

Hydrogen i fremtidens lavkarbonsamfunn



HVA ER HYDROGEN?

Hydrogen (H) har atomnummer 1 i det periodiske systemet og er det letteste grunnstoffet av alle. Ved standard temperatur og trykk opptrer hydrogen som en gass bestående av to atomer (H₂). Hydrogen er det elementet det er mest av i universet og antas å utgjøre hele 75 prosent av universets totale masse.

På jorden opptrer vanligvis hydrogen i kombinasjon med oksygen og danner vann.

Bruken av hydrogen er i dag først og fremst knyttet til industrielle prosesser som oljeraffinering og kunstgjødselproduksjon, men får stadig større oppmerksomhet som energibærer både innen transport og fornybar energiproduksjon.

HVORDAN FREMSTILLES DET?

Hydrogen fremstilles i dag hovedsakelig ved reformering av hydrokarboner (for eksempel metan; CH₄) men kan også fremstilles ved elektrolyse. Ved bruk av hydrogen som energibærer med mål å redusere CO₂-utslipp vil de mest nærliggende fremstillingsmetodene være:

- Fremstilling ved elektrolyse der vann spaltes til hydrogen og oksygen. Vannelektrolyse er en velkjent teknologi som har vært benyttet i Norge i lang tid, med oppstart av Norsk Hydro i 1921.
- Reformering av naturgass med karbonfangst og lagring. Teknologielementene og løsningene er velkjent fra olje- og gass industrien.





Sammendrag

Hydrogen som energibærer kan bidra til reduserte CO₂-utslipp innenfor en rekke sektorer. Det viser denne rapporten som er basert på forskning i FME CenSES, FME MoZEES, NTNU, SINTEF og IFE.

Hydrogen kan bidra til at Norge når sine klimamål og være en nøkkelfaktor i Norges ambisjon om å skape grønn industrivekst og i omstillingen av norsk prosessindustri.

Målet med denne rapporten er å gi en oversikt over rollen hydrogen kan spille i et framtidig lavutslipps-samfunn, for å komme i mål med nødvendige utslippsreduksjoner i 2030 i tråd med norsk klimapolitikk. Vi ser på i hvilken grad, hvor og hvordan hydrogen-teknologi kan implementeres for å bli et mest mulig effektivt middel for å nå målene om sterkt reduserte utslipp av klimagasser i Norge. Vi vurderer i hvilke sektorer hydrogen kan tas i bruk raskt, hvilke barrierer og muligheter som finnes og hvordan virkemiddel og politikk kan relateres til dette. Rapporten tar som utgangspunkt at det trengs ny virkemiddelbruk og politikk rettet mot hydrogen som støtter opp om klimamålsetningene for 2030. Samtidig er det sentralt at beslutninger som tas i den prosessen også er et skritt på vegen mot 2050 målene. Dette vil kreve et samspill mellom de virkemidlene som tas i bruk for omstilling på kort sikt og langsiktig forskning og utvikling for å dekke teknologi- og kunnskapsgap.

I dag dekkes om lag 70 prosent av Europas energiforbruk av fossile energikilder¹. Norge har gjennom Parisavtalen² (COP21) og EUs reviderte fornybardirektiv³ forpliktet seg til betydelige klimagassreduksjoner og en mer effektiv og klimavennlig bruk av energi. Forpliktelsene innebærer mål om 40 prosent reduserte klimagassutslipp innen 2030. Ambisjonen er 80-95 prosent utslippsreduksjon innen 2050 sammenliknet med referanseåret 1990. Norge skal i tillegg til å følge opp Parisavtalen, være en pådriver for det internasjonale klimaarbeidet, forsterke klimaforliket⁴ og samtidig oppfylle Kyotoprotokollen⁵. I Jeløya⁶ plattformen legges det til grunn en satsning på nullutslippsteknologi, og det legges vekt på at **regjeringen vil ha en helhetlig strategi for forskning, teknologiutvikling og bruk av hydrogen som energibærer.**

I tillegg til å være en karbonfri energibærer, skaper hydrogen verdi ved at det er en energibærer som kan lagres og transporteres. Dette er en egenskap som vil bli viktig i framtidens energisystem med store mengder ikke-regulerbar fornybar kraft. For å håndtere kraft-

- 1 EU Energy statistics: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption
- 2 https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- 3 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0767>
- 4 <https://www.regjeringen.no/no/dokument/dep/kld/sak/klimaforliket/id2076072/>
- 5 <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>
- 6 <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/politisk-plattform/id2585544/>

overskudd og underskudd, vil det bli behov for fleksibilitet. Norge har gode og naturgitte forutsetninger for å produsere hydrogen, både for egen bruk og for eksport. Dette kan skje via nær 100 prosent fornybar kraft eller ved videreføring av naturgass kombinert med karbonfangst og lagring (CCS).

Hydrogen sin rolle

Hydrogen som energibærer kan bidra til reduserte CO₂-utslipp innen en rekke sektorer:

- **Transport** – hydrogen vil være en attraktiv energibærer for land- og maritim transport som krever lagring av større energimengder enn det som er optimalt for batteri, eller i markeder hvor CO₂-intensiteten til tilgjengelig elektrisk kraft er høy.
- **Energilagring** – overskuddskraft fra fornybar elektrisitet kan konverteres til hydrogen gjennom elektrolyse og lagres for senere bruk i flere aktuelle sektorer.
- **Industri** – som direkte innsatsfaktor. Hydrogen kan erstatte direkte bruk av fossile innsatsfaktorer som olje, gass og kull.
- **Kraftproduksjon** – en stor andel av kraftproduksjonen i de fleste land baseres i dag på fossile brenslere. Hvis disse erstattes med hydrogen vil en vesentlig del av dagens CO₂-utslipp elimineres.

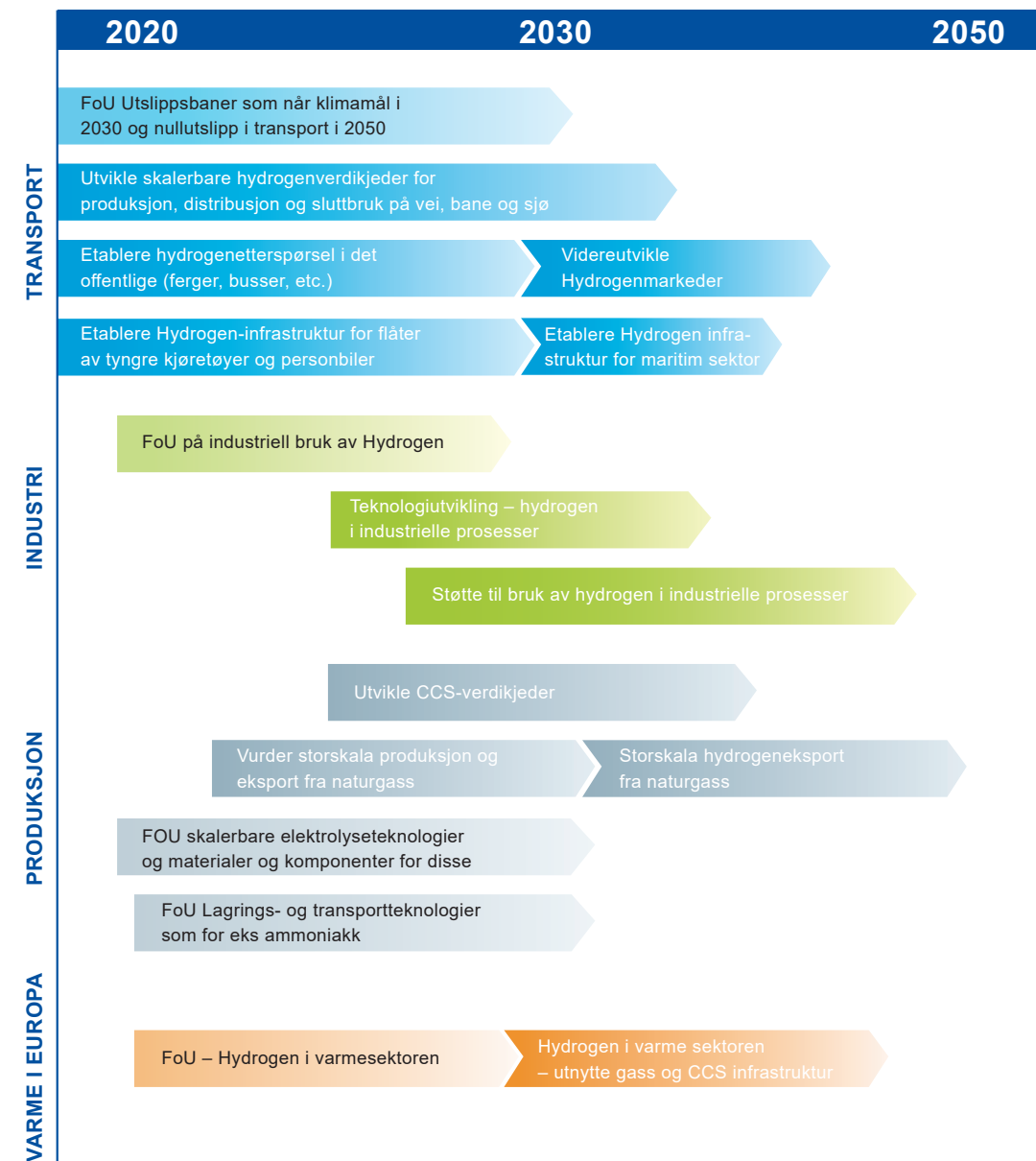
- **Varme** – høytemperatur varmebehov i industri, men også som erstatning for naturgass til oppvarming og komfyrer i privat sektor for land som har et utviklet gassrørnett.

En av trendene som gjør hydrogen aktuell som energibærer er tettere integrering av de ulike sektorene energi, transport, industri og oppvarming av bygg. Sektorkobling vil gjøre utbygging av fornybar kraft enklere.

For Norge er koblingen mellom kraftsektoren og transportsektoren spesielt viktig. Transportsektoren representerte 31 prosent av de totale CO₂-utslippene i Norge i 2016⁷, og utslippene fra transport økte med 24 prosent i perioden 1990–2016. Gjennom elektrifisering (batteri og brenselcelle) kan transportsektoren redusere sine utslipp betydelig. Denne koblingen kan skje direkte, ved hjelp av lagring av elektrisitet i batterier, eller koblingen kan skje mer indirekte, gjennom produksjon av hydrogen som benyttes i brenselceller.

Etterspørselen etter strøm og belastningen på strømmettet vil med dette øke kraftig. Særlig hurtiglading i stor skala vil gi betydelig effektutfordringer, og dermed store oppgraderingsbehov av kraftnettet. Hydrogenproduksjon kan opptre som et mellomlager som vil kunne fordele energibruken over døgnet. Den kan også slås av i perioder med høy belastning, og på den måten avlaste kraftnettet og ikke gi samme oppgraderingsbehov.

⁷ Miljødirektoratet, 03.01.2018: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/norske-klimagassutslipp/utslipp-av-klimagasser-fra-transport/>



Det er i prinsippet to konkurrerende konsepter vi kan benytte for å integrere storskala variabel fornybar kraftproduksjon: Vi kan enten forsterke kraftnettet eller vi kan koble kraftproduksjonen til andre sektorer. Hverken solkraft eller vindkraft er regulerbar. Det betyr at strøm produseres bare når sola skinner og vinden blåser, og ikke nødvendigvis når vi trenger strøm. Det innebærer at lagring av energi vil bli stadig viktigere med mer variabel fornybar kraftproduksjon.

Begrepet **power-to-x** innebærer at fornybar kraftproduksjon kan omdannes til ulike energibærere for å dekke behovet for energitjenester. Ved å inkludere hydrogen i energisystemet kan vi optimalisere utnyttelsen og verdien av fornybar kraft. Det vil på sikt vil muliggjøre en større andel uregulerbar fornybar kraft i nettet.

I den senere tid har også koblingen mot verdikjeden for naturgass fått oppmerksomhet. Hydrogen produsert fra naturgass med karbonfangst og lagring (CCS) er en storskala løsning som kan bidra til å redusere CO₂-utslipp og skape nye markedsmuligheter for naturgass. Norge kan i et langsiktig perspektiv eksportere store mengder hydrogen til Europa, og dermed bidra til sektorkobling og reduserte utslipp i Europa. I første omgang kan naturgass eksporteres til Europa, hvor den konverteres til hydrogen lokalt. CO₂-en fra naturgassen kan importeres tilbake for lagring i Norge. På lengre sikt kan det være aktuelt med dedikerte rørled-

ninger for hydrogeneksport eller alternativt å eksportere flytende hydrogen med skip.

Å bruke elektrisitet direkte er den mest energieffektive løsningen, men behovet for å kunne lagre energi er et argument for å satse på power-to-gas. De fleste aktørene mener at det vil være behov for ikke bare én teknologi eller løsning, men en blanding av ulike løsninger⁸. Analyser fra Danmark peker på at samspillet mellom storskala løsninger og distribuerte løsninger er viktig for at storskala løsninger med vindkraft, internasjonal infrastruktur og power-to-x kan fungere effektivt sammen med distribuerte løsninger som PV, batterier og elbiler.⁹

Anbefalinger

Ny politikk og virkemiddelbruk

I perioden fram til 2030 viser studier fra NTNU, IFE og SINTEF at hydrogen vil spille en rolle i vegtransport særlig for gods og varetransport og særlig på lange distanser. Samtidig ser vi at hydrogenløsninger er i ferd med å testes ut for maritim transport nær kysten. Vi mener derfor at det på kort sikt bør fokuseres på virkemiddel og politikk som fremmer kostnadseffektive verdikjeder og helhetlige og langsiktige planer for produksjon, distribusjon og bruk av hydrogen i de mest relevante

transportsegmentene for Norge: Person, vare- og godstransport på vei og nærskipstrafikken.

- På kort sikt bør det fokuseres på å etablere hydrogenstasjoner og sørge for en kommersiell utrulling av hydrogendrevne busser, varebiler og lastebiler (2020–2030). For personbiler bør tiltak i hovedsak rettes mot kunder med behov for lang rekkevidde, taxi og andre flåteanvendelser.
- Hydrogenbiler bør fritas for bompenger og ha tilgang til kollektivfelt fram til 50 000 biler er registrert i Norge, uavhengig av hva som blir bestemt for elbiler.
- Det bør gradvis etableres produksjon og distribusjon av hydrogen for ferger, hurtigbåter, og andre større skip.
- Lønnsomhet i hydrogenverdikjeder krever volum. Det vil derfor være gunstig å se utviklingen av etterspørsel for hydrogen i vegtransport, maritim transport og industri i sammenheng, slik at distribusjonsløsninger og produksjonsløsninger gradvis kan skaleres til å dekke nødvendig volum i ulike sektorer.
- Offentlige innkjøp bør benyttes aktivt for å skape etterspørsel etter hydrogen og redusere pris- og volumrisiko for tilbydere av hydrogen.
- Hydrogenproduksjon og distribusjon i verdikjedene vil kunne trenge investeringsstøtte og driftsstøtte fordi faste driftskostnader ikke dekkes ved inntekter fra lave initielle volum, og fordi umoden teknologi leder til høye variable kostnader.

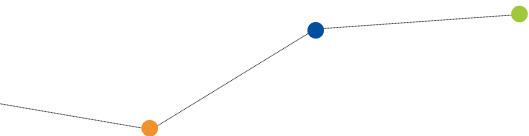
- Det vil være naturlig å bruke virkemiddel som er spesielt designet for ulike segment som lokal vare-distribusjon, lett langtransport, tung langtransport og maritim transport som tar hensyn til ulemper ved å være tidlig ute. Det vil også være naturlig å vurdere hvor konkurranseutsatt de ulike segmentene er når virkemidlene designes.
- Norge bør sammen med EU spille en nøkkelrolle i arbeidet med analyser av sikkerhet, definisjon av standarder og sertifisering av maritime hydrogenløsninger.

Skal omstillingen av transport skje på en effektiv måte kreves det at en hydrogenstrategi legger til rette for hydrogenverdikjeder med produksjon, distribusjon og konsum som gradvis utvider tilbud og etterspørsel fram mot 2030. En forutsetning for å få ned kostnader for produksjon og transport et at volumene øker slik at skalafordeler og lærings-effekter kan oppnås. Dersom man også lykkes med å etablere hydrogeneksport kan produksjonskostnadene antagelig reduseres betydelig.

- Verdiskapingspotensialet for norsk hydrogenproduksjon vil økes ved å etablere effektive transportverdikjeder for hydrogen både for nasjonal bruk og eksport.
- Tidligfaseetablering av denne type verdikjeder bør støttes til volumene er så høye at både faste og variable kostnader kan dekkes kommersielt.

⁸ <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/sector-coupling-shaping-integrated-renewable-power-system>

⁹ Systemperspektiv 2035, EnergiNet DK, 2018: <https://energinet.dk/-/media/4DDC27A7159245E985CEC07A92FB70AF.pdf>

- 
- Dette bør sees som et ledd i en langsiktig politikk, hvor målet er at teknologiutvikling og forskning skal sikre storskala utnyttelse av fortrinnet som ligger i naturressursene. I det ligger også å være ledende på forretningsmodeller og teknologi for produksjon og transport av hydrogen.

Det er sannsynlig at dersom etterspørselssiden i ulike segment stimuleres som nevnt over og tidligfase infrastruktur for distribusjon støttes, vil det være attraktivt å etablere tilstrekkelig produksjon av hydrogen. Et element i å stimulere etterspørselen vil være å gradvis øke bruken av hydrogen i industri.

- For å sikre en tidlig og konkurransedyktig omstilling i industrien, anbefaler vi at det sees på samspillet mellom de ulike kortsiktige virkemidlene.
- Støtteordninger bør være rettet mot teknologiutvikling og kompensasjon for tidlig implementering av umoden teknologi.
- Samtidig bør støtteordningene koordineres tett med langsiktig forskning og innovasjonsrettet forskning på mellomlang sikt.
- Det vil være sentralt at alle disse virkemidlene går inn i en koordinert omstilling av industrien til lavutslipp, der forskningen fokuserer på å få effektiviteten opp og kostnadene ned, mens omstillingsstøtten bygger opp under den langsiktige utviklingen samtidig som en sikrer konkurransekraft.

Storskala hydrogenproduksjon i Norge basert på naturgass og CCS vil føre til økt etterspørsel etter norsk naturgass lokalt og positive klimaeffekter ved å substituere fossile brensel med hydrogen. Det er her i tillegg et verdiskapingspotensial fra reduserte enhetskostnader i CO₂-infrastrukturen på grunn av skalafordeler i rørtransport fra CO₂-mellomlager på land til injeksjonsbrønn.

- For å legge til rette for storskala hydrogenproduksjon fra norsk naturgass, bør det allerede i første steg av utviklingen av fullskala CO₂-lagring i Norge tas høyde for CO₂-volumene som kan komme fra denne produksjonen.

Forskning og utvikling

Forskning som ser på omstilling til nullutslipps-transport bør styrkes.

- Vi anbefaler et spesielt fokus på forskning som vurderer dagens virkemiddelbruk og teknologivalg rundt infrastruktur opp mot utslippsmål for 2030 og nullutslipp i 2050.
- Det vil være sentralt å få mer kunnskap om design av effektive verdikjeder for produksjon og distribusjon av hydrogen som samspiller mellom flere etterspørselssegment, både i transport, industri og for eksport.

Det europeiske kraftsystemet vil i framtiden bestå av store mengder ikke-regulerbar fornybar kraft. Fleksibilitet fra hydrogenverdikjeder kan bli viktige, både for å ta unna overskuddskraft, men og ved å bruke hydrogen i kraftproduksjon ved underskudd.

- Vi anbefaler å forske på samspillet mellom naturgass, hydrogen, CCS og fornybar kraft for å balansere europeiske kraftmarkeder.

Skalerbare elektrolyseteknologier har stort potensiale når de installeres i sammenheng med norske vindressurser og dermed kan brukes til å balansere den ikke-regulerbare kraftproduksjonen. Dette vil potensielt øke verdien både på vindkraften i Norge og lede til klimagevinster ved å gi billigere hydrogen som kan substituere CO₂-intensiv energi.

- Forsknings- og utviklingsstøtte til skalerbare elektrolyseteknologier som har mye lavere kapital-kostnader enn dagens teknologi bør styrkes. Dette omfatter alt fra fundamental materialforskning, prosess og kjemiteknikk til avanserte produksjonsmetoder.

Teknologier for mer effektiv produksjon av hydrogen via elektrolyse eksisterer i dag på prototypenivå. For eksempel kan høytemperatur elektrolyse (SOEC) produsere hydrogen med 100 prosent elektrisk virkningsgrad. Disse teknologiene har fortsatt for høy kostnad og for kort levetid. Forsk-

ning på nye og bedre materialer, effekter som påvirker levetid og mer kostnadseffektive produksjonsmetoder er nødvendig.

- Vi anbefaler videre støtte på utvikling av nye, mer kostnadseffektive materialer og komponenter for lav og høytemperatur elektrolyse samt på å øke forståelsen av hva som bestemmer levetiden til disse teknologiene.

Det er en sterk interesse fra den maritime industrien i å benytte brenselceller til framdrift av skip. Dette medfører et behov for å bruke store systemer basert på mange parallelle brenselceller. Dette finnes det lite forskning på internasjonalt.

- Vi anbefaler derfor økt forskning på teknologiske løsninger for design og styring av store, hybride systemer bestående av batterier og brenselceller for optimal kostnad og levetid.

Forsknings- og utviklingsbehov relatert til teknologi i verdikjeder for hydrogen og eventuelt hydrogen som energibærere bør gis støtte gjennom virkemiddelapparatet. Fremdeles finnes det et FoU-gap for ulike teknologielementer for fremtidige hydrogenverdikjeder.

- Spesielt gjelder dette teknologiske elementer for mellom- og storskala transport av hydrogen, eksempelvis større isolerte lagertanker for flytende hydrogen.

- Det bør forskes på andre former for hydrogenlagring enn som rent hydrogen, for eksempel ammoniakk. Verdikjedevurderinger bør utføres, for å avgjøre under hvilke betingelser hydrogen bør konverteres kjemisk til for eksempel ammoniakk kontra flytende-gjøres som ren hydrogen. Oppdatert kunnskap rundt spaltning tilbake til hydrogen og løsninger for direkte forbrenning eller bruk i brenselceller, er nødvendig for å kunne utføre verdikjedevurderinger for bruk av ammoniakk som energibærer.

Det norske virkemiddelapparatet bør legges helhetlig til rette for å støtte forskning og teknologitviking innen hydrogenproduksjon og transport i og fra Norge: Vi opplever at det er et hull i det norske virkemiddelapparatet knyttet til FoU innen temaene storskala hydrogenproduksjon, prosessering og transport av hydrogen, særlig fra fossile kilder. Dette temaet faller nå mellom mandatene til EnergiX, CLIMIT, Petromaks II og MAROFF.

- Det bør etableres et klart mandat for området storskala hydrogen som eies av ett av programmene, eller koordineres mellom disse.
- Dette bør videre koordineres med andre deler av virkemiddelapparatet som Enova, Gassnova og Pilot-E.

På europeisk nivå er det i noen land aktuelt å bruke hydrogen til oppvarming i bygg, som et alternativ til elektrifisering, med de infrastrukturkostnader det ville medføre.

- Det anbefales å arbeide med utvikling av kostnads-effektive løsninger for transport og distribusjon av hydrogen og hydrogen/naturgass blandinger. Dette vil gjøre det mulig å etablere forretningsmodeller for naturgass, CCS, hydrogen til oppvarming av bygg i Europa.

En verdiskapning basert på avansert materialteknologi er avhengig av sterke kunnskapsmiljøer.

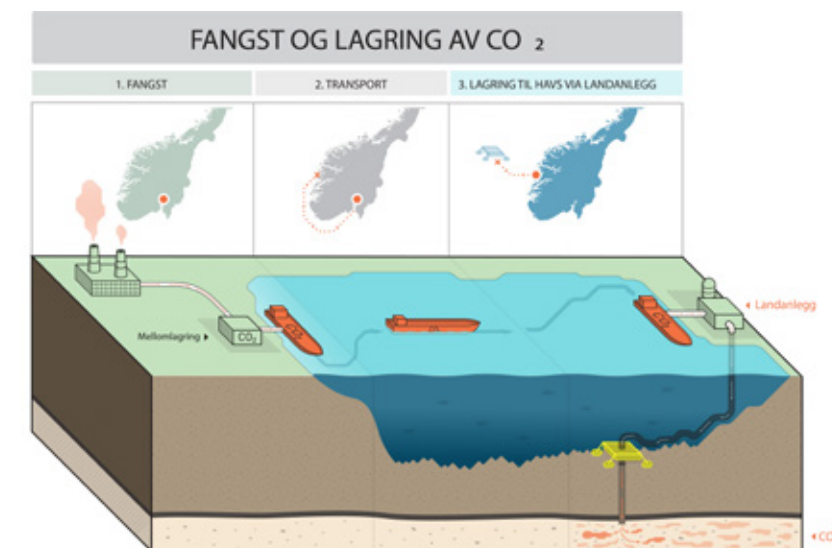
Det er fortsatt et sterkt behov for å videreutvikle de eksisterende løsningene for produksjon, lagring og bruk av hydrogen for å kutte kostnader, forbedre ytelse og levetid. En slik utvikling må baseres på en fortsatt sterk støtte til fundamental forskning på materialteknologi. Samtidig som det må satses på mer målrettet materialforskning inn mot områder som Norge har spesielt gode forutsetninger og behov, slik som lav og høytemperatur vannelektrolyse og brenselceller, komposittmaterialer for hydrogenlagring, hydrogensprøhet i stål og materialer for membraner til direkte hydrogenproduksjon og CO₂-separasjon.

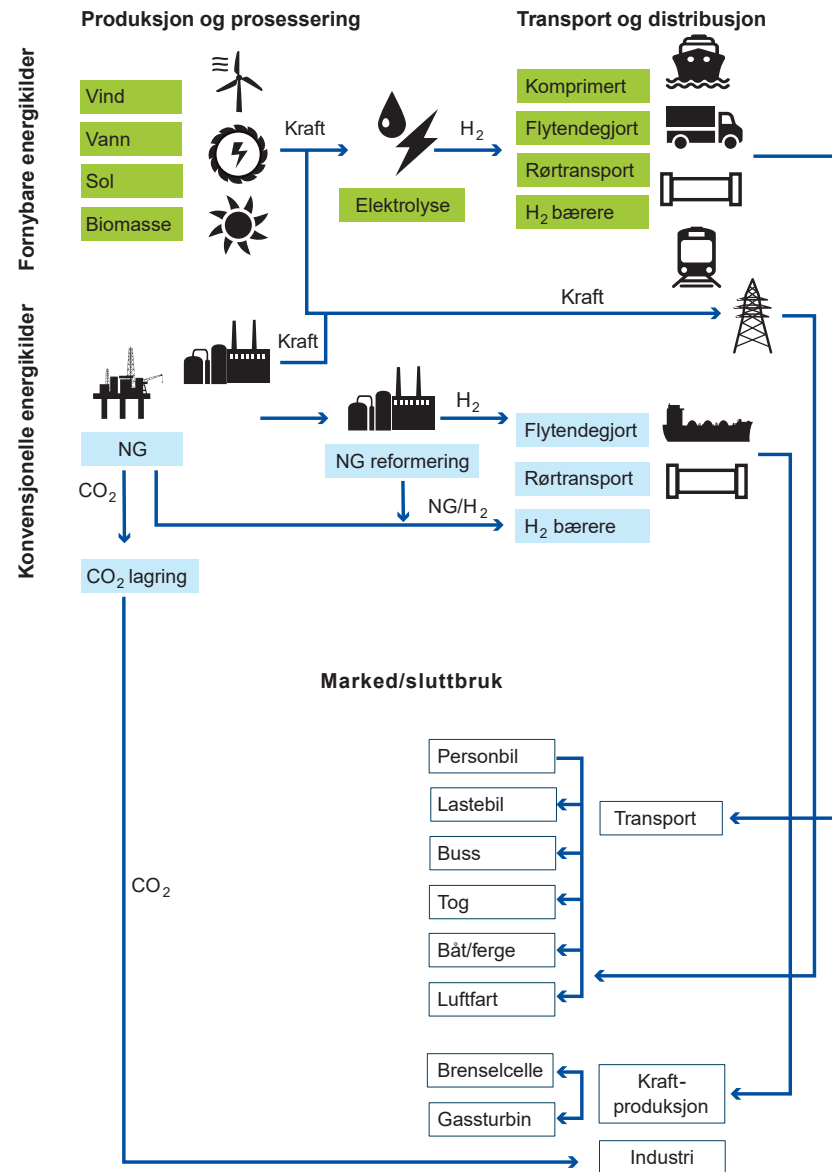
Langsiktig samarbeid

Industriens rolle i samarbeid med forskningsinstituttene, universitetene og det offentlige er sentralt for verdiskaping. Denne typen langsiktig samarbeid baner vei for økt konkurransekraft internasjonalt for produkter, tjenester og kompetanse fra Norge.

Verdiskaping fra norsk forskning er innenfor dette området og avhengig av at løsninger tas i bruk internasjonalt. Det er derimot svært viktig at Norge, som en eventuell tidlig aktør i mange av hydrogenverdikjedene, ikke velger sær-norske løsninger.

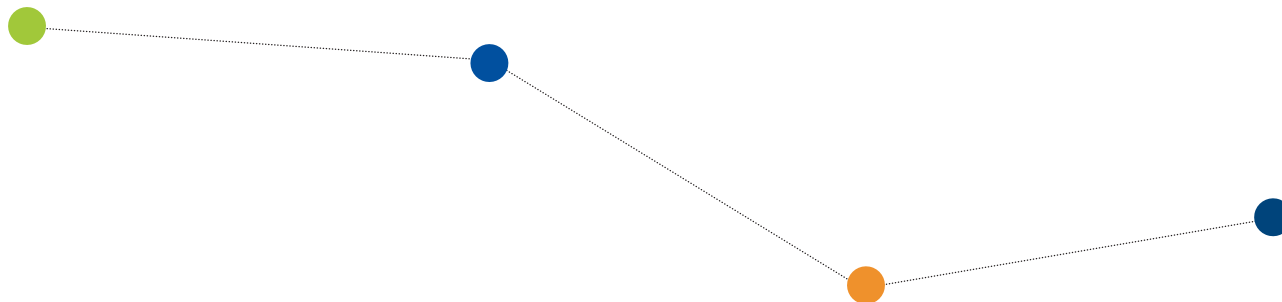
- Vi anbefaler fokus på langsiktig internasjonalt forskningssamarbeid som involverer både industri og forskningsmiljø og som utnytter norsk spisskompetanse.
- Internasjonalt samarbeid er viktig, både for å sikre arbeidsdeling som utnytter nasjonal kompetanse og for å sikre at forskning støtter opp om og leder fram til felles løsninger og standarder. Mission Innovation og europeisk forskningssamarbeid bør prioriteres høyt for å oppnå dette.
- Det vil være sentralt for verdiskapingen at midler som støtter omstilling av sektorer i dag, i samspill med forskning er et skritt på veien til varig omstilling med nye forretningsmodeller med et internasjonalt potensiale.





I Europa varmes derimot store deler av bygningsmassen i dag ved hjelp av naturgass. Energibruk i bygninger står for om lag 40 prosent av energiforbruket og 36 prosent av CO₂-utslippene i EU-landene. Hydrogen som fremtidig energibærer i varmesektoren har et betydelig potensiale i Europa, og muliggjør fortsatt bruk av eksisterende gassinfrastruktur i flere tiår fremover.

Figur. Kobling mellom ulike energibærere og sluttbruk

**Forfattere:**

Asgeir Tomasgard (NTNU, redaktør)
Edd Anders Blekkan (NTNU)
Per Ivar Karstad (NTNU)
Steffen Møller-Holst (SINTEF)
Sigmund Størset (SINTEF)
Øystein Ulleberg (IFE)

David Berstad (SINTEF)
James Dawson (NTNU)
Terese Løvås (NTNU)
Petter Nekså (SINTEF)
Kyrre Sundseth (SINTEF)

Odne Stokke Burheim (NTNU)
Kari Aamodt Espegren (IFE)
Julien Meyer (IFE)
Bruno G. Pollet (NTNU)
Magnus Thomassen (SINTEF)