjekter på dette området i Norge, og blant annet har Elkem et PILOT-E-prosjekt, der målsettingen er å bygge et industrielt pilotanlegg for produksjon av biokarbon, spesialtilpasset som reduksjonsmiddel i silisiumovner.

En full omlegging til bruk av biokarbon for norsk silisiumindustri vil kreve et forbruk av trevirke tilsvarende 35 prosent av dagens uttak av trevirke i Norge. Høsting av biokarbon vil også påvirke natur og miljø, og det dette må veies opp mot tilsvarende effekter av gruvedrift for å ta ut fossilt karbon.

Det er også planer om nye prosjekter for å anvende trevirke til kjemiske produkter, som for eksempel biodrivstoff. Det vil være hensiktsmessig å kombinere dette med produksjon av biokarbon av det faste karbonet, som er et biprodukt i produksjon av kjemiske produkter. På denne måten vil norsk silisiumproduksjon fortsatt ha tilgang til en viss andel norsk biokarbon.

### Nye karbonkilder – metan fra naturgass og biogass

Leveransene av kull til silisiumproduksjon er tett knyttet opp mot forbruket av kull i energiproduksjon, og strukturelle endringer som gjøres i energimarkedet, for eksempel i Europa, vil direkte påvirke tilbud og prisnivå for kull til de norske silisiumprodusentene. Siden tilgang av bærekraftig biokarbon ikke vil være tilstrekkelig, vil en framtidig norsk karbonnøytral silisiumproduksjon være avhengig av karbonfangst eller bruk av karbon fra nye kilder, eller en kombinasjon av disse. Metan er en svært interessant karbonkilde som ved prosessering både kan gi hydrogen og et karbon som kan anvendes som reduksjonsmiddel.

Elkem har gjennomført forskningsprosjekter som i laboratorieskala viste at karbondeponering fra metan på kvarts gav et svært godt råmateriale som vil kunne benyttes på dagens smelteovner, samtidig som hydrogen ble produsert.

Utnyttelse av karbon fra metan vil ha en stegvis utvikling fra bruk av naturgass til biogass eller metan produsert ved karbonfangst. Dersom man erstatter kull med et nytt materiale basert på karbondeponering på kvarts fra metan, vil CO<sub>2</sub>-utslippene fra silisiumproduksjon reduseres med inntil 25 prosent.

Helt nye prosesser hvor metan reagerer med SiO-gass er en annen mulighet som har vært testet og nå undersøkes i laboratorieskala i prosjekter under Forskningsrådets Kompetanseprosjekt for næringslivet (KPN). Denne prosessen forventes å gi samme eller større reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp som deponering av karbon på kvarts, men mer omfattende undersøkelser må til for å kvantifisere miljøeffekter



## Ved å optimalisere pyrolyseprosessen, kan man framstille et biokarbon skreddersydd silisiumprosessen. Dette vil utnytte bioressursene bedre, gi et bedre reduksjonsmiddel og muliggjøre utnyttelse av gassen som produseres under pyrolysen

### Metallotermisk produksjon av silisium

Det er i prinsippet mulig å produsere silisium ved å bruke metaller med høyere tilknytning til oksygen enn silisium som reduksjonsmiddel, såkalt metallotermisk produksjon. Dette vil gi en silisiumproduksjon med et svært lavt direkte karbonavtrykk, men framstillingen av de alternative reduksjonsmidlene vil kunne ha et betydelig karbonavtrykk. I en kombinasjon med resirkulering av metaller, vil metoden være aktuell. De mest aktuelle materialene er aluminium, magnesium og kalsium.

- Ulike versjoner av aluminotermisk reduksjon av  $\text{SiO}_2$  i fast fase har blitt grundig undersøkt i laboratorieskala med tanke på solcellesilisiumproduksjon. *SisAl* er en aluminotermisk produksjonsprosess på TRL 5 nivå som er under utvikling i EUs Horizon 2020 program. I prosessen benyttes aluminiumskrap og dross for å redusere  $\text{SiO}_2$  i flytende  $\text{SiO}_2$ -CaO slag med flytende Si-legering og flytende CaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$  basert slag som produkt. Prosjektet har som mål å demonstrere produksjon i industrielt relevant skala innen 2024.
- Ved magnesiotermisk reduksjon av  $\text{SiO}_2$ , som i de fleste studier foregår i fast fase, vil man få silisium i form av et nanopulver, og dette kan være en mulig metode for å produsere nanosilisium direkte til spesielle anvendelser. Metoden er per i dag på < TRL5 og studeres bare i laboratorieskala.
- Calsiotermisk reduksjon av  $\text{SiO}_2$  vil kunne gi et silisiumprodukt i nanoform tilsvarende som magnesiotermisk. Metoden er per i dag på < TRL5 og studeres bare i laboratorieskala.

Metallotermiske prosesser er eksoterme og vil derfor typisk redusere energiforbruket i produksjon. I for eksempel *SisAl*-prosessen vil det beregnede spesifikke energiforbruket tilsvare cirka 30 prosent av dagens ovnsteknologi med et direkte  $\text{CO}_2$ -utslipp på mindre enn 10 prosent av dagens, gitt fornybar kraftproduksjon og at de resirkulerte råmaterialene regnes som  $\text{CO}_2$ -frie.

### Elektrolytisk produksjon av silisium

På 2000-tallet var det som følge av den økte etterspørselen etter silisium til solcelleproduksjon, stor forskningsaktivitet internasjonalt for å utvikle nye produksjonsmetoder for silisium med høy renhet. Flere av disse benyttet elektrokjemiske prosesser for silisium, men ingen av prosessene er tatt forbi laboratorie- eller pilotskala. Bruk av elektrolyse i silisiumproduksjon er hovedsakelig undersøkt for produksjon av silisium til solceller, hvor renheten er en utfordring. For metallurgisk silisium, som ikke har de samme kravene til renhet, kan dette være enklere. Muligheten for elektrolytisk produksjon av silisium vurderes nå i KPN-prosjektet KPN Reduced  $\text{CO}_2$ .

Elektrolytisk produksjon av silisium kan være et energi-besparende alternativ til dagens kjemiske metoder for fremstilling av silisium med høy renhet. Hvis det kan benyttes en inert anode, og hvis strømkilden er fornybar, kan silisiumelektrolyse foregå helt uten utslipp av  $\text{CO}_2$ . Ulike elektrolytter er blitt undersøkt;

- fluorid/kryolittbasert elektrolytter,
- oksidbaserte elektrolytter og
- kloridbaserte ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$ ) elektrolytter.

En viktig årsak til at elektrolyseprosesser ikke har blitt industrialisert, er det høye smeltepunktet til silisium (> 1 400 °C) i forhold til andre metaller. Dette hindrer dannelse av flytende silisium ved vanlige elektrolysetemperaturer (< 1 000 °C). Den høye temperaturen vil gi store materialutfordringer og i tillegg er flere av elektrolyttene svært korrosive.

Kloridelektrolytt-prosessene vil kunne gi en betydelig lavere driftstemperatur, men her vil silisiumet bli avsatt som pulver eller i fast form ved katoden og ytterligere rensetrinn kan være nødvendig.



For at elektrolyse skal kunne erstatte dagens produksjon av metallurgisk silisium, er man avhengig av et gjennombrudd i teknologien for inerte elektroder. Ved bruk av en karbonanode vil energiforbruket og karbonavtrykk ved elektrolytisk produksjon være i samme størrelsesorden som for dagens smelteovner. Ved bruk av gassanode, som er en umoden teknologi og har store teknologiske utfordringer, vil utslippet av CO<sub>2</sub> kunne halveres. Inert anode vil gi null utslipp av CO<sub>2</sub>, men energiforbruket vil øke med rundt 25 prosent, siden den kjemiske energien som tilføres via karbon må erstattes med elektrisk energi.

Imidlertid kan elektrolyse i framtiden bli aktuell for høyrene markedssegmenter, som silisium til elektronikk og solceller. I flere av de nye anvendelsene av silisium, for eksempel til batterier, benyttes silisiumpulver i nanomålestokk for å få de ønskede material-egenskapene. Dette pulveret produseres i dag med knusing og nedmaling av utstøpt metallurgisk silisium, med et betydelig materialtap. Elektrolyseprosessene som produserer fast silisium i pulverform, kan bli aktuelle for disse anvendelsene.

## Hydrogenplasma kan være en mulig erstatning for karbon som reduksjonsmiddel

### Hydrogen som reduksjonsmiddel

Muligheten til å bruke hydrogen i silisiumproduksjon i stedet for karbon har vært undersøkt i en rekke ulike forskningsprosjekt de siste årene. Siden hydrogen har et lavere potensiale for reduksjon enn karbon, er det store utfordringer knyttet til dette. Det er ingen klare teknologier som skiller seg ut, og ulike muligheter for bruk av hydrogen undersøkes nå i forskjellige forskningsprosjekter. Felles for alle teknologiene er et lavt TRL-nivå og at det er en lang vei fram til mulig industriell realisering. Bruk av hydrogen har et stort potensial for å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp, så det er viktig å undersøke disse for å kunne realisere bruk innen 2050. Gjennom KPN Reduced CO<sub>2</sub> undersøker man hvordan hydrogen påvirker de forskjellige kjemiske reaksjonene for framstilling av silisium.

Et annet eksempel på en mulige nye teknologier er bruk av hydrogenplasma. Dette undersøkes nå av SINTEF i et internt prosjekt. Plasma er gass med så stor energi at gassmolekylene rives fra hverandre til ioner og andre radikaler. I denne tilstanden er plasmaet langt mer reaktiv enn den tilsvarende gassen. For silisium kan hydrogenplasma i teorien redusere kvarts til SiO ved temperaturer rundt 1 000 °C, mens den samme reaksjonen med hydrogen ikke vil være termodynamisk mulig under 2 650 °C. Hydrogenplasma kan derfor være en mulig erstatning for karbon som reduksjonsmiddel selv om hydrogengass ikke kan være det. Litt forenklet kan man si at man kompenserer for den lavere reaktiviteten i hydrogen sammenlignet med karbon, med å tilføre energi, som omformer hydrogenet til plasma. På denne måten kan man bytte ut karbon med (elektrisk) energi og hydrogen.

Dersom hydrogenet er produsert ved vannelektrolyse, og både vannelektrolysen og plasmaproessen er basert på fornybar energi, vil det ikke være noen CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til silisiumproduksjonen ved hydrogenplasma. Konseptet er nytt, og de første utfordringene blir derfor å undersøke om konseptet er teknologisk mulig. Fram mot en eventuell industrialisering vil det i neste runde bli viktig å kunne arbeide med volumstrømmer som er store nok til å være betydningsfulle sammenlignet med dagens smelteovner.



Silisium har en viktig rolle i veien fram til lavutslippssamfunnet. Anvendt i batterier vil silisium kunne øke batterieffektiviteten betydelig © Elkem.

### Direkte bruk av prosessgass - Prosessgassen fra silisiumovner kan utnyttes for algeproduksjon

Finnfjord og Universitetet i Tromsø har gjennomført vellykkede tester av å bruke alger til å binde CO<sub>2</sub> i prosessgassen. Prosjektet disponerer nå verdens største algebioreaktor (300 000 liter) og er nå i pilotskala. Dette er omtalt i rapportens CCU-kapittel og som en suksesshistorie.

### CO<sub>2</sub>-håndtering av prosessgass

Utslippene er på flere smelteverk konsentrert i punktkilder, og karbonfangst kan derfor være en framtidig mulighet. Konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i avgassen er imidlertid lav, typisk 3 til 4 prosent. Dette vil være en betydelig kostdriver for karbonfangst, og konsentrasjonen bør to-tredobles for å oppnå et realistisk kostnadsnivå. Det gjennomføres i dag forskningsprosjekter, blant annet ved FME HighEff, der målsettingen er for å øke CO<sub>2</sub> innholdet i avgassen blant annet gjennom å resirkulere prosessavgassen. De store mengdene tilgjengelig energi fra forbrenning av prosessgassene fra smelteovnene vil kunne anvendes ved karbonfangst og dermed redusere fangstkostnadene.

Selv om den forbrente og filtrerte prosessgassen inneholder relativt små mengder av svovelforbindelser, NO<sub>x</sub> og partikler, vil de redusere effektiviteten av karbonfangsten betydelig. Installasjon av ytterligere rensetrinn av prosessgassen vil være en forutsetning for å kunne implementere karbonfangst.

Alle de norske smelteverkene er plassert ved gode kaianlegg, slik at de enkelt vil kunne kople seg på det framtidige norske infrastrukturen for karbonfangst. Karbonfangst er behandlet i Prosess21-rapporten Karbonfangst.

## Anbefalinger

Karbotermisk reduksjon i smelteovner er i dag enerådende for produksjon av silisium og ferrosilisium. Ingen av de alternative prosessene er industrielt utviklet. Det vil kreve tid og ressurser å utvikle og industrialisere disse.

Det er derfor trolig at en framtidig karbonnøytral produksjon de nærmeste tjue årene fortsatt vil være basert på karbotermisk reduksjon i dagens prosess-teknologi, der det benyttes fornybare karbonmaterialer i størst mulig grad. Dette vil bli kombinert med energigjenvinning og karbonfangst fra avgassen med lagring eller utnyttelse av avgassen til andre formål så som algeproduksjon.

Bruken av biokarbon som reduksjonsmiddel vil være begrenset av tilgangen både i Norge og internasjonalt. Tilgangen på fossile karbonkilder vil bli redusert og kostnadene øke betydelig som følge av utfasing av kull i energisektoren, spesielt i Europa. I et 2050-perspektiv med mål om full karbonnøytralitet, kan det derfor være mulig at noen av produksjonsalternativene blir aktuelle som f.eks. metallotermisk eller hydrogen. For å utvikle de nye prosessene til industrielt nivå, vil det være nødvendig med fokusert innsats over en 20 års periode på hele utviklingsløpet fra laboratorium til ny industri. Utviklingsarbeidet vil i første omgang omfatte grunnleggende forskning i laboratorieskala på mulige prosesser med fokus på kjemiske reaksjoner, energiforbruk, karbonavtrykk og materialutbytter. Dette vil så gå videre med etablering av prosessdesign, verifisering av prosess og utstyr i industrielle piloter, og så i siste fase etablering av nye produksjonsanlegg fram mot 2050.

For å utvikle de nye prosessene må det satses ressurser på hele utviklingsløpet fra grunnleggende undersøkelser til industrialisering. Det anbefales derfor at det lages et målrettet program for hvordan dette skal gjøres. Norge mangler i dag forskningsinfrastruktur i benke- og pilotskala for å kunne studere og utvikle de nye produksjonsprosessene. Det anbefales derfor å bygge opp nødvendig infrastruktur for å kunne gjennomføre dette. For å skape reelle alternativ til dagens prosess bør det i tillegg gjennomføres storskala demonstrasjonsprosjekter på de alternative produksjonsmetodene; metallotermisk og elektrokjemisk produksjon og bruk av hydrogen som reduksjonsmiddel.

De vurderte fremtidige teknologiene for silisiumproduksjon er oppsummert i Tabell 3.

## Barrierer

Utvikling av lavutslipps-produksjonsteknologi for silisium og ferrosilisium vil kreve en langsiktig innsats over mange år i form av grunnleggende og anvendt forskning i ulike skalaer, testing av prosessutstyr i lab og pilotskala og industriell verifikasjon av prosessene.

Norge mangler infrastruktur for forskning ut over laboratorieskala for utvikling av alternative prosesser for silisiumproduksjon. Dette gjelder også videreutvikling av dagens produksjonsprosess med karbotermisk reduksjon i form av endret prosessdesign.

Utviklingskostnadene for nye prosesser vil være betydelige, anslagsvis flere milliarder kroner. De norske produsentene opererer i et internasjonalt marked med begrensede marginer og vil ikke kunne finansiere enn slik utvikling alene.

Det vil også være investeringer i milliardklassen for å etablere produksjon ved de nye teknologiene enten i form av ombygginger av eksisterende anlegg eller «green field» anlegg.

De nye prosessene vil ha et kostnadsnivå (og energiforbruk) som er høyere enn dagens smelteovner. I tillegg til en betydelig usikkerhet i oppstart av ny prosess-teknologi. Disse investeringene vil derfor ikke være lønnsomme i en normal økonomisk vurdering.

Tabell 3: Oversikt over teknologier for produksjon av silisium og ferrosilisium

Teknologi	Tidspunkt industrielt anlegg	Pågående aktiviteter	Teknologisk og kommersiell status Mulig karbonavtrykk
Biokarbon	2020-2025	Elkem: Industriell pilot bygges for produksjon av biokarbon.  Elkem: Målsatt andel biokarbon i produksjon; 20 prosent i 2020 og 40 prosent i 2030	Det er forventet knapphet og økt kostnadsnivået for trevirke for produksjon av biokarbon som følge av overgang til biobaserte produkter i flere bransjer.
Direkte utnyttelse av prosessavgass	2020-2025	Finnfjord: Industriell pilot for algeproduksjon.	Vellykket testing i pilotskala. Større anlegg under bygging. Begrenset reduksjon i karbonavtrykk ved bruk av fossilt karbon på ovnen.
Karbonfangst	2025-2030	Elkem: Mulighetsstudie og FoU prosjekt.  FME HighEff. NTNU PhD studie om økt CO <sub>2</sub> innhold i avgass ved resirkulering.	Muligheter for og krav ved karbonfangst evalueres ved flere fabrikker. Lav CO <sub>2</sub> innhold og relativ høy andel forurensninger i avgassen vil være en utfordring ved selve karbonfangsten.
Lukket ovn	>2030	Elkem: FoU prosjekt SiNoCO <sub>2</sub> avsluttes 2021.	Store tekniske utfordringer som følge av forhold i prosessen og prosessgass. Lite trolig at det blir realisert. Karbonfangst mer trolig alternativ.
Alternative karbonkilder (metan)	> 2030	FFF/NTNU/SINTEF: Evalueres i KPN Reduced CO <sub>2</sub>  Elkem gjennomfører FoU prosjekt	Bruk av rent karbon fra naturgass vil gi 25 prosent reduksjon i CO <sub>2</sub> -utslipp sammenliknet med bruk av kull. Biogass kan være en mulig kilde.
Metalltermisk reduksjon	>2030	NTNU: EU prosjektet SisAl basert på resirkulerte/sekundære Al kilder.	Er blitt demonstrert i 300 kilo skala. Karbonavtrykket vil være avhengig av CO <sub>2</sub> avtrykket for å produsere de aktuelle reduksjonsmetallene. Bruk av EoL aluminium og dross vil gi synergieffekter og lavt CO <sub>2</sub> avtrykk.
Elektrolyse	>2040	FFF/NTNU/SINTEF: Evalueres i KPN Reduced CO <sub>2</sub>  Tidligere FoU prosjekter for solcelleproduksjon	Langt fra industrielle prosesser i dag. Karbonavtrykk avhengig av inert elektrode.
Hydrogen	>2050	FFF/NTNU/SINTEF: Evalueres i KPN Reduced CO <sub>2</sub> og SINTEF's HyPla	Forskningsstadiet, svært lav TRL. Plasmalektrode kan være en mulighet



## KPN Reduced CO<sub>2</sub> emissions in metal production

I følge norsk prosessindustri sitt veikart, skal produksjon av silisium, jern- og manganlegeringer være CO<sub>2</sub>-nøytral innen 2050 og samtidig øke produksjonen til det dobbelte av 2016-nivå. Slike målsettinger nås ikke uten innsats.

SINTEF leder KPN-prosjektet Reduced CO<sub>2</sub>, og norsk metallindustri er representert ved mangan- og silisiumprodusentene Eramet, Elkem, Wacker og Finnfjord samt TiZir som produserer titanoksid. NTNU er forskningspartner i prosjektet som finansieres av Forskningsrådet og industripartnerne.

Målet med prosjektet er å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra metallproduksjon. Norsk prosessindustri er generelt svært energieffektiv og fornybar vannkraft benyttes som energikilde. Norge er blant de landene i verden med lavest CO<sub>2</sub>-utslipp per tonn produsert silisium og ferrolegeringer.

At vi bruker vannkraft som energikilde har mye å si for CO<sub>2</sub>-utslippet, men selve prosessene for metallproduksjon som brukes i Norge i dag er dessuten allerede godt optimaliserte.

Ytterligere optimalisering vil derfor ikke bidra til de store utslippsreduksjonene. Her må det altså tenkes nytt!

Det største bidraget til CO<sub>2</sub>-utslipp fra metallproduksjon kommer fra fast karbon som tilsettes som reduksjonsmiddel i prosessen hvor metalloksider omdannes til rent metall og CO<sub>2</sub>. Ofte er det fossilt karbon som tilsettes lysbueovn for å fremstille metaller. Dette prosjektet dreier seg derfor i hovedsak om å finne alternativer til fossilt karbon. Biokarbon, hydrogen og andre gasser er alternativer som vies stor plass i prosjektet. Et biokarbon testsenter hvor biokarbonets egenskaper og effekt på lysbueoven blir analysert, er opprettet. Videre er det stor aktivitet på hydrogen som alternativt reduksjons- eller forreduksjonsmiddel og andre karbonholdige gasser som reduksjonsmiddel eller som karbonkilde for å øke tettheten i biokarbon. Sist, men ikke minst, ser prosjektet på nye teknologier. Finnes det alternative metoder som er realiserbare på sikt? Det ønsker vi å finne ut. Vi vet ikke helt hvordan metallindustrien vil se ut i fremtiden, men at den vil komme til å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene sine, det er vi sikre på.





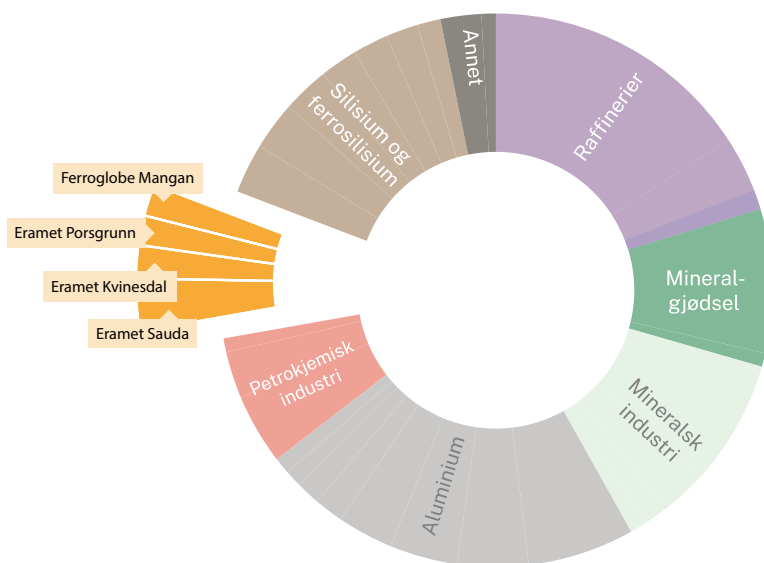
# Mangan og manganlegeringer

## Status

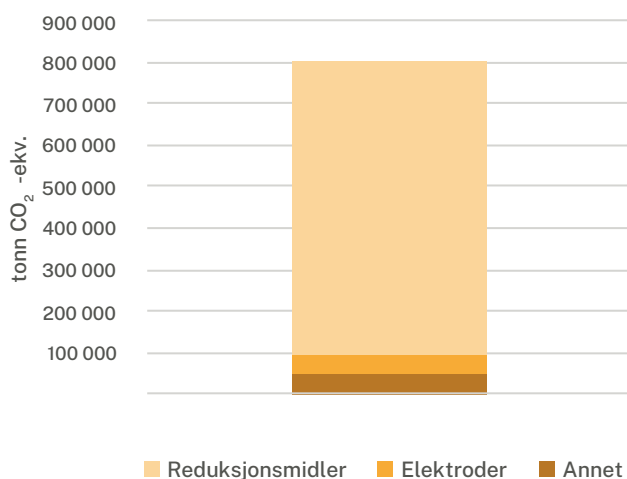
Norge er en viktig global produsent av manganlegeringer, med rundt 3 prosent av verdens produksjon. Til sammen utgjør dette cirka 600 000 tonn i året<sup>33</sup>. De to norske produsentene, Eramet Norway og Ferroglobe Mangan Norge, er begge eid av internasjonale selskap, henholdsvis det franske konsernet Eramet og spansk/amerikanske Ferroglobe. Eramet Norway har smelteverk i Sauda, Porsgrunn og Kvinesdal, mens Ferroglobe Mangan har et smelteverk i Mo i Rana. Kompetansen på produksjon av manganlegeringer som er bygget opp hos norske produsenter og kompetansemiljø gjennom flere årtier, har gjort Norge til et ledende produsentland både innen miljøvennlig produksjon og produktkvalitet.

De to vanligste kvalitetene av manganlegeringer er silikomangan (SiMn) og ferromangan (HCFeMn). Begge produseres i Norge, både som standardkvalitet og som en rekke spesialprodukter. Norge har cirka 15 prosent<sup>33</sup> av verdensmarkedet av raffinert ferromangan. Elektrolytisk mangan produseres ikke i Norge.

Manganlegeringer, SiMn og HCFeMn produseres ved karbotermisk reduksjon i store elektriske smelteovner på 10-45 MW. Det finnes en lang rekke ulike mangankilder. Både mangankilden som brukes og hvilken manganlegering som produseres vil påvirke energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp.



**Figur 20:** Anlegg for produksjon av mangan og manganlegeringer og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet



**Figur 21:** Utslippskilder i manganproduksjon. Kilde: Miljødirektoratet

<sup>33</sup> Basert på 2019 «Other Europe» produksjon fra IMnI Market analysis – August 2020

Energiforbruket er cirka 2 500 til 3 000 kWh/ tonn HCFeMn og 3 500 til 4 000 kWh/tonn SiMn. Det brukes mellom 300 og 400 kg karbon per tonn metall, i all hovedsak i form av koks. For hvert tonn med manganlegering produseres det i tillegg cirka ett tonn med slagge som hovedsakelig er en CaO-SiO<sub>2</sub>-blanding. Slaggen fra HCFeMn-produksjon inneholder en del mangan og brukes videre i SiMn-produksjon. Slaggen fra SiMn har flere anvendelser blant annet i sement og det jobbes med å finne flere anvendelser av dette produktet.

Med de teknologiene som nå brukes for å produsere manganlegeringer, er det nødvendig med fast karbon. Dette trengs både for å fjerne oksygen og som elektrisk leder. Ovner for manganproduksjon kan være åpne slik at CO-gass brenner til CO<sub>2</sub> på toppen av ovnen eller lukket slik at det produseres en CO/CO<sub>2</sub> blanding med opptil 70 prosent CO. Lukkede ovner er standarden i Norge i dag. Dette gir mulighet til å utnytte kjemisk energi i avgassen. Det gir også store muligheter når det gjelder karbonfangst og bruk (CCU) eller karbonfangst og lagring (CCS). I dag forbrennes avgassene og forårsaker CO<sub>2</sub>-utslipp, eller gass selges til og brukes av eksterne bedrifter. Prosessen for produksjon av manganlegeringer er grundig beskrevet i lærebøker<sup>34,35</sup> skrevet av det norske fagmiljøet.

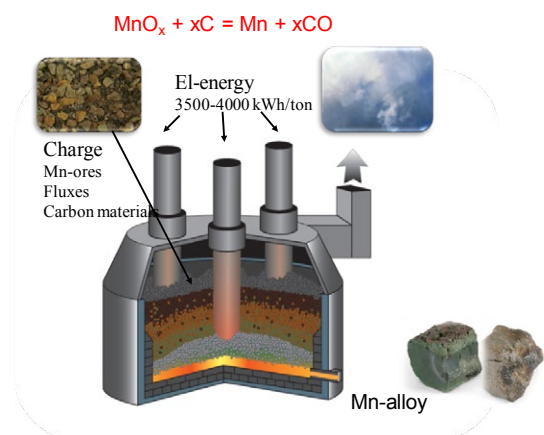
Utslippene av CO<sub>2</sub> fra manganproduksjon er en kombinasjon av utslipp fra prosessen, fra produksjon av elektrisiteten brukt i prosessen og fra koks- og sinterproduksjon (Figur 22). Som for annen prosessindustri i Norge, bidrar fornybar vannkraft til lave utslippstall for norsk manganproduksjon, sammenlignet med for eksempel produksjon i Kina.

### Mulige teknologier for fremtiden

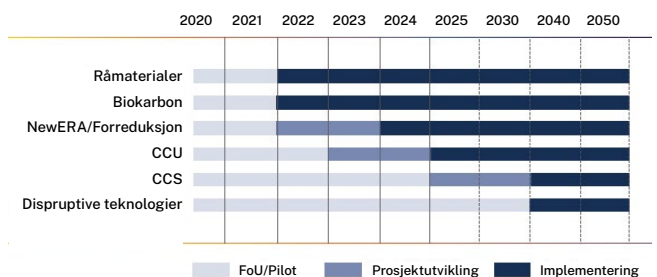
Det vurderes flere mulige teknologier for å få ned CO<sub>2</sub>-utslippene fra manganproduksjon. Dette kan være teknologier basert på eksisterende prosesser eller helt nye teknologier. Eramet Norway har en uttalt målsetting om å redusere sine CO<sub>2</sub>-utslipp med 43 prosent innen 2030 og 80 prosent innen 2050, sammenlignet med 2005-nivå. For å nå disse målene, har et veikart med tilstøtende prosjekter blitt utviklet (Figur 23)<sup>36</sup>.

Ved Eramet deles teknologier basert på eksisterende prosess inn i forbehandling, prosess, energigjenvinning etter ovn samt CCU- og CCS-prosesser etter ovn.

**Figur 22:** Elektrisk smelteovn for produksjon av manganlegeringer. Kilde: Olsen, S.E., Olsen, S., Tangstad, M. and Lindstad, T., 2007. Production of manganese ferroalloys. Tapir Academic Press.



**Figur 23:** Forenklet veikart for CO<sub>2</sub>-reduksjon for Eramet Norway. Kilde: Eramet Norway



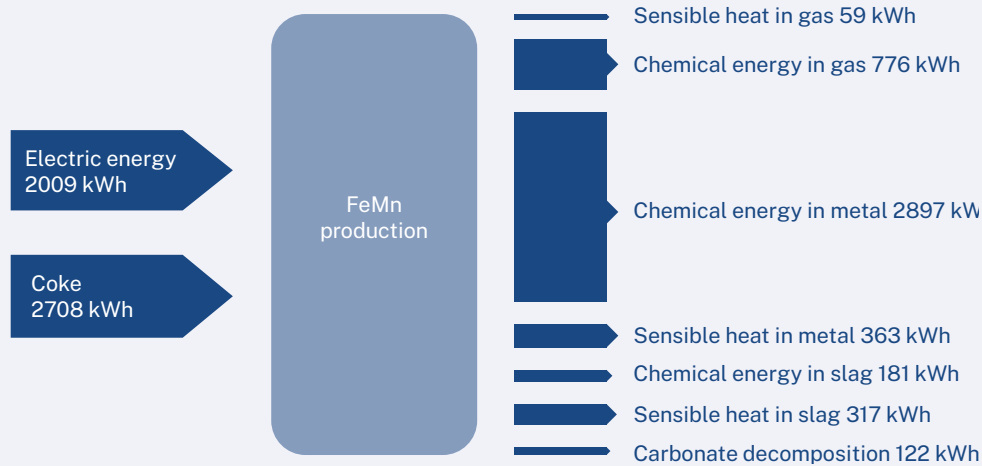
Siden produksjon av manganlegeringer i Norge gjøres i lukkede ovner, er avgassen en blanding av CO og CO<sub>2</sub> og det er ikke i samme grad som i andre prosesser, for eksempel silisiumproduksjon, nødvendig å fjerne nitrogen og å oppkonsentrere gassen i forbindelse med karbonfangst. Det høye innholdet av CO gjør også at gassen har et høyt energiinnhold som vist i Figur 24. Gassen kan derfor brukes til elektrisitetsproduksjon og som energikilde for andre prosesser, slik som gjøres ved Eramet Norway Kvinesdal og i Mo Industripark. Selv om CO<sub>2</sub> slippes ut, kan strømproduksjon erstatte noe fossilbasert elektrisitet. I det følgende er kun teknologier med potensiale til å redusere totalt forbruk av fossilt karbon, og dermed utslipp av fossilt CO<sub>2</sub>, omtalt.

<sup>34</sup> Olsen, S.E., Olsen, S., Tangstad, M. and Lindstad, T., 2007. Production of manganese ferroalloys. Tapir Academic Press.

<sup>35</sup> Tangstad, M., 2013. Metal production in Norway. Akademika, Trondheim.

<sup>36</sup> <https://eramet.no/baerekraftrapport/>

Figur 24: Energiflyt for HCFeMn i en lukket smelteovn



### Biokarbon som reduktant

Erstatning av fossile karbonmaterialer med biokarbon vurderes som den eneste teknologien som alene kan redusere manganindustriens CO<sub>2</sub>-utslipp i en størrelsesorden av 40 prosent i et 2030-perspektiv. Dette er fordi teknologien vurderes til å kunne utvikles og brukes på tvers av alle eksisterende manganovner i drift i dag, i motsetning til andre opsjoner som enten krever vesentlig omlegging av produksjon eller ikke har et tilstrekkelig potensial for CO<sub>2</sub>-reduksjon.

Norsk manganindustri bruker per i dag ikke biobaserte reduksjonsmidler. Dagens kommersielle trekull har mange egenskaper som i utgangpunktet ikke egner seg til bruk i dagens store lukkede ovner i Norge: lav styrke, høy andel finstoff og høy reaktivitet. Derfor er det betydelig utvikling som skal til både for å utvikle biokarbon som er bedre egnet til manganlegeringsproduksjon og oppgradere produksjonsanlegg til bruk av biokarbon. Industrien har ervervet fundamental kunnskap om hele verdikjeden for utnyttelse av biomasse til metallurgiske applikasjoner som danner nødvendig grunnlag for den videre forskningen innenfor biokarbon.

Utvikling av et biokarbonmateriale skreddersydd for manganproduksjon utredes nå i flere prosjekt, som EU-prosjektet BioCoke4Fal, hvor Eramet og SINTEF er med, og de norske forskningsprosjektene IPN Pyrogass med Norske Skog og KPN BioCarbUp og KPN Reduced CO<sub>2</sub>, hvor både silisium- og aluminiumsprodusenter er med. Disse prosjektene har gitt mye kunnskap om biokarbon, men det finnes fortsatt ikke biokarbonkvalitet eller teknologi som gjør at biokarbon kan erstatte fossilt kull i produksjon av manganlegeringer.

Tilgjengeligheten av råstoff for biokarbonproduksjon må også tas med i vurderingen av biokarbon som et alternativ for koks til manganproduksjon.

### Forbehandling eller forreduksjon av malm

En viktig kilde til variasjon i CO<sub>2</sub>-utslipp, er at det inne i ovnen dannes CO<sub>2</sub> som når temperaturen er over 800 °C reagerer med karbon. Dette øker karbonforbruket og krever i tillegg ekstra energi.

Med forbehandling i en egen enhet utenfor ovnen hvor det ikke er karbon til stede, kan dette unngås. Ved samtidig å tørke og varme opp råvarene vil forbruket av elektrisk energi og relaterte CO<sub>2</sub>-utslipp reduseres.

CO-rik avgass fra smelteovn har et høyt innhold av kjemisk energi og er en aktuell energikilde i forbehandling. Aktuelle teknologier for bruk av CO-rik avgass undersøkes og utvikles nå i EU-prosjektet PreMa, hvor Eramet og FerroGlobe deltar, og SINTEF er koordinator. Det forventes her å ha testet teknologier i pilotforsøk i semi-industriell skala innen 2023. I tillegg til bruk av CO-rik ovnsgass undersøkes muligheten for å bruke termisk sol eller biokarbon som energikilde.

Hydrogen er en annen aktuell reduktant, og muligheten for bruk av hydrogen i forreduksjon undersøkes i forskningsprosjekt som KPN Reduced CO<sub>2</sub>.

Forbehandling av malm kan fremme forreduksjon i ovnen, selv uten en dedikert forreduksjonsenhet som beskrevet tidligere. Basert på forskningsresultater som har demonstrert hvilke tiltak som kreves, har Eramet Norway planer om å bygge og drive et anlegg til å tørke og sikte malm og agglomerere fines, gjennom NewERA-prosjektet.

### Bruk av hydrogen og biogass

Mangan lar seg ikke redusere med hydrogen under vanlige industrielle termodynamiske forhold, men bare til MnO. Utfordringer og status når det gjelder bruk av hydrogen er lik det som er beskrevet for silisium, og manganindustri deltar i samme samarbeidsprosjekter for å utvikle teknologien.

Biogass har metan som hovedreduksjonsmiddel. Derfor kan utvikling av bruk av biogass i manganindustrien bygges på kunnskapen ervervet i KMB GasFerroSil. Grunnforskning på bruk av biogass pågår i KPN Reduced CO<sub>2</sub>.

Bruk av gass for å produsere manganlegeringer direkte krever både teknologiske utviklinger og betydelig omlegging av dagens produksjon.

### Metallotermi

Isolert sett vil metallotermisk manganproduksjon ha tilnærmet null CO<sub>2</sub>-utslipp innen scope 1 og 2 av CO<sub>2</sub>-regnskapet. En utfordring er at alle metaller som kan redusere manganoksider fremstilles ved bruk av fossilt karbon. Derfor, for å få en reduksjon av det totale karbonfotavtrykket (inkludert scope 3), må det enten brukes metaller som ellers blir tapt eller dårlig utnyttet (avfall) eller så må produksjon av aktuelle metaller dekarboneres først. Eramet har testet i forskjellige skalaer, fra lab til pilot, bruk av silisium og aluminium til å redusere forskjellige manganoksider, og demonstrert at det var teknologisk mulig. På grunn av høye kostnader av råmaterialer og eksisterende marked for manganoksider, var ikke konseptet lønnsomt.

### Elektrolyse

Det finnes flere ulike alternativer for å produsere mangan ved elektrolyse:

Manganelektrolyse brukes i dag for produksjon av spesiallegeringer som krever en høy renhet (99.7-99.9 prosent)<sup>37</sup> og som ikke skal inneholde jern. "Electrolytic manganese metals" (EMM) blir blant annet brukt som tilsats til aluminium og i batterier. Markedet for EMM ventes å mangedobles i takt med etterspørselen av elektriske biler<sup>38</sup>.

Elektrolyse kan være et alternativ til dagens karbotermiske produksjon av HCFemn og SiMn. I dagens EMM produksjon brukes karbon til forreduksjon, mens det i andre elektrolyseprosesser brukes blyelektroder som ikke gir CO<sub>2</sub>-utslipp. Elektrolytisk produksjon av mangan fra silikatsmelter ble prøvd industrielt på 60-tallet<sup>38</sup>, men ga da et svært høyt energiforbruk.

Hvis det kan benyttes fossilfri reduksjonsmidler til forreduksjon, inert anode og fornybar strømkilde, kan manganmetall produseres uten CO<sub>2</sub>-utslipp. For SiMn og HCFemn produksjon er ulike teknologier aktuelle:

- Elektrolyse i vandig elektrolytt slik som det gjøres for EMM
- Elektrolyse fra flytende oksidmelter
- Produksjon av mangan fra MnCl<sub>2</sub> løst i alkalikloridmelter<sup>39,40</sup>

Siden mangan, i motsetning til silisium, kan produseres ved vandig elektrolyse, er dette en aktuell teknologi. Flere barrierer både når det gjelder lønnsomhet og teknologisk utvikling må imidlertid først løses. Elektrolyse sees derfor på som en aktuell teknologi på meget lang sikt. Ved et gjennombrudd for inerte anoder vil en oksidmelteelektrolytt kunne være et CO<sub>2</sub>-fritt alternativ til dagens smelteteknologi. Nødvendig forreduksjon kan skje med hydrogen. Dette gjelder også for den vandige prosessen.

### CCU og CCS

Karbonfangst, enten for bruk eller for lagring, er dekket andre steder i denne rapporten og i Prosess21-rapporten Karbonfangst. Vi vil fremheve her at lukkede ovner produserer en blanding av hovedsakelig CO, CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub> som er svært godt egnet til produksjon av kjemikalier og kan føre til avgasser med høy CO<sub>2</sub>-konsentrasjon med et enkelt punktutslipp som vil føre til kostnadseffektiv fangst og lagring. Eramet Norway er aktiv i Eyde-klyngens CCS-initiativ som har fått Gassnova-støtte. Teknologipartneren er identifisert og Eramet Norway planlegger en karbonfangstpilot.

37 <https://www.mn25.ca/manganese>

38 Winand et al PROCESS AND CELL FOR THE PRODUCTION OF MANGANESE OF LOW CARBON CONTENT BY MEANS OF A FUSED ELECTROLYTIC BATH, US patent 3,535,214 1970

39 Gasviani et al, ELECTROREDUCTION OF MANGANESE(II) CHLORIDE IN KCl-NaCl AND KCl-KF MELTS, Eur. Chem. Bull., 2018, 7(2), 59-62

40 Saijun Xiao, Cathodic process of manganese (II) in NaCl-KCl melt, Ionics 22, 2387-2390 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1778-y>



# Eramet Norways klimaveikart



Eramet Norway er i dag en av verdens reneste produsenter av raffinerte manganlegeringer, en posisjon som krever stadig utvikling og fornyelse. For å sikre kontinuerlig fokus, målrettet arbeid og måloppnåelse, har Eramet satt seg konkrete klimamål og utviklet et eget veikart.

Ett av Eramet mål er å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene med minst 43 prosent innen 2030 og 80 prosent innen 2050, sammenlignet med referanseåret 2005. For å finne de beste løsningene for selskapet, ble det etablert en ekspertgruppe, satt sammen av spesialister fra en rekke ulike fagområder. Gruppen studerte ulike teknologier, samt samfunnets forventninger som uttrykkes i form av rammevilkår, spesielt fra EUs klimavotesystem.

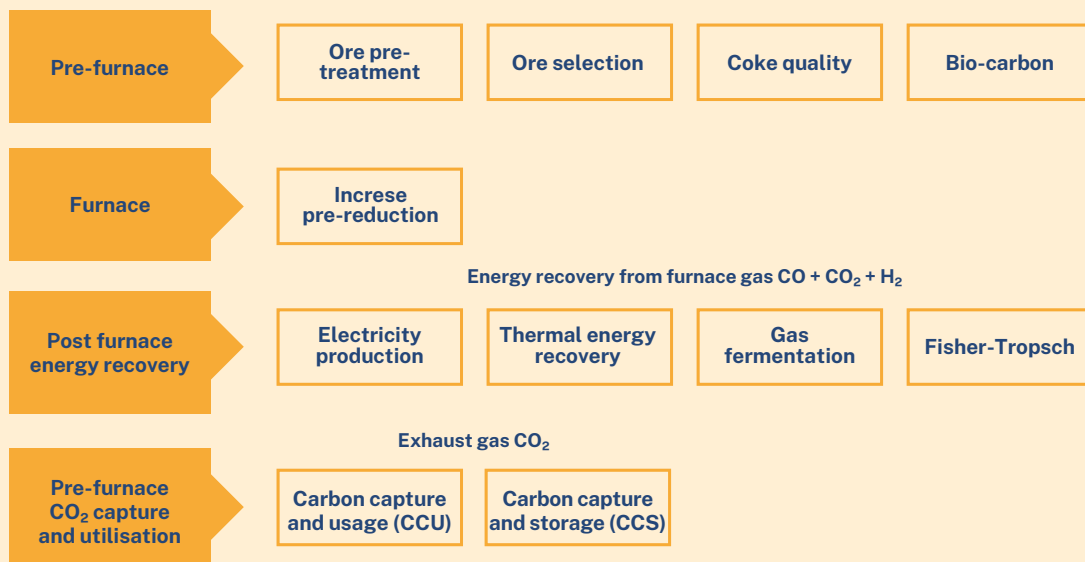
Over hundre dokumenter i form av åpen litteratur og interne rapporter ble analysert for å kartlegge hvilke teknologier som var aktuelle og hvilke tekniske og økonomiske betingelser disse ville medføre. I første omgang ble disse teknologiske løsningene delt inn følgende hovedkategorier: råvarer, smelteprosessen og håndtering av avgassene (som illustrert under).

For å rangere teknologiene, ble verktøyet Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) utviklet, og rundt ti forskjellige kriterier for teknologienes potensial og vanskelighetsgrad for implementering identifisert. Dette ga en rangering av mulige løsninger, som ble brukt som utgangspunkt for valg av de teknologiene som det jobbes med i dag. Analysen oppdateres jevnlig og brukes til videre prioriteringer, slik at Eramet til enhver tid har en strategi forankret i et godt og dokumentert faktagrunnlag.

Modellen ble lagt til grunn da Eramet utviklet sitt veikart, som inneholder en plan med tiltak på kort (2025) og lang sikt (2050), og hovedområdene er listet i henhold til planlagt implementering:

- Forbedre eksisterende prosess i forhold til ressurs, karbonforbruk og energi
- Introdusere og videre økt bruk av reduserende midler basert på biomasse for å erstatte koks og antrasitt
- Innføre karbonfangst og -bruk (CCU) samt karbonfangst og -lagring (CCS)

Oversikt over teknologier for å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra produksjonsprosesser som brukes i Norge i dag:



## Anbefalinger

Manganindustrien jobber målrettet for å redusere sitt karbonavtrykk, med hovedfokus på forbedringer og endringer som kan implementeres i nåværende prosess. Samtidig, som for resten av den metallurgiske industrien, vil tilstrekkelig tilgang på bioressurser være et usikkerhetselement. Det vil derfor være viktig å sørge for fortsatt utredning og implementering av alternative prosesser. En oppsummering av mulige nye teknologier for manganproduksjon med lavt eller null utslipp med teknologisk status for er gitt i Tabell 4. Videre anbefalinger er som følger:

- Å utvikle, teste og implementere teknologi for forreduksjon av manganmalm
- Å videreutvikle aktuelle konsepter for utnyttelse av ovns- og prosessgass eventuelt i sammenheng med karbonfangst
- Å fortsette utviklingen av biokarbon-kvaliteter egnet for manganproduksjon og å ta disse i bruk industrielt
- Å etablere et større FoU-prosjekt for utredning og utvikling av nye prosesser for manganproduksjon.

## Barrierer

Utvikling og innføring av nullutslippsteknologier for manganproduksjon krever en langsiktig innsats over mange år i form av grunnleggende og anvendt forskning i ulike skalaer, testing av prosessutstyr i lab og pilotskala og industriell verifikasjon av prosessene. De teknologiske og økonomiske barrierene avhenger av type teknologi, teknologisk modenhet, tidsaspekt og investeringer knyttet til dette.

Bruk av biokarbon til manganproduksjon krever utvikling av egnet biokarbonkvalitet, samt tilgjengelighet og kostnader knyttet til dette hovedbarrieren. Andre nye teknologier som bruk av gass som reduksjonsmiddel, metallotermisk fremstilling av mangan og elektrolyseprosesser er det først og fremst teknologiske barrierer som må overkommes. Dette krever langsiktig forskning- og utviklingsarbeid først i laboratorie-skala, så i demo- og i pilotskala. Disse prosessene vil også kreve ny og tilpasset infrastruktur. Utfordringer knyttet til tilgang på kompetanse, støtte fra virkemiddelapparatet og rammevilkår for industriell implementering blir her de samme som for resten av prosessindustrien.

**Tabell 4:** Oversikt over teknologier for produksjon av mangan og manganlegeringer

Teknologi	Tidspunkt industrielt anlegg	Pågående aktiviteter	Teknologisk og kommersiell status Mulig karbonavtrykk
Biokarbon	2020-2030	FFF/SINTEF/NTNU: KPN Reduced CO <sub>2</sub> Eramet/SINTEF/NTNU: KPN BiocarbUp Eramet: forskningsprosjekter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biokarbon har aldri blitt brukt i store lukkede ovner som benyttes i Norge, men har vært brukt i mindre ovner i andre land og brukes i annen metallproduksjon</li> <li>• Mye kunnskap fra utviklingsarbeid over flere tiår</li> <li>• Stort potensialet for CO<sub>2</sub> reduksjon</li> </ul>
Forreduksjon av malm	2020-2025	Eramet/Ferroglobe/SINTEF/NTNU/EU forskningsprosjektet PREMA Eramet: NewERA prosjekt for forbehandling av malm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forbehandling: vellykket testing i pilotskala. Større anlegg under bygging. Begrenset reduksjon i karbonavtrykk</li> <li>• Forreduksjon planlegges testes i pilotskala i 2022. Forventes 25 prosent reduksjon i elektrisitetsforbruk og 15 prosent reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp.</li> </ul>
Karbonfangst (CCU og CCS)	2025-2030	CCS: Climit prosjekt for å identifisere aktuelle teknologier med mål å ha en pilot. CCU: kontakt med leverandør av teknologier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avgass fra lukket ovner har 70-90 prosent CO og er godt egnet til karbonfangst.</li> </ul>
Bruk av hydrogen og biogass	> 2030	FFF/NTNU/SINTEF: i KPN Reduced CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mye utviklingsarbeid og lang tidshorison kreves for å bruke hydrogen eller biogass i stedet for fossilt karbon. Stort potensiale for reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp.</li> <li>• Bruk av rent karbon fra naturgass vil gi 25 prosent reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslipp ift. bruk av kull.</li> </ul>
Metallotermisk reduksjon	>2030		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Er blitt demonstrert i forskjellige skaler i Eramet. Kjent teknologi vil forflytte CO<sub>2</sub>-utslipp hos produsenter av det reduserende metallet</li> <li>• Metallotermi uten CO<sub>2</sub>-utslipp krever langt utviklingsarbeid</li> </ul>
Manganelektrolyse	>2040	Eramet har et verk i Gabon som produserer elektrolytisk mangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan redusere betydelig karbonavtrykk</li> <li>• Trenger store investeringer – helt nytt anlegg med ukjent teknologi for Mn fagmiljøer i Norge</li> </ul>

# Annen metallurgisk industri

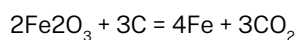
## Status

### Titandioksidslagget og råjern

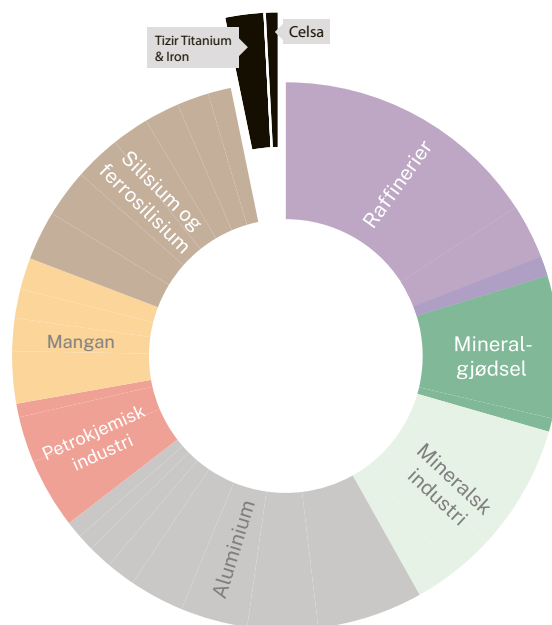
Tizir i Tyssedal opererer en unik pyrometallurgisk prosess for produksjon av 230 000 tonn titandioksid (TiO<sub>2</sub>) slagget og 110 000 tonn høyreint råjern per år fra ilmenitt. TiO<sub>2</sub>-slagget brukes til titandioksidpigmenter og råjernet brukes til høyverdige støpejernsprodukter. Prosessen foregår i to trinn der jernet i ilmenitten først forreduseres med kull i en roterovn. Deretter smeltes den metalliserte ilmenitten i en lysbueovn der titandioksid utgjør hoveddelen av slaggen mens jernet smeltes ut i en metallfase. Dagens prosess genererer cirka 1,6 tonn CO<sub>2</sub> per tonn slagget produsert.

### Jern og stål

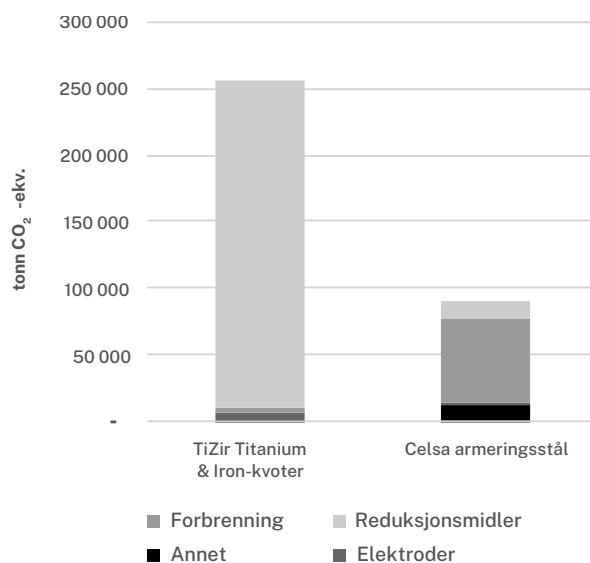
Masovnen er blitt brukt for produksjon av råjern i flere tusen år og er fortsatt den dominerende reduksjonsteknologien for malmbasert produksjon av jern og stål. Masovnen er en motstrømsreaktor, der jernmalm, typisk hematitt eller magnetitt, reduseres med metallurgisk koks til flytende råjern, slagget og en avgass bestående av N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>. Råjernet raffineres for løst karbon i en konverter til stål. I konverteren resirkuleres også jernskrap gjennom smelting sammen med det flytende råjernet. Masovnsprosessen bruker typisk 350-400 kg karbon per tonn råjern gjennom totalreaksjonen:



Det gjennomsnittlige globale utslippet av CO<sub>2</sub> for masovnsbasert stål er 1.85 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per tonn stål. Jernproduksjon basert på gass, DRI, krever jernmalm av høy kvalitet, men gir vesentlig mindre CO<sub>2</sub>-utslipp. Globalt er DRI-produksjon økende og norsk



Figur 26: Annen metallurgisk industri og deres andel av utslippene fra stor landbasert prosessindustri. Kilde: Miljødirektoratet



Figur 27: Utslippskilder hos Tizir Titanium & Iron og Celsa armeringsstål. Kilde: Miljødirektoratet

DRI-produksjon basert på skandinaviske jernmalmer har vært utredet. For å produsere jern av god nok kvalitet er det nødvendig at det globalt er en viss andel av jernproduksjon fra jernmalm, i tillegg til jernproduksjon fra omsmelting av skrap som gir lavere CO<sub>2</sub>-utslipp.

Til tross for vesentlige jernmalmsressurser produserer Norge i dag ikke jern fra jernmalm. Jernmalm fra Norge eksporteres til jernproduksjon i andre land. Det produseres dog cirka 90 000 tonn jern/år til armeringsjern gjennom omsmelting av skrapjern fra nasjonale og internasjonale kilder i en veletablert lysbueovnsprosess hos Celsa i Mo i Rana. Omsmelting av skrapjern gir et betydelig lavere CO<sub>2</sub>-utslipp per tonn metall produsert enn produksjon fra malm i masovn. I 2019 rapporterte Celsa et CO<sub>2</sub>-utslipp på 0,165 tonn / tonn stål produsert. CO<sub>2</sub>-utslippet er primært relatert til oppvarming med CO-rik avgass fra nærliggende industri (energikilde til stål- og valseverket), elektrodeforbruk og antrasittinjeksjoner i stålslaggen.

## Mulige teknologier for fremtiden

### Titanoksidslag og råjern

Som et ledd i å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp arbeider Tizir med en alternativ prosess for forreduksjon av ilmenitt der man ønsker å erstatte roterovnen med et hydrogenbasert fluidisert anlegg. Den forreduuerte ilmenitten vil kunne tilsettes ved høy temperatur til lysbueovnen, et tiltak som både vil redusere energiforbruket og CO<sub>2</sub>-utslippene fra cirka 1,6 til 0,2 tonn per tonn slag.

### Jern og stål

Celsas strategi for å redusere dagens relativt beskjedne CO<sub>2</sub>-utslipp er å bytte ut CO-gassen som i dag brukes som brensel i ovnene i valseverket med hydrogen. Med en slik strategi bør CO<sub>2</sub>-utslippene kunne reduseres med cirka 50 prosent. Som et ledd i en mer sirkulær økonomi undersøker man også muligheten for å erstatte deler av karbonet fra dagens antrasittbruk med karbon i brukte bildekk. Dette vil ikke redusere CO<sub>2</sub>-utslippene, men innebære bedre ressursutnyttelse.

I et fremtidsbilde der Norge velger å bruke egne eller andre nordiske ressurser for primærfremstilling av jern og stål finnes det ulike teknologimuligheter for lavt CO<sub>2</sub>-fotavtrykk:

- Bruk av naturgass i en fastfase-reduksjonsprosess ("DRI" -Direct Reduced Iron) med etterfølgende smelting av det faste jernet i lysbueovn. Med en slik prosess utnyttes hydrogenet sammen med karbonet i naturgassen som reduksjonsmaterialet, noe som gir en reduksjon i direkte CO<sub>2</sub>-utslipp på cirka 75 prosent sammenlignet med bruk av koks i masovn. Det finnes flere modne DRI teknologier som i dag brukes for industriell jernproduksjon i bla. Midtøsten og Sør-Amerika. Et slikt konsept ble utredet og planlagt i "Ironman" prosjektet<sup>41</sup> – et samarbeid mellom Statoil/Equinor, svenske LKAB og Höganäs og SIVA. Ironman prosjektets mål var å produsere det som den gang var verdens mest miljøvennlige stål i en fabrikk på Tjeldbergodden ved bruk av naturgass fra Heidrunfeltet. Ironman-prosjektet hadde sikret seg intensjonsavtale med den mest kostnadseffektive og miljøvennlige leverandøren av slik teknologi. Prosjektet ble stanset i 2015 da det ikke var mulig å finne investorer til satsingen blant europeisk stålindustri.
- Bruk av kun hydrogen i en fastfase-reduksjonsprosess med etterfølgende smelting i lysbueovn. Slik produksjon vil i prinsipp ha lignende totale CO<sub>2</sub>-utslipp som dagens lysbueovnsprosess for smelting av det faste jernproduktet. Hydrogenbasert jernproduksjon piloteres i "Hybrit"<sup>42</sup> prosessen i Sverige i et samarbeid mellom Vattenfall, LKAB og SSAB.
- Elektrolysebasert jernproduksjon. Flere stålselskaper i Europa jobber med ny teknologi for elektrolytisk produksjon av jern. Et eksempel på slik utvikling er EU H2020 prosjektet SIDERWIN<sup>43</sup> der blant annet ArcelorMittal bruker en vann-NaOH basert elektrolytt ved lav temperatur. NTNU deltar i prosjektet som fortsatt er på et relativt lavt TRL nivå (<6).

41 <https://siva.no/2013/08/optimisme-rundt-ironman-planene/>

42 <https://www.hybritdevelopment.com/>

43 <https://www.siderwin-spire.eu/>

## Anbefalinger

Teknologiske muligheter skissert ovenfor er summert i Tabell 5.

Det anbefales at myndigheter støtter opp om og risikoavlaster industrielle initiativ for å bruke hydrogen som erstatning for kull (Tizir) og CO (Celsa).

Dersom Norge ønsker en utvidet rolle som produsent av jern og stål bør det satses der 1) Norge har fortinn med tanke på kompetanse og naturressurser, 2) på den prosessen som først er industrielt moden og gir synergieffekter med øvrige industrianlegg.

**Tabell 5:** Oversikt over teknologier for annen metallurgisk industri

Teknologi	Tidspunkt industrielt anlegg	Pågående aktivitet	Teknologisk og kommersiell status, Mulig karbonavtrykk
<b>Jern og Stål</b>			
DRI	Hyllevarer om strategisk ønsket	Ingen aktivitet i Norge	Industriell prosess, fotavtrykk cirka 25 prosent av nåværende masovnsprosess
Hydrogen som brensel	<2025 ved investeringsbeslutning	Celsa – del av strategiske planer	Pre-industriell. Lavt fotavtrykk ved bruk av grønt hydrogen
Hydrogen	>2025 om strategisk ønsket	Ingen aktivitet i Norge	Pilot i Sverige, lavt fotavtrykk ved bruk av grønt hydrogen
Elektrolyse	>2030 om strategisk ønsket	NTNU deltar i EU prosjektet SIDER-WIN41	Lab skala i Europa. Lavt fotavtrykk ved bruk av fornybar kraft
<b>Titanslagg</b>			
Hydrogen forreduksjon	<2025 ved investeringsbeslutning	Tizir-forprosjekt gjennomført. Prosess påventer investeringsbeslutning  Forskning for å løse spesifikke problemstillinger i KPN Reduced CO <sub>2</sub>	Pre-industriell. Lavt fotavtrykk ved bruk av grønt hydrogen





REEtec



## REEtec og Yara utvikler nye verdifulle produkter fra Yaras råstoff

Ett av Yaras råstoff for fullgjødselproduksjon, apatitt, inneholder små mengder sjeldne jordartssalter (Rare Earth Elements, REE). Oppstartsselskapet REEtec har utviklet en ny, unik separasjonsteknologi for REE. Yara har utviklet en teknologi som oppkonsentrerer REE i deres fosfatråstoff, som kan benyttes av REEtec for fremstilling av rene fraksjoner av de forskjellige REE-elementene og deres salter. I dag utvinnes de sjeldne jordmetallene i hovedsak i Kina. EU vil løsrive seg fra Kina-avhengigheten og har derfor bevilget penger over Horizon 2020-programmet. Målet er å sikre en bærekraftig, stabil og sikker europeisk verdikjede for produksjon av sjeldne jordmetaller.

REEtec, SINTEF, og Yara har, sammen med et engelsk og et tysk firma, fått 125 millioner kroner i EU-støtte for å utvikle prosessen ytterligere (SecREEs- prosjektet). REEtec bruker også hjelpestoffer fra Yaras virksomhet på Herøya som kan returneres tilbake til Yara igjen etter at REEtec har gjort seg ferdig med dem. På denne måten kan man sette opp en fullstendig sirkulær prosess hvor sjeldne jordartselementer fremstilles uten avfallsstrømmer. Dette er til stor forskjell fra de tradisjonelle fremstillingsmetodene vi kjenner i dag, og som er sterkt forurensende og lite bærekraftige prosesser.

REEtec har planene klare for videre oppskaleringer av deres egenutviklede separasjonsteknologi for REE.

# Utnyttelse av karbon i prosessgass (CCU)

## Hva er CCU?

”Carbon Capture and Utilization”, forkortet CCU, er en betegnelse for bruk av CO<sub>2</sub> til å lage produkter med ulike teknologier og i mange verdikjeder. Det finnes ingen omforent definisjon av CCU<sup>44</sup>, men typisk omfatter det utnyttelse av konsentrerte CO<sub>2</sub>/CO-utslipp fra industri og forbrenningsanlegg eller syntesegass produsert ved gassifisering av karbonholdig avfall. Planteproduksjon inkluderes vanligvis ikke. Innenfor rammen av Prosess21 vil CCU-begrepet primært benyttes om utnyttelse av røykgasser fra industrien med det formål å redusere virksomhetens klimaavtrykk.

Man bør imidlertid også vurdere CCU i en bredere sammenheng. Det er sannsynlig at utfasing av fossile hydrokarboner vil føre til mangel på fornybare bioressurser, i hvert fall i en overgangsfase. Globalt er det begrenset tilgang på dyrkbare arealer, vann og gjødsel. Økt etterspørsel etter biomasse til karbonholdige kjemikalier, materialer og energibærere kan konkurrere med matproduksjon og gi økt press på intakt naturmiljø og biomangfold. Flydrivstoff er eksempel på et produkt som i overskuelig fremtid forventes å måtte baseres på energitette stoffer slik som hydrokarboner. Ifølge en undersøkelse av Nova Institute vil erstatning av det europeiske forbruket av fossilt flydrivstoff i 2018 med bioråstoff som sukkerroer eller mais, kreve henholdsvis 18 og 48 prosent av dagens jordbruksareal i Europa<sup>45</sup>.

I et integrert system av tiltak kan imidlertid diettendringer og redusert matsvinn frigjøre betydelige jordbruksarealer til andre formål. Sammen med bruk av marginalt og degradert land vil det kunne redusere utfordringene for matsikkerhet<sup>46</sup>. Det er likevel et langt stykke igjen til et slikt forvaltingsregime er på plass. I norsk sammenheng illustreres denne utfordringen av debatten om bruken av palmeolje i drivstoff og soya i fiskefôr, og den negative effekten produksjon av disse råvarene kan ha på verdifulle naturmiljøer gjennom indirekte arealbruksendringer i fravær av god regulering.

I fremtiden vil industriell resirkulering av karbon kunne bli et nødvendig supplement til fotosyntese i mange verdikjeder for karbonbaserte produkter<sup>47</sup>.

## CCU og næringsutvikling

Mange land ser på CCU som et grunnlag for næringsutvikling. Karbongasser som ressurs er diskutert i nasjonale strategier i blant annet Storbritannia, Japan, Italia og Canada. I henhold til mandatet for Prosess21 vil diskusjonen nedenfor fokusere på CCU som klimatiltak. Samtidig vil vi peke på at flere komparative fortrinn gir Norge mulighet til å etablere en fremtidsrettet CCU-basert industri i samspill med CCS og hydrogenproduksjon.

Norge har en stor mulighet til å ta en ledende posisjon innen karbonresirkulering. Norsk prosessindustri har mange punktutslipp (Figur 1), der den samlede mengden karbon er sammenlignbar med karboninnholdet i norsk skogsavvirkning (cirka tre millioner tonn karbon). Norge har gjennom mange år bygget opp ledende teknologi og kompetanse innen karbonfangst (konsentrering og rensing) og gjennom planlagte storskala CCS-prosjekter vil det etableres en logistikk for CO<sub>2</sub> fra både nasjonale og internasjonale kilder.

For CCU vil det viktigste komparative fortrinnet for Norge være tilgang på relativt rimelig fornybar kraft, som gjør det mulig å produsere «grønn» hydrogen ved elektrolyse av vann. I kombinasjon med CCS vil Norge innen 2050 også kunne produsere betydelige mengder nær utslippsfritt «blått» hydrogen fra naturgass, der karbonet i metan tilbakeføres til reservoarene. Mulig tilgang på bærekraftig hydrogen gjør også Norge til et attraktivt sted å pilotere industriell fangst og utnyttelse av atmosfærisk CO<sub>2</sub> (Direct Air Capture, DAC).

Tilgangen på de to viktigste råvarene, CO<sub>2</sub> og hydrogen, kan legge grunnlaget for en ny type kraftkrevende industri med et vidt spekter av mulige produkter av stor samfunnsmessig betydning, for eksempel ingredienser til fôr (som erstatter importert protein fra soya eller marine

44 <https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/what-is-ccu/>

45 Nova Institute 2020: <http://nova-institute.eu/press/?id=181>

46 IPCC 2019: Climate Change and Land <https://www.ipcc.ch/srccl/>

47 Nova Institute 2020: <http://nova-institute.eu/press/?id=218>

fettsyrer), bærekraftige kjemikalier, plast eller flydrivstoff (som erstatter plantebaserte karbohydrater eller oljer). Dette vil kunne posisjonere Norge innenfor flere fremtidsrettede leverandørkjeder med positive ringvirkninger innen oppdrett, luftfart, så vel som ulike typer ferdigvareindustri.

## CCU som klimatiltak

De fleste kilder vi har gjennomgått konkluderer med at CCU bare vil kunne spille en begrenset rolle som klimatiltak i industrisektoren, og det er også slik det er beskrevet i IPCCs rapport om 1,5°C global oppvarming<sup>48</sup>. Men CCU er også et relativt nytt konsept, og det er lite forskning å bygge på<sup>49</sup>. I enkelte andre analyser spiller CCU en svært stor rolle i alt fra drivstoff, kjemikalier og industriprosesser til energibærere i de tusen hjem<sup>50</sup>.

Å bruke CO<sub>2</sub> vil imidlertid ikke nødvendigvis føre til varige reduserte utslipp av CO<sub>2</sub>. På kort sikt er nytteverdien først og fremst knyttet til å fortrenge produkter med høyere utslipp over livsløpet. Nyttverdien vil være prosjekt- og produktspesifikk og må bestemmes gjennom en kompleks vugge-til-grav livsløpsanalyse. Det finnes ingen internasjonal standard for å gjøre dette i dag, og det brukes ulike metoder som kan gi forskjellige svar. De fem viktigste forholdene som påvirker klimaeffekten av CCU-produkter er<sup>51</sup>:

- Kilden til CO<sub>2</sub>
- Hvor lenge karbonet blir bundet i produktet
- Hvor mye og hvilken type energi som brukes i konverteringen
- Produktet eller tjenesten CCU-produktet fortrenger
- I hvilken skala det er mulig å bruke CO<sub>2</sub>

## Kilden til CO<sub>2</sub>

I mange livsløpsanalyser blir bruk av CO<sub>2</sub> fra industri-kilder behandlet som om det har nøytral klimaeffekt fordi man antar at utslippet uansett ville funnet sted. Bruk av CO<sub>2</sub> fra prosessindustrien kan imidlertid komme i konkurranse med geologisk lagring av CO<sub>2</sub>, som er et langt mer effektivt klimatiltak hvis kapasitet er bygget ut. CCU kan også medføre at utslippene fra fossil CO<sub>2</sub> fra prosessindustrien flyttes fra kvotepliktig til ikke-kvotepliktig sektor.

For prosessindustrien vil både CCS og mange CCU-alternativer innebære bygging og drift av karbonfangstanlegg, og dette er nærmere beskrevet av Prosess21-rapporten Karbonfangst. Etter fangst vil transport og permanent lagring av CO<sub>2</sub> trolig koste 35-55 euro per tonn for de første prosjektene i vår del av verden<sup>52</sup>. Betalingsvilligheten for CO<sub>2</sub> som råstoff til CCU-prosjekter som kan være aktuelle i Norge er ikke kjent, men i mange CCU-kjeder er innkjøp av CO<sub>2</sub> en relativt liten del av produksjonskostnaden<sup>53</sup>. Ren CO<sub>2</sub> kan ellers ha en salgsverdi på 13-150 euro per tonn i begrensede markeder<sup>54</sup>. De fleste eksisterende stor-skala karbonfangstprosjektene i verden er av økonomiske årsaker basert på en eller annen variant av CCU<sup>55</sup>.

Med dagens produksjonskostnader og CO<sub>2</sub>-prising kan flere CCU-produkter som fiskefôr, polymerer og bygningsmaterialer være konkurransedyktige i markedet<sup>56</sup>. Metanol og e-drivstoff basert på fossil CO<sub>2</sub> kan også godt komme til å spille en rolle i mange år framover, særlig i markeder med relativt få alternative nullutslippsløsninger, som fly eller tungtransport<sup>57</sup>. Hvilke rammevilkår som settes politisk i Norge og EU vil sannsynligvis avgjøre hvilke løsninger som blir mest konkurransedyktige.

48 IPCC, 2018, SR15, s336: "Review studies indicate that CO<sub>2</sub> utilization in industry has a small role to play in limiting warming to 1.5°C because of the limited potential of reusing CO<sub>2</sub> with currently available technologies and the re-emission of CO<sub>2</sub> when used as a fuel"

49 SAPEA, 2019, Novel carbon capture and utilisation technologies, se litteraturoversikt i del 2.3

50 F.eks. UBA, 2013, DECEMA/Cefic, 2017

51 IEA, 2019, Putting CO<sub>2</sub> to use

52 Atkins og Oslo Economics, 2020, Kvalitetssikring (KS2) av tiltak for demonstrasjon av fullskala CO<sub>2</sub>-håndtering, se s35.

53 Zero, 2020, Sirkulær karbonøkonomi

54 SINTEF, 2015, Product fact sheet, food-grade CO<sub>2</sub> og IEA, 2019, World Energy Outlook (s 503 for typisk CO<sub>2</sub>-pris til EOR)

55 Hovedsakelig EOR, se Global CCS Institute, 2019, Global Status of CCS-2019

56 Se beskrivelse av potensielle markeder for ulike produkter i IEA, 2019, Putting CO<sub>2</sub> to use

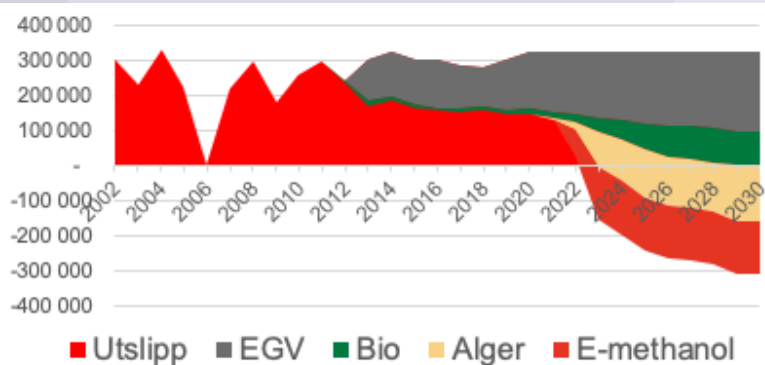
57 Mange kilder viser til disse behovene, også i strategidokumenter som EU, 2020, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe

# CCU-initiativer ved Finnfjord AS

CCU gir muligheter som kan oppnå betydelige CO<sub>2</sub>-effekter relativt snart. Helt siden Finnfjord installerte energigjenvinningsanlegget sitt i 2012 – har bedriften jobbet med løsninger for å redusere utslippene av CO<sub>2</sub>. I 2015 startet et samarbeid mellom Universitetet i Tromsø og Finnfjord som studerer mulighetene for massedyrking av kiselalger i prosessrøyken til Finnfjord. Prosjektet har vært svært vellykket, og man har i dag verdens største bioreaktor på anlegget. Anlegget har hatt kontinuerlig drift, god kvalitet på biomasse og effektiv høsting av algene. Ettersom algeproduksjonen er moden for å gå over i storskala produksjon er ulik anvendelse av biomassen svært viktig å arbeide videre med. De umiddelbare anvendelsesområdene er fiskefôr, biodrivstoff, humant konsum og batterier.

Det er også viktig å studere andre sammenhenger som bruker CO<sub>2</sub> som industriell ressurs. Våren 2020 ble det dannet et konsortium mellom Statkraft, CRI og Finnfjord som tar sikte på å starte produksjon av 100 000 tonn e-metanol. Innsatsfaktorene for denne produksjonen er grønt hydrogen (fra elektrolyse) og 150 000 tonn CO<sub>2</sub> fra prosessgassene til Finnfjord. Produksjonen er basert på CRIs «emission to liquid» teknologi, som har vært i drift på Island siden 2012. Anlegget på Finnfjord vil være en oppskalert versjon av denne installasjonen. Det kreves CO<sub>2</sub>-fangst på anlegget – og det vil gi verdifull læring av effektiv fangst av CO<sub>2</sub> fra industrielle prosesser.

I tillegg til fjerning av CO<sub>2</sub> vil utslippene av SO<sub>x</sub> og NO<sub>x</sub> fra Finnfjord bli sterkt reduserte, både gjennom algeprosjektet og e-metanol prosjektet. Eksempelet Finnfjord viser at en kan oppnå betydelige reduksjoner av CO<sub>2</sub> ved å kombinere mange tiltak – og at det finnes lovende prosjekter som kan realiseres innen kort tid. Grafen under illustrerer CO<sub>2</sub>-effektene ved tiltakene på Finnfjord.



I et klimaregnskap må utslippet enten måtte telles fra kilden eller som utslipp fra bruken. For at CCU skal ha positiv klimaeffekt i et langt tidsperspektiv vil CO<sub>2</sub> enten måtte komme fra kilder med nøytral klimaeffekt, som biomasse eller omgivelsesluft, eller så må bruken innebære permanent binding av karbon eller etablering av et lukket kretsløp. Alternativet vil være at den fossile andelen kompenseres med en eller annen form for negative utslippskreditter, for eksempel generert fra biogent CO<sub>2</sub> som inngår i geologisk lagring. Over tid vil antagelig rammebetingelsene reflektere dette. I klimaanalyser hvor e-drivstoff spiller en stor rolle er premisset at karbonet stammer fra biomasse eller omgivelsesluft<sup>58</sup>, og man kan se for seg at slik CCU kan bli en stor kraftkrevende industri som avlaster landbruk i et klimanøytralt samfunn.

### Karbonbinding i produktet

En av de største uløste problemene i livsløpsanalyser av CCU-prosjekter er hvordan man kan hensynta hvor lenge karbon blir bundet i produktet. Ulike CCU-løsninger kan binde CO<sub>2</sub> fra noen dager eller uker som for drivstoff, potensielt mange år som for polymerer, eller permanent som i noen mineralske produkter. Sluttbehandlingen av produktet vil også være veldig viktig. Man kan for eksempel se for seg et system hvor man produserer plast via CCU som så enten gjenvinnes eller brennes i et anlegg med CCS.

Det finnes i dag ingen insentiver for å lagre karbon i produkter, hverken for CCU-produkter eller treprodukter og lignende. Det store antallet mulige bruksområder for CO<sub>2</sub> kan tilsi at det fra et regulatorisk perspektiv vil være enklest å avgiftsbelegge utslippet slik som i dag, og heller gi insentiver til karbonbinding i produkter på en annen måte.

### Energiforbruk

Konvertering av CO<sub>2</sub> til drivstoff og til de fleste kjemikalier er energikrevende. Klimaeffekten av slik CCU kan være negativ i energisystemer med vesentlig fossilandel. Ved å bruke livsløpsanalyse konkluderte EU i 2019 at CCU-drivstoff vil ha negativ klimaeffekt sammenlignet med fossilt drivstoff dersom det er mindre enn 86 prosent fornybarandel i kraftmiksen<sup>59</sup>.

Mange produksjonskjeder har også relativt store tap av energi fra ledd til ledd slik at energieffektiviteten blir lav. For eksempel er det beregnet at konverteringen av CO<sub>2</sub> til diesel vil ha en energieffektivitet på under 15 prosent.

Konvertering av CO<sub>2</sub> i stort omfang vil innebære økning i behovet for fornybar kraft i en skala som kan komme i konflikt med andre bærekraftsmål og skape utfordringer for omleggingen av energisystemet. DECEMA og Cefic, 2017<sup>60</sup>, har anslått at overgang til en CCU-basert kjemisk industri i Europa kan øke behovet for fornybar elektrisitet med opp til 4 900 TWh i 2050. I scenarioet 1,5TECH i konsekvensutredningen for "A Clean Planet for All" er industriens totale el-forbruk 4 800 TWh, hvorav 3 500 TWh er knyttet til produksjon av hydrogen og e-drivstoff<sup>61</sup>. Transport & Environment viser til et behov for 2 700 TWh ny fornybar energi dersom 50 prosent av transportsektoren skal bruke e-drivstoff, og i underkant av 900 TWh for å dekke halyparten av energibehovet til innenlands luftfart i EU.

Til sammenligning var den totale el-produksjonen i EU cirka 3 600 TWh i 2015<sup>62</sup>, og omlegging av denne til fornybar energi er en av de sentrale utfordringene i klimapolitikken. Noen analyser indikerer imidlertid at det tekniske potensialet for produksjon av fornybar energi i Europa er mer enn stort nok, også for å kunne dekke en vesentlig økt etterspørsel til CCU-formål<sup>63</sup>.

### Produktet som fortrenses og andre alternativer

Hvilken type produkt som fortrenses i markedet av nye CCU-produkter kan være vanskelig å bedømme, men har stor effekt på klimanytten. Metanol kan for eksempel produseres fra reformering av naturgass, som er normalt i Europa, eller gassifisering av kull, som er normalt i Kina, og klimanytten vil framstå som mye større hvis det siste brukes i livsløpberegningen. E-drivstoff sammenlignes normalt med konvensjonelt drivstoff, mens hvis man heller brukte batteri-elektriske biler ville regnestykket blitt ganske annerledes. For kjemikalier og plast vil referansegrunnlaget kunne være produkt- eller kjemisk resirkulering, eller deelektrifisering og CCS i den eksisterende produksjonskjeden.

58 IEA, 2020, Energy Technology Perspectives, s 145: "To be carbon neutral, this CO has to be generated from biogenic CO<sub>2</sub> from a bioenergy source or alternatively from CO<sub>2</sub> captured from the atmosphere using direct air capture (DAC) technologies"

59 EU, 2019: Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies

60 DECEMA/Cefic, 2017, Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry

61 IN-DEPTH ANALYSIS IN SUPPORT OF THE COMMISSION COMMUNICATION COM (2018) 773, s 155

62 Cerulogy, 2017, What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?

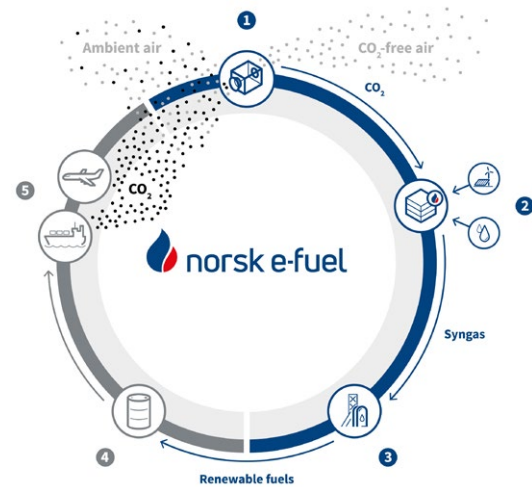
63 For eksempel IEA, 2019, Offshore Wind Outlook



# CCU-prosjekter på Herøya

To selskap planlegger konvertering av CO<sub>2</sub> ved hjelp av hydrogen produsert fra fornybar kraft, såkalte Power-to-Liquid prosjekter. Selskapene Norsk e-Fuel AS og Nordic Blue Crude AS planlegger begge demonstrasjonsanlegg på Herøya Industripark. Ved å trekke på den industrielle kompetansen som er i regionen, samt en meget godt utbygd industriell infrastruktur, er begge selskapene godt i gang med sine prosjekter. Ved å fange CO<sub>2</sub> som dannes etter at produktene forbrennes, ved den såkalte Direct Air Capture teknologien, er de i stand til å sette opp en sirkulær karbonøkonomi, hvor CO<sub>2</sub> konverteres først til drivstoff og deretter, når drivstoffet forbrennes, fanges CO<sub>2</sub> i luften igjen.

Begge selskapene tar sikte på å starte demonstrasjonsanleggene i 2023 (kapasitet 10 000 m<sup>3</sup>/år) og videre oppskalering av teknologien til 100 000 m<sup>3</sup> per år i 2026.



- 1 Capturing pure CO<sub>2</sub> from air
- 2 Syngas produced from CO<sub>2</sub> and water using 100% renewable electricity
- 3 Renewable fuels generated from syngas
- 4 Refined to final product
- 5 Utilisation of renewable fuels releases CO<sub>2</sub> back into the atmosphere



En indirekte klimaeffekt er knyttet til fortrengning av bioråstoff eller andre produkter som kan medføre avskoging eller oppdyrking av myrområder og dermed reduksjon av karbonlager. Ifølge selskapet Nutreco vil produksjon av 100 000 tonn protein ved CCU-basert fermentering kunne erstatte 650 km<sup>2</sup> med soya-produksjon. Et alternativt referansesystem vil imidlertid kunne være soyaproduksjon på områder uten fare for økologiske skadevirkninger.

## Regulering og rammebetingelser

### EUs klimavotesystem og prising av utslipp

Det er usikkert om salg av CO<sub>2</sub> til CCU-prosjekter vil regnes som utslippsreduksjoner fra kvotepliktig industri i framtiden. I dag er det ikke tilfelle. Også framover vil det være slik at det enten regnes som et utslipp fra industrien eller fra bruken, for eksempel som drivstoff. For myndighetene kan dette være en utfordring i framtiden fordi virkemidlene som brukes i ikke-kvotepliktige sektorer generelt er mye sterkere enn i kvotepliktig industri, og dette kan føre til en skjev insentivstruktur.

I de fleste tilfeller er det heller ikke mulig å inkludere fanget karbon som blir permanent bundet i produkter som utslippsreduksjoner i EUs klimavotesystem. Karbon-looping vil sannsynligvis heller ikke regnes som utslippsreduksjoner i dagens kvoteregulering, fordi kun fanget CO<sub>2</sub> som går til permanent lagring gir grunnlag for fratrek.

Myndigheter og virksomheter bør bruke sine muligheter til å løfte disse problemstillingene, særlig i arbeidet med å videreutvikle EUs klimavotesystem og andre aktuelle reguleringer.

### Fornybardirektivet og drivstoff

I Fornybardirektivet (Renewable Energy Directive, RED) regnes e-drivstoff produsert utelukkende med fornybar energi som bærekraftig drivstoff, og nasjonale tilpasninger til RED gir i dag en forretningsmodell for slik produksjon. Nye regler (under REDII) trer i kraft 1. januar 2021 og gjelder til 2030. I REDII er det et krav om at e-drivstoff må kunne vise til 70 prosent reduserte livsløpsutslipp sammenlignet med fossilt drivstoff for å kunne regnes som bærekraftig. Beregningsmetodikken er imidlertid ikke klar, men skal komme i løpet av 2021. I praksis vil nasjonale tilpasninger til REDII avgjøre hvilke rammevilkår e-drivstoff får i hvert enkelt land i årene framover dersom de klarer kravet i direktivet.

Kravet til biodrivstoff i RED var opprinnelig 35 prosent reduserte livsløpsutslipp, og dette har gradvis økt til 65 prosent som trer i kraft 1. januar 2021. Derfor er det ikke urimelig å se for seg at kravene også i framtiden vil strammes inn, både for biodrivstoff og e-drivstoff.

### Taksonomien for grønne investeringer

I EUs taksonomi for grønne investeringer står det at kravet for reduksjon av livsløpsutslipp for biodrivstoff bør økes mot 100 prosent innen 2050. I praksis kan dette innebære krav om CCUS på produksjon av biodrivstoff dersom det blir slik. Dette kan gi en pekepinn også for framtiden til e-drivstoff. I dag er det imidlertid kun karbonfangstprosjekter med geologisk lagring som regnes som grønne investeringer i taksonomien.

### Handlingsplanen for sirkulær økonomi

I handlingsplanen for sirkulær økonomi har EU-kommisjonen skrevet at de vil foreslå et regulatorisk rammeverk for karbonbinding innen 2023<sup>64</sup>. Kommisjonen har videre signalisert at de har til hensikt å håndtere CCU-produkter som en del av dette rammeverket.

### ETSs Innovation Fund

Innovative CCU-prosjekter med vesentlig potensial for utslippsreduksjoner kan søke støtte i EUs Innovasjonsfond, som skal ha jevnlig utlysninger fra 2020 til 2030.

### CCU teknologier og industrisymbiose

Metodene for å omdanne oksidert karbon, slik som CO<sub>2</sub>, til kjemisk redusert karbon, typisk karbon-hydrogen forbindelser, kan grovt sett deles i tre hovedgrupper: i) termokjemiske, ii) elektrokjemiske eller iii) bioteknologiske prosesser, og gjerne kombinasjoner av disse. I tillegg kan CO<sub>2</sub> inngå mer direkte i mineralisering eller som direkte reaktant i noen polymerer. Ulike metoder har imidlertid ulike krav til CO<sub>2</sub>/CO råstoffet; konsentrasjon, nærvær av andre gasser, toksiske stoffer, metaller etc. For eksempel har bioteknologiske prosesser ofte høy toleranse for forurensninger, noe som begrenser levetiden på katalysatorer i kjemiske prosesser.

Gass-kvaliteten vil åpenbart være sentral når CCU skal vurderes som et industrielt alternativ. Eksisterende teknologi for rensing av avgasser har i hovedsak til formål å fjerne forurensning som påvirker det lokale miljøet. Kravene til CO<sub>2</sub> som skal benyttes til CCU eller CCS kan gjøre det nødvendig å utvikle ny renseteknologi.

64 EU, 2020, Circular Economy Action Plan

Tabell 6: Oversikt over kjemiske CCU-prosesser

Råstoff og energi	Prosess	Produkter	Aktiviteter i Norge	TRL
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> til metanol	2-trinns kjemisk katalyse	Kjemikalier (formaldehyd, olefiner, DME mm) eller drivstoff	Forskning på optimalisering ved NTNU, SINTEF og utnyttelse til olefiner ved UiO (Cascade X)	9
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> til metanol	1-trinns kjemisk katalyse	Kjemikalier (formaldehyd, olefiner, DME mm) eller drivstoff	Industrielle prosjekter utredes av Carbon Recycling International (Finnfjord) og Thyssenkrupp/Swiss Liquid Future (Mo Industripark)	6-8
CO <sub>2</sub> + e- til metanol eller maursyre	Elektrokjemisk	Til kjemikalier eller drivstoff via etterfølgende fermentering	SINTEF er med i EU prosjekt (eForFuel)	2-3
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> til maursyre	Kjemisk katalyse			9
CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> til langkjedede hydrokarboner	Fischer-Tropsch (event. via RWGS)	Olefiner, smørprodukter eller drivstoff	Industrielle prosjekter utredes av Nordic Blue Crude og Norsk e-fuel	6-9
CO til karbon (+ H <sub>2</sub> )	Boudouard reaksjon eventuelt med H <sub>2</sub>	Karbonfiber eller bulk karbon som reduksjonsmiddel	Har vært vurdert av Elkem	9
CO <sub>2</sub> + e- til karbon	Saltsmelteelektrolyse	Karbonfiber-produkter	Bergen Carbon Solutions	5-6
CO <sub>2</sub> + NH <sub>3</sub> til urea	Kjemisk katalyse	Mineralgjødning	Etablert hos Yara	9
CO <sub>2</sub> inkorporering i plast		Derivater av PPC og PCHC	Forskning ved NTNU og fagmiljøer ved Norner, Ineos og Borealis	3-4
CO <sub>2</sub> inkorporering i betong		Bedre betongprodukter (varig lagring)	Under vurdering av Norcem, SINTEF og Byggforsk	5-6

Alternativt kan det utvikles nye produksjonsprosesser som direkte gir en mer egnet avgass. I den grad utnyttelse forutsetter forbehandling i form av konsentrering eller rensing, vil det påvirke både lønnsomhet og bærekraft.

Utnyttelse av konsentrerte CO<sub>2</sub>-strømmer begrunnes først og fremst fra et sirkulærøkonomisk perspektiv, der konsentrerte karbondasser har en produksjonsmessig verdi sammenlignet med atmosfærens 0,04 prosent CO<sub>2</sub>. CCU må derfor sammenlignes med ressursforbruket ved produksjon av biomasse fra jord- og skogbruk. Energieffektiviteten vil være særlig viktig, både for det enkelte prosesstrinn og energibalansen innenfor et industrielt system med mange koblede virksomheter. For eksempel kan spillvarme utnyttes til desorpsjon ved oppkonsentrering av CO<sub>2</sub> (aminteknologi). De grunnleggende forutsetningene for CCU-applikasjoner er tilgangen på elektrisk kraft (eller hydrogen direkte), men kraftprisen og andre lokale forhold som industriarealer, veier, kai og annen infrastruktur vil også påvirke attraktiviteten.

Det er mange CCU-prosjekter under utredning i Norge, og flere av disse beskrives nedenfor. Ofte er prosjektene basert på utenlandsk nøkkelteknologi som tiltrekkes av tilgangen på fornybar kraft. Alle prosjektene er imidlertid forankret i etablerte norske industriklynger og har som

mål å utnytte eksisterende infrastruktur gjennom nye former for industriell symbiose.

### Kjemisk og termokjemisk konvertering (Tabell 6)

Ved hjelp av den snart 100 år gamle Fischer-Tropsch prosessen (FT) kan CO<sub>2</sub> og hydrogen omdannes til langkjedede hydrokarboner. De direkte produktene vil typisk være en blanding av gasser og en olje/tjære-fase, men prosessen kan til en viss grad styres i ønsket retning, for eksempel om man primært ønsker lette olefiner, smørprodukter eller drivstoff i form av diesel eller parafin (flydrivstoff). Urenheter i prosessgassen, for eksempel S, Na, P eller tungmetaller, vil imidlertid kunne påvirke virkningsgraden og kan skade FT-katalysatoren.

Det synes å være stor interesse for å etablere slik CCU-virksomhet i Norge, basert på tilgangen på fornybar kraft til produksjon av grønt hydrogen. To prosjekter som begge er tilknyttet Herøya-miljøet er henholdsvis i) Norsk E-fuel i regi av det tyske elektrolyseselskapet Sunfire og ingeniørselskapet Paul Wurth og ii) det norske oppstart-selskapet Nordic Blue Crude i samarbeid med NTNU og Aker Solutions. Begge disse prosjektene planlegger demoprojekter med forskjellige typer hydrokarboner som produkter. Det kan også nevnes at norske forskningsmiljøer har høy kompetanse på FT prosesser. For eksempel utviklet Equinor en proprietær FT-reaktor og katalysator som senere ble solgt.



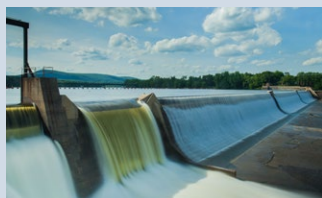
# CCU kan gi nok fôr-proteiner til å støtte en dobling av norsk lakseoppdrett

Under overskriften 'Feeding the Future', har Skretting satt fokus på behovet for mer bærekraftig fôr til akvakultur og hvordan det kan inngå i en sirkulær økonomi.

Som en del av denne ambisjonen har Skretting inngått flere industrielle partnerskap som kan lede til nye proteinråvarer. Samarbeidet med det amerikanske teknologiselskapet Kiverdi har potensial for å kunne bli et viktig grunnlag for fremtidig vekst i norsk oppdrettsnæring. Kiverdi har utviklet en unik fermenteringsteknologi der mikroorganismer benytter CO<sub>2</sub> som eneste karbonkilde sammen med energi fra hydrogen. Resultatet er en cellemasse med meget høyt innhold av protein med stor ernæringsmessig verdi. Dette proteinproduktet er grundig studert og godkjent for å inngå i human ernæring.

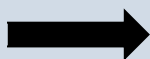
Kiverdi jobber tett sammen med Skrettings morselskap Nutreco og deres innovasjonsdivisjon NuFrontiers. Det planlegges nå at denne teknologien skal testes i pilotskala i Stavanger, Norge har flere konkurransefortrinn for fremtidig kommersiell produksjon. Skretting har nylig gjennomført en LCA-analyse med utgangspunkt i norske punktutslipp av CO<sub>2</sub> og utslippsfri hydrogen. Resultatene av disse studiene viser at mikrobiell produksjon av protein scorer høyt på viktige bærekraftsindikatorer sammenlignet med råvarer som normalt benyttes i dag. Bruk av CCU på dette området kan begrense avhengigheten av plantebasert produksjon, som kan føre til avskoging og redusert biodiversitet.

Beregninger viser at et norsk anlegg for produksjon av 100 000 tonn mikrobielt protein kan erstatte 650 km<sup>2</sup> soyaåker og samtidig gi en reduksjon i CO<sub>2</sub>-avtrykket på 86 prosent hvis CO<sub>2</sub>-kilden er fossil og 98 prosent dersom CO<sub>2</sub>-kilden er biogen (Blonk Consulting, 2019).



Bakteriekultur sparer 650 km<sup>2</sup> soya åker

1 H 1s<sup>+</sup>  
Hydrogen  
1,008



CO<sub>2</sub>



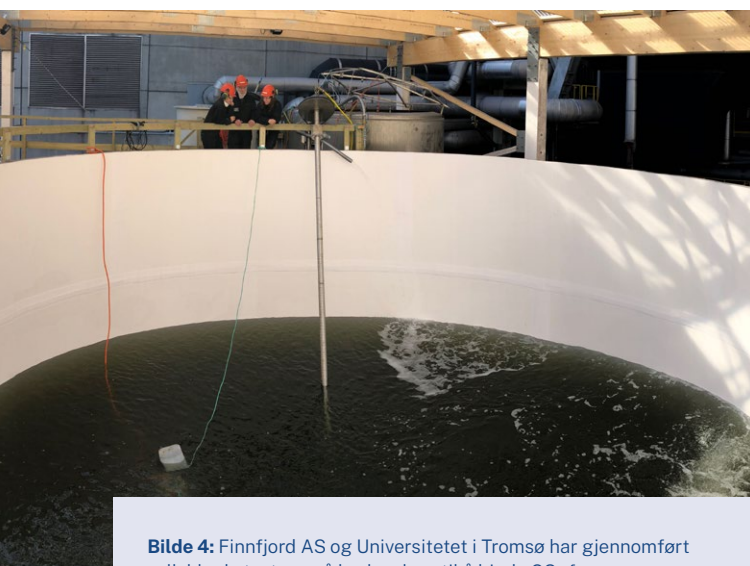
...og gir 86 prosent reduksjon i CO<sub>2</sub> utslipp



Metanol kan bli en viktig plattform i sirkulær karbon-økonomi (Figur 28). I tillegg til CCU fra konsentrerte røykgasser, som er fokus her, kan metanol på tilsvarende måte produseres fra syntesegass ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) dannet ved termiske prosesser (pyrolyse eller gassifisering) av biomasse eller avfall fra husholdninger og industri.

Som beskrevet i kapitlet om petrokjemi er metanol en viktig byggestein for en lang rekke organiske produkter, og kan for eksempel omdannes til formaldehyd og derfra til lim og resiner i for eksempel sponplater og limtre, eller være utgangspunkt for plastmaterialer via ulike olefiner. Videre prosessering av produktene vil da påvirke graden av hvordan syklusen lukkes (der karboner går til nye produkter) eller avsluttes med CCS. Metanol kan også brukes direkte som drivstoff eller konverteres videre til propan-/dieselerstatningen dimetyleter, eller «bensinmolekyler». I tillegg kommer mange andre spesialkjemikalier.

Det forskes på flere ulike prosessalternativer og katalysatorer for framstilling av metanol fra  $\text{CO}_2$ , men virkningsgraden vil i stor grad påvirkes av  $\text{CO}_2$ -konsentrasjonen og urenheter i prosessgassen. Ved en 2-trinns reaksjon vil  $\text{CO}_2$  og hydrogen først reagere gjennom såkalt «reverse water-gas shift» til karbonmonooxyd (CO), som så reagerer videre med hydrogen til metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Denne prosessen er industrialisert. Prosessen kan også skje direkte i ett trinn ved hjelp av andre katalysatorer. 1-trinns konvertering av  $\text{CO}_2$  til metanol er i demofase og flere prosjekter utredes



**Bilde 4:** Finnjord AS og Universitetet i Tromsø har gjennomført vellykkede tester av å bruke alger til å binde  $\text{CO}_2$  fra prosessgassen. Prosjektet disponerer nå verdens største fotobioreaktor (300 000 liter) og er nå i pilotskala

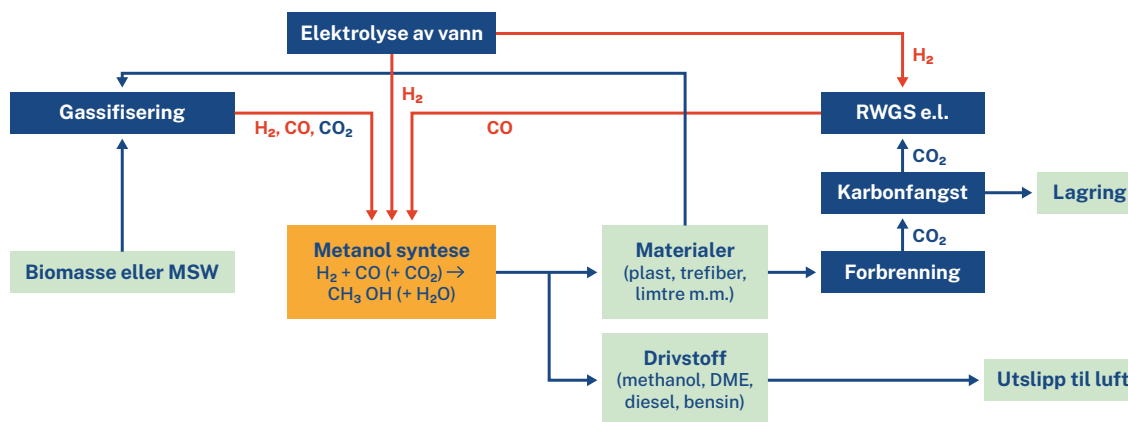
i Norge. Blant disse er i) islandske Carbon Recycling International (CRI) og ii) en industriell gruppering rundt tyske Thyssenkrupp og det sveitsiske teknologiselskapet Swiss Liquid Future. CRI har inngått samarbeid med Statkraft og Finnfjord ferrosilisiumverk, mens Thyssenkrupp har nylig lansert planene for etablering ved Mo Industripark knyttet til  $\text{CO}_2$ -utslipp fra Elkem Rana. Statkraft er involvert i begge disse prosjektene, som potensiell leverandør av grønt hydrogen.

Det foreligger en lang rekke andre alternative reduksjonsprosesser for  $\text{CO}_2$ :

- BASF har for eksempel utviklet en prosess der  $\text{CO}_2$  og hydrogen danner maursyre ( $\text{CHOOH}$ ). Ved SINTEF foregår det forskning på en tilsvarende elektrokjemisk omdanning av  $\text{CO}_2$  til maursyre, som så kobles til en bioteknologisk prosess hvor maursyren anvendes som substrat for mikroorganismer.
- $\text{CO}_2$  kan også omdannes til elementært karbon (C) via  $\text{CO}$ /syntesegass og såkalt Boudouard reaksjon. Hvorvidt det vil være aktuelt for produksjon av bulk karbon som reduksjonsmiddel i metallurgiske prosesser er trolig både et teknisk og et økonomisk spørsmål. Alternativt kan  $\text{CO}_2$  i en røykgass omdannes til karbon gjennom en saltsmelteelektrolyse. Sistnevnte prinsipp benyttes av oppstartselskapet Bergen Carbon Solutions for å produsere karbonfibre av høy kvalitet og pris.
- Det foregår betydelig forskning, blant annet ved Forskningsinstituttet Norer og ved NTNU, for å inkorporere  $\text{CO}_2$  direkte inn i ulike plastpolymerer. Resultatet er materialer med interessante egenskaper, for eksempel polypropylene-karbonat (PPC) eller polycyclohexan-karbonat (PCHC). CCU kan dermed inngå i verdikjeden for plastproduksjon på ulike måter, se blant annet produksjon av plastbyggesteiner som etylen, propylen og PHA (polyhydroxyalkanoat) via bakteriell fermentering diskutert nedenfor.
- $\text{CO}_2$  kan også inkorporeres i betong på en måte som forbedrer betongens egenskaper (raskere herding og høyere styrke), samtidig som det skaper en langsiktig lagring. Ifølge canadiske Carbon Cure kan opptil flere hundre kilo  $\text{CO}_2$  absorberes per tonn betong og metoden er under vurdering ved Norcem og norske byggfaglige miljøer.
- Som eksempel på fullt industrialiserte teknologier kan nevnes  $\text{CO}_2$ , som i reaksjon med ammoniakk ( $\text{NH}_3$ ) danner urea, en prosess som er i industriell anvendelse i mineralgjødselproduksjon. En annen fullt industrialisert prosess er  $\text{CO}_2$  reduksjon til metan (Sabatier reaksjon), men det er kanskje tvilsomt om dette er aktuelt i Norge.



Figur 28: Kjemisk basert CCU via metanol.



### Bioteknologisk konvertering (Tabell 7)

Den mest nærliggende bioteknologiske CCU metoden er å øke effektiviteten av planters fotosyntese gjennom høyere CO<sub>2</sub> konsentrasjon, for eksempel i et lukket drivhus eller såkalt vertikalt landbruk. Dette benyttes allerede for CO<sub>2</sub>-utslipp fra for eksempel Greve Biogass og Tine Meieriet på Jæren. CO<sub>2</sub> konsentrasjonen når imidlertid et metningsnivå ved cirka tre ganger atmosfærekonsentrasjon, og industriell planteproduksjon har derfor begrenset skalerbarhet innenfor et CCU perspektiv.

Alternativt kan man benytte mikroalger, som kan gi en svært høy og kompakt biomasseproduksjon. De fleste mikroalger er encellede organismer som lever i vann. Ved autotrof dyrkning bruker de på samme måte som planter, lys som energikilde (i Norge hovedsakelig kunstig lys) og CO<sub>2</sub> som dominerende karbonkilde. CO<sub>2</sub> må

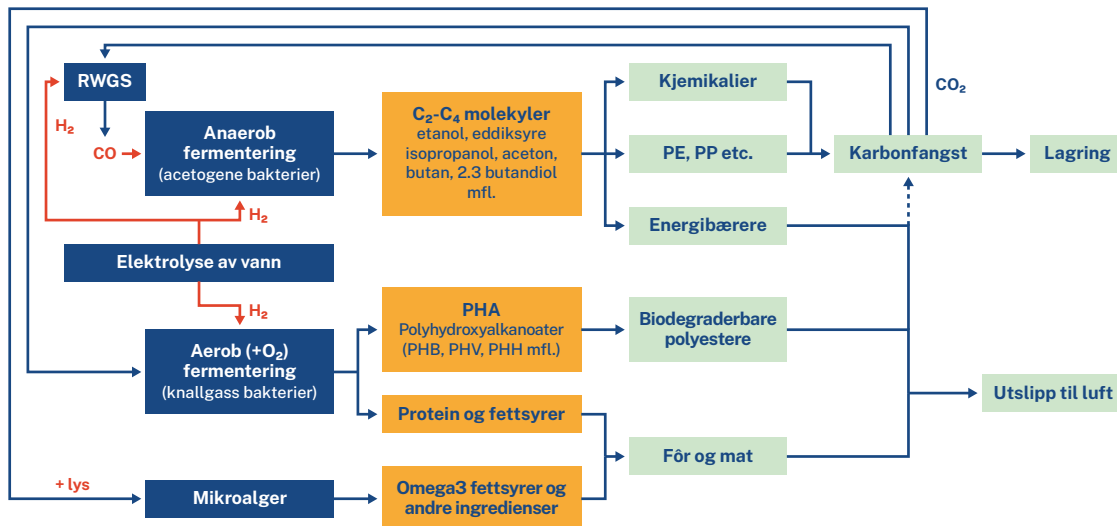
dermed tilføres dyrkningsvannet i kvantitative mengder sammen med ulike andre næringsstoffer som nitrogen, fosfor, svovel mm. Mikroalger er en interessant kilde til komplekse biomolekyler som proteiner, lipider, polysakkarider, vitaminer, fargestoffer etc. I Norge foregår det to forsøk i industriell pilotskala, henholdsvis ved oljeraffineriet på Mongstad og ved Finnfjord AS (Bilde 4), begge med sikte på å levere ingredienser til fiskefôr.

De senere årene har det blitt utviklet flere CCU prosesser basert på bakteriell fermentering. Amerikanske Lanzatech har vært ledende på industrialisering av acetogene bakterier, som bruker CO som både energi og karbonkilde. Prosessen er anaerob, det vil si foregår uten oksygen. Fra naturlige forekommende bakterier er det selektert frem stammer som gir høyt utbytte av etanol. På samme måte som metanol nevnt ovenfor, kan etanol videreforedles til en lang rekke kjemikalier,

Tabell 7: Bioteknologisk CCU prosesser, de mest aktuelle produktene og mulige lukkede CO<sub>2</sub> kretsløp.

Råstoff og energi	Organisme	Produkter	Aktiviteter i Norge	TRL
CO (+ hydrogen)	Acetogene bakterier	C2-C4 molekyler med etanol som basisprodukt	Etanol til SAF eller PE utredes	8-9
CO <sub>2</sub> + hydrogen via RWGS eller syntese-gass	Acetogene bakterier	C2-C4 molekyler med etanol som basisprodukt	Etanol til SAF eller PE utredes	7
CO <sub>2</sub> + hydrogen via RWGS eller syntese-gass	Knall-gass bakterier	Cellemasse (proteiner og lipider) til fôr og mat	Demoanlegg planlegges (Nutreco)	5-6
CO <sub>2</sub> + hydrogen via RWGS eller syntese-gass	Knall-gass bakterier	Polyhydroxyalkanoater (PHA) = biodegraderbare polyestere	Pilot planlegges (NORCE)	4-5
Forhøyet CO <sub>2</sub> + lys	Mikroalger	Cellemasse (omega3 fettsyrer og andre ingredienser)	Demoanlegg i drift (Finnfjord)	7
Forhøyet CO <sub>2</sub> + lys	Drivhus/vertikal landbruk		Noen drivhus, men ingen større anlegg for vertikallandbruk	9

Figur 29: Bioteknologiske CCU prosesser, de mest aktuelle produktene og mulige lukkede CO<sub>2</sub> kretsløp.



polymerer eller drivstoff. Lanzatechs teknologi har vært i kommersiell produksjon i Kina siden 2018 (40 millioner liter per år). Ved hjelp av genteknologiske metoder kan metabolismen i disse mikroorganismene endres slik at de produserer mange andre nøkkel-kjemikalier, slik som aceton, isopropanol, 2,3-butandiol mfl. Teknologien kan derfor betraktes om en allsidig plattform under utvikling.

Lanzatech er også i ferd med å ferdigstille en ny kjemisk prosess for å omdanne etanol til parafin (flydrivstoff), og metoden er allerede godkjent for kommersielle flygninger. Fra et norsk synspunkt er det interessant at karbon-effektiviteten (hvor mye CO<sub>2</sub> som utnyttes) i Lanzatech's prosess øker vesentlig dersom man tilfører hydrogen, og med økende hydrogenmengde kan også CO<sub>2</sub>/CO blandinger benyttes. Videre er hydrogen nødvendig for den etterfølgende «etanol-to-jet»-prosessen og Lanzatechs produksjonsplattform vil derfor egne seg godt i Norge. Det pågår utredning av flere norske prosjekter basert på acetogene bakterier.

Et annet alternativ benytter seg av såkalte knallgass-bakterier. I motsetning til acetogene bakterier er denne prosessen aerob, det vil si det vil tilføres en del oksygen sammen med CO<sub>2</sub>/CO og hydrogen. Knallgassbakterier er på samme måte som mikroalger, meget godt egnet for produksjon av proteiner og andre ingredienser til fiskefôr, og det forventes vedtak høsten 2020 om bygging av et pilotanlegg for denne prosessen i Stavanger.

Fiskefôrprodusenten Skretting (norsk del av nederlandske Nutreco) har inngått avtale med den amerikanske teknologileverandøren Kiverdi, med planer om produksjon av 100-200 000 tonn protein i Norge.

Et interessant aspekt ved knallgassbakterier er at de ved nitrogen-eller oksygen-begrensning produserer store mengder av en naturlig polyester, polyhydroxyalkanoat (PHA) som opplagsnæring. Ved å styre fermenteringsprosessen kan opptil 70 prosent av cellemassen konverteres til denne typen biodegraderbar plast. PHA er en familie av molekyler med ulik kjedelengde som allerede er tatt i bruk i mange produkter, men foreløpig med små volumer. Mens dagens produksjon skjer fra substrater som sukker, metan eller fritureolje, forsker NORCE på produksjon av PHA fra CO<sub>2</sub> + hydrogen.

I tillegg til karboneffektivitet og produktutbytte må de bioteknologiske prosessene også vurderes ut fra deres energieffektivitet. Ettersom mikroalgene benytter LED-lys, Lanzatechs basisprosess CO og knallgassbakterier hovedsakelig hydrogen, vil energieffektiviteten variere, men det teoretiske energiforbruket ved karbon-reduksjon er selvsagt det samme i bioprosesser som ved kjemisk konvertering.

## Oppsummering og anbefalinger knyttet til CCU

CCU kan representere en god mulighet for reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp, samtidig som Norge kan ta en ledende posisjon innenfor karbonresirkulering der utnyttelse av industriell CO<sub>2</sub> kan avlaste jord- og skogbruk (bioøkonomi) i produksjon av organiske produkter. Slik karbonresirkulering bør rettes mot produkter som ikke har karbonfrie alternativer.

### Anbefalinger:

- Virkemiddelbruk bør rettes mot prosjekter av stor samfunnsmessig betydning, det vil si prosjekter som kan dokumentere klimaeffekt eller andre bærekraftsfordeler i et livsløpsperspektiv og har godt potensiale for å kunne bli lønnsomme på sikt.
- Assistere norske bedrifter i å utnytte EUs finansielle ordninger innen karbonresirkulering.
- Legge forholdene til rette for å tiltrekke utenlandsk CCU-relatert teknologi/industri.
- Bidra til at fornybar energi og utslippsfri hydrogen også er tilgjengelig for CCU formål.

Det finnes mange konkurrerende teknologier for CCU, hvorav noen har lavt TRL nivå, mens andre er modne. I en tidlig fase kan det være vanskelig å vurdere hvilke som er mest egnet i forhold til fremtidig marked, lønnsomhet og klimaeffekt. Det er videre et sterkt behov for støtte til overgangen mellom forskning og industriell realisering.

### Anbefalinger:

- Det bør forskes på et bredt spekter av CCU teknologier som dekker mange produktområder.
- Støtteordninger for pilotering, demonstrasjon og oppskalering bør også omfatte CCU prosjekter.

På sikt må CCU enten være del av sirkulære lukkede systemer, bruke CO<sub>2</sub> fra biomasse eller omgivelsesluft, eller innebære permanent binding av CO<sub>2</sub>.

### Anbefalinger:

- I en overgangsfase utnytte satsingen på CCS til parallelt å bygge en lønnsom CCU industri.
- Samtidig intensivere erstatning av fossilt karbon i prosessindustrien med biogent karbon.
- Stimulere forskning og samarbeid som kan gjøre Norge til et pilotland for DAC.

Det er vanskelig å beregne den direkte og indirekte klimaeffekten av CCU, og policy må sikre at CCU ikke forsinker viktige klimatiltak med større effekt, som elektrifisering eller CCS.

### Anbefalinger:

- Stimulere forskning på bærekraftsanalyse, der både klima og andre miljøindikatorer inngår.
- Norge bør delta i arbeid med indikatorer, policy og reguleringer for sirkulær karbonøkonomi.

Det bør utredes en helhetlig plan for karbonforvaltning som bygger videre på nasjonale planer for bioøkonomi og sirkulærøkonomi, det vil si der i) reduserte utslipp, ii) karbon resirkulering, iii) effektivisert bioproduksjon og DAC samspiller med avtagende fossile uttak og CCS.

### Anbefalinger:

- CCU og CCS bør rettes mot utslipp der dette er enklest og billigst, uavhengig av karbonets opprinnelse (fossil eller biogen).
- Bruke karbon-prising på uttak og finansiell belønning ved lagring, uavhengig av karbonets opprinnelse.

# Hydrogen

## – en forutsetning for omstilling

Hydrogen er en energibærer som kan bidra til å redusere utslipp og til å skape verdier for norsk næringsliv. Tilgang på tilstrekkelig mengde hydrogen er en viktig forutsetning for flere av prosessene som vurderes i dette arbeidet, både som energibærer og som direkte råmateriale (for eksempel reduksjonsmaterialer i metallurgisk industri og som råstoff til ammoniakk-produksjon). Energiinnholdet i hydrogen kan enten utnyttes ved at hydrogen omdannes til elektrisitet gjennom brenselceller, eller til kraft- og varmeproduksjon ved forbrenning på samme måte som naturgass.

### Viktig med videre teknologiutvikling

For at hydrogen skal være en lav- eller utslippsfri energibærer, må det produseres med ingen eller svært lave utslipp, som ved elektrolyse av vann med ren kraft, eller fra naturgass med CO<sub>2</sub>-håndtering. Teknologimodenhet og høye kostnader er i dag sentrale barrierer for økt bruk av hydrogen. Skal hydrogen og hydrogenbaserte løsninger som grønn ammoniakk tas i bruk på nye områder, må teknologien og løsningene bli mer modne, og kostnadene må ned i alle deler av verdikjedene.

### To produksjonsmetoder for lavutslippshydrogen – grønt og blått

Den første måten å produsere hydrogen på, er gjennom vannelektrolyse. Dette blir gjerne kalt grønt hydrogen når det brukes fornybar kraft. Elektrolyse gjøres hovedsakelig ved to teknologier som er kommersielt tilgjengelig på markedet i dag; alkalisk elektrolyse og polymer-elektrolytt membran (PEM) elektrolyse. Begge teknologiene er relativt modne, men med fortsatt rom for videre utvikling. Både energieffektiviteten og levetiden er noe høyere ved alkalisk elektrolyse. PEM-anlegg er per i dag i snitt dyrere, blant annet fordi det brukes edle metaller (som platina og iridium) i anleggene og de har noe kortere levetid enn alkalisk. Fordelen er at anleggene er mer kompakte og fleksible.

Den andre måten å produsere hydrogen på er fra naturgass, tunge hydrokarboner eller kull. Dette gjøres vanligvis med dampreforming (SMR) eller autotermisk reformering (ATR). Produksjon fra naturgass, som i stor grad består av metan, innebærer at naturgass reagerer med vanddamp eller oksygen (i form av luft eller rensed O<sub>2</sub>) under forholdsvis høyt trykk og høy temperatur. Denne prosessen produserer hydrogen og CO<sub>2</sub>. For at prosessen skal gi utslippsfritt hydrogen må karbonfangst og -lagring være en del av prosessen, og hydrogenet kalles da gjerne blått hydrogen. Dampreforming har rundt 70 til 85 prosent energieffektivitet. Uten CO<sub>2</sub>-håndtering, vil produksjon av ett tonn hydrogen gi omtrent åtte tonn CO<sub>2</sub><sup>65</sup>. Sammenlignet med elektrolyse er produksjonsanlegget, og dermed produksjonsvolumet, betydelig større. Ett storskala dampreformeringsanlegg kan produsere fra 120 til 240 tonn hydrogen per døgn. Til sammenligning opplyser det norske børsnoterte selskapet NEL AS (Norsk Hydro Electrolysers AS), som produserer elektrolysører og fyllestasjoner, at en av deres alkaliske moduler kan produsere opp mot åtte tonn hydrogen per døgn.

Skalering av vannelektrolyse er således et område for FoU, og SOEC og høytrykks-elektrolyse er teknologier under utvikling. I et mer langsiktig perspektiv jobbes det rundt om i verden og også i Norge med termokjemisk splitting av vann ved utnyttelse av for eksempel konsentrert solvarme, samt utnyttelse av solenergi direkte til reaksjonen  $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$  gjennom fotokatalyse.

### Bruk av hydrogen i industrien i dag

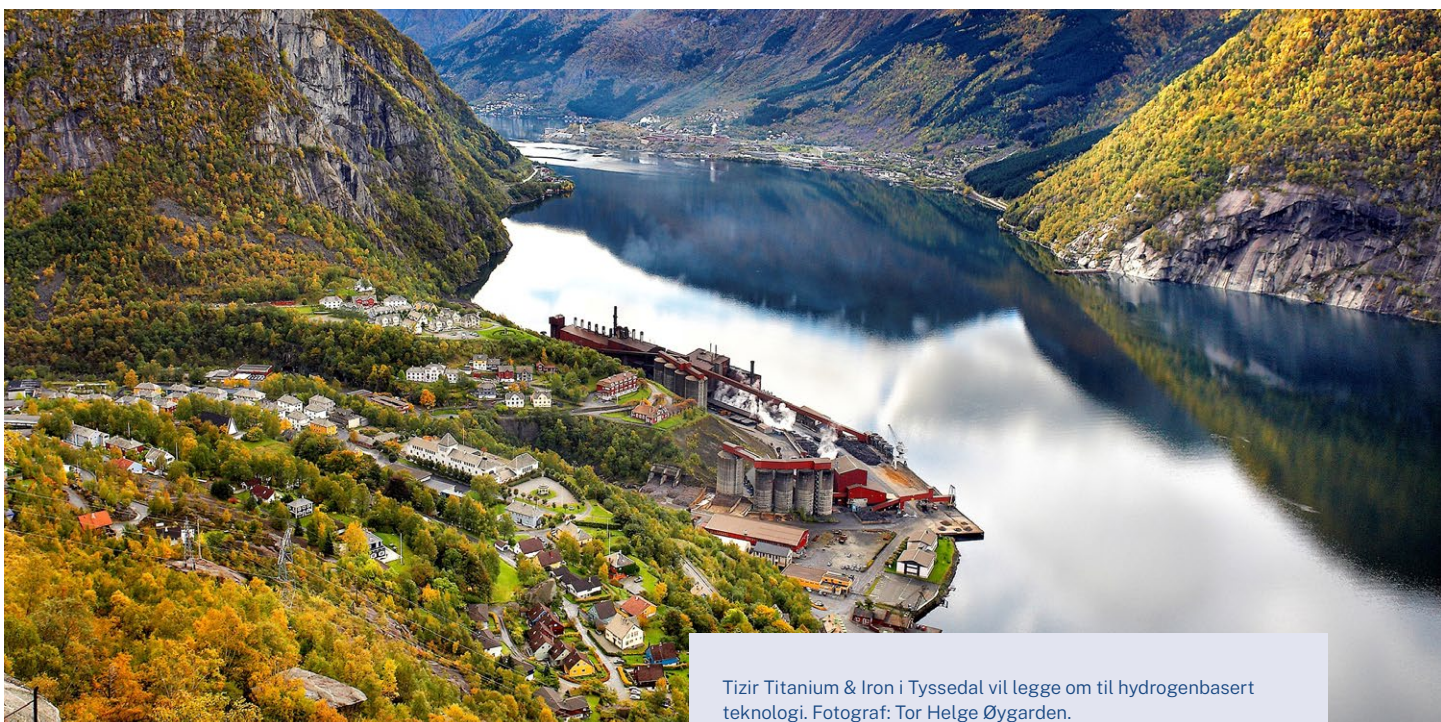
Bruk av hydrogen i prosessindustrien faller i tre kategorier:

- Bruk som innsatsfaktor i produksjonen
- Bruk som energibærer
- Bruk i selve prosessen

Det er i tillegg noen industriprosesser hvor det i dag produseres hydrogen som et biprodukt. Dette hydrogenet kan utnyttes i andre sektorer.

65 Hallgeir; Hole (2019), Hydrogen i det moderne energisystemet





Tizir Titanium & Iron i Tyssedal vil legge om til hydrogenbasert teknologi. Fotograf: Tor Helge Øygarden.

Nesten alt hydrogen som i dag brukes i Norge anvendes som innsatsfaktor i kjemisk industri og i raffinering av petroleumsprodukter. I slike anvendelser blir hydrogenet en del av sluttproduktet. I produksjon av mineralgjødning brukes hydrogen for å produsere ammoniakk, som så brukes til å produsere ulike gjødningstyper. Hydrogenet som i dag brukes er nesten utelukkende produsert ved reformering av naturgass uten karbonfangst- og lagring. Det medfører store utslipp.

Bruk av hydrogen som energibærer innebærer at hydrogenet omdannes til elektrisitet eller varme gjennom forbrenning eller i en brenselcelle. Utover det som allerede er elektrifisert på vei mot lavutslippssamfunnet, dekkes industriens energibehov i dag i stor grad av fossile energiprodukter som olje, naturgass og LPG. I teorien kan hydrogen erstatte disse fossile energibærerne og gi utslippsreduksjoner dersom hydrogenet er produsert uten utslipp. Eksempelvis kan hydrogen forbrennes istedenfor olje eller gass der hvor det trengs varme, eller gassturbiner kan oppgraderes slik at de kan drives med hydrogen eller ammoniakk i stedet for naturgass.

Den siste kategorien hvor hydrogen kan komme til anvendelse er i industrielle prosesser hvor energibærere i dag anvendes for deres kjemiske egenskaper, som reduksjonsmiddel. I dag er det kull og petroleumsokoks som i stor grad anvendes. I noen prosesser er det teoretisk mulig å bytte ut kullet med hydrogen som reduksjonsmiddel.

Prosesser hvor det i dag er mulig å benytte hydrogen som reduksjonsmiddel er i stålproduksjon, reduksjon av titanoksid og til forreduksjon ved manganproduksjon. I Norge produseres det ikke stål fra jernmalm, men i blant annet Sverige og Tyskland vurderes og testes bruk av hydrogen som reduksjonsmiddel i stålproduksjon. I Norge har Tizir i Tyssedal et prosjekt hvor de jobber med å utvikle og teste teknologi som skal til for å bruke hydrogen som reduksjonsmiddel. Det bør bemerkes at de estimerte volumbehovene for hydrogen til metallproduksjon er små i forhold til de totale hydrogenbehovene en ser for seg i 2050. DNV GL<sup>66</sup> estimerer at industrien utgjør cirka 7 prosent av totalbehovet for hydrogen. Av dette utgjør metallproduksjon cirka halvparten.

Hvorvidt hydrogen tas i bruk som energibærer eller som innsatsfaktor kommer i stor grad an på hva som er lønnsomt for den enkelte bedrift og hvilke alternativer som finnes. Dette avhenger av prisen på de fossile produktene, avgifter og kostnaden ved utslippsfri hydrogen eller bruk av andre lavutslippsløsninger. For de anleggene som er underlagt kvotesystemet, er kvoteprisen med på å legge føringer for hva som er lønnsomt, mens det særlig er avgifter og eventuelt krav i utslippstillatelser som legger føringene for ikke-kvotepliktige anlegg.

66 DNV GL (2019), Produksjon og bruk av hydrogen i Norge; IEA (2019), The Future of Hydrogen



# Oppsummering og ekspertgruppens samlede anbefalinger

Målene i Prosess21 og regjeringens mål om å redusere utslippene med minst 50 prosent og opp mot 55 prosent sammenliknet med 1990 nivå innen 2030, samt karbonnøytralitet i 2050, er svært ambisiøse, og vi har dårlig tid. Omstilling til nullutslipp i prosessindustrien krever avansert teknologiutvikling og store investeringer, med omfattende planlegging etterfulgt av lang nedskrivningstid. Det er avgjørende at man kombinerer virkemidler som i) stimulerer forskning, utvikling og kompetansebygging rettet mot teknologi og råvarer med ii) markedsinsentiver som stimulerer industrielle investeringer i de strategisk viktige utviklingsløpene.

Norsk landbasert prosessindustri er i verdensklasse når det gjelder energieffektivitet og produksjon med lave utslipp. For flere av dagens prosesser og teknologier er man imidlertid i ferd med å nå teoretisk minimum for energiforbruk og utslipp av klimagasser. Dette betyr at utvikling av nye og utslippsfrie prosesser er nødvendig. Industrien ser denne utfordringen og de fleste selskapene har utarbeidet klimastrategier med konkrete mål.

Det er for tidlig å si noe om hvilken nullutslippsteknologi som vil vinne fram i ulike industrielle segmenter. Trolig vil det være en kombinasjon av flere ulike løsninger. Virkemiddelbruk må derfor ikke innrettes for å "plukke vinnere", men for å "skape vinnere". Dette må gjøres gjennom et samordnet sett av virkemidler som gir risikoavlastning gjennom hele utviklings- og realiseringsløpet, tilpasset den fasen som en teknologi til enhver tid er i.

De fleste aktører i norsk prosessindustri opererer i et globalt marked der konkurrenter i ulik grad jobber med tiltak for å redusere sine utslipp av CO<sub>2</sub>, og ofte under helt andre rammevilkår. Det betyr at økte klimainvesteringer og kostnadsnivå kan gi norske aktører en markedsutfordring. Det er derfor viktig å innrette nasjonal virkemiddelbruk (inkludert tilskudds-/låneordninger, regelverk, skatter, avgifter og øvrige insentiver) på en slik måte at industrien kan prioritere for omstillingen til lavutslippssamfunnet.

Rikelig tilgang på fornybar kraft i sammenheng med globale og regionale utslippskrav kan imidlertid også gjøre Norge mer attraktiv som lokasjon for utslippsfri produksjon.

Gjennomføring av utslippsreducerende tiltak i eksisterende anlegg vil likevel ikke være nok til å nå visjonen om økt verdiskaping med nullutslipp i 2050. Etablert industri må omstilles og ny industri må skapes, og det må investeres i nye anlegg med helt ny teknologi enn den som benyttes i dag. Det må etableres industri som produserer andre produkter enn dagens, og legges til rette for industriell symbiose som gir redusert totalt karbonfotavtrykk.

Basert på de vurderingene som er gjort i dette arbeidet, samt anbefalingene fra de ulike delene og temaene i rapporten, er ekspertgruppens samlede hovedkonklusjoner og anbefalinger som følger:

## Støtte til forskning og utvikling

Omstilling til ny teknologi krever store investeringer og omfattende planlegging, samt internasjonalt ledende kompetanse. Det er viktig med økt satsing på videreutvikling av sterke norske forskningsmiljø og kompetanseinstitusjoner innenfor prosessindustriens kjerneområder.

Eksisterende virkemiddelapparat dekker ikke prosessindustriens behov for fundamental forskning og piloteringsmuligheter i tilstrekkelig grad. Et dedikert nullutslippsprogram for prosessindustrien i Forskningsrådet på lik linje med de bransjeorienterte programmene Petromaks, Maroff og EnergiX vil avhjelpe dette og sikre kontinuitet i forskningen.

**Vi anbefaler** etablering av et eget program for prosessindustrien, Prosess 2050, i Forskningsrådet. Prosess 2050 skal legge til rette for lange, komplekse og kostnadsintensive utviklingsløp, både nasjonale og med internasjonalt samarbeid.

Formålet med Prosess 2050 skal være grønn omstilling med nullutslipp, sirkulære prosesser og utvikling av ny, miljøvennlig prosess teknologi som hovedkriterier. I en overgangsfase kan Prosess 2050 legges inn i eller bli en del av Forskningsrådets, Innovasjon Norges, Enova og Sivas Grønn Plattform.

Prosess 2050 må:

- Bidra til grunnleggende akademisk høy-risiko forskning og forskerutdanning innrettet mot industriens fremtidsbehov.
- Styrke kompetansebygging med industri-medvirkning innenfor prosessindustriens områder (her er det begrensede muligheter i dag).
- Dekke hele innovasjonskjeden frem til pilotering og være koordinert med øvrige virkemidler for innovasjon, markeds-introduksjon og implementering.

**Vi anbefaler** målrettet satsing på avansert forskningsinfrastruktur, samt vurdere å justere katapultkonseptet ([norskkatapult.no](https://norskkatapult.no)) for å dekke prosessindustriens behov. Prosessindustriens behov for infrastruktur bør fremheves som eget punkt i Forskningsrådets infrastruktur-strategi (i dag ligger prosessindustrien under kategori "Andre infrastrukturbehov").

**Vi anbefaler** tett integrasjon mot EU og europeiske støtte- og finansieringsordninger samt europeiske strategier for omstilling. Norsk prosessindustri må styrke sitt engasjement i relevante fora og partnerskap for å sikre at satsinger blir relevant for norsk prosessindustri og derav øke deltakelsen i europeiske prosjekter.

## Tiltak for teknologiimplementering og markedsutvikling

**Vi anbefaler** økt fokus på og støtte til oppskalering og uttesting i industrielt relevante betingelser (TRL 6-8), både til investering og tilhørende FoU-aktiviteter.

**Vi anbefaler** et tett samarbeid mellom industrien og virkemiddelapparatet, der industrien forplikter seg til ambisiøse klimastrategier, utvikling og implementering av nullutslippstønsninger, og virkemiddelapparatet forplikter seg til risikoavlastning tilpasset utviklingsløpenes behov. Sektoravtaler med myndighetene bør vurderes, eksempelvis innen hydrogenteknologi.

**Vi anbefaler** at det utredes nye virkemidler, som for eksempel carbon contracts for difference (CCfD) for risikoavlastning i tidlig markedsutvikling for nullutslippsteknologi (f.eks. CCS, bruk av nullutslippshydrogen eller bærekraftig biokarbon), der kvoteprisen alene ikke utløser slike investeringer i dag.

**Vi anbefaler** krav i offentlige innkjøp som drivkraft for marked etter produkter med lave karbonfotavtrykk, der det første betalingsvillige markedet skapes.

**Vi anbefaler** videreføring av Prosess21 som forum for samarbeid mellom industri, virkemiddelapparat og myndigheter.

**Vi anbefaler** god tilrettelegging og attraktive rammebetingelser for ny-investeringer i grønn industri, med referanse til rapport fra ekspertgruppen for Vertskapsattraktivitet.

**Vi anbefaler** videreføring og styrking av risikoavlastende støtteordninger for investeringer i innovativ null- og lavutslippsteknologi i en periode fram til rammevilkår for CO<sub>2</sub>-utslipp utjevnes mellom globale aktører. Slik støtte vil måtte knyttes til ambisiøse klimastrategier fra industriens side, samt til forpliktelser til å følge dem.

## Helhetlig karbonforvaltning

**Vi anbefaler** at det utarbeides en helhetlig plan for karbonforvaltning som bygger videre på nasjonale planer for bioøkonomi og sirkulærøkonomi. I en slik plan vil i) prosesser for reduserte utslipp, ii) karbonresirkulering, iii) effektivisert bioproduksjon og iv) fremtidig "direct air capture" (DAC) samspille med avtagende fossile uttak og CCS.

**Vi anbefaler** at det utarbeides anbefalinger og policy i samsvar med internasjonale føringer som stimulerer bruken av knappe bioressurser der behovet og nytten er størst.

**Vi anbefaler** at Norge deltar aktivt i arbeidet med å utarbeide internasjonale standarder for beregninger av bærekraft og at det samtidig stimuleres til forskning på bærekraft der både klima og andre miljøindikatorer inngår.

## Tilgang på fornybar kraft og hydrogen

Tilgang på fornybar kraft og hydrogen er en forutsetning og en kritisk viktig ressurs i de fleste teknologiene som er omtalt i denne rapporten

**Vi anbefaler** at det legges til rette for videre utbygging og industriell utnyttelse av fornybar kraft og norsk satsing på utslippsfri hydrogenproduksjon slik at kraftoverskudd kan brukes til grønn omstilling og etablering av ny grønn industri.

## Kompetansebehov og rekruttering

Kompetanseutvikling må videreføres og styrkes. Fagkompetansen må hele tiden vedlikeholdes og videreutvikles, fra fag- til forskerutdanning. Tett samarbeid mellom industrien, FoU-miljøene og virkemiddelapparatet må videreutvikles. Kunnskap og kompetanse er en viktig forutsetning for fortsatt utvikling av en bærekraftig prosessindustri. Det utdannes i dag ikke nok kandidater med riktig fagbakgrunn og rekruttering er en bekymring for industrien.

I tillegg til dette vil stadig mer komplekse bærekrafts-vurderinger i framtiden gi et økende behov for kompetanse og forskning på livsløpsanalyse der både klima og andre miljøindikatorer inngår.

**Vi anbefaler** at realfagene matematikk, fysikk, kjemi og biologi styrkes betraktelig i videregående skole og at det gis målrettet veiledning rundt hva slags kompetanse og kunnskap som må til for å føre oss til lavutslippssamfunnet.

**Vi anbefaler** fortsatt fokus på og videreutvikling av den norske samspillsmodellen mellom industri, FoU og virkemiddelapparatet som drivkraft for kompetanse, innovasjon og rekruttering.

**Vi anbefaler** at kunnskap om bærekraft integreres i relevant mastergradsutdanning.

## Industrispesifikke anbefalinger

### Raffinerier og petrokjemisk industri:

Klimastrategiene til raffineriene og den petrokjemiske industrien innebærer både direkte utslippsreduksjoner gjennom elektrifisering og indirekte utslippsreduksjoner gjennom økende andel fornybart råmateriale og resirkulering. Til dette finnes mye moden og tilgjengelig teknologi, men dette er meget kapitalintensive endringer som krever gode rammevilkår eller økte krav for å iverksettes.

- **Vi anbefaler** å øke innsatsen på å fjerne utslippene fra egne produksjonsprosesser gjennom elektrifisering, varmegjenvinning og overgang til fornybar energi.
- **Vi anbefaler** å prioritere produkter med lavt klimafotavtrykk over et livsløp, co-prosessering med massebalanseprinsipp for avfall og bioføde, samt resirkulering av plast og bioavfall.
- **Vi anbefaler** integrering med annen industri for optimal utnyttelse av energi og ressurser, samt for stordriftsfordeler (industriell symbiose).
- **Vi anbefaler** å opprette en Kjemisk Prosessindustri Forskningsforening (tilsvarende FFF -Ferrolegeringsindustriens Forskningsforening).

### Mineralgjødning:

Produksjon av mineralgjødning basert på grønn ammoniakk fra hydrogen produsert fra elektrolyse ved bruk av fornybar energi er den **anbefalte** løsningen for å dekarbonisere gjødningproduksjonen i Norge. I tillegg kan grønn ammoniakk gi en løsning for dekarbonisering av skipsfart, og posisjonere Norge som en frontløper for grønn ammoniakk som skipsdrivstoff. En overgang til grønn ammoniakkproduksjon er i dag ikke konkurransedyktig, og det bør legges til rette for virkemidler som kan fremskynde implementeringen. Elektrolyseteknologi for produksjon av hydrogen er kommersielt tilgjengelig i små enheter, men en oppskalering til industriskala er i dag lineær og kapitalintensivt.

- **Vi anbefaler** satsing på videreutvikling og uttesting av småskala elektrolyseteknologi tilknyttet ammoniakk-anlegg mhp. virkningsgrad og driftssikkerhet for å oppnå optimale industrielle storskalaanlegg for grønn ammoniakk.

### Aluminiumproduksjon:

Det arbeides med flere potensielle teknologiløp for produksjon av nullutslippsaluminium. Det finnes per i dag ingen åpenbar beste teknologi, noe som illustreres tydelig ved at det er, eller har vært, betydelig aktivitet for alle teknologier som vurderes i denne rapporten hos de store aluminiumsprodusentene.

- **Hovedanbefalingen** er at flere alternativer fortjener videre utvikling og vurdering, og at industrien setter et tidspunkt for avgjørelse for videre satsing. Det er likevel slik at et eventuelt gjennombrudd for Elysis' prosjekt med bruk av inerte anoder vil bli retningsgivende.

### Silisium- og ferrosiliumproduksjon:

Karbotermisk reduksjon i smelteovner er i dag enerådende for produksjon av silisium og ferrosilium. Ingen av de alternative prosessene er industrielt utviklet. Det vil kreve tid og ressurser å utvikle og industrialisere disse. Det er derfor trolig at en framtidig karbonnøytral produksjon de nærmeste tjue årene fortsatt vil være basert på karbotermisk reduksjon med dagens prosess teknologi.

- Bruk av biokarbon i silisiumproduksjon er på implementeringsstadiet og **vi anbefaler** denne løsningen i nærmeste fremtid, forutsatt tilgang på bærekraftig biokarbon. Dette vil kombineres med energigjenvinning og karbonfangst fra avgassen med lagring eller utnyttelse av avgassen til andre formål.
- Tilgang til bærekraftig biokarbon er usikkert i et 2050-perspektiv. For å skape reelle alternativ til dagens prosess **anbefaler vi** at det gjennomføres storskala FoU- og demonstrasjonsprosjekter på de alternative produksjonsmetodene; metalotermisk og elektrokjemisk produksjon og bruk av hydrogen som reduksjonsmiddel.

### Manganlegeringer:

Manganindustrien jobber målrettet for å redusere sitt karbonavtrykk, med hovedfokus på forbedringer og endringer som kan implementeres i nåværende prosess. Samtidig, som for resten av den metallurgiske industrien, vil tilstrekkelig tilgang på bio-ressurser være et usikkerhetsmoment. Det vil derfor være viktig å sørge for fortsatt utredning og implementering av alternative prosesser.

#### Vi anbefaler derfor:

- Å utvikle, teste og implementere teknologi for forreduksjon av manganmalm.
- Å videreutvikle aktuelle konsepter for utnyttelse av ovns- og prosessgass eventuelt i sammenheng med karbonfangst.
- Å fortsette utviklingen av biokarbonkvaliteter egnet for manganproduksjon og å ta disse i bruk industrielt.
- Å etablere et større FoU-prosjekt for utredning og utvikling av nye prosesser for manganproduksjon.

### Utnyttelse av karbon i prosessgass (CCU)

CCU kan representere en god mulighet for en betydelig reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp, samtidig som en skaper ny lønnsom industri på forholdsvis kort sikt. Selv om mange CCU-teknologier er i tidlig fase, er flere prosjekter basert på industrielt modne CCU-prosesser under vurdering i Norge. Norges viktigste fortrinn er mulighetene for tilgang på fornybar energi og utslippsfri hydrogen til en relativt rimelig pris.

Det kan være vanskelig å beregne klimaeffekten av CCU-prosjekter. Bruk av prosessgass som erstatter nye fossile uttak kan være et godt klimatiltak i en overgangsfase. Bærekraften av hvert enkelt prosjekt må imidlertid vurderes i et verdikjedeperspektiv, enten ved at CCU-produktene erstatter annen produksjon med vesentlig høyere klimaavtrykk eller biobasert produksjon med negative konsekvenser for naturmiljøer eller matsikkerhet.

Norges satsing på CCS skaper samtidig muligheter for CCU. Mange av de samme teknologiene vil være i bruk og CCS etablerer stabil tilgang på konsentrert CO<sub>2</sub> og mulighet for blått hydrogen. Synergi med CCS kan bidra til å hjelpe CCU-basert produksjon i gang, men på sikt må slik industri bli del av sirkulære lukkede CO<sub>2</sub>-systemer eller bruke fornybar CO<sub>2</sub> fra biomasse eller omgivelsesluft. Det understrekes at CCU ikke må bidra til å forsinke CCS ambisjonene eller andre prioriterte klimatiltak.

#### Vi anbefaler at:

- Støtteordninger for pilotering, demonstrasjon og oppskalering også omfatter CCU-prosjekter som kan dokumentere klimaeffekt eller andre bærekraftsfordeler i et livsløpsperspektiv, og som har godt potensiale for å kunne bli lønnsomme på sikt.
- Det vurderes hvordan man kan etablere et hensiktsmessig samspill mellom CCU og CCS uten at dette forsinke nasjonale CCS mål og/eller implementering av nullutslipps-teknologier.
  - Virkemiddelapparatet stimulerer til norsk forskning og internasjonalt samarbeid innen CCU-teknologi
  - Norge bør delta aktivt i arbeid med faktagrunnlag, policy, regulering, indikatorer og modeller for sirkulær karbonøkonomi, der CCU antas å få en viktig rolle.

# Vedlegg

## VEDLEGG I:

# Bidragstere

### Workshops og innspillmøter

Underveis i arbeidet har ekspertgruppen deltatt i og arrangert to workshops og to større innspillmøter som har gitt gode bidrag, kommentarer og forslag til arbeidet med denne rapporten:

#### **4. desember 2019:**

WorkShop i Mo i Rana i samarbeid med Arctic Cluster Team og ekspertgruppene Sirkulærøkonomi og Vertskapsattraktivitet

#### **6. februar 2020:**

WorkShop på Herøya Industripark i samarbeid med Industrial Green Tech og ekspertgruppene Sirkulærøkonomi og Vertskapsattraktivitet

#### **11. mai 2020:**

Digitalt innspillmøte "Ny prosessteknologi med redusert karbonavtrykk for landbasert kjemisk prosessindustri" med presentasjoner fra Equinor og Haldor Topsøe (<https://www.prosess21.no/om-prosess-21/presentasjoner/>)

#### **20. mai 2020:**

Digitalt innspillmøte "Utnyttelse av karbon i prosessgass (CCU)-muligheter for norsk prosessindustri" med presentasjoner fra NTNU, Finnfjord Smelteverk, Nutreco og Carbon Recycling International (<https://www.prosess21.no/om-prosess-21/presentasjoner/>)



## Ekspertgruppen



**Nina Dahl (leder)**  
SINTEF



**Aasgeir Valderhaug**  
Elkem



**Christian Rosenkilde**  
Hydro



**Eli Ringdalen**  
SINTEF



**Gabriella Tranell**  
NTNU



**Geir Henning Wintervoll**  
Finnfjord og ACT



**Gudbrand Rødsrud**  
Borregaard



**Harry Salvesen**  
Alcoa



**Hilde Venvik**  
NTNU



**Rolf Olaf Larsen**  
Herøya Industripark



**Tore Løland**  
Equinor



**Trine Kopperud**  
Yara



**Ulrik Thisted**  
NORCE

## Sekretariatet



**Anita Fossdal**  
Enova



**Henrik Gade**  
Miljødirektoratet



**Henrik Norgaard**  
Miljødirektoratet



**Katja Synsfjell**  
Miljødirektoratet



**Ole Jørgen Marvik**  
Innovasjon Norge



**Svein Ingar Semb,**  
Gassnova

(Observatør)

## Andre bidragsyttere:

Benjamin Ravary, Eramet Norway  
Sigmund Størset, Enova  
Rune Røkke, Enova  
Richard Heyn, SINTEF  
Catherine Boccadoro, NORCE

Samt flere kolleger av ekspertgruppens medlemmer som har kommet med gode innspill underveis i arbeidet.

## VEDLEGG II:

# Referanser

Atkins og Oslo Economics, Kvalitetssikring (KS2) av tiltak for demonstrasjon av fullskala CO<sub>2</sub>-håndtering, 2020; <https://www.regjeringen.no/contentassets/9f8d6e401b4e-4f2e9d48645323aa26c0/kvalitetssikring-ks2-av-tiltak-for-demonstrasjon-av-fullskala-co2-handtering.pdf>  
 BASF; <https://www.basf.com/global/en/investors/calendar-and-publications/factbook/basf-group/verbund.html>

Cerology, What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?, 2017; [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017\\_11\\_Cerology\\_study\\_What\\_role\\_electrofuels\\_final\\_0.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_11_Cerology_study_What_role_electrofuels_final_0.pdf)

DECHEMA, Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, 2017; [https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry-DECHEMA\\_Report-energy\\_climate.pdf](https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry-DECHEMA_Report-energy_climate.pdf)

DKNVS og NTVA, Verdiskaping basert på produktive hav i 2050, 2012; [https://www.sintef.no/globalassets/upload/fiskeri\\_og\\_havbruk/publikasjoner/verdiskaping-basert-pa-produktive-hav-i-2050.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/fiskeri_og_havbruk/publikasjoner/verdiskaping-basert-pa-produktive-hav-i-2050.pdf)

DNV GL, Produksjon og bruk av hydrogen i Norge, 2019; <https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e-6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf?fbclid=IwAR05DS9llgi5OxN2AUC4ngbazj7a1fpu2tOGdlns-MJriUsRB4qzrcKXs4X0>

Eramet Norway, Bærekraftsrapport for 2019, 2020; <https://eramet.no/baerekraftsrapport/>

EU-kommisjonen, A Clean Planet for all - A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, 2018; [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com\\_2018\\_733\\_analysis\\_in\\_support\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf)

EU-kommisjonen, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020; [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)

EU-kommisjonen, Financing a Sustainable European Economy, 2020; [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business\\_economy\\_euro/banking\\_and\\_finance/documents/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_en.pdf)

EU-kommisjonen, Circular Economy Action Plan, 2020; [https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new\\_circular\\_economy\\_action\\_plan.pdf](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf)

EU-kommisjonen, European Industrial Strategy, 2020; [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en)

Fertilizers Europe; <https://www.fertilizerseurope.com/paving-the-way-to-green-ammonia-and-low-carbon-fertilizers/>

FN; <http://www.un.org/>

FN; <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/population/index.html>

Global CCS Institute, Global Status of CCS, 2019; <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

Haldor Topsøe, eSMR, Electrically heated steam methane reforming; <https://www.prosess21.no/contentassets/52fc2f61d-22f484aa4c205ef423c6e07/haldor-topsoe---esmr.pdf>

Hole, Hallgeir, Hydrogen i det moderne energisystemet, 2019; [https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019\\_12.pdf](https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_12.pdf)

Hybrit; <https://www.hybritdevelopment.com/>

IEA, Energy Technology Perspectives 2020, 2020; <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

IEA, Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects, 2019; <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7656142c-7083-11e9-9f05-01aa75ed71a1>

IEA, Offshore Wind Outlook 2019, 2019; <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>

IEA, Putting CO<sub>2</sub> to Use, 2019; <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>

IEA, World Energy Outlook, 2019; <https://webstore.iea.org/login?ReturnUrl=%2fdownload%2fdirect%2f2375>

IPCC, Climate Change 2014, Summary for Policymakers, 2018; <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/Fig-1.07-01-2.png>

IPCC, Climate Change and Land, 2019; <https://www.ipcc.ch/srccl/>

IPCC, Global Warming of 1.5 °C, 2018; <https://www.ipcc.ch/sr15/>

N2Applied; <https://n2applied.com/>

- Nova Institute, Can the European Union's kerosene demand be met by the amount of biomass produced in the EU?, 2020;  
<http://nova-institute.eu/press/?id=181>
- Nova Institute, The future of the chemical and plastics industry: Renewable Carbon, 2020;  
<http://nova-institute.eu/press/?id=218>
- NTNU, Center for Industrial Catalysis Science and Innovation;  
<https://www.ntnu.edu/icsi>
- NTNU, SFI Metal Production;  
<https://www.ntnu.edu/metpro/cri-metal-production>
- Prosess21;  
<https://www.prosess21.no/>
- Prosess21, Ekspertgrupperapport Sirkulærøkonomi, 2020;  
[https://www.prosess21.no/contentassets/90d6c-3c0ae9f43e684252610398a8ce1/p21\\_sluttrapport\\_sirkularokonomi.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/90d6c-3c0ae9f43e684252610398a8ce1/p21_sluttrapport_sirkularokonomi.pdf)
- Prosess21, Ekspertgrupperapport Karbonfangst, 2020;  
<https://www.prosess21.no/om-prosess-21/ekspertgrupper-og-workshops/karbonfangst-og-lagring/>
- Prosess21, Ekspertgrupperapport Kraftmarkedet, 2020;  
[https://www.prosess21.no/contentassets/37807b8b744d4675b-3cdd6aaf603e08d/nf\\_prosess21\\_ekspertgrupperapport\\_kraftmarkedet\\_def\\_131020.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/37807b8b744d4675b-3cdd6aaf603e08d/nf_prosess21_ekspertgrupperapport_kraftmarkedet_def_131020.pdf)
- Prosess21, Ekspertgrupperapport Vertskapsattraktivitet, 2020;  
<https://www.prosess21.no/contentassets/3dc454f8d67b4f8d-8de8cc617172d3ca/200827-prosess21-vertskapsattraktivitet-endig.pdf>
- Prosess21, Ekspertgrupperapport Biobasert Prosessindustri, 2020;  
[https://www.prosess21.no/contentassets/8fdf5202cb224ce0b-b2cf1aa1a9a9384/prosess21\\_biobasert-prosessindustri\\_ekspertgrupperapport\\_def.pdf](https://www.prosess21.no/contentassets/8fdf5202cb224ce0b-b2cf1aa1a9a9384/prosess21_biobasert-prosessindustri_ekspertgrupperapport_def.pdf)
- SAPEA, Novel carbon capture and utilisation technologies, 2018;  
<https://www.sapea.info/wp-content/uploads/CCU-report-web-version.pdf>
- Siderwin;  
<https://www.siderwin-spire.eu/>
- SINTEF, Bio4Fuels;  
<https://www.sintef.no/prosjekter/bio4fuels-nasjonalt-krafttak-for-barekraftig-biodrivstoff/>
- SINTEF, HighEFF;  
<https://www.sintef.no/projectweb/higheff/>
- SINTEF, Product Fact Sheet Food-grade CO<sub>2</sub>, 2015;  
<https://www.sintef.no/globalassets/project/cemcap2/12112017--fact-sheet--co2-food.pdf>
- SINTEF, 2019;  
<https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/energieffektivisering-cat/aluminium-inerte-anoder-hall-heroult/>
- Siva, Optimisme rundt Ironman-planene, 2013;  
<https://siva.no/2013/08/optimisme-rundt-ironman-planene/>
- TCFD, Task Force on Climate-related Financial Disclosures;  
<https://www.fsb-tcfd.org/>
- Yara;  
<https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/capital-markets-day/2019/capital-markets-day-2019-with-reader-notes.pdf>
- Umweltbundesamt, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 2013;  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales\\_deutschland\\_im\\_jahr\\_2050\\_langfassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf)
- Vaderhaug, A, Sustainable production of silicon by reducing fossil CO<sub>2</sub> emissions. 2016
- World Aluminium, Aluminium Carbon Footprint Technical Support Document, 2018;  
[http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2018/02/15/carbon\\_footprint\\_technical\\_support\\_document\\_v1\\_published.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2018/02/15/carbon_footprint_technical_support_document_v1_published.pdf)
- Zero, Sirkulær karbonøkonomi, 2020;  
[https://zero.no/wp-content/uploads/2020/05/20200527\\_zeronotat\\_sirkul%C3%A6rkarbon%C3%B8konomi\\_endelig.pdf](https://zero.no/wp-content/uploads/2020/05/20200527_zeronotat_sirkul%C3%A6rkarbon%C3%B8konomi_endelig.pdf)
- Zero Emissions Platform (ZEP);  
<https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/what-is-ccu/>

## VEDLEGG III:

# Mandat for ekspertgruppe

## – Ny prosess teknologi med redusert karbonavtrykk inkl. CCU

### Bakgrunn og begrunnelse for etablering av ekspertgruppen

Prosess 21 er en nasjonal strategiprosess for prosessindustrien som ble etablert av Nærings- og Fiskeridepartementet i 2018. Hovedoppgaven for Prosess21 er å gi strategiske råd og anbefalinger om hvordan Norge best kan få til en utvikling i retning av minimale utslipp fra den landbaserte prosessindustrien i 2050, og samtidig legge til rette for at virksomheter i prosessindustrien har bærekraftig vekst i denne perioden. Visjonen til Prosess21 er økt verdiskaping med nullutslipp i 2050. Dette er også visjon i Veikartet til Norsk Industri<sup>i</sup>. Visjonen samsvarer og er i tråd med de mål og utfordringer som er gitt i Parisavtalen<sup>ii</sup>, IPCCs spesialrapport om 1,5 grader global oppvarming<sup>iii</sup>, EU-kommisjonens 2050 visjon<sup>iv</sup>- og Norges mål om å bli et lavutslippssamfunn innen 2050.

Globalt representerer industrien cirka 32 prosent (21 prosent direkte og 11 prosent indirekte) av de totale klimagassutslippene som vist i figur 1. Med utslipp av over 11 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2017 representerer norsk landbasert prosessindustri i dag i mer enn 21 prosent av Norges totale klimagassutslipp. Figur 2 viser utslipp i norsk prosessindustri i 2017, fordelt på industrisektor. Fra 1990 til 2014 reduserte prosessindustrien sine klimagassutslipp med cirka 40 prosent, samtidig som produksjonen økte med 37 prosent. Mesteparten av denne reduksjonen er tatt i direkte prosess-utslipp og skyldtes i stor grad reduksjoner av andre klimagasser enn CO<sub>2</sub>, hovedsakelig PFK-gasser fra aluminiumsproduksjon, N<sub>2</sub>O fra salpetersyreproduksjon og SF<sub>6</sub> fra magnesiumproduksjon. Det resterende potensialet for å redusere utslipp av disse gassene er nå begrenset. Den norske industrien har også redusert direkte og indirekte utslipp gjennom effektivisering, men prosessene vil fortsette å produsere klimagasser så lenge fossilt karbon brukes som energikilde og som råmateriale. For flere av de relevante/aktuelle prosessene nærmer dagens teknologi seg teoretisk minimum med hensyn til direkte CO<sub>2</sub>-utslipp.

Fig.1: Globale klimagassutslipp per økonomisk sektor (<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/fig-1.07-01-2.png>)

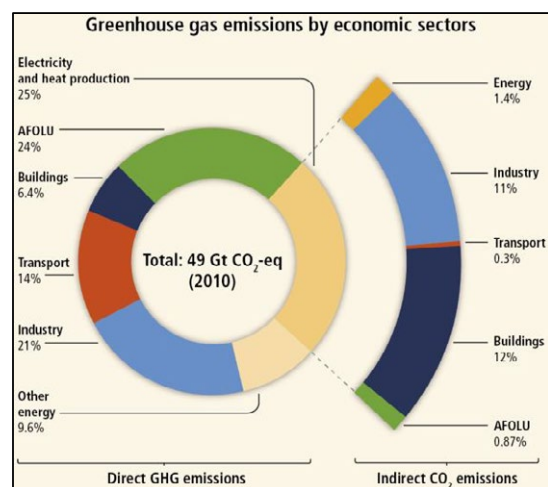
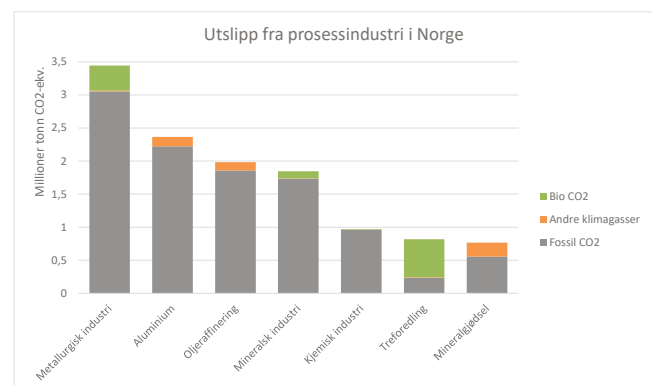


Fig.2: Prosessindustriens utslipp i 2017 (CO<sub>2</sub> fra bio teller null i klimagassregnskapet, men er tatt med her for å vise den totale produksjonen av CO<sub>2</sub>)



Nullutslipp vil dermed for de fleste av disse prosessene bety helt nye prosesser og ny prosess teknologi, overgang til fornybare brenslere og råmaterialer, og eventuelt i kombinasjon med løsninger for karbonfangst, utnyttelse og lagring. Fordi det tar lang tid å gjennomføre slike teknologiutviklingsløp, og fordi prosessindustri legger har lang levetid, må utviklingen og innfasingen av disse nye løsningene starte umiddelbart for at de skal kunne få bred og allmenn anvendelse i løpet av de neste tre tiårene. Denne omleggingen vil også være rammet inn av at forbruket av mange naturressurser allerede i dag

overstiger hva som er bærekraftig og viktige økosystemer er under sterkt press, samtidig som jordas befolkning øker kraftig og mange mennesker lever i relativ eller absolutt fattigdom. Det vil derfor være avgjørende å sikre at de begrensede naturressursene brukes på bærekraftige og effektive måter i sirkulære systemer i framtiden.

Prosessindustriens produkter handles i internasjonale markeder, men verdens nasjoner går i dag i ulik hastighet mot det grønne skiftet. Omlegging til nullutslipp-løsninger vil i mange tilfeller øke kostnadene i produksjonen, og vil innebære tunge utviklingsprosjekter i startfasen. Klimavirkemidlene som tas i bruk i Norge og Europa må derfor innrettes på en slik måte at konkurransevridning mot land med svak klimapolitikk unngås. Alternativet er stopp av aktivitet og industri-nedleggelse i vår del av verden. Dette gir karbonlekkasje og vil føre til økte globale utslipp, da nedleggelse i Norge gir økt produksjon i land med svakere klimaregulering. 97 prosent av klimagassutslippene fra den norske prosessindustrien er dekket av EUs klimavotesystem, og andre reguleringer fra EU må også etterleves av den norske industrien. Den europeiske dimensjonen er derfor svært viktig.

Med bakgrunn i nå-situasjonen samt de svært utfordrende målene som er satt i Prosess21-arbeidet, ønsker styret for Prosess21 å etablere en ekspertgruppe for å evaluere nye teknologier for å redusere (eliminere) karbonavtrykket fra prosessindustrien. Dette skal sees i lys av fremtidens industristruktur og det en ser for seg av fremtidens materialbehov. Tema for denne ekspertgruppen er således helt sentral og i kjernen av Prosess21 sin visjon. Parallelt etableres det flere andre ekspertgrupper som blant annet skal dekke karbonfangst og lagring, sirkulær økonomi, biobasert prosessindustri, produktutvikling og kartleggingen av tilgang på fornybar kraft og framtidig prisbane på CO<sub>2</sub>.

Ekspertgruppen skal bestå av relevante fag-eksperter fra industri og FoU-sektoren. Gruppen skal arbeide i tett samarbeid med Prosess21 sekretariatet.

Ekspertgruppen og sekretariat skal kartlegge relevante studier innen ny prosesssteknologi for å etablere felles forståelse av nåsituasjon for prosessindustrien samtidig som en omforent vurdering over hva som skal til for nå nullutslipp i 2050 skal etableres.

Med basis i felles forståelse av nåsituasjon, kan ekspertgruppen gå videre med tidligere og/eller pågående studier og kan foreslå nye studier.

Videre kan ekspertgruppen arrangere workshops med relevante miljøer for å sikre innspill og forankring av arbeidet.

Ekspertgruppens leder og sekretariat, eventuelt i samråd med ekspertgruppens medlemmer kan etablere student-oppgaver om det er hensiktsmessig.

### **Effektmål for ekspertgruppen og for dens rapport/anbefalinger**

Ekspertgruppen forventes å levere en anbefaling i henhold til begrunnelsen for etableringen samt definerte oppgaver og mål. Ekspertgruppens rapport vil inngå som en del av beslutningsunderlaget til Prosess21 og de strategiske råd og anbefalinger som skal gis. Rapporten skal vise hvordan ny prosesssteknologi er knyttet til Prosess21 sin visjon og strategiske mål.

Ekspertgruppen skal også utarbeide et kortfattet ekstrakt som skal inngå i Prosess 21 sin sluttrapport.

Overordnet effektmål er å identifisere og prioritere teknologier og prosesser som gir/bidrar til reduksjon i direkte utslipp fra norsk prosessindustri med de material/produktbehov lavutslippssamfunnet etterspør, 43 prosent reduksjon innen 2030 sammenlignet med 2005 (mål fra Veikartet) til netto null utslipp av fossilt CO<sub>2</sub> innen 2050. Dette skal videre tilpasses framtidens industristruktur, slik ekspertgruppen ser for seg/vurderer den.

Videre er det naturlig å foreslå detaljerte effektmål for gruppen innen de ulike områdene for hver enkelt industri-sektor, evt. innenfor områder ekspertgruppen finner hensiktsmessig:

- Landbasert kjemisk prosessindustri
- Metallurgisk prosessindustri

### **Mål for ekspertgruppen**

Ekspertgruppen skal beskrive, vurdere og prioritere de viktigste teknologiske drivkreftene, mulighetene og barrierene for å ta i bruk ny teknologi i prosessindustrien for å redusere utslipp av klimagasser og dermed redusere det totale karbonavtrykket. Ekspertgruppen etablerer kontakt med de andre ekspertgruppene for informasjonsdeling der det er fornuftig.



Arbeidet konsentreres om følgende temaer:

- Oppnå felles forståelse av effektmålene.
- Oppnå en felles forståelse av nåsituasjon hva gjelder ny teknologi, grad av implementering og modenhet, impact/konsekvens på klima og lønnsomhet på kort (2025) og lang (2050) sikt. Det vil i forkant av ekspertgruppens oppstart, bli utarbeidet en rapport/et notat med oppdatert underlag med data og statistikk for nasjonal vs global prosessindustri.
- Inkludert i dette utarbeide en oversikt som dagens industristruktur, med fokus på de delene av industriens verdikjeder der prosessindustrien i Norge inngår. Oversikten utarbeides i samarbeid med ekspertgruppen for sirkulær økonomi.
- Undersøke hvordan andre land (som det er relevant å sammenligne med) legger til rette for utvikling og implementering av nye prosesser

Deretter bør det tas utgangspunkt i

- Å utarbeide en anbefaling over prioriterte prosesser og teknologier som oppfyller på forhånd definerte kriterier mht. utslipp og lønnsomhet
- Teknologi- og kompetansebehov for fremtidige nye prosesser
- Begrensende faktorer for investeringer i ny teknologi, inkludert en vurdering av hvilke som kan la seg realisere med offentlig virkemiddelbruk

Basert på temaene foreslå tiltak som kan bidra til:

- Økt innovasjonstakt (inkl. virkemiddelapparatet, skatte- og avgiftspolitik)k)
- Riktig og fokusert kompetanse (utdanning)
- Effektiv implementering (inkl. behov for virkemiddelbruk fra det offentlige eller annen finansiering)
- Fra dette analyseres tilhørende ressursbehov, vekstpotensial og viktigste risiko (oppside og nedside), samt behov for risikoavlastning.

### Leveranser fra ekspertgruppen

Ekspertgruppen skal gi klare anbefalinger som forespurt i mandatet for Prosess21:

1. hvordan den samlede virkemiddelbruken, inkl. forskningsinnsatsen og annen innovasjons-fremmende aktivitet som angår prosessindustrien, kan innrettes for å oppnå de langsiktige klimamålene på en effektiv måte,
2. kostnader ved forslag til nye, eller endringer i eksisterende, FoU-programmer eller andre virkemidler, konsekvensene for prosessindustrien og virkninger på utslipp av klimagasser i Norge og internasjonalt, og
3. Inkluder beskrivelser av framtidige kompetansebehov og muligheter for bruk av digitale verktøy for økt verdiskaping
4. Hvilke av ekspertgruppens anbefalinger som påvirker og hvordan de påvirker visjonen og de 4 strategiske målene til Prosess21
5. Hva som bør nedprioriteres ved forslag som krever økte bevilgninger
6. Arbeidet bør inneholde referanser til aktiviteter utenfor Norges grenser.

Arbeidet skal dokumenteres i en egen rapport og møte-referater fra workshop og ekspertgruppemøter. Ekspertgruppens rapport kan settes sammen med ekstern lay-out-hjelp etter samråd med styrets sekretær.

Ekspertgruppens medlemmer bidrar med kvalitetssikring av rapporten før ferdigstilling for Prosess21-styret og offentliggjøring.

Det skal utarbeides kronikk til relevant media samt presentasjon for relevant konferanse.

### Ekspertgruppens grensesnitt og samarbeid med andre Prosess21 ekspertgrupper

Tema for denne ekspertgruppen er som nevnt over helt i kjernen av visjon og formålet med Prosess21. Temaet er krevende og spenner relativt bredt og vil i noen/flere tilfelle overlape med tema i andre ekspert grupper. Grensesnitt og koordinering/samarbeid med spesielt følgende ekspertgrupper er derfor viktig:

- CCS (Geir Vollseter): skal beskrive og vurdere de viktigste drivkreftene, barrierene og en mulig forretningsplan for norsk prosessindustri, gitt en etablert norsk verdikjede for transport og lagring av CO<sub>2</sub>.

- Sirkulær økonomi (Kathrine Næss): skal beskrive ulike teknologier og hjelpemiddel for den enkelte prosess-industribedrifts ledere og ansatte i deres mål og arbeid for økt gjenvinning og verdiskaping.
- Biobasert prosessindustri (Gisle Løhre Johansen): Det skal evalueres økt bærekraftig bruk av biologisk karbon og biomasse og reduserte klimagassutslipp gjennom bruk av biomasse i norske prosessindustri.
- Kartleggingen av tilgang på fornybar kraft og framtidig prisbane på CO<sub>2</sub> (Toini Løvseth)

### Arbeidsform, tidsperspektiv og ressursbehov

Det legges opp til heldagsmøter, hvor ekspertgruppen møtes i sin helhet. Første møte i ekspertgruppen avklarer arbeidsform, antall fellesmøter og møtehyppighet, begrensinger i oppgaven og kontekst. Gitt bredde og kompleksitet i tema for denne gruppen, vil det etableres en kjernegruppe og undergrupper innen ulike tema/sektorer.

I tillegg vil det kunne være behov, etter nærmere og individuelle avtaler, for kortere møter/video/telefon/mail med hele eller deler av ekspertgruppen.

Møtene vil arrangeres sentralt i Oslo-regionen, eller der ekspertgruppen finner det hensiktsmessig, og normalt ha en varighet fra 09:00 til 15:00.

- Arbeidet startet i oktober 2019 og avsluttes i september/oktober 2020.
- Prosess21 sitt sekretariat vil delta i arbeidet og bistå med fakta-underlag når ekspertgruppen utarbeider rapport(er).
- Dersom det er behov for å sette ut særskilte studier og/eller workshops avtales det med styrets sekretær.

### Møtedatoer:

- Møte 1: 18.10.2019 hos Forskningsrådet, Oslo (deltagere er invitert)
- Møte 2: 21.11.2019 hos Miljødirektoratet i Oslo
- Møte 3: 4. mars 2020 hos Forskningsrådet i Oslo
- Videre et møte per annen måned så lenge arbeidet pågår
- Sluttmøte: tentativt uke 42, 2020

Workshops og utvidede innspillmøter planlegges mellom ekspertgruppemøtene i henhold til enighet i oppstartsmøtet. Det vil bli lagt opp til samkjøring med møter og WS i andre relevante ekspertgrupper for å effektivisere tidsbruk og reiser.

### Ekspertgruppens sammensetning

Oppdragsleder er Nina Dahl, SINTEF som leder gruppen og møtene.

Gruppen vil bestå av representanter fra relevante forskningsmiljøer, industri og interesseorganisasjoner. Medlemmene vil bli invitert basert på interesse og anbefaling.

Ekspertgruppen har følgende sekretariat som kan koordinere og organisere møtene og skrive referat fra møtene; Anita Fossdal (Enova) og Henrik Gade/Katja s/ Henrik Norgaard (Miljødirektoratet), Ole Jørgen Marvik (Innovasjon Norge)

Underlag:

Ekspertgruppen skal bruke følgende dokumenter som føringer for sitt arbeid:

1. Mandatet for ekspertgruppen
2. Presentasjon av arbeidsform og tidslinje – presenteres og godkjennes i oppstartsmøtet
3. Interne Prosess21 dokumenter; Prosess21 presentasjon (Håvard Moe 20190320), Nye industriprosesser med redusert CO<sub>2</sub> avtrykk (Nina Dahl 6.3.2019), Notat med oppdatert status for produksjon, utslipp osv.

I tillegg vil følgende dokumenter og rapporter gi bakgrunn og innspill i arbeidet:

[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en)  
<https://www.ipcc.ch/sr15/>

Veikartet for norsk prosessindustri,

[https://www.norskindustri.no/siteassets/dokumenter/rapporter-og-brosjyrer/veikart-for-prosessindustrien\\_web.pdf](https://www.norskindustri.no/siteassets/dokumenter/rapporter-og-brosjyrer/veikart-for-prosessindustrien_web.pdf)

Veikartet for gass til metallproduksjon

<https://www.sintef.no/metallproduksjon/metallindustrien-veikart/>

<https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/aluminium-inerte-anoder-hall-heroult/>  
<https://blogg.sintef.no/industri/kan-kloridprosessen-erstatte-hall-heroult-for-aluminiumproduksjon/>

PreMa prosjektet

<https://www.spire2030.eu/PREMA>

<https://www.tu.no/artikler/>

[kina-kontrollerer-mye-av-mineralene-verden-trenger-til-det-gronne-skiftet/458192](https://www.tu.no/artikler/kina-kontrollerer-mye-av-mineralene-verden-trenger-til-det-gronne-skiftet/458192)

HYBRIT <https://www.hybritdevelopment.com/>

Elysis web site: [www.elysistechnologies.com](http://www.elysistechnologies.com)

**Prosess21**  
**Ny prosess teknologi med redusert**  
**karbonavtrykk inkl. CCU**  
prosess21.no

November 2020  
Design: Miksmaster as · [www.miksmaster.no](http://www.miksmaster.no)  
Trykk: RK Grafisk

Publikasjonen kan lastes ned fra  
[www.prosess21.no/om-prosess-21/dokumenter/](http://www.prosess21.no/om-prosess-21/dokumenter/)