



RAPPORT

Effekter av energiforskning

Delrapport 1 av 2



Av Annegrete Bruvoll, Leo Grünfeld, Sigrid Hernes, Inger Nielsen Hole, Mikael Storhaug Amari, Piotr Śpiewanowski, Ingvald Sundal Smelvær, Bjarne Børresen, Sigmund Sørensen Kielland, Morten Solstad, Carl Godager Kaas, Alexander Ross Cowie-Sailer, Kaj Halvorsen, Øyvind Handberg og Even Winje.

Menon-publikasjon Nr. 66

2025

Forord

På oppdrag for Norges forskningsråd har Menon Economics og Multiconsult utarbeidet en studie av effekter av energiforskning. Formålet med arbeidet er å dokumentere effekter av forskningen i Forskningssentre for miljøvennlig energi (FME) og programmene ENERGIX og CLIMIT. Studien tar utgangspunkt i energiforskning i perioden 2016 og fram til i dag, og bygger videre på den tidligere studien av energiforskning som Impello gjennomførte sammen med Menon Economics i 2018.

Studien presenteres i to delrapporter. Dette er delrapport 1 som presenterer effekter av utvalgte forskningscase som har vært gjennomført i regi av FME-ordningen. Delrapport2 omhandler vurdering av FME-ordningen.

Annegrete Bruvoll (administrativt ansvarlig, faglig ansvarlig del 1) og Leo Grünfeld (faglig ansvarlig del 2) har vært ansvarlige for prosjektet. Sigrid Hernes, Inger Nielsen Hole, Piotr Śpiewanowski, Mikael Storhaug Amari har vært prosjektmedarbeidere fra Menon. Ingvild Sundal Smelvær har ledet teamet med fagekspert og kvalitetssikrere fra Multiconsult, med Bjarne Børresen, Sigmund Sørensen Kielland, Morten Solstad, Carl Godager Kaas, Alexander Ross Cowie-Sailer, og Kaj Halvorsen. Even Winje og Øyvind Handberg har vært kvalitetssikrere fra Menon.

Vi takker Norges forskningsråd for et spennende oppdrag. Takk også til alle involverte fra FME-sentrene for gode innspill og informasjonsdeling underveis i prosessen.

Mai 2025

Annegrete Bruvoll
Prosjektansvarlig Del 1
Menon Economics

Mai 2025

Leo Grünfeld
Prosjektansvarlig Del 2
Menon Economics

Om Menon Economics

Menon Economics analyserer økonomiske problemstillinger og gir råd til bedrifter, organisasjoner og myndigheter. Vi er et konsultentselskap som opererer i grenseflatene mellom økonomi, politikk og marked.

Menon kombinerer samfunns- og bedriftsøkonomisk kompetanse innenfor fagfelt som samfunnsøkonomisk lønnsomhet, verdsetting, klima-, miljø- og energiøkonomi, nærings- og konkurranseøkonomi, strategi, finans og organisasjonsdesign. Vi benytter forskningsbaserte metoder i våre analyser og jobber tett med ledende akademiske miljøer innenfor de fleste fagfelt.

Les mer om vårt arbeid på menon.no.

Om Multiconsult

Multiconsult ASA er et ledende norsk ingeniør- og arkitekturselskap. Med nærmere 3500 høyt kompetente medarbeidere fordelt på sterke fagområder kan Multiconsult påta seg de mest komplekse prosjektene markedet har å tilby. Multiconsult har lang erfaring med prosjekter for offentlige og private kunder innen bygg og eiendom, energi og industri og anlegg. Vår rådgivning dekker et bredt spekter av fagområder, blant annet energiledelse og energieffektivisering, fornybar energiproduksjon, transport og klimagassutslipp og klimagassreduksjon med kjent og ny teknologi.

Om Forskningsrådet

Forskningsrådet skal sikre at de beste forsknings- og innovasjonsprosjektene blir finansiert og deler ut ca. 11 mrd. kroner hvert år på vegne av alle departementene. Forskningsrådet er forvaltningens og regjeringens rådgiver innen forskning og innovasjon og gir råd om på hvilke områder samfunnet trenger mer kunnskap og nye løsninger. Forskningsrådet har også ansvar for ulike arenaer for dialog mellom forskere, næringsliv, offentlig sektor og andre brukere av forskning og innovasjon og kobler sektorene slik at de kan lære av hverandre og samfunnet får tatt ny kunnskap raskere i bruk. I tillegg utfører Forskningsrådet ulike eksternt finansierte oppdrag, satsinger og strategiprosesser, på vegne av departementene og andre offentlige organ.

Innhold

Innhold	3
Sammendrag	6
Formål med studien	6
Effekter av energiforskningen	7
1 Innledning og metode	13
1.1 Innledning og formål	13
1.2 Metodisk tilnærming	14
1.3 Forskningsrådets betydning i form av addisjonalitet	16
2 Effekter av energiforskning innen ulike forskningsområder	18
2.1 Vannkraft	18
2.2 Vindenergi	20
2.3 Solenergi	23
2.4 Biodrivstoff	25
2.5 Energibruk i bygg og områder	27
2.6 Energieffektivisering i industrien	29
2.7 Nullutslippstransport	31
2.8 Energisystemer	33
2.9 CO ₂ -håndtering	35
3 Effektanalyser av utvalgte forskningscase	38
3.1 Redusert produksjonstap med avanserte metoder for drift av solparker	39
3.2 Utslippskutt med CO ₂ -kjøling av dagligvarebutikker	45
3.3 Økt kapasitet i kraftnettet med dynamisk drift av kraftledninger	50
3.4 Billigere transport av CO ₂ på skip ved bruk av lavtrykksteknologi	56
3.5 Utslippskutt og lavere energibruk med høytemperatur varmpumper	62
3.6 Redusert fare for havari i vannturbiner	68
CASEKATALOG	73
4 Introduksjon til casekatalogen	75
5 Vannkraft	77
5.1 HiFrancis-turbiner – redusert fare for havari	78
5.2 Feildeteksjon og prediksjon av levetid	79
5.3 Oppgradering av sandfang i vannkraft-tuneller	80
5.4 ProdRisk-SHOP simulator for investeringsanalyser	81
5.5 Miljø-DNA for overvåking av økologisk tilstand	82
5.6 Nye løsninger for sikker nedvandring av fisk forbi kraftverksinntak	83
5.7 Variabel hastighet for turbin og generator	84
5.8 Pumpekraft – ombygging og utvidelse av eksisterende kraftverk	85
6 Vindenergi	86
6.1 Webapplikasjon for lokalisering av vindkraftverk	87
6.2 Optimalisering av strømmettet til havs	88
6.3 Videreutviklet simulator for havvindturbiners respons på ulike sjø- og vindforhold	89
6.4 Vindturbin simulator SIMA videreutvikling	90
6.5 Miljøvennlige sjøkabler for strømmett til havs	91
6.6 Kostnadseffektiv produksjon av understell til havvindturbiner	92

6.7	Verktøy for å optimalisere marine operasjoner for havvind	93
6.8	SKARV: Metode for å unngå kollisjoner mellom fugler og vindturbiner	94
7	Solenergi	95
7.1	Avanserte metoder for drift og vedlikehold av solkraftverk	96
7.2	Flytende solkraftverk	97
7.3	Produksjon av høyren kvarts til produksjon av solcellematerialer	98
7.4	Produksjon av monokrystallinsk silisium	99
8	Biodrivstoff	100
8.1	Ressurstilgang til biodrivstoffproduksjon	101
8.2	Utvidelse av biogassverdikjede	102
8.3	Biodrivstoff fra avfall	103
8.4	Prosess for å produsere bioolje	104
8.5	HTL-basert produksjon av biodrivstoff	105
9	Energibruk i bygg og områder	106
9.1	Realisering av nullutslippsbygninger (ZEB-metoden)	107
9.2	Energifleksibilitet og reduksjon/flytting av topplast	108
9.3	Energieffektivisering gjennom energiomlegging i bygg og områder	109
9.4	Smart ventilasjon med lave utslipp	110
9.5	Metode for nullutslippsområder (ZEN)	111
10	Energieffektivisering i industrien	112
10.1	CO ₂ -baserte kjøle- og varmepumpesystem for dagligvarebutikker	113
10.2	Økt utnyttelse av lavtemperatur overskuddsvarme med varmepumpe	114
10.3	Integrerte energisystem for industrien	115
10.4	Bruk av høytemperatur varmepumper i industrien	116
10.5	Resirkulering av gass i metallproduksjon	117
10.6	Termisk energilagring og fleksibilitet	118
11	Nullutslippstransport	119
11.1	Silisumbaserte nanomaterialer for litium-ion-batterier	120
11.2	PEM vannelektrolyse for tungtransport og industri	121
11.3	EIS-verktøy for levetidsstudier av brenselcelle	122
11.4	Laboratorium for batteri- og hydrogengasseksplasjonstester	123
11.5	Verktøy for beregning av energi og utslipp i sjøtransport	124
11.6	ZETruck-metode for integrert kostnads- og miljøanalyse av nullutslippslastebiler	125
12	Energisystemer	126
12.1	Metode for risikobasert nettdrift	127
12.2	Transformatorforvaltning	128
12.3	Feil- og avbruddshåndtering	129
12.4	Dynamisk drift av kraftledninger	130
12.5	Økt overføringskapasitet på kraftkabler	131
12.6	Ladeinfrastruktur i kraftsystemet	132
12.7	Industriell fleksibilitet opp mot kraftsystemet	133
12.8	Planlegging av kraftnett hensyntatt fleksibilitet	134
13	CO₂-håndtering	135
13.1	NCCS' bidrag for å muliggjøre fullskalaprojekt	136
13.2	CO ₂ -fangst fra skip	137
13.3	Fiskale målinger for flytende CO ₂	138
13.4	Kostnadseffektive metoder for overvåking av CO ₂ -lagring i undergrunnen	139
13.5	Lavtrykks skipstransport av CO ₂	140
13.6	Lavutslipp hydrogenproduksjon basert på membranteknologi	141

13.7	Redusert tap av solventer ved fangst av CO ₂	142
13.8	Ren og effektiv forbrenning av hydrogen i gassturbiner	143
13.9	Økt lagringskapasitet og redusert risiko gjennom forkastningsanalyser	144
13.10	Modell for beregning av løpende brudd i CO ₂ -rørledninger	145
Vedlegg		146
A	Generelt om beregninger i effektanalyser av utvalgte forskningscase	146
B	Forutsetninger i effektanalyser av utvalgte forskningscase	147
C	Om addisjonalitetsgrad knyttet til finansiering fra Forskningsrådet	149

Sammendrag

Formål med studien

I lys av den grønne omstillingen står Norge og verden overfor store utfordringer. Dette henger sammen med behovet for et mer robust energisystem som kan håndtere høye effekttopper, inkorporere nye regulerbare energikilder, redusere flaskehalser i strømmettet, samt minimere kostnader og naturpåvirkning fra nye energikilder eller energieffektiviserende tiltak. I tillegg kreves utvikling av nye grønne teknologier, som hydrogen, forbedret bruk av restmaterialer, bioteknologier og karbonfangst og -lagring (CCS). Forskning er avgjørende for å lykkes med disse utfordringene.

En viktig del av Forskningsrådets innsats innen energiforskning har vært gjort gjennom Forskningsssentre for miljøvennlig energi (FME), samt programmene ENERGIX og CLIMIT. Formålet med denne studien er å belyse effekter av energiforskningen som har vært delfinansiert av Forskningsrådet. Dette arbeidet oppsummeres i to delrapporter:

- **Delrapport 1: Effekter av energiforskning.** Vurdering av økonomiske og miljømessige effekter av 60 case som har fått støtte fra FME-ordningen, CLIMIT og/eller ENERGIX.
- **Delrapport 2: Vurdering av FME-ordningen** i lys av sentrenes egenskaper. Dette inkluderer strukturer for samarbeid, forskerutdanning, publikasjoner, flerfaglighet, internasjonalisering og øvrige resultater utover det som presenteres i delrapport 1.

Denne rapporten tilsvare Delrapport 1. Effekstudien er basert på et utvalg av 60 forskningscase. Funn og konklusjoner i denne rapporten er avgrenset til de 60 casene. Vi beskriver seks av casene mer detaljert, og tallfester effekter for disse.

Om FME-ordningen og de ni FMEene som inngår i analysen

FMEene har som formål å drive forskningsaktivitet på høyt internasjonalt nivå i samarbeid med brukere fra næringsliv, forvaltning og samfunnet for øvrig. Forskningen i sentrene skal bidra til å løse sentrale utfordringer på energi- og klimaområdet og styrke innovasjonsevnen i norsk næringsliv. FME-ordningen har siden den ble opprettet i 2009 støttet et betydelig antall teknologiske FMEer. I denne analysen ser vi nærmere på forskning hos åtte FMEer som har vært aktive i perioden 2016–2025, og ett FME¹ som har vært aktiv siden 2021, se punktlisten sammen med deres forskningsområde:

- FME HydroCen – Vannkraft
- FME SuSolTech – Solenergi
- FME Bio4Fuels – Biodrivstoff
- FME ZEN – Energibruk i bygg og områder
- FME HighEFF – Energieffektivisering i industrien
- FME MoZEES – Nullutslippstransport
- FME CINELDI – Energisystemer
- FME NCCS – CO₂-håndtering
- FME NorthWind – Vindenergi

¹ FME NorthWind. Dette FME-senteret avsluttes i 2029.

Effekter av energiforskningen

Energiforskning er lønnsomt for samfunnet

I denne rapporten har vi vurdert effekter av energiforskning basert på 60 forskningscase. Vi har gjort detaljerte effektanalyser hvor vi har tallfestet effekter for seks av disse. Samlet finner vi at energiforskning har store realiserte og potensielle effekter knyttet til økt fornybar energiproduksjon, energieffektivisering, reduserte klimagassutslipp, redusert miljøpåvirkning, økt forsyningssikkerhet, reduserte kostnader, og næringslivspotensial.

Vår vurdering er at nytten av energiforskningen i FME-ene overstiger kostnadene. Det betyr at den samfunnsøkonomiske avkastningen på investeringer i denne typen FoU er positiv.

Anslått prissatt samfunnsøkonomisk gevinst for Norge er mellom 9 og 36 mrd. kroner for de seks casene alene hvor vi har gjort detaljerte effektanalyser. Av dette finner vi at om lag 5 mrd. kroner allerede er realisert, mens resten må anses som potensielle forventede effekter som det er knyttet stor usikkerhet til. De globale effektene er derimot langt større. Vi anslår at mellom 3 og 23 mrd. kroner av den samfunnsøkonomiske gevinsten fra de seks casene kan tilskrives finansieringen fra Forskningsrådet.

Det aller meste av gevinstene fra de seks casene knytter seg til redusert energiforbruk og verdier knyttet til reduserte klimagassutslipp. Vi finner lave realiserte verdiskapingseffekter i norsk næringsliv. Så langt synes med andre ord norske bedrifter i begrenset grad ha nyttiggjort innovasjonene knyttet til casene vi har sett på. I tillegg til de tallfestede verdiene har de seks casene en rekke effekter som ikke er tallfestet, inkludert økt forsyningssikkerhet, redusert miljøpåvirkning, og fremtidig næringslivspotensial.

Den tallfestede samfunnsøkonomiske gevinsten kan tolkes som et minimumsanslag på verdien av energiforskning, ettersom vi kun har verdsatt en liten andel av forskningsporteføljen. De seks utvalgte casene er imidlertid særlig suksessfulle, og må ikke tolkes som representative for forskningsporteføljen som helhet.

Forrige gjennomgang av energiforskningen var i 2018.² Da ble total nåverdi av realiserte effekter for energiforskningen gjennomført mellom 2008 og 2017 anslått til 16 mrd. kroner, med potensial på over 100 mrd. kroner, basert på forenklete effektberegninger av 48 case. Våre anslag er mer moderate, noe som kan komme av at vi kvantifiserer effekter bare fra de seks antatt mest suksessfulle casene, og at beregningene er mer detaljerte.

Den offentlige finansierte energiforskningen i Norge er i hovedsak organisert gjennom Forskningsrådet, og Forskningsrådets programmer: ENERGIX, CLIMIT og FME-ordningen. Mellom 2017 og 2023 har disse tre programmene årlig bevilget mellom 600 og 800 mill. kroner i støtte til energiforskning. De ni sentrene som inngår i denne rapporten hatt et samlet budsjett på 3,3 mrd. kroner, der 1,4 mrd. kroner har vært bevilget gjennom FME-ordningen.

Overordnet, kvalitativ vurdering av totalt 60 case er visualisert i effektkartet i Figur 1:

² Impello og Menon Economics (2018). Effekter av energiforskningen. Tilgjengelig [her](#).

Figur 1: Effektkart som viser relative effektstørrelser for de 60 inkluderte forskningscasene i studien. Kilde: Menon Economics.

Effektkart for 60 forskningscase

Relative effektstørrelser på tvers av effekttyper og forskningsområder. Effektene er skjønnsmessig aggregert per forskningsområde, og viser kun til direkte effekter.

Potensielle effekter  Realiserte effekter 	Vannkraft	Vindenergi	Solenergi	Biodrivstoff	Energibruk i bygg og områder	Energieff. i industrien	Nullutslipps-transport	Energi-systemer	CO ₂ -håndtering
Økt fornybar energi									
Energi-effektivisering									
Reduserte klimagassutslipp									
Redusert miljøpåvirkning									
Økt forsynings-sikkerhet									
Reduserte kostnader									
Næringslivs-potensial									

Effektkartet viser bare *direkte effekter*. Vi vurderer ikke indirekte effekter, hvor én effekt utløser en annen effekt. Størrelsen på indirekte effekter er usikre, og vanskeligere å anslå enn de direkte effektene. For eksempel vil økt forsynings-sikkerhet ved bedre kapasitet i strømmettet kunne muliggjøre økt produksjon av vindkraft, som i sin tur kan føre til reduserte klimagassutslipp, og som igjen gir redusert miljøpåvirkning. Bare den direkte effekten, økt forsynings-sikkerhet, illustreres i effektkartet.

Totalt sett vurderer vi at de potensielle effektene er større enn realiserte effekter for alle forskningsområder og alle effekttyper. I det følgende oppsummerer vi hvilke direkte effekter de 60 forskningscasene har bidratt til.



Økt produksjon av fornybar energi fra sol, vann, og biodrivstoff, og potensial for økt vindenergi på land og til havs

Forskningen på vannkraft, vindenergi, solenergi og energikilder har økt produksjonen av fornybar energi. Det er potensial for ytterligere økning i produksjon, om flere forskningsresultater fra casene realiseres.

Forskningen har gitt mer effektiv og lønnsom *vannkraftproduksjon*, og dermed gjort energimarkedet mer robust overfor svingninger i etterspørselen. Flere forskningsprosjekter har eksempelvis bidratt til økt oppetid på kraftverkene. Forskningen har bidratt til å muliggjøre fremtidig omlegging av eksisterende vannkraftverk til pumpekraftverk, som pumper vann tilbake i kraftverkene i perioder med lave strømpriser. Vannturbiner er tilpasset tøffere driftsmønster, med lavere risiko for havari.

Innenfor *vindenergi* har forskningen stort potensial til å bidra til økt energiproduksjon ved å bedre kostnadseffektiviteten i utbygging og/eller redusere miljøbelastning av utbygging, særlig knyttet til havvind.

Forskning på drift og vedlikehold av solparker har bidratt til økt global produksjon av *solenergi*, og blant annet er nedetid ved solparker halvert i en rekke solparker som følge av utviklede avanserte metoder for drift og vedlikehold. Internasjonalt er forbedret ytelse hos norskeide solkraftverk realisert bl.a. ved nye metoder for bruk av droner og avansert software i drift av solcelleparker. Forskning innen *energibruk i bygg og områder* kan samtidig potensielt øke produksjonen av solenergi ved å tilrettelegge for lokal energiproduksjon.

Forskningen har i tillegg bidratt til økt produksjon av *biodrivstoff* i Norge, og har potensialer for videre økning dersom casene tas i bruk kommersielt. Særlig er det potensialer knyttet til hydrotermisk flytendegjøring av biomasse til flytende drivstoff.



Økt energieffektivisering gjennom redusert energibruk og utnyttelse av overskuddsstrømmer i bygninger og i industrien

To av forskningsområdene har som hovedformål å redusere energibruk, i henholdsvis industrien og i bygg og områder. Forskningen har bidratt til å realisere lavere energibruk, og har potensial for større effekter.

I *industrien* har særlig utviklede CO₂-baserte kjøle- og varmepumpesystem til bruk i dagligvarebutikker gitt store kutt i energibruk. Høytemperatur varmepumpe, som utnytter overskuddsvarme fra industrielle prosesser, er i startgropen til å bli et alternativ til mer energiintensive alternativer, og kan gi betydelige kutt i energibruk i Europa de neste årene.

Innen *bygg og områder* har nye løsninger og metodikk for blant annet nullutslippsbygg og -områder store potensialer for energibesparelser i fremtiden.

Det er utviklet teknologier for hydrogenproduksjon med lavere energiforbruk innen *transport*, og for redusert behov for å tilføre solventer som reduserer energibehovet ved *karbonfangst*.



Reduserte klimagassutslipp fra fossil energibruk og kjølesystemer, og potensial for økt CO₂-fangst og -lagring

Forskningen har gitt store utslippskutt i transportsektoren og i industrien, og økte muligheter for CO₂-fangst og -lagring. Brorparten av de 60 casene bidrar *indirekte* til utslippskutt ved å tilrettelegge for grønn omstilling.

Realiserte utslippseffekter er særlig store i *industrien*, ved at det ble utviklet alternative teknologier til utslippsintensive kjølesystemer i dagligvarebutikker. Det er stort potensial for at europeisk industri kan erstatte oljefyrte eller dieseldrevne varmforsyningssystemer med høytemperatur varmepumper.

Forskningen har bidratt til reduserte kostnader for fangst, frakt og lagring av CO₂, noe som gir stort potensial for utslippskutt innen *CO₂-håndtering*. Ettersom kostnader er en viktig barriere for å realisere CCS i stor skala, kan reduserte kostnader utgjøre en stor forskjell i mengden CO₂ som blir lagret.

Forskning innen *energibruk i bygg og områder* har potensial til utslippskutt. Implementering av nye metoder for nullutslippsbygg og -områder gir store potensialer for utslippskutt i Norge og utlandet.

Forskningen gir lavere utslipp i *transportsektoren*, gjennom økt produksjon av *biodrivstoff* og nye nullutslipp-teknologier, som innenfor hydrogen og batteri. Dersom forskningen kommersialiseres, er det framtidige potensialet enda større.

Innen *vindenergi* har forskningen potensial til å redusere direkte utslipp i mer effektiv produksjon av komponenter, og mer effektiv installasjon og drift av havvindparker.



Redusert miljøpåvirkning fra fornybar energiproduksjon, mindre forurensing, redusert utbygging av kraftnett og lavere materialforbruk

Alle forskningsområdene har bidratt til, eller har potensial for, redusert miljøpåvirkning gjennom fokus på utvikling av naturvennlige løsninger. Det omfatter mindre naturinngrep i utbygging, lavere forbruk av råvarer, mindre forurensing av miljøskadelige stoffer, og økt sirkularitet.

Forskningen gir mindre miljøpåvirkning fra utbygging av fornybar energi. For *vannkraft* og *vindenergi* er miljøpåvirkning redusert i utbygging og drift av kraftverkene, og for *solenergi* er behovet for råvarer i produksjon av solcellepaneler redusert. Økt bruk av avansert *biodrivstoff* laget fra avfall kan fortrenge konvensjonelt biodrivstoff som kan være skadelig for naturen.

Forskningen har ført til lavere materialforbruk, og dermed redusert miljøpåvirkning. Dersom utviklede standarder for nullutslippsbygg og -områder realiseres, kan det gi redusert miljøpåvirkning i *bygg- og anleggssektoren*. Innen *nullutslippstransport* har forskningen potensial til å gi mer materialeffektiv produksjon, mer holdbare batterier og mindre forbruk av råvarer. Innen *energieffektivisering i industrien* er det utviklet verktøy for økt gjenbruk i industriklynger av materialer som ellers ville måtte deponeres. Innen *energisystemer* kan lengre levetid på transformatorer redusere materialforbruket.

Forskningen har potensial til å føre til redusert risiko for lekkasjer av CO₂ og redusert utslipp av kjemikalier innen *CO₂-håndtering*.



Økt forsyningssikkerhet gjennom redusert energibruk, økt utnyttelse av kapasitet og økt fleksibilitet i kraftnettet, og økt produksjon av fornybar energi

Særlig forskning innen *energisystemer* gir økt forsyningssikkerhet av strøm, ved å bidra til et mer robust kraftnett med høy grad av utnyttet kapasitet. I lys av stor mangel på nettkapasitet i Norge, vil dette muliggjøre elektrifisering av transport og industriprosesser, tilknytning av nye vind- og vannkraftverk, og oppblomstring av nye kraftintensive næringer. Realisering av effekter fra en stor andel av casene betinger et fungerende strømnnett.

Økt produksjon av fornybar energi innebærer *økt forsyningssikkerhet* gjennom å sikre nok energiproduksjon. Særlig regulerbare energikilder (biodrivstoff og vannkraft) er viktig i et marked med mer fornybare energikilder.

Redusert energibruk i industrien og i bygg og områder bidrar til at energisystemet bedre kan møte store svingninger i etterspørselen, og kapasitet kan frigjøres i kraftnettet. For eksempel kan utvikling av høytemperatur industrielle varmepumper kutte energibruk i industrielle prosesser med over 50

prosent. Forskning innen nullutslippstransport kan øke forsyningssikkerheten ved å legge til rette for produksjon av hydrogen og gjøre batterier mer holdbare.

Forskning innen fleksibilitet i *industrien og bygg og områder* gir mer forsyningssikkerhet gitt økende andel uregulerbar kraft, som skaper behov for å flytte strømforbruk fra perioder med press i strømmettet til tider med bedre kapasitet. Forskningen har særlig potensial til å øke fleksibiliteten i *bygg og områder* ved flytting av topplast, og i *industrien* ved bruk av termisk energilagring.



Reduserte kostnader knyttet til unngåtte investeringer, lavere driftskostnader og lavere materialforbruk

Kostnadene reduseres i alle forskningsområdene som følge av mer effektive prosesser, bedre utnyttelse av ressurser, og unngåtte investeringer.

Forskningen har redusert kostnader for installasjon, drift, og vedlikehold av fornybare kraftverk. Innen *vannkraft* har forskningene ført til lavere drifts- og vedlikeholdskostnader og unngåtte reparasjonskostnader ved havari og skader. For *vindenergi* er det potensielt store kostnadsreduksjoner knyttet til mer kostnadseffektiv produksjon og installasjon av vindparker og tilknyttet nettinfrastruktur. For *solenergi* har forskningen gitt mer avanserte metoder for drift og vedlikehold, blant annet med droner, som gir lavere driftskostnader, samt potensielt lavere kostnader ved mindre materialforbruk i produksjon.

I *industrien* reduseres kostnadene gjennom mer effektive industriprosesser med lavere energibruk, og utnyttelse av overskuddsstrømmer av energi og materialer.

Forskning innen *biodrivstoff* kan bidra til økt lønnsomhet i verdikjeden. For eksempel kan optimalisering av biogassprosessen redusere kostnader knyttet til produksjon av biometan.

Forskningen på *nullutslippstransport* har utviklet metodikk og verktøy som kan brukes til å planlegge kostnadseffektive batteri- og hydrogenelektriske systemer og verdikjeder innen tungtransport.

Forskning innen *energisystemer* har gitt store kostnadsreduksjoner gjennom unngåtte investeringer i kraftsystemer og mer effektiv drift av kraftnettet. Ved bedre utnyttelse av eksisterende kapasitet i strømmettet kan en unngå kostbare nettinvesteringer.

Forskning innen *CO₂-håndtering* kan potensielt gi lavere kostnader innen frakt, fangst, og lagring av CO₂.



Næringslivspotensial i form av økt verdiskaping for norske aktører

Forskningen styrker norske produkt- og tjenesteleverandører. Forskningsområdene har i varierende grad utviklet løsninger som er klare for det internasjonale markedet.

For eksempel har forskning innen *solenergi* styrket norsk konkurranseevnen innen produksjon av solenergi, og i produksjon av komponenter til solkraftverk globalt. Innen *biodrivstoff* har særlig HTL-basert produksjon av biodrivstoff stort potensial dersom denne lykkes – med utvikling av en helt ny verdikjede for ny type biodrivstoffproduksjon. Forskningen innen *nullutslippstransport* kan bygge opp verdikjedene for hydrogen- og batteriproduksjon i Norge. Forskning innen *energisystemer* har ført til utviklede sensorer for å overvåke kapasitet i kraftnettet, som er på vei til å kommersialiseres og er til

salg i flere land. Innen *vindenergi* kan særlig utvikling av automatiserte produksjonsteknologier støtte norsk posisjon i fremtids utbygging av havvind. I *industrien* har forskningen ført til etablering og vekst av flere teknologileverandører.

1 Innledning og metode

1.1 Innledning og formål

I lys av den grønne omstillingen står Norge og verden overfor store utfordringer. En viktig del av dette henger sammen med behovet for et mer robust energisystem som kan håndtere høye effekttopper, inkorporere nye regulerbare energikilder, redusere flaskehalser i strømmettet, samt minimere kostnader og naturpåvirkning fra nye energikilder eller energieffektiviserende tiltak. I tillegg kreves utvikling av nye grønne teknologier, som hydrogen, forbedret bruk av restmaterialer, bioteknologier og karbonfangst og -lagring (CCS). Forskning er avgjørende for å lykkes med disse utfordringene.

Energidepartementet har bedt Forskningsrådet om å gjennomføre en studie av effekter av energiforskningen. Formålet er å dokumentere effekter av forskningen i forskningssentrene for miljøvennlig energi (FMEene) i tillegg til programmene CLIMIT og ENERGIX. Dette arbeidet oppsummeres i to delrapporter, hvor denne rapporten er delrapport 1:

- **Delrapport 1: Effekter av energiforskning.** Denne delrapporten fokuserer på å identifisere og beregne de samfunnsmessige (økonomiske og miljømessige) effekter av forskning som har fått støtte fra FME-ordningen, CLIMIT og ENERGIX. Vurderingen baseres på gjennomgang av 60 forskningscase, hvorav det er gjennomført en detaljert effektanalyse på seks av disse. I 2018 ble en tilsvarende studie gjennomført av Impello og Menon Economics.³
- **Delrapport 2: Vurdering av FME-ordningen.** I denne delrapporten vurderes FME-ordningen i lys av dens egenskaper og måloppnåelse. Dette inkluderer strukturer for samarbeid mellom aktører fra forskning/akademia, næringsliv, det offentlige og øvrige, kompetanseutvikling og forskerarbeid, publikasjoner, flerfaglighet, internasjonalisering og øvrige resultater fra ordningen, herunder det vi dokumenterer av effekter i delrapport 1.

Denne rapporten vurderer forskning fra de ni teknologiske FME som alle, bortsett fra ett⁴, har vært aktive i perioden 2017 til 2025, se Tabell 1-1. Tekstboks 1-1 lenger nede gir mer informasjon om FME-ordningen, CLIMIT og ENERGIX.

Tabell 1-1: Oversikt over FME som inngår i denne rapporten. Kilde: Norges forskningsråd

Forkortelse	FME	Tematisk område
FME HydroCen	Norwegian Research Centre for Hydropower Technology	Vannkraft
FME NorthWind	Norwegian Research Centre on Wind Energy	Vindenergi
FME SuSolTec	Research Centre for Sustainable Solar Cell Technology	Solenergi
FME Bio4Fuels	Norwegian Centre for Sustainable Bio-based Fuel and Energy	Biodrivstoff
FME ZEN	Research Centre on Zero Emission Neighbourhoods in Smart Cities	Energibruk i bygg og områder
FME HighEFF	Centre for an Energy Efficient and Competitive Industry for the Future	Energieffektivisering i industrien

³ Impello og Menon Economics (2018). Effekter av energiforskningen. Tilgjengelig [her](#).

⁴ FME NorthWind sin prosjektperiode varer fra 2021 til 2029.

Forkortelse	FME	Tematisk område
FME MoZEES	Mobility Zero Emission Energy Systems	Nullutslippstransport
FME CINELDI	Centre for intelligent electricity distribution	Energisystemer
FME NCCS	Norwegian CCS Research Centre	CO ₂ -håndtering

Tekstboks 1-1: Kort om FME-ordningen, ENERGIX og CLIMIT

FME-ordningen (Forskningssentre for fornybar energi) ble etablert i 2009. Ordningen har siden oppstarten hatt som formål å stimulere til forskningsaktivitet på høyt internasjonalt nivå i samarbeid med brukere fra næringsliv, forvaltning og samfunnet for øvrig. Ordningen tilbyr langsiktig finansiering av forskningssentre, med varighet opp til åtte år. Forskningen i sentrene skal bidra til å løse sentrale utfordringer på energi- og klimaområdet og styrke innovasjonsevnen i norsk næringsliv. I den nyeste utlysningen fremheves det at forskningen i sentrene må ta for seg realiseringen av Norges energi- og klimamål for 2030 og 2050. Fokus skal også rettes mot et klimanøytralt Europa, og forsyningssikkerhet trekkes fram som et viktig forskningsfelt. FME-ene skal forske på god utnyttelse av energiresurser for å sikre bærekraftig energiforsyning til Norge og Europa.

ENERGIX støtter forskning på fornybar energi, effektiv energibruk, energisystem og energipolitikk. Programmet skal støtte utvikling av et helhetlig energisystem som ivaretar bærekraft og naturmiljø. Programmet henvender seg til norske bedrifter og forsknings- og kompetanseinstitusjoner som kan bidra til langsiktig kompetanseoppbygging for å videreutvikle energinæringen og andre tilknyttede næringer, eksempelvis kraftintensiv industri og leverandørindustri. Programmet har eksistert siden 2013. ENERGIX kan sees på som en videreføring av det tidligere programmet RENERGI.

CLIMIT er det nasjonale programmet for forskning, utvikling og demonstrasjon av teknologi for CO₂-håndtering. Programmet består av to deler, herunder støtteordningen for forskning og utvikling (FoU-delen) administrert av Forskningsrådet, og Gassnovas støtte til utvikling og demonstrasjon (demo-delen). Programmet henvender seg til industri, forskningsinstitutter, universiteter og høyskoler, ofte i samarbeid med internasjonale bedrifter og forskningsinstitusjoner, for å akselerere kommersialiseringen av CO₂-håndtering. Programmet har eksistert siden 2005.

1.2 Metodisk tilnærming

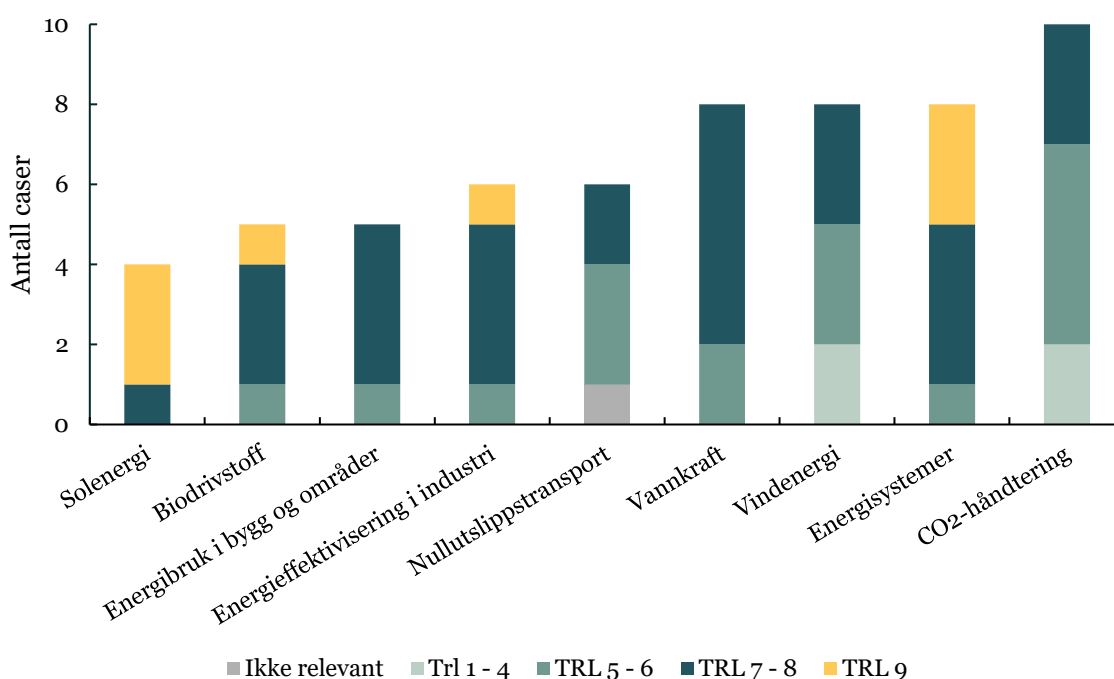
Det er gjennomgående vanskelig å beregne effekter av FoU-prosjekter, ikke minst fordi det er komplisert å påvise den kausale sammenhengen mellom FoU-støtte og effekter på et senere tidspunkt.

Møreforskningens relativt omfattende effektmåling av næringsrettede forskningsprosjekter viser at noen få prosjekter gir stor avkastning for næringen eller samfunnet, flertallet av offentlig støttede FoU-prosjekter har uklare eller ingen virkninger. Det er med andre ord en god tilnærming å snevre inn effektanalyser til de casene som synes å ha kastet mest av seg, siden disse trolig vil representere det vesentligste av den samlede gevinsten for samfunnet.

I denne effektstudien har vi valgt å tilnærme oss effektmåling i to trinn. *I første trinn* har vi vurdert totalt 60 forskningscase knyttet til FME-ene, basert på case som de selv har valgt ut der sentrene har vurdert dem som særlig suksessfulle mht. mulige effekter (Kapittel 2). De 60 casene er fordelt på ni ulike forskningsområder som følger FME-enes hovedtema i Tabell 1-1, og er sammenstilt i en casekatalog (andre delen av denne rapporten). Et «case» er avgrenset og definert av innovasjonen som blir bragt fram, og er sammensatt av ett eller flere forskningsprosjekter. Casene dekker ikke bare forskningsaktivitet i FME-ene, men også tilknyttet forskning innenfor forskningsområdene. Funn og konklusjoner i rapporten er avgrenset til de 60 casene, som betyr at effekter fra øvrige deler av FME-sentrene energiforskning ikke er inkludert. Våre vurderinger av de 60 casene totalt sett er overordnet og foretar i liten grad konkrete verdiberegninger i kroner.

Hvert forskningsområde er representert med mellom 4 og 10 caser, og varierer i teknologisk modenhetsnivå (TRL-nivå), som illustrert i figuren under.

Figur 1-1: Innsamlede case fordelt på forskningsområder og TRL-nivå.



I andre trinn har vi vurdert og dokumentert langsiktige effekter i seks caser som er valgt ut blant de 60 (Kapittel 3). Her går vi mer grundig til verks for å beregne forventede nåverdier av forskningsbidragene innenfor de seks casene. Disse verdiene kan tolkes som et absolutt minimumsanslag på FME-ordningens effekter, ettersom et stort antall andre case ikke er redegjort for. Utvelgelsen er blitt gjort i samspill med aktørene i FME-ene, og er utført i flere trinn. En del case som var antatt gode, ble på veien tatt ut av ulike årsaker. Forskningscasene er valgt etter følgende kriterier:

- Effekter: Casene skal demonstrere store effekter og gi eksempler på forskning med høy oppnåelse
- Målbarhet: Effektene skal være mulige å måle og kvantifisere, og data skal være tilgjengelig
- Spredning: Casene skal belyse ulike tema og ulike typer effekter
- Vi har også vektlagt å ta med både nye case, og case som var inkludert i 2018-rapporten

Effekter er delt inn i syv ulike kategorier, som oppsummert i Tabell 1-2. Vi beregner *direkte effekter*. Vi vurderer ikke indirekte effekter, hvor direkte effekter av caset kan utløse andre effekter (for eksempel

kan økt fornybar energi utløse reduserte klimagassutslipp, eller økt forsyningssikkerhet kan utløse økt produksjon av fornybar energi). Størrelsen på indirekte effekter avhenger av flere faktorer, og mer usikre og vanskeligere å anslå enn direkte effekter.

Tabell 1-2: Definisjon av effekter.

Type effekt	Beskrivelse
Økt produksjon av fornybar energi	Oppstår ved å muliggjøre mer utbygging av fornybare energikilder, redusert nedetid av produksjon.
Energieffektivisering	Oppstår ved redusert energibruk per produserte eller konsumerte enhet, dvs. mer effektiv energibruk.
Reduserte klimagassutslipp	Oppstår ved å fortrenge fossile drivstoff, fortrenking av utslippsintensiv teknologi, eller ved fangst av klimagassutslipp.
Redusert miljøpåvirkning	Oppstår ved mindre belastning på natur og miljø, for eksempel ved redusert materialbruk, eller færre/mer skånsomme naturinngrep.
Økt forsyningssikkerhet	Oppstår ved å øke energitilgang, effektsikkerhet, leveringspålitelighet av strøm, eller ved økt energifleksibilitet.
Reduserte kostnader	Oppstår ved å lavere produksjonskostnader, lavere investeringskostnader, lavere kostnader til drift/vedlikehold, etc.
Næringslivspotensial	Oppstår ved økt verdiskaping.

Nærmere informasjon om hvordan vi har beregnet effektene er beskrevet i Vedlegg. Effekter som er oppgitt i casekatalogen er beregnet av FME-ene. Utover å gjøre rimelighetsvurderinger har vi ikke vurdert påståtte effekter i casekatalogen.

Involvering av og forankring med FME-ene har vært et viktig element i organiseringen av arbeidet og utarbeidelsen av analysene. Representanter fra FME-ene har i løpet av prosessen gitt innspill til og kvalitetssikret rapporten.

1.3 Forskningsrådets betydning i form av addisjonalitet

Prosjektene som inngår i FME-enes portefølje er ikke utelukkende finansiert av Forskningsrådet. Dersom en ønsker å synliggjøre Forskningsrådets bidrag til effekter, må en både ta hensyn til at prosjektet er finansiert av flere aktører og at selve prosjektet kan utgjøre ett av flere bidrag til løsningen på et definert problem. Å ta hensyn til dette omtales gjerne som virkemiddelets addisjonalitet. Addisjonalitet handler om i hvilken grad finansieringen fra Forskningsrådet har vært utløsende for at prosjektet kom i gang i første rekke, og deretter i hvilken grad prosjektet har vært utløsende for vurderte effekter.

I vurderingen av i hvilken grad prosjektet har vært utløsende, inngår både en vurdering av *om* en kunne kommet fram til en tilsvarende løsning på en annen måte, og en vurdering av *når* en eventuelt kunne kommet fram til en løsning. For eksempel kunne næringsaktører ha igangsatt et tilsvarende prosjekt på egen hånd. Tidsdimensjonen utgjør en viktig del av vurderingen, fordi vi bare kan regne med de effektene som innovasjonen skaper inntil vi mener en eventuell alternativ løsning med tilsvarende effekter ville kommet på plass gjennom en annen kanal.

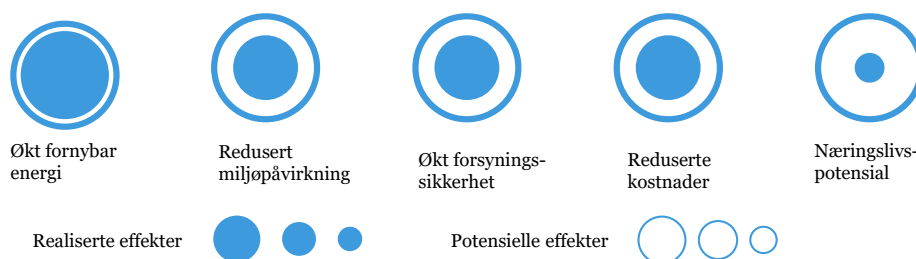
I våre arbeider med verdsetting av FoU-prosjekter legger vi normalt stor vekt på addisjonaliteten. Det gjør vi også i vår vurdering av de seks dybde-casene. Vurderingene knyttet til addisjonalitet vil i sin

natur være subjektive fordi vi ikke kjenner den kontrafaktiske utviklingen dersom prosjektet ikke var gjennomført. I informasjonsinnhenting som ligger til grunn for våre vurderinger legger vi derfor stor vekt på å innhente informasjon som kan belyse prosjektets addisjonalitet. Vi legger særlig stor vekt på uttalelser fra brukere/næringsaktørene når grad av addisjonalitet skal fastslås, ettersom disse ofte vil ha mer innsikt i betydningen av en gitt innovasjon for verdiskapingen og gjerne vil ha et nøkternt blikk på hvor utløsende en gitt innsikt har vært.

2 Effekter av energiforskning innen ulike forskningsområder

De følgende kapitlene tar for seg effekter fra de ulike forskningsområdene innen energiforskning, basert på totalt 60 utvalgte forskningscase. Oppsummert finner vi store realiserte og potensielle effekter innen vannkraft, vindenergi, solenergi, biodrivstoff, energibruk i bygg og områder, energieffektivisering i industrien, nullutslippstransport, energisystemer, og CO₂-håndtering.

2.1 Vannkraft



Forskningsområdet *vannkraft* spiller en viktig rolle i overgangen til et nullutslippssamfunn. Vannkraft som kilde til regulerbar kraft er kritisk for å stabilisere energiforsyningen i et samfunn som er stadig mer avhengig av uregulerbare fornybare energikilder som sol- og vindkraft. Med mange vannkraftverk i drift kan selv små forbedringer gi betydelige positive bidrag til energisystemet.

Det er en viktig erkjennelse at all utbygging av kraft kan ha negative konsekvenser for natur og miljø. Forskning som bidrar til bedre ivaretagelse av natur og miljø er inkludert i forskningsområdet, og energiforskningen vektlegger at vannkraftprosjekter skal bygges og driftes på mest mulig skånsom måte for naturen.

FME [HydroCen](#) (2016–2024) har vært sentral i forskning på vannkraft i Norge. Senteret har ledet en rekke prosjekter som har utforsket ulike aspekter ved vannkraft, inkludert strukturer, turbiner, generatorer, markedsdynamikker og miljødesign. Senteret har bidratt til å forbedre vannkraftens effektivitet og miljømessige bærekraft, sistnevnte gjennom prosjekter som kan redusere belastning på naturen fra vannkraftverk, eller øke kunnskap om påvirkning på naturen.

HydroCen legger vekt på å sikre at forskningen er relevant for hele vannkraftsektoren, fra utstyrsfabrikanter til tjenesteleverandører, vannkraftprodusenter og reguleringsmyndigheter. Senteret arbeider for å implementere forskningens resultater i praksis, noe som innebærer samarbeid med industrien for å navigere overgangen fra forskning til praktisk bruk.

Tilbakemeldinger fra samarbeidspartnere viser at forskningsarbeidet har vært til nytte også utover de konkrete forskningsresultatene. Hafslund har for eksempel fått utviklet bedre produkter, prosesser, og kompetansetilgang internt og eksternt. NVE har fått gjennomført nyttig forskning som vil gi mindre naturbelastning fra vannkraftverk, og oppgir at forskningssamarbeidet har økt kompetanse og jobbtilfredshet internt. I Statkraft har samarbeidet bidratt til å knytte sammen og oppnå synergier på tvers av fagmiljø.

Denne rapporten beskriver åtte caser som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet vannkraft. Forskningen er i hovedsak gjennomført i HydroCen, men også i andre norske forskningsmiljøer. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-1: Inkluderte caser innen vannkraft. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 5.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	HiFrancis-turbiner – redusert fare for havari. Metoder og prosedyrer som turbinprodusentene kan anvende når nye turbiner skal designes, som reduserer risiko for havari.
2	Feildeteksjon og prediksjon av levetid. Smarte sensorer og kunstig intelligens som overvåker tilstanden til elektriske maskiner. Dette gjør det mulig å minimere uplanlagt nedetid og forlenge levetiden til utstyret.
3	Oppgradering av sandfang i vannkraft-tunneler. Løsning for forbedring av sandfang i norske vannkraftverk. Sandfang samler opp sand og andre sedimenter og forhindrer at de havner inne i turbinen.
4	ProdRisk-SHOP simulator for investeringsanalyser. Teknisk-økonomiske beregningsmodeller til å vurdere mulige effektutvidelser.
5	Miljø-DNA for overvåking av økologisk tilstand. Metode basert på miljø-DNA (eDNA) gir bedre innsikt i hvordan vannkraft påvirker biologisk mangfold i norske elver.
6	Nye løsninger for sikker nedvandring av fisk forbi kraftverksinntak. Løsning for tryggere oppstrøms fiskepassasje ved kraftverksinntak, som kombinerer flytende ledegjerde og vannstrømbasert styring.
7	Variabel hastighet for turbin og generator. Modifikasjoner på Francis-turbinen, som kan gjøre den bedre tilpasset til å operere med variable turtall.
8	Pumpekraft- ombygging og utvidelse av eksisterende kraftverk. Pumpekraftverk kan tillate økende innfasing av uregulerbar energi, samtidig som økonomiske og naturmessige kostnader unngås ved å oppgradere eksisterende kraftverk.

Casene bidrar til **økt produksjon av fornybar energi** i Norge og utlandet, gjennom økt lønnsomhet og effektivitet i vannkraftproduksjon. Produksjon økes ved å redusere nedetid, og dermed produksjonstap, i kraftverkene. Forskning har ført til at turbiner er tilpasset til tøffere driftsmønster, og har lavere risiko for havari (case 1 og case 7). Nedetid på kraftverk er redusert ved bruk av sensorer og kunstig intelligens (case 2). Økt produksjon kan muliggjøres ved å bruke utviklede beregningsmodeller for mulighet til effektutvidelser på eksisterende kraftverk, utviklet i samarbeid med Statkraft, Eviny, Hafslund (case 4).

Casene bidrar samlet til **økt forsyningssikkerhet** i Norge, gjennom økt produksjon av energi, og gjennom at regulerbar kraft er stadig viktigere for å sikre en stabil energiforsyning. Forskningen kan potensielt føre til økt utbygging av pumpekraft, som løsning for energilagring (case 8). Pumpekraftverk utnytter overskuddet av fornybar energi produsert av sol- og vindkraft ved å pumpe vann opp i reservoarer når forbruket er lavere enn energiproduksjonen og deretter produserer elektrisitet når etterspørselen er høy.

Enkelte av casene kan bidra til **redusert miljøpåvirkning** i utbygging og drift av vannkraft. For eksempel har forskning i samarbeid med NVE ført til redusert påvirkning på fisk ved flytegrader som øker andelen fisk som passerer trygt inntak til kraftverket (case 6). En ny metode basert på miljø-DNA, utviklet med NVE, vil gjøre det lettere og billigere å overvåke økologisk tilstand og effekten av tiltak over tid (case 5). Ved å oppgradere eksisterende kraftverk fremfor å bygge nye, kan naturinngrep unngås (case 8).

Flere av casene bidrar til **reduserte kostnader** i vannkraft. Bedre teknologi kan gi redusere drifts- og vedlikeholdskostnader, og reparasjonskostnader ved havari og skader (case 1, case 2, case 3, case 7). Dette vil gi økt lønnsomhet for både teknologileverandører og kraftaktører, inkludert Statkraft, Aker Solutions, EDR Medeso, Voith Hydro, GE, Andritz, Hafslund, Vattenfall, Sira-Kvina, og Eidsiva. For eksempel kan sandfang spare vedlikeholdskostnader ved kraftverk (case 3).

Casene har **næringslivspotensial** ved at vannkraft kan produseres mer lønnsomt og fleksibelt enn før. Flere av prosjektene er med på å styrke norske leverandører av produkter og tjenester til sektoren, blant annet høytrykks Francisturbiner, feildeteksjon, og ProdRisk-SHOP-simulatoren (case 1, case 2, og case 4). Ombygging og utvidelse av eksisterende vannkraftverk til pumpekraft (case 8) kan redusere kostnadene sammenlignet med å bygge nye kraftverk for næringsaktørene Sira-Kvina kraftselskap og Statkraft som har samarbeidet om forskningen.

Casene bidrar også indirekte til reduserte klimagassutslipp ettersom økt fornybar kraftproduksjon kan redusere produksjonen av fossile energi, og til redusert miljøbelastning ettersom mer økt effektivitet i eksisterende kraftverk kan redusere utbyggingen av ny fornybar energi.



Forskningsområdet *vindenergi* omfatter produksjon, utbygging og drift av vindparker på land og til havs. Landbasert vindkraft blir stadig mer økonomisk lønnsomt i takt med teknologiske framskritt, men er kontroversielt på grunn av naturinngrep, skader på naturmangfold og motstand fra lokalsamfunn. Norge har teknologisk ekspertise fra olje- og gassnæringen som kan utnyttes til å videreutvikle havvindteknologien for økt lønnsomhet. Forskning som kan redusere natur- og miljøbelastningen og redusere kostnadene kan øke Norges konkurransekraft.

FME-et [NorthWind](#) (2021–2029) leder forskning, utdanning og innovasjon som bidrar til å kutte kostnader for vindkraft, redusere miljøskader, skape arbeidsplasser lokalt og øke eksporten fra norsk leverandørindustri. Senteret ledes av SINTEF med NTNU, NGI, UiO og NINA som forskningspartnere. Industrien bidrar i brukerstudier, i interaksjon med forskningspartnerne og i styret av senteret. Totalt deltar over 40 industripartnere i NorthWind, som dekker hele den norske verdikjeden innen vindkraft, med særlig vekt på bunnfast og flytende havvind.

Forskningen i NorthWind adresserer tema der Norge og partnerne har ledende ekspertise. Særlige tema er 1) strukturer og integritet, 2) marine operasjoner og logistikk, 3) elektrisk infrastruktur og systemintegrasjon, 4) digital tvilling og driftsoptimering, og 5) bærekraftig utvikling.

For industripartnerne har samarbeid i forskningsprosjekt gevinster ved utvikling av ny teknologi, mer kostnadseffektiv produksjon, og verktøy som kan anvendes til lokalisering, installasjon og drift av vindparker. For eksempel vil forskning i samarbeid med Aker Offshore Wind, Aibel og Force Technology kunne føre til mer kostnadseffektiv produksjon av understell til havvindturbiner ved bruk av laser-hybrid sveis i stedet for konvensjonell sveising.

Denne rapporten beskriver åtte caser som representerer et utvalg av innovasjonene innen forskningsområdet *vindenergi*. Forskningen er i hovedsak gjennomført av NorthWind, men også av andre norske forskningsmiljøer. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-2: Caser innen forskningsområdet vindenergi. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 6.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	Webapplikasjon for lokalisering av vindkraftverk. Nettbasert applikasjon for å balansere miljømessige og økonomiske avveininger i lokalisering og planlegging av vindkraftprosjekter.
2	Optimalisering av strømmettet til havs. Verktøy for å identifisere økonomisk gunstige investeringer i nettinfrastruktur til havs, basert på matematisk optimalisering.
3	Videreutviklet simulator for havvindturbiners respons på ulike sjø- og vindforhold. Simuleringsverktøyet 3DFloat simulerer belastning på havvindturbiner i ulike værforhold, og kan dermed bidra til å finne egnede lokasjoner for utbygging.
4	Vindturbinsimulator SIMA videreutvikling. Videreutvikling av simuleringsverktøy som brukes i analyse av kabler, riser og rør med armering til havvindutbygging, med mål om lavere kostnader i utbygging av drift.
5	Miljøvennlige sjøkabler for strømmett til havs. Kunnskap om å lage blyfrie kabler med lengre levetid og lavere kostnader.
6	Kostnadseffektiv produksjon av understell til havvindturbiner. Produksjonsteknologier som vil bidra til å øke produksjonskapasiteten og senke produksjonskostnadene.
7	Verktøy for å optimalisere marine operasjoner for havvind. Nettbasert verktøy for å optimalisere den maritime logistikken knyttet til installasjon og vedlikehold av havvindparker.
8	SKARV: Metode for å unngå kollisjoner mellom fugler og vindturbiner. Konsept som reduserer turbinens omdreiningshastighet dersom sensorer fanger opp at en fugl kommer nær turbinen.

Samlet har alle casene potensial til **økt produksjon av fornybar energi**, ved økt utbygging av fornybar energi til havs eller på land. Casene kan gjøre utbygging mer kostnadseffektivt og/eller redusere miljøbelastning av utbygging. Reduserte kostnader er sentralt for å realisere utbygging av havvind, hvor investeringskostnadene er høye. Miljøpåvirkning og negative effekter for lokalsamfunn

er en viktig barriere for utbygging både til havs og på land (caser som gir reduserte kostnader og/eller redusert miljøpåvirkning er nærmere beskrevet i de neste avsnittene).

Utviklede simuleringsverktøy kan beregne belastning på havvindturbiner ved ulike værforhold til havs (case 3), og en webapplikasjon kan bidra til å finne egnede lokasjoner på land hensyntatt miljømessige og økonomiske aspekter (case 1).

Flere av casene bidrar til **reduserte kostnader** gjennom mer kostnadseffektiv produksjon og installasjon av vindparker, og tilknyttet nettinfrastruktur. Utviklet simuleringsverktøy kan for eksempel anbefale en bedre egnet plassering av flytende og bunnfaste havvindparker i forhold til belastning fra værforhold, og dermed lavere kostnader i drift og materialforbruk (case 3). Utviklet applikasjon kan bidra til økt lønnsomhet ved lokalisering av nye vindparker på land, ved å hensynta vind- og produksjonspotensial, nettilgang, og produksjonskostnader (case 1).

Mer effektiv installasjon og vedlikehold av havvindparker vil gi lavere kostnader ved bruk av simuleringsverktøy og verktøy for kostnadsanalyser (case 7 og case 4). Optimalisering av nettinfrastruktur til havs kan gi lavere utbyggingskostnader (case 2).

Flere av casene bidrar til potensial for **redusert miljøpåvirkning** gjennom å redusere naturbelastning ved utbygging og drift av vindturbiner. Utviklet applikasjon for plassering av nye anlegg kan bidra til å hensynta miljømessige faktorer ved lokalisering av nye vindparker (case 1). Færre, og mer effektive marine operasjoner kan som følge av optimalisert logistikk gi lavere miljøavtrykk (case 7). SKARV-konseptet kan forebygge at fugler kolliderer med vindturbiner (case 8). Det er utviklet sjøkabler uten bly, som er mer miljøvennlig enn tradisjonelle kabler (case 5).

Casene har **næringslivspotensial** ved å fremme gode teknologiske løsninger. Utviklet applikasjon kan bidra til å finne lønnsomme plasseringer av vindparker, og dermed gi økt verdiskaping knyttet til produksjon av vindkraft (case 1). Utvikling av avanserte produksjonsteknologier kan øke norsk konkurranseevne (case 6).

Lavere kostnader knyttet til maritime logistikkoperasjoner kan øke lønnsomheten i installasjon og drift av havvindparker (case 7), mens mer (kostnads)effektiv produksjon av understell til havvindturbiner kan bidra til at norske aktører kan bli konkurransedyktige leverandører av havvindteknologi (case 6).

Mer effektiv produksjon av komponenter, og mer effektiv installasjon og drift av havvindparker kan gi **reduserte klimagassutslipp**. Utviklet verktøy for å optimalisere installasjon og vedlikehold av havvindparker kan bidra til mer effektive maritime logistikkoperasjoner (case 7), mens en mer effektiv produksjon av understell kan føre til lavere utslipp i produksjon (case 6).

Casene bidrar til **økt forsyningssikkerhet** ved å muliggjøre mer utbygging av fornybar energi, og dermed økt forsyning av strøm.

2.3 Solenergi



Forskningsområdet *solenergi* fokuserer på den internasjonalt raskest voksende fornybare energikilden. Det er flere grunner til dette: Solparker er raske og enkle å bygge ut, størrelsen kan sømløst skaleres opp eller ned ved behov, og kostnaden er lav per kWh. Halvparten av alle nye kraftproduksjonsanlegg i verden var solcelleanlegg i 2023, målt i kapasitet. Det bygges ut stadig mer solcellebasert kraftproduksjon også i Norge. Vi har også god kompetanse på flere deler av verdikjeden.

FME-senteret [SuSolTech](#) (2017–2025) har ledet mye av forskningen på solkraft i Norge. Senterets arbeid bygger blant annet på FME-senteret Solar United (2009–2017) og sentrale aktiviteter videreføres i FME-senteret Solar som nylig er startet (2024). Utgangspunktet var den tidlige forventningen om at kraftproduksjon basert på solceller kunne bli en betydelig kilde til kraftproduksjon på verdensbasis. Norske teknologier er utviklet til flere ulike ledd i verdikjeden. Spesielt har norsk materialteknologi, knyttet til silisium, konkurrert om markedsandeler internasjonalt. Norsk industri var en ledende aktør internasjonalt i dette feltet i en tidlig fase. Mye av de tidlige metodene for datahåndtering og -analyse kom her. Gjennom det siste tiåret har norske aktører og en målrettet forskningsinnsats bidratt til utviklingen av verdensledende kompetanse på utvikling, drift og vedlikehold av solkraftverk.

Industrielt samarbeid har vært avgjørende for å bringe fram relevant forskning, særlig innen drift og vedlikehold av solkraftverk. Et eksempel på dette er IPN-prosjektet PEANUTS, som var et samarbeid mellom Scatec (prosjektleder), TGS/Prediktor, Equinor og forskningspartneren IFE. I prosjektet har aktørene forsket på å optimalisere drift og vedlikehold av storskala solparker. Gjennom flere års forskning, bl.a. gjennom FME SuSolTech, har IFE fått muligheten til å bygge opp en internasjonalt ledende kompetanse på drift og vedlikehold.

For nye muliggjørende teknologier innenfor solkraft er norsk kompetanse bygget på flytende solkraftverk, bl.a. gjennom prosjektene KSP FLOW og Hydrosun. Dette er en relativt ny teknologi, også internasjonalt. Ved å tidlig ta del i forskning og kompetansebygging har norske forskere og bedrifter, deriblant Ocean Sun, Moss Maritime og Sunlit Sea, posisjonert seg for å komme tidlig inn i utviklingen av dette markedet.

Norge har hatt sterk kompetanse på silisium-baserte materialer, og denne kompetansen har også blitt videreutviklet for bruk i solceller. Her har en både i FME-senteret og i andre forskningsprosjekter bygget opp videre kompetanse om produksjon av høyren monokrystallinsk silisium, og om hvordan innsatsfaktorer og produksjonsparametere kan spille påvirke sluttkvaliteten på monokrystallinske silisium. I denne delen av verdikjeden har det vært spesielt hard konkurranse, og det har vært utfordrende for norske miljøer å konkurrere internasjonalt på tross av kompetansen de besitter.

Denne rapporten beskriver fire caser som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet *solkraft*. Forskningen er gjennomført i samarbeid med de norske forskningsmiljøene i FME SuSolTech. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-3: Caser innen solenergi. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 7.

Nr. Navn på case og beskrivelse av innovasjon	
1	Avanserte metoder for drift av solparker. Utvikling av bruk av droner, og algoritmer som reduserer produksjonstap og øker lønnsomhet ved solparker.
2	Flytende solkraftverk. Utvikling av flytende solkraftverk, og analyser av muligheter for hybride solkraftverk på vannkraftreservoarer.
3	Produksjon av høyren kvarts til produksjon av solcellematerialer. Forbedret materialkvalitet og reduserte kostnader, og renere kvarts for høyere virkningsgrad på solceller.
4	Produksjon av monokrystallinsk silisium. Høyere materialkvalitet og forbedrede produksjonsprosesser for monokrystallinsk silisium.

Casene har realisert effekter spesielt knyttet til **økt produksjon av fornybar energi** globalt og følgelig **næringslivspotensial** gjennom økt konkurranseevne for næringsliv. Flere næringsaktører har samarbeidet om forskningen, og har fått betydelige gevinster av forskningsresultatene. Den norske energiforskningen har lagt grunnlag for mer kostnadseffektiv produksjon av silisium til solceller, på bakgrunn av mindre produksjonstap og høyere ytelse for disse teknologiene, i samarbeid med blant annet selskapene Norsun, Norwegian Crystals, The Quartz Corp, REC Solar Norway (case 4). Nye avanserte metoder for drift av solcelleparker har forbedret ytelse hos solkraftverk eid av det norske selskapet Scatec (case 1). Forskning på produksjon av kvarts har ledet til at norske The Quartz Corp i dag en viktig leverandør av kvarts til solceller internasjonalt. Forskning på flytende solkraft har bidratt til at det norske selskapet Ocean Sun har flere pilotanlegg klare for flytende solkraft (case 2).

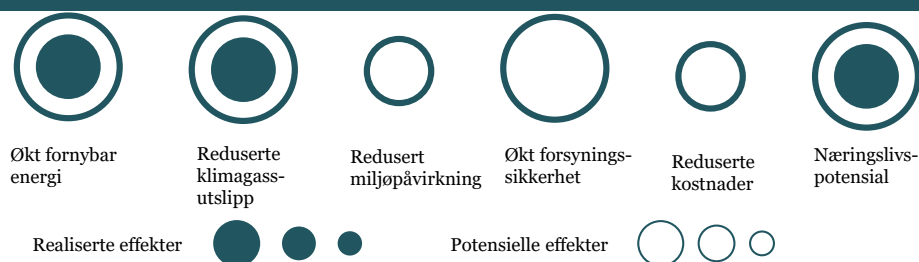
Videreutviklingen av solkraft som en modulær og skalerbar energikilde har bidratt til **økt forsyningssikkerhet** globalt. Alle casene bidrar til potensielt økt produksjon og dermed forsyningssikkerhet av strøm. Dette inkluderer både bedre ytelse (case 1), nye typer solkraftproduksjon (case 2), samt bedre og mer effektive materialer til solcellene (case 3 og 4).

Forskningen har ført til **reduserte kostnader** gjennom mer effektiv produksjon. Mer avansert drift kan gi lavere driftskostnader (case 1), og bedre produksjonsprosesser gir lavere kostnader blant annet for materialforbruk (case 3 og case 4).

Forskningen har bidratt til **redusert miljøpåvirkning** gjennom lavere materialforbruk. For eksempel kan bedre drift av solkraftanlegg gi lenger levetid på paneler (case 1), og bedre prosesser for å produsere materialer som kvarts kan øke kvaliteten på paneler og redusere forbruk av råvarer (case 3).

Casene bidrar også indirekte til reduserte klimagassutslipp ettersom økt fornybar kraftproduksjon kan redusere produksjonen av fossile energi, og til redusert miljøbelastning ettersom mer økt produksjon av solkraft kan redusere utbyggingen av arealkrevende fornybar energi.

2.4 Biodrivstoff



Forskningsområdet *Biodrivstoff* har et lavere karbonavtrykk enn fossile drivstoff. Biodrivstoff kan særlig være relevant som substitutt for fossil energi innen langtransport på vei, luft, og vann, hvor elektrifisering kan være mer krevende enn på kortere distanser og med mindre kjøretøy eller fartøy. Biodrivstoff har høy energitetthet, tilvarende fossildrivstoff, og er mer effektiv som drivstoff enn for eksempel hydrogen, som har lavere energitetthet.

Ulike typer biodrivstoff kan ha ulike effekter. Vi skiller mellom konvensjonelt biodrivstoff (produsert fra råstoff som alternativt kan brukes til å produsere mat eller dyrefor) og avansert biodrivstoff (produsert fra rester og avfall som ellers ikke kan utnyttes som mat eller dyrefor). Konvensjonelt biodrivstoff kan ha negative konsekvenser på naturmangfold fordi det innebærer arealbruksendringer og/eller bruk av biologisk materiale som ellers kan ha andre bruksområder, eller som ellers ikke hadde blitt fjernet fra naturen. Avansert biodrivstoff benytter avfall og rester, og har derfor ikke disse negative virkningene.

FME-et [Bio4Fuels](#) (2017–2025) har vært sentral i forskning på biodrivstoff i Norge. Senteret fokuserte på forskning og utvikling innen bærekraftig biodrivstoff, inklusiv biogass, som en del av klimatiltak for å redusere klimagassutslipp i transportsektoren. Bio4Fuels er et samarbeid mellom sju forskningspartnere⁵ og nesten 50 interessenter som dekker alle viktige aspekter av senterets aktiviteter: ressurseiere, teknologileverandører, produsenter, distributører, og sluttbrukere. NMBU er vertsinstusjon og SINTEF er senterleder. Visjonen for Bio4Fuels er å muliggjøre bærekraftig biodrivstoffproduksjon i Norge. Dette realiseres gjennom nye prosesser og verdikjeder, fra bioressurs til implementering og sluttbruk. Senteret har et nordisk perspektiv, hvor skogrester som råstoff og bærekraftig produksjon av avansert biodrivstoff står sentralt. I siste fase av senterets periode fokuserte Bio4Fuels på de viktigste verdikjedene for realisering av produksjon av biodrivstoff i Norge. Senteret har for eksempel bidratt til etableringen av [Biokraft](#), som i dag er verdens største produksjonsanlegg for flytende biogass.

Denne rapporten beskriver fem caser som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet *biodrivstoff*. Forskingen er i hovedsak gjennomført i Bio4Fuels, men også i andre norske forskningsmiljøer. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-4: Caser innen *biodrivstoff*. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 8.

Nr. Navn på case og beskrivelse av innovasjon	
1	Ressurstilgang til biodrivstoffproduksjon. Skogsektormodell som optimerer geografisk plassering av fabrikker for biodrivstoffproduksjon.

⁵ De syv forskningspartnere i Bio4Fuels er NMBU, SINTEF, NTNU, RISE-Pfi, Ife og USN.

2	Utvidelse av biogassverdikjede. Optimalisering av biogassverdikjeden, for økt produksjon av biometan.
3	Biodrivstoff fra avfall. Bedre forståelse av biomassen som stammer fra avfall. Dette kan bidra til å utvikle produksjon av biodrivstoff fra kommunalt avfall.
4	Prosess for å produsere bioolje. Det er utviklet en to-trinns prosess for raffinering av bioolje, som kan være en viktig ressurs for produksjon av drivstoff.
5	HTL-basert produksjon av biodrivstoff. Utvikling av teknologi for hydrotermisk flytendegjøring (HTL), som vil muliggjøre konvertering av biomasse til flytende drivstoff.

Samlet bidrar casene til **økt produksjon av fornybar energi** ved å gi bedre betingelser for produksjon av biodrivstoff. Biodrivstoff er fornybart fordi det lages av fornybare biologiske ressurser som skog, planter, eller fra avfall. Casene har allerede bidratt til økt produksjon, og potensialet er større dersom casene i større grad tas i bruk kommersielt.

Biodrivstoff kan erstatte fossilt drivstoff, og bidrar dermed til **reduerte klimagassutslipp**. Alle casene har som mål å tilrettelegge for økt produksjon av biodrivstoff. Bioolje kan for eksempel erstatte fossilolje, og dermed bidra til reduerte klimagassutslipp fra skip og fly (case 4).

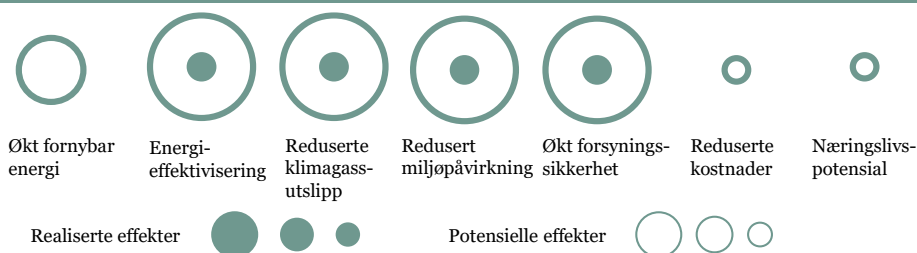
Utnyttelse av avfall til biodrivstoff kan gi **reduert miljøpåvirkning** (case 3). Avansert biodrivstoff laget fra avfall er mer miljøvennlig enn konvensjonelt biodrivstoff, og ved å øke mengden avansert biodrivstoff kan vi unngå å måtte importere konvensjonelt biodrivstoff fra utlandet.

Casene har potensial til å **øke forsyningssikkerheten** ved å øke norsk energiproduksjon. Vi importerer nesten alt flytende biodrivstoff, og mesteparten av det avanserte biodrivstoffet importeres fra USA og Øst-Asia. Norsk produksjon vil redusere importavhengighet. Biodrivstoff kan særlig bidra til forsyningssikkerhet ved at det er en regulerbar energikilde som kan lagres og fraktes, som fossilt drivstoff.

Noen av casene bidrar til **reduerte kostnader** ved å gjøre verdikjeden mer lønnsom. For eksempel kan optimalisering av biogassprosessen redusere kostnader knyttet til å produsere biometan (case 2). Optimal plassering av biogassanlegg kan gi mer kostnadseffektiv verdikjede innen produksjon av biodrivstoff (case 1).

Casene bidrar til **næringslivspotensial** for norske produsenter av biodrivstoff. For eksempel kan modellen for plassering av biodrivstoffanlegg gi bedre økonomiske betingelser for biodrivstoffproduksjon, og bedre utnyttelse av biomasse (case 1). Optimalisering av biogassverdikjeden kan gi bedre betingelser for produksjon for blant andre St1 Biokraft, Scandinavian Biogas Fuel AB, og [Den magiske fabrikken](#) (case 2). Særlig har HTL-basert produksjon av biodrivstoff stort potensial dersom det lykkes med utvikling av en helt ny type verdikjede for biodrivstoffproduksjon, i regi av Statkrafteide Silva Green Fuel (case 5). Ved å utnytte norsk avfall skapes næringsaktivitet og verdier i Norge (case 3). Næringsaktivitet og verdier skapes ved å foredle norsk biomasse til bioolje. Gjennom kompakt og verdifull bioolje som kan inngå i to-trinnsprosesser i eksisterende raffinerier i inn og utland økes (eksport)verdien av norsk biomasse (case 4).

2.5 Energibruk i bygg og områder



Forskningsområdet *energibruk i bygg og områder* fokuserer på å fremme mer energieffektive og fleksible bygninger og nabolag, mer fleksibel energibruk, lokal produksjon og lagring av energi. Forskningstemaet er dermed sentralt i et framtidig nullutslippssamfunn, der energi må brukes effektivt og være fornybar. Forskingen kan bidra til redusert og mer fleksibel energibruk, og lavere klimagassutslipp gjennom bygningers og områders levetid.

FME [ZEN](#) (2016–2025) har spilt en sentral rolle i forskningen på dette området. Målet til FME ZEN er å bidra til mer bærekraftige og energieffektive områder. Forskningssenteret har utviklet analytiske rammeverk og verktøy for design og planlegging av nullutslippssprosjekter, inkludert scenarioanalyser og GIS-visualisering. Det forskes også på energieffektive og fleksible bygninger og energifleksible områder for optimalisering av lokal energi i større systemer. Videre har senteret gjennomført pilotprosjekter og "living labs" for å teste og validere forskningsresultater, samtidig som de har utviklet nøkkelindikatorer for nullutslippsområder. For eksempel har FME ZEN i samarbeid med Statsbygg utviklet [campus Evenstad](#) i Østerdalen til Norges mest selvforsynte studiested med lokale fornybare energiløsninger, som solcellepaneler, effektstyring, varmepumper, og flisbaserte CHP-maskiner.

FME ZEN og tidligere FME ZEB (2009–2016) har påvirket regulatoriske rammeverk og fremmet utvikling mot nullutslippsbygg og -områder, samt adopsjon av nullutslippsteknologier nasjonalt og internasjonalt. En viktig del av forskningsarbeidet i ZEB og ZEN er utvikling av definisjoner og metoder, som er en del av veien mot at nullutslippsbygninger og -områder skal være standard i nye byggeprosjekter. Forskingen til FME ZEN og ZEB har fått internasjonal oppmerksomhet, og er blant annet referert til i underlagsdokumenter for EUs bygningsenergidirektiv.

Denne rapporten beskriver fem case som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet *energibruk i bygg og områder*. Forskingen er i hovedsak gjennomført av NTNU og SINTEF i FME ZEB og ZEN, med viktige bidrag fra brukerpartnere, men noen andre norske forskningsmiljøer har også bidratt. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-5: Caser innen *energibruk i bygg og områder*. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 9.

Nr. Navn på case og beskrivelse av innovasjon	
1	Realisering av nullutslippsbygninger. Metode for planlegging og evaluering av nullutslippsbygninger. Nullutslippsbygg optimaliserer material- og energibruk, og produserer nok fornybar energi til å kompensere for bygningens totale utslipp gjennom levetiden.
2	Energifleksibilitet og reduksjon/flytting av topplast. Avanserte styringssystemer som optimaliserer energibruken i bygninger, ved å flytte energibruken bort fra høylastperioder.

3	Energieffektivisering gjennom energiomlegging i bygg og områder. Analyser av hvordan økt bruk av fjernvarme og varmepumper i vannbårne varmesystemer kan bidra til energieffektivisering.
4	Smart ventilasjon med lave utslipp. Forbedret varmevekslerteknologi og systemdesign for ventilasjonsanlegg, samt bruk av sensorer for bedre kontroll av luftkvalitet, med mål om redusert energibruk og klimagassutslipp.
5	Metode for nullutslippsområder. Metode for å estimere og dokumentere klimagassutslipp i planleggings- og driftsfasen i områder, med mål om netto null utslipp over levetiden. Klimagassutslipp kompenseres med ny fornybar energi på bygninger og i området.

Casene bidrar til **energieffektivisering** ved å fremme løsninger og metodikk for lavere energibruk i bygninger og områder (case 1, case 3, case 4, og case 5). Forskningen er gjennomført blant annet i samarbeid med Statsbygg, som har fått bygget flere nullutslippsbygg. Systemer som gir økt energifleksibilitet, utviklet med blant annet Asplan Viak, Multiconsult, og SWECO er avgjørende for å håndtere variabel fornybar energiproduksjon og redusere toppbelastninger i strømmettet (case 2).

Tilrettelegging for lokal energiproduksjon kan gi **økt produksjon av fornybar energi**. Implementering av nullutslippsbygninger/-løsninger vil gi en økning i produksjon av lokal solenergi på bygg (case 1).

Casene bidrar til **redusert miljøpåvirkning** gjennom mindre materialforbruk i nye byggeprosjekter. Forbedret systemdesign kan for eksempel gi lavere materialforbruk i ventilasjonssystemer (case 4). Nullutslippsbygg og -områder innebærer lavere materialforbruk gjennom økt gjenbruk og resirkulering (case 1 og case 5).

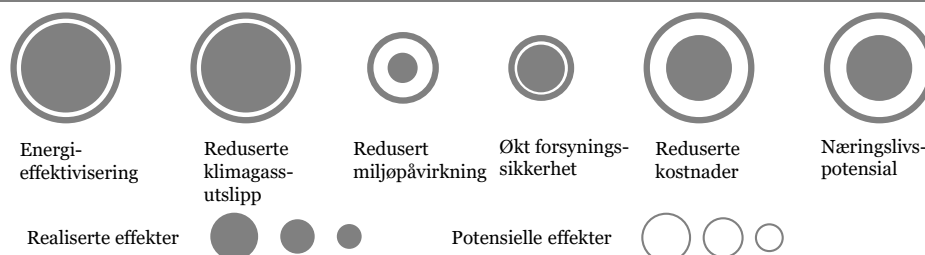
Casene synliggjør potensial til å **redusere klimagassutslipp**. Dersom metodene for nullutslippsbygg og -områder implementeres, vil utslippskuttene bli betydelige (case 1 og case 5). Ventilasjonssystemer med forbedret systemdesign og varmevekslerteknologi, utviklet med blant annet Flexit, kan gi reduserte klimagassutslipp (case 4).

Casene kan bidra til implementering av løsninger som gir **økt forsyningssikkerhet**. Redusert energibehov sikrer at energisystemet bedre kan møte etterspørsel og håndtere potensielle energikriser (case 1, case 3, case 4, og case 5). Flytting av energibruk bort fra høylastperioder kan redusere belastning og frigi kapasitet i strømmettet (case 2).

Energieffektivisering og økt energifleksibilitet kan gi **reduserte kostnader** knyttet til lavere strømknudnader (case 2, case 3).

Utviklede produkter og systemer representerer et **næringslivspotensial** for norske aktører. For eksempel bruker selskapet Flexit forskningsresultater til å utvikle nye produkter innen smart ventilasjon (case 4). Forskning på energifleksibilitet har resultert i verktøy for å optimalisere energibruken, som kan selges videre (case 2).

2.6 Energieffektivisering i industrien



Forskningsområdet *energieffektivisering i industrien* handler om å redusere energibruk og tilknyttede klimagassutslipp i industrien. Industrien står for om lag en femtedel av norske utslipp, og har høyt energiforbruk per produsert enhet. Lavere energibruk reduserer kostnadene og kan styrke industriens konkurransekraft. Potensialet er derfor stort ved utvikling av mer energieffektiv og mindre utslippsintensiv teknologi.

FME-et HighEFF (2016–2024) har vært sentral i utvikling og demonstrasjon av teknologier for forbedret energieffektivitet og reduserte klimagassutslipp fra industrien. Energieffektiviteten kan økes ved å forbedre kjerneprosessene og ved å utnytte overskuddsvarme og andre overskuddsstrømmer enten internt for prosesser i den enkelte industri eller i nærliggende bygninger eller industrier. Sistnevnte inkluderer tilrettelegging for samarbeid mellom industriaktører om å utnytte hverandres overskudd av blant annet energi, vann, og materialer. HighEFF har også arbeidet for bedre utnyttelse av overskuddsvarme. Mengden overskuddsvarme produsert årlig i Europa er like høyt som det totale varmebehovet i Europa. Varmen kan utnyttes direkte, eller den kan utnyttes ved oppgradering til et høyere temperaturnivå ved hjelp av varmepumper eller konvertering av varmen til elektrisitet.

Ulike industripartnere har bidratt til og fått store gevinster av forskningen. For eksempel har selskapet ledet til etablering av en rekke selskaper, inkludert Cartesian, som spesialiserer seg på termisk energilagring. Flere industriaktører har fått installert industrielle høytemperatur varmepumper, som gir lavere utslipp og energikostnader.

Denne rapporten beskriver seks caser som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet *energieffektivisering i industrien*. Forskningen er i hovedsak gjennomført av HighEFF, men også av andre norske forskningsmiljøer. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-6: Caser innen *energieffektivisering i industrien*. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 10.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	CO₂-baserte kjøle- og varmepumpesystem for dagligvarebutikker. Energieffektive systemer som bruker CO ₂ som kjølemedium i kulde- og varmepumpesystemer for dagligvarebutikker, i stedet for systemer med kjølemedier som har sterkere drivhusgasser.
2	Økt utnyttelse av lavtemperatur overskuddsvarme. Integrerte varmepumpesystemer som gir reduksjon i energiforbruk og utslipp.
3	Integrerte energisystem for industrien. Utnyttelse av overskuddsstrømmer (energi og materialer) mellom bedrifter i industriklynger.
4	Bruk av høytemperatur varmepumper i industrien. Høytemperatur varmepumper som erstatter fossile brenslere reduserer kraftbehov og klimagassutslipp.

5	Resirkulering av gass i metallproduksjon. Resirkulering av avgass for økt CO ₂ -konsentrasjon som muliggjør effektiv CO ₂ -fangst.
6	Termisk energilagring og fleksibilitet. Teoretisk grunnlag for utvikling av teknologier for termisk energilagring, som kan gi økt fleksibilitet i energimarkedet.

Casene har bidratt til **energieffektivisering** gjennom redusert energibruk i industrien. CO₂-baserte kjøle- og varmepumpesystem har gitt lavere energibruk i mange dagligvarebutikker (case 1). Utvikling av varmepumper til bruk i industrien gir redusert energibruk ved å utnytte overskuddsvarme fra industrielle prosesser (case 2, case 3 og case 4). Integrerte energisystemer, hvor overskuddsvarme fra en prosess kan utnyttes til for eksempel tørking av ulike produkter eller matproduksjon, kan redusere total energibruk (case 3).

Casene gir **reduserte klimagassutslipp**, ved å erstatte konvensjonelle, utslippsintensive teknologier. CO₂-baserte kjøle- og varmepumpesystemer for dagligvarebutikker har gitt lavere utslipp enn konvensjonelle systemer basert på HFK-gasser (case 1). Høytemperatur varmepumper har potensial til å kutte store mengder klimagassutslipp ved å erstatte industriell oppvarming med fossilkjeler (case 2 og case 4). Resirkulering av gass i metallproduksjon kan bidra til mer effektiv fangst av CO₂ (case 5).

Noen av casene gir **redusert miljøpåvirkning**. Erstatning av tidligere kjølesystemer i dagligvarebutikker med CO₂ som kjølemedium har gitt lavere utslipp av miljøskadelige HFK-gasser, som omgjøres til helseskadelige PFAS og TFA ved nedbrytning i atmosfæren (case 1, case 2, og case 4). Verktøy for å analysere materialflyt mellom ulike bedrifter i industriklynger kan føre til økt gjenbruk av materialer som ellers ville måtte deponeres, og dermed bidra til lavere materialbruk (case 3).

Ved å redusere energibruk bidrar casene til **økt forsyningssikkerhet**. Termisk energilagring øker fleksibiliteten i strømforbruk, og gir lavere behov for overføringskapasitet av strøm og lavere strømforbruk (case 6).

Utvikling av teknologi med lavere energikostnader, gir isolert sett **reduserte kostnader** (case 1). Utnyttelse av overskuddsmaterialer og -varme kan gi billigere produksjon ved unngått energibruk og materialinnkjøp (case 3).

Casene har **næringslivspotensial** ved at norske aktører kan kommersialisere teknologiene som er utviklet i samarbeid med HighEFF. En rekke norske aktører, inkludert TINE og REMA 1000, har tatt i bruk utviklede kjøle- og varmepumpesystemer (case 1, case 2, case 4). Integrerte energisystem for industrien kan gi grunnlag for nye industribedrifter og økt konkurransedyktighet for eksisterende, ved å utnytte overskuddsstrømmer (case 3). Selskapet Cartesian, som spesialiserer seg på termisk energilagring, har etablert seg som følge av forskningsaktivitet (case 6).

2.7 Nullutslippstransport



Forskningsområdet *nullutslippstransport* fokuserer på teknologier for reduserte klimagassutslipp i transportsektoren. Mens nullutslippsteknologi for personbiler nå nærmer seg samme kostnads- og ytelsesnivå som fossilkjøretøy, har det har vist seg vanskelig å utvikle tilsvarende nullutslippsteknologi for lufttransport, sjøfart, og tungtransport på vei.

FME-et [MoZEES](#) (2017–2025) har forsket på verdikjeder, systemer og applikasjoner for batteri og hydrogen til transportsektoren, hvor Norge kan ta en ledende posisjon framover. Forskningstemaet inkluderer utvikling av batteri- og hydrogenteknologi, integrerte nullutslippsenergi- og transportløsninger, og infrastruktur for lading av batterier og fylling av hydrogen.

MoZEES har vært et samarbeid mellom forskningsinstitusjoner, universiteter, offentlige partnere, private interesseorganisasjoner og nærings- og industripartnere. Sistnevnte inkluderer leverandører av materialer, nøkkelkomponenter, teknologi, og systemer innen batterier og hydrogen. Forskingen har ledet til produkter som er klare for verdensmarkedet, inkludert [Cenates](#) patenterte teknologi for produksjon av komponenter til bilbatterier.

Denne rapporten beskriver seks caser som representerer et utvalg av innovasjonene fra forskningsområdet *nullutslippstransport*. Forskingen er i hovedsak gjennomført i MoZEES, men også av andre norske forskningsmiljøer. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-7: Caser innen *nullutslippstransport*. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 11.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	Silisiumbaserte nanomaterialer for litium-ion-batterier. Produksjon av silisiumbaserte nanomaterialer til erstatning for grafitt i anoden på batteriene, som gir høyere energitetthet i batterier, og lavere kostnader og utslipp i produksjon.
2	PEM vannelektrolyse for tungtransport og industri. Utvikling av PEM (proton exchange membrane) vannelektrolyseteknologi- og systemer med oppstart av utstyrsproduksjon i Norge, som kan brukes til å produsere hydrogen mer energieffektivt.
3	EIS-verktøy for levetidsstudier av brenselceller. Instrumentering og analysemetoder som muliggjør bedre tilstandsovervåkning av brenselceller, som dermed øker levetiden på brenselcellene.
4	Laboratorium for batteri- og hydrogengasseksplosjonstester. Eksperimentelt oppsett og kompetanse i Norge for studier av eksplosjoner av batteri- og hydrogengass.
5	AISEEM – Verktøy for beregning av energi og utslipp i sjøtransport. Modell som analyserer bevegelsene av fartøy og beregner energibruk i ulike havner for å vurdere behovet for lade- og fylleinfrastruktur.

6	ZETruck-metode for integrert kostnads- og miljøanalyse av nullutslipps-lastebiler. Rammeverk for å studere kostnadseffekter og miljøeffekter ved å erstatte diesel-lastebiler med nullutslippslastebiler basert på batteri- og hydrogenteknologi.
----------	--

Alle casene kan bidra til **reduserte klimagassutslipp**, ved å erstatte bruk av fossil energi med nullutslippsløsninger i transportsektoren. Økt produksjon av hydrogen basert på fornybar kraft (grønt hydrogen) kan redusere klimagassutslipp, spesielt i sektorer som er vanskelige å avkarbonisere. Forskning gjennomført i samarbeid med Cenate og Dynatec kan på sikt gi lavere utslipp i selve batteriproduksjonen (case 1).

Arbeidet i MoZEES legger til rette for **energieffektivisering** i transportsektoren. Den nye PEM vannelektrolyseteknologien fra Hystar kan produsere hydrogen med lavere energiforbruk (case 2). AISEEM- og ZETruck-verktøyene kan benyttes til planlegging av energieffektive transportsystemer på sjø (case 5) og vei (case 6).

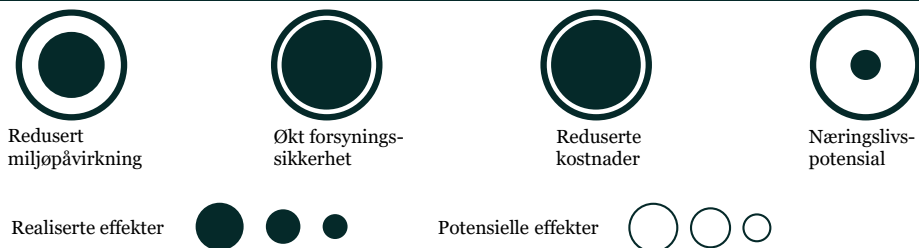
Mer materialeffektiv produksjon og mer holdbare batterier kan gi **redusert miljøpåvirkning** gjennom mindre forbruk av råvarer. Det er forsket på silisium-anoder som kan redusere litium-forbruket til batteriproduksjon, sammenliknet med andre mer tradisjonelle anoder basert på grafitt (case 1). Forlenget levetid av brenselceller kan gi mindre bruk av råvarer (case 3).

Casene gir **økt forsyningssikkerhet** ved å legge til rette for produksjon av hydrogen, ved å gjøre batterier mer holdbare, og ved å gi kunnskap om energibehov i transportsystemer. Overvåkingssystemer kan gi bedre informasjon om brenselcellers tilstand, og dermed gi bedre utnyttelse av eksisterende brenselceller (case 3). Kunnskap om energibehov hos fartøy og energitilgjengelighet fra landsstrømanlegg i havner gir økt forutsigbarhet om energitilgjengelighet i havner (case 5).

Flere av casene bidrar til **reduserte kostnader** gjennom å produsere hydrogen og batterier på mer kostnadseffektive måter. Produksjon av nanomaterialer har potensiale til å redusere kostnadene for produksjon av silisium for batterier (case 1). Ny PEM vannelektrolyseteknologi vil gjøre det mulig å produsere hydrogen med lavere energiforbruk og dermed lavere kostnader (case 2). Økt levetid på brenselceller kan gi lavere drifts- og investeringskostnader (case 3).

Casene har **næringslivspotensial** gjennom å bygge opp verdikjeden for batteriproduksjon i Norge. Cenates patenterte prosess for produksjon av silisiumbaserte nanomaterialer har stort internasjonalt potensial (case 1). For Hystars patenterte teknologi utviklet ved SINTEF er det planlagt betydelig produksjon av PEM-vannelektrolysesystemer (case 2).

2.8 Energisystemer



Forskningsområdet *energisystemer* spiller en viktig rolle som tilrettelegger for økt produksjon av fornybar energi og elektrifisering av fossildrevne prosesser. Strømnettet knytter sammen forbruk og kraftproduksjon, og er kritisk i overgangen til et lavutslippssamfunn hvor både forbruk og produksjon øker og produksjon blir mer variabel. Mangel på kapasitet i strømnettet er et hinder for næringsutvikling og bremser omstillingen til lavutslippssamfunnet.⁶ Elektrifisering av tidligere fossildrevne prosesser og nye kraftintensive industrier øker etterspørselen etter energi og effekt i strømnettet, og elektrifisering av transport øker etterspørselen etter strøm langs transportkorridorene. Samtidig fører økende produksjon av vind- og solkraft til store svingninger i strømforsyningen, noe som i perioder med høy produksjon krever stor kapasitet i ulike deler av kraftnettet.

FME-et [CINELDI](#) (2016–2024) har vært sentral i å bringe fram ny teknologi og kunnskap som kan bidra til å realisere mer kapasitet i strømnettet. CINELDI bidrar til modernisering av strømnettet, og dermed høyere effektivitet, fleksibilitet og robusthet. CINELDIs [strategi og veikart](#) for overgangen til et fleksibelt og intelligent strømfordistributionsnett kan muliggjøre høyere utnyttelse av nettet, bedre integrering av fornybare og fleksible energiresurser og økt elektrifisering av industri, transport og andre sektorer. Dette vil i sin tur bidra til å redusere CO₂-utslipp og potensielt øke norsk verdiskaping.

Forskningen i CINELDI er gjennomført sammen med en rekke flere næringspartnere, deriblant Statnett og andre nettselskaper. Næringspartnerne bidrar til å gjennomføre og finansiere forskningen, men får også flere gevinster ved mer effektiv drift av kraftnettet, og at det trengs færre investeringer.

Denne rapporten beskriver åtte caser som representerer et utvalg av innovasjonene innen forskningsområdet *energisystemer*. Forskningen er dels gjennomført i CINELDI, og dels i andre forskningsprosjekter. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-8: Caser innen *energisystemer*. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 12.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	Metode for risikobasert nettdrift. Metode for å beregne faktisk risiko for overbelastning av kraftnettet, som gir bedre utnyttelse av kapasitet av nettet.
2	Transformatorforvaltning. Bedre spesifikasjon av nye transformatorer med bedre materialer og kostnads- og tilstandsbasert forvaltning, for lengre levetid.
3	Feil- og avbruddshåndtering. Smartere feil- og avbruddshåndtering ved bruk av feilstrømsindikatorer og selvhelende nett, som gir kortere varighet av avbrudd i strømforsyningen og reduserte avbruddskostnader.

⁶ Riksrevisjonen (2025). Kapasiteten i strømnettet. Tilgjengelig [her](#).

4	Dynamisk drift av kraftledninger. Sensorer som overvåker luftledninger og gir sanntids informasjon for å finne faktisk tilgjengelig nettkapasitet. Dette vil gi bedre utnyttelse av kapasiteten på linjene.
5	Økt overføringskapasitet på kraftkabler. Programvare og modeller som beregner overføringskapasitet på kraftkabler og som vil gi økt kapasitetsutnyttelse.
6	Ladeinfrastruktur i kraftsystemet. Metoder for å modellere ladebehovet og lastprofiler for personbiler og tungtransport, som bidrar til bedre investeringsbeslutninger både i strømnnett og i ladeinfrastruktur.
7	Industriell fleksibilitet opp mot kraftsystemet. Analyse av potensial for fleksibilitet i ulike typer industriprosesser som kan bidra til å senke topplasten i kraftnettet i kortere perioder.
8	Planlegging av kraftnett hensyntatt fleksibilitet. Bruk av fleksibilitet som supplement til nettutbygging kan brukes for raskt å kunne tilknytte nytt elektrisitetsforbruk og ny produksjon samt gi bedre utnyttelse av nettet.

Casene gir **reduserte kostnader**, ved at en med bedre utnyttelse av eksisterende kapasitet i strømnettet kan unngå kostbare investeringer i nytt nett (case 1, case 4, og case 8). Bedre feil- og avbruddshåndtering kan gi reduserte driftskostnader for nettoperatørene (case 3). Bedre informasjon om tilgjengelig kapasitet og avbruddshåndtering gir mindre risiko for avbruddskostnader (case 1, case 3, og case 4). Dette har allerede gitt gevinster i form av unngåtte investeringer for flere av nettselskapene som deltok i pilotforskningen (case 4): BKK, Lede, Tensio, Fagne, Linja, Arva, og Statnett. Smartere planlegging av strømnnett med ladeinfrastruktur vil bidra til raskere og mer kostnadseffektiv elektrifisering av transportsektoren (case 6). Lenger levetid på transformatorer fører til færre innkjøp (case 2).

Unngått utbygging og materialbruk gir **redusert miljøpåvirkning**. Ved økt utnyttelse av kapasitet kan utbygginger av kraftnettet unngås, som fører til færre naturinngrep (case 1, case 4, case 5, case 7, og case 8). Lenger levetid på transformatorer gir lavere materialbruk (case 2).

Casene bidrar i stor grad til **økt forsyningssikkerhet** i kraftsystemet. Særlig kan bedre forståelse av kapasitet i kraftnettet gi økt forsyningssikkerhet og mulighet til å takle variasjon i effektbehov på tvers av tid og lokasjoner (case 1, case 4, og case 5). Forskning på smarte sensorer på kraftlinjer, i samarbeid med nettselskaper og teknologiselskapet Heimdall Power, har vist at linjene har mer kapasitet enn dagens grenser skulle tilsi i over 50 prosent av tiden (case 4).

Industrifleksibilitet gir bedre utnyttelse av kraftsystemet og kan redusere last i kraftnettet i kortere perioder (case 7). Bruk av fleksibilitet som supplement til nettutbygging kan brukes for raskt å kunne tilknytte nytt forbruk og ny produksjon, samt gi bedre utnyttelse av nettet (case 8).

Det er lang leveringstid på nye transformatorer globalt, og lengre levetid for transformatorer gir dermed økt forsyningssikkerhet (case 2).

Enkelte av casene viser stort **næringslivspotensial**, og har bidratt til utvikling av teknologi som er i gang med å spres utenfor Norges grenser (case 4). SINTEF og REN har utviklet programvare som beregner overføringskapasitet, som kan selges til både norske og internasjonale aktører, og er i dag tatt i bruk hos norske nettselskaper og store konsulentselskap (case 5).

Ved bedre utnyttelse av kraftnettet bidrar casene også indirekte til økt fornybar energi ved å muliggjøre tilknytning av ny produksjon, og indirekte til utslippskutt ved å muliggjøre elektrifisering.

2.9 CO₂-håndtering



Forskningsområdet *CO₂-håndtering* rommer fangst, transport, og lagring av CO₂. CO₂-håndtering kan spille en viktig rolle i å nå klimamålene ved å gjøre det mulig å redusere CO₂-utslippene fra kilder hvor det er begrensede muligheter for å elektrifisere, som avfallsforbrenning og sementproduksjon. CO₂-lagring på norsk sokkel representerer også en fremtidig verdiskapingsmulighet for Norge. I en verden hvor utslipp av klimagasser blir stadig dyrere kan fangst, frakt, og lagring av CO₂ legge til rette for en betydelig forretningsmulighet med utgangspunkt i norsk teknologi. Norsk forskning på CO₂-håndtering har spilt en viktig rolle for å gjøre karbonfangst- og lagring (CCS) til et realistisk alternativ for å redusere mengden klimagassutslipp som når atmosfæren.

[NCCS](#) (2016–2024) inngår i en rekke med FME innen CO₂-håndtering, som sammen har brakt feltet videre mange steg. Kunnskap og teknologi fra sentrene har vært viktig for å realisere Langskip, Europas første hele verdikjede for fangst, transport og lagring av CO₂ fra industrien. Langskip-prosjektet innebærer fangst av CO₂ fra avfallsforbrenning i Oslo og fra sementproduksjon i Brevik, som deretter skal fraktes med spesialbygde skip til mottaksanlegget Northern Lights i Øygarden. CO₂ lagres så i tanker på land før den transporteres gjennom en rørledning og ut til brønnen, der den vil pumpes ned i det undersjøiske reservoaret. Utslippene som skal lagres på denne måten vil utgjøre 1,6 prosent av Norges samlede utslipp årlig, og er planlagt å starte i løpet av 2025.

En rekke næringsaktører⁷ har bidratt til forskningen, og har samtidig opparbeidet kompetanse og teknologi som gir muligheter i et voksende marked for CO₂-håndtering. Tilgang på eksperter, data, nettverksarena og labfasiliteter, har direkte ført til gevinster for samarbeidspartnere. For eksempel er det videreutviklet fangstteknologi i SLB Capturi, og utslippsfri kraftproduksjon basert på hydrogen i Ansaldo Energi. Ideen om CCS som et klimatiltak ble unnnfanget av SINTEF-forskere på 80-tallet. I 1996 startet CO₂-injeksjon på Sleipner-feltet. I stedet for å betale CO₂-avgift, bestemte Statoil at CO₂ skulle injiseres i undergrunnen. Her ble CO₂ fjernet fra naturgassen for å oppnå salgskvalitet for det europeiske markedet. Dette ble starten på fullskala CCS. I tiden etter dette har SINTEF og NTNU sammen med partnere fra akademia og industri i inn- og utland bygget opp kompetansebasen som i dag utgjør et kraftsentrum internasjonalt.

CO₂-håndtering er et relativt umodent forskningsområde, med få realiserte effekter siden en begrenset mengde CO₂ hittil blir lagret. Til gjengjeld har forskningsområdet store potensielle effekter. Denne rapporten beskriver ti caser som representerer et utvalg av innovasjonene innen forskningsområdet

⁷ Se oversikt over samarbeidspartnere [her](#).

CO₂-håndtering. Forskningen er i hovedsak gjennomført i NCCS, men også i tilknyttede forskningsprosjekter utviklet av NCCS-partnere. Casene oppsummeres kort i tabellen under:

Tabell 2-9: Caser innen CO₂-håndtering. Alle casene er beskrevet i detalj i casekatalogens kapittel 13.

Nr.	Navn på case og beskrivelse av innovasjon
1	NCCS' bidrag for å muliggjøre fullskalaprojekt. Forskning og innovasjon har bidratt til kunnskapsbaserte beslutninger for realisering av Langskip-fullskalaprojektet.
2	CO₂-fangst fra skip. Kostnadseffektive løsninger for CO ₂ -fangst ombord i skip.
3	Fiskale målinger for flytende CO₂. Videreutvikling av måleteknologier av CO ₂ -strømmer, som muliggjør nøyaktige økonomiske oppgjør mellom aktører i en CCS-verdikjede.
4	Kostnadseffektive metoder for overvåking av CO₂-lagring i undergrunnen. Metoder for overvåking av lagret CO ₂ , som utnytter tilgjengelige data og forbedrer nøyaktigheten til geofysiske målinger.
5	Lavtrykks skipstransport av CO₂. Ny forståelse av lavtrykks skipstransport som en kostnadseffektiv måte for å frakte CO ₂ til offshore-lagre.
6	Lavutslipp hydrogenproduksjon basert på membranteknologi. Metode for lavtemperaturseparasjon av CO ₂ , som kan produsere hydrogen og CO ₂ klar for transport og lagring.
7	Redusert tap av solventer ved fangst av CO₂. Analysemetoder, modeller og teknologier som bidrar til at solvent-prosessen blir billigere, mer energieffektiv og mer miljøvennlig. CO ₂ -fangst med solventer er den mest modne teknologien for å fange CO ₂ fra punktutslipp.
8	Ren og effektiv forbrenning av hydrogen i gassturbiner. Kunnskap om hvordan en kan brenne hydrogen og ammoniakk i gassturbiner på en ren, sikker, stabil og effektiv måte.
9	Økt lagringskapasitet og redusert risiko gjennom forkastningsanalyser. Kunnskap, metoder og verktøy for å vurdere risiko rundt forkastninger, strukturer som utgjør gode feller for lagring av CO ₂ .
10	Modell for beregning av løpende brudd i CO₂-rørledninger. Modell for beregning av brudd som forplanter seg langs en rørledning for transport av CO ₂ , med formål å redusere risiko og kostnader.

Flere av casene kan bidra til **reduerte kostnader** innen CO₂-håndtering, og dermed **reduerte klimagassutslipp** ved å muliggjøre karbonfangst og lagring. Reduserte kostnader kan utgjøre en stor forskjell i mengden CO₂ som blir lagret. Mer kostnadseffektive løsninger for CO₂-fangst ombord i skip kan muliggjøre betydelig utslippsreduksjon i maritim sektor (case 2), mens redusert tap av solventer (kjemikalie som brukes for å løse opp CO₂) gjør den mest modne teknologien for CO₂-fangst billigere (case 7). Mer effektive metoder for lagring kan gi reduserte klimagassutslipp både ved å hindre lekkasjer og gjøre lagring i seg selv billigere (case 4 og case 9).

Forskningen kan danne grunnlag for utslippskutt ved utvikling av teknologi som anvender grønne energikilder fremfor fossile brennstoffer, og utviklede hydrogenfyrte gassturbiner kan potensielt erstatte tradisjonelle forbrenningssystemer basert på fossilgass (case 8).

Lavtrykks skipstransport kan gi billigere frakt av CO₂ enn dagens standard mellomtrykksløsning, blant annet fordi det er mulig å bruke større skip til frakt (case 5). Modell for beregning av brudd i rørledninger for transport av CO₂ gir reduserte kostnader knyttet til produksjon og legging av rør (case 10).

Casene kan gi **redusert miljøpåvirkning** ved å bidra til sikrere CO₂-fangst og -lagring med færre lekkasjer som kan være skadelig for miljøet. Bedre overvåking av CO₂ kan forebygge miljøskadelige lekkasjer (case 4). Utviklede metoder for å overvåke solventhelse, utslipp, CO₂-produkt og miljø ved CO₂-fangst med solventer kan forhindre uønskede utslipp av kjemikalier (case 7).

Casene viser et stort **næringslivspotensial**, om teknologien kommersialiseres. Ny teknologi for produksjon av hydrogen med fangst av CO₂ representerer næringslivspotensial for teknologileverandører, og for sluttbrukere innen olje og gass som ønsker å produsere utslippsfri hydrogen i stedet for naturgass (case 6). Utviklede hydrogengassturbiner representerer verdiskapingspotensial for gassturbinprodusenter, særlig for Ansaldo Energia som eier teknologien (case 8). Fremtidig kommersialisering av verktøy som beregner brudd i rørledninger representerer et potensial for verdiskaping blant annet for samarbeidspartnere Aker BP, SLB Capturi og Equinor (case 10).

Flere case åpner for mer kostnadseffektiv lagring av CO₂, som bidrar til større markedspotensial for aktører innen CO₂-lagring (case 4 og case 9).

Mindre behov for å tilføre solventer i CO₂-fangst gir **energieffektivisering ved** at det trengs mindre energi per tonn i CO₂ fanget (case 7).

3 Effektanalyser av utvalgte forskningscase

Seks utvalgte forskningscase med særlig store realiserte og/eller potensielle effekter illustrer en stor andel av samfunnsgevinsten knyttet til energiforskning. Totalt har de seks casene allerede bidratt til, eller har fremtidig potensial til, betydelige utslippskutt, økt produksjon av fornybar energi, redusert miljøpåvirkning, økt forsyningssikkerhet, lavere energibruk, og næringslivspotensial. Den totale tallfestede samfunnsøkonomiske verdien for Norge av disse seks casene anslås til mellom 9 og 36 mrd. kroner. I tillegg er det store globale effekter.

Tabellen under viser totale tallfestede effekter globalt og samfunnsøkonomisk verdi for Norge for de seks casene, tilknyttet FME per case, og addisjonalitet knyttet til Forskningsrådets finansiering. Casene har også store ikke-tallfestede effekter.

Tabell 3-1: Tallfestede effekter for seks case, totalt over tid.

Oppsummering av tallfestede effekter		
Global effekt	Realisert totalt for alle case over tid	Potensielt totalt for alle case over tid
Økt produksjon av fornybar energi	7 TWh	37–164 TWh
Næringslivspotensial (verdiskaping)	0,1 mrd. kr	1–17 mrd. kr
Reduserte kostnader	0,1 mrd. kr	14–156 mrd. kr
Energieffektivisering	11–12 TWh	255–1002 TWh
Reduserte klimagassutslipp	37–42 MtCO ₂ e	77–307 MtCO ₂ e
Case (tilknyttet FME)	Samfunnsøkonomisk nåverdi til Norge	Forskningsrådet addisjonalitet*
1. Redusert produksjonstap med avanserte metoder for drift av solparker (SuSolTech)	0,3–0,7 mrd. kr	25–75 %
2. Utslippskutt med CO ₂ -kjøling av dagligvarehandler (HighEFF)	4,9–5,2 mrd. kr	25–50 %
3. Økt kapasitet i kraftnettet med dynamisk drift av kraftledninger (CINELDI)	1,4–18,9 mrd. kr	25–75 %
4. Billigere transport av CO ₂ på skip ved bruk av lavtrykksteknologi (NCCS)	0–0,7 mrd. kr	50–75 %
5. Utslippskutt og lavere energibruk med høytemperatur varmepumper (HighEFF)	1,5–8,7 mrd. kr	25–50 %
6. Redusert fare for havari i vannturbiner (HydroCen)	1,3–1,7 mrd. kr	50–75 %
Total samfunnsøkonomisk verdi	9–36 mrd. kr	3–23 mrd. kr

*Tolkes som anslått andel av nasjonale og globale effekter per case som kan tilskrives Forskningsrådets finansiering.

3.1 Redusert produksjonstap med avanserte metoder for drift av solparker

Oppsummering

Utbygging av solkraftverk globalt vokser i et raskt tempo, og små marginer i driften kan utgjøre store forskjeller i global energiproduksjon. Disse marginene er avgjørende for konkurranseevnen til de involverte bedriftene. I dette forskningscaset ble det utviklet nye metoder for drift og vedlikehold i solparker basert på analyse av produksjonsdata og dronebilder. Disse metodene har bidratt til en reduksjon i kontrollerbare produksjonstap fra over 4 til 2 prosent. Vi anslår at metodene kan øke den globale produksjonen av solkraft med mellom 24,5 og 122,5 TWh samlet over de neste seks årene. Dette tilsvarer mellom 1,5 og 7,5 prosent av verdens samlede produksjon av solenergi i 2023.⁸

NØKKELINFORMASJON		FINANSIERING	
Varighet: 2021–2024		Forskningsrådet:	9,4 mill. kr
Forskningsaktør: IFE		Egeninnsats:	
Næringsaktører: Scatec, Prediktor / TGS, Equinor		Scatec:	3,5 mill. kr
		Equinor:	3,5 mill. kr
Oppnådd TRL-nivå: 9		TGS:	2,4 mill. kr
Video om prosjektet her .		Totalbudsjett	= 18,8 mill. kr

Tallfestede effekter		
	Realisert 2020–2024	Potensielt 2025–2030
Økt produksjon av fornybar energi globalt	0,2 TWh	24,5–122,5 TWh
Næringslivspotensial globalt	98 mill. kr	203–611 mill. kr
Nåverdi 2020–2030		
Samfunnsøkonomisk nåverdi	304–721 mill. kr	
Addisjonalitet Forskningsrådet*	25–75 %	

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

Verdens solkraftkapasitet doblet seg mellom 2020 og 2023⁹, og DNV forventer at den globale solkraftkapasiteten vil være 12 ganger høyere i 2050 enn i 2024.¹⁰ I dag er den globale produksjonen på over 2000 TWh i året, tilsvarende rundt 7 prosent av verdens elektrisitetsproduksjon.¹¹ Om lag halvparten av denne kapasiteten er installert de siste to årene. I 2024 oversteg investeringene i nye solkraftverk investeringene i alle andre typer kraftverk i verden samlet.¹²

Flere norske bedrifter er store aktører som utvikler, eier og drifter storskala solkraftverk internasjonalt, deres konkurranseevne er avhengig av at de hele tiden utvikler sin teknologi. Her er samarbeidet med norske forskningsorganisasjoner viktig.

⁸ IEA (2025). Solar PV. Tilgjengelig [her](#).

⁹ IRENA (2024) – processed by Our World in Data. Solar photovoltaic capacity. Tilgjengelig [her](#).

¹⁰ DNV (2024). ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2024. Tilgjengelig [her](#).

¹¹ IEA (2025). Electricity 2025 – Executive summary. Tilgjengelig [her](#).

¹² IEA (2025). World Energy Investment 2024 – Overview and key findings. Tilgjengelig [her](#).

Intelligente systemer for drift er sentralt for å redusere tap i produksjonen og sikre lave driftskostnader. Solkraftverk kan ha millioner av komponenter. Selv om én enkelt feil i disse har relativt liten effekt på kraftverkens totalproduksjon, kan summen av feil være betydelig. Avansert drift av solcelleparker muliggjør feildeteksjon og forbedrer vurderingen av feilens alvorlighetsgrad, og kan effektivisere driften av solcellekraftverkene.

Caset hadde som mål å optimalisere driften av solparker, der balansen mellom produksjonstap og driftsutgifter i produksjonen var en konkrete avveining. Produksjonstap i solparker skyldes i stor grad tilsmussing («soiling»), men også skygging fra andre paneler og vegetasjon kan påvirke energiproduksjonen. Feil i solcellepanelene og andre komponenter kan også bidra til tap. Soiling dreier seg om støv, skitt, snø og andre materialer som tildekker solcellepanelene og reduserer effekten av produksjonen. Paneler som er tildekket krever kostbar vasking, som historisk har blitt gjennomført etter en kalenderbasert tilnærming med en gitt tidsfrekvens når solparken vaskes. For skygging er spesielt effekten ved lav sol relevant, hvor vinkling og plassering av panelene spiller en avgjørende rolle for å maksimere innstrålingen uten å få uønsket skygge.

Forskningsaktiviteter og resultater

Det sentrale forskningsprosjektet i caset er IPN-prosjektet¹³ PEANUTS¹⁴, et samarbeid mellom IFE, Scatec, Equinor og TGS. Scatec og Equinor eier og drifter storskala solkraftverk og er brukere av løsningene. TGS er en ledende utvikler av digitale verktøy for datahåndtering (SCADA) og Asset Management. IFE et internasjonalt ledende forskningsmiljø innen dette feltet og ledet FME SuSolTech.

Prosjektet har utviklet flere nye metoder basert på analyse av produksjonsdata og dronebilder for å gjøre det mulig å utvikle lønnsomme strategier for drift og vedlikehold i storskala solparker. Dette er oppnådd blant annet gjennom bedre metoder og rutiner for vasking av solcellepaneler, reduserte skygetap, bedre håndtering av snø, bedre metoder for deteksjon og diagnostikk av avvik og feil og redusert nedetid for strømomformere, strenger av solcellepaneler og solfølgende trackere. Milepæler i forskningen er oppsummert i Figur 3-1.

Figur 3-1: Tidslinje med milepæler i utvikling av avanserte metoder for drift og vedlikehold.



Prosjektets resultater har medvirket til at de kontrollerbare tapene i Scatecs portefølje har blitt redusert fra i overkant fire prosent i 2020 til i overkant av to prosent i 2024.. Den økte produksjonen kommer fra implementering av en rekke verktøy og algoritmer som optimaliserer driften av solparker. Fire konkrete innovasjoner på følgende områder kan særlig trekkes fram:

1. **Produksjonsmodellering.** En presis modell av solkraftverkens produksjon basert på virkelige data har gjort det mulig å nøyaktig identifisere og håndtere tap i solkraftverkene.

¹³ Innovasjonsprosjekt i næringslivet

¹⁴ Performance analytics for utility-scale PV power plants

Blant annet er tap forårsaket av skygger kastet av rekkene av solcellepaneler redusert ved bruk av modellen.

2. **Optimalisering av vaskerutiner.** Algoritmer som kontinuerlig gir oppdatert og nøyaktig informasjon om soiling på solcellepanelene. Dette gir mer effektive vaskerutiner.
3. **Dronebasert termografi for feildeteksjon.** Ny metode for å kombinere infrarøde bilder fra droneovervåkning av solparkene med romlig oppløste sanntidsdata knyttet til ytelse. Metoden muliggjør feildeteksjon i solparker, samt vurdering av alvorlighetsgrad av feilen.
4. **Datakvalitetsfilter.** Det er utviklet metoder for å sikre tilgang til gode, pålitelige data, noe som forbedrer driftssystemet. Metodene forbedrer påliteligheten til værstasjonsmålinger, spesielt på store anlegg og i områder med raskt skiftende værforhold.

Med disse fire punktene og flere forbedringer har forskningen ført til betydelige realiserte effekter. Potensialet er stort i verdensmarkedet. For øyeblikket er det Scatec som i størst grad har implementert teknologien i de anleggene de drifter, mens TGS Prediktor leverer tjenester til flere andre solcelleparker og har som mål å utvide sin virksomhet.

Figur 3-2: Avanserte driftssystemer bidratt til økt produksjon i store solparker. Her representert ved Mendubim solpark i Brasil. Kilde: SuSolTech



Anslåtte realiserte og potensielle effekter

Caset har to hovedeffekter som vi tallfester: økt energiproduksjon, og næringslivspotensial.¹⁵ Vi beregner effekter over en periode på seks år for innovasjonen, som er den perioden vi antar løsningen har merverdi utover alternative løsninger. Solkraft er preget av rask teknologisk utvikling, der nye algoritmer og programvare raskt kan gjøre eksisterende løsninger mindre relevante. Konkurransen i markedet er høy, og nye løsninger kan komme på kort tid og tilby forbedrede funksjoner eller effektivitet. Siden innovasjonen i hovedsak dreier seg om programvare og systemer, er det sannsynlig at nye, mer effektive løsninger vil konkurrere med og potensielt erstatte de eksisterende løsningene.

Med reduserte tap i driften vil solcelleparkerne kunne produsere 1–2 prosent mer energi. Dersom de utviklede metodene implementeres i alle eksisterende solkraftverk, er potensialet til økt produksjon av solenergi i Norge 4,3 GWh/år, og 15 900 GWh/år internasjonalt, begge basert på 2024-nivå. I tillegg vil potensialet øke proporsjonalt med veksten i solenergi i årene som kommer. I beregningene legger vi til grunn at mellom 10 og 50 prosent av storskala solcelleparker i verden implementerer teknologien. Totalt gir dette mellom 25 og 123 TWh over en periode på seks år.

Det beregnede næringslivspotensialet er basert på at det norske solkraftselskapet Scatec har bedret sin lønnsomhet og økt porteføljen av solparker som direkte følge av resultatene som knyttes til

¹⁵ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

forskningsprosjektet. Anslått næringslivseffekt er økte inntekter til Scatec ved at selskapet kan produsere og selge 2 prosent mer kraft, fratrukket systemkostnadene. Mindre produksjonstap kan også være avgjørende for å vinne anbud i for nye parker. Den realiserte globale effekten er anslått til 98 mill. kroner, mens de potensielle effektene er anslått til mellom 203 og 611 mill. kroner, se Tabell 3-2.

Tabell 3-2: Realiserte og potensielle effekter globalt for avansert drift av solcelleparker summert over perioden 2020–2030.

Type global effekt	Realiserte effekter 2020–2024	Potensielle effekter 2025–2030	Beskrivelse
 Økt produksjon av fornybar energi	0,2 TWh	24,5–122,5 TWh	Økt produksjon som følge av implementering av metodene
 Reduserte kostnader	Positiv effekt	Positiv effekt	Kan redusere kostnader knyttet til: - inspeksjoner og reise fra feilaktige alarmer - vasking av paneler
 Redusert miljøpåvirkning	Positiv effekt	Positiv effekt	Kan redusere materialbruk ved forbedret drift, og redusere behovet for reservedeler på lager
 Økt forsynings-sikkerhet	Positiv effekt	Positiv effekt	Forbedret driftssikkerhet kan redusere avbrudd og holde jevn produksjon på et høyere nivå
 Norsk næringslivs-potensial (nåverdi)	98 mill. kr	203–611 mill. kr	Videresalg av deler av teknologien. Scatec vinner flere anbud som en direkte effekt av mer presise produksjonsestimater

Teknologien kan gi flere kostnadsbesparelser, som ikke tallfestes. Bedre datakvalitet og modellering av produksjon reduserer behovet for og kostnader ved inspeksjon av komponenter. Driftskostnadene reduseres gjennom mer effektiv vasking av solcellepanelene. Kapasiteten kan også økes uten tilsvarende økning i driftspersonell, og utgiftene til lagerkapasitet kan reduseres siden behovet for reservedeler forventes å bli lavere. De nye metodene gir bedre kontroll over driften, noe som gir en tydeligere oversikt over hvilke deler som faktisk er nødvendige.

Redusert behov for reservedeler vil videre redusere miljøpåvirkningen i form av mindre materialbruk. Implementering av de utviklede metodene vil også øke forsynings sikkerheten, i form av færre avbrudd og større produksjon over lengre tid.

Økt produksjon av fornybar energi kan også indirekte føre til reduserte klimagassutslipp, dersom denne erstatter fossil energiproduksjon.

Den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge tilsvarer verdien av økt energiproduksjon nasjonalt, og næringslivspotensial i form av økte inntekter til norske aktører fra solparker over hele verden. Verdien av økt energiproduksjon er beregnet med antatt strømpris på 40 øre/KWh. Vi anslår at den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge til mellom 304 og 721 mill. kroner, som oppsummert i Tabell 3-3.

Tabell 3-3: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge summert over perioden 2020–2030. Om lag en 100 mill. kroner er realisert. Inkluderer både realisererte og potensielle effekter.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Økt produksjon av fornybar energi	2,5–12,6 mill. kr
Næringslivspotensial	302–709 mill. kr
Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi	304–721 mill. kr
Ikke prissatte virkninger	
Reduserte kostnader	+
Redusert miljøpåvirkning	+
Økt forsyningssikkerhet av fornybar strøm	+

Realisering av fremtidige effekter og spredning av teknologien avhenger av mulighetene for å komme inn på det internasjonale markedet. Scatecs løsning er spesifikt tilpasset deres egne data. Dette kan være en teknologisk barriere, da andre kunder av TGS Prediktor ikke nødvendigvis har samme kvalitet og kvantitet av data. Variasjoner i datakvalitet innebærer at metodene kan ha redusert ytelse.

Forskningsrådets utløsende effekt

Forskningsrådets bidrag har vært med på å utløse kapital fra de andre aktørene i prosjektet. Basert på informasjon fra Forskningsrådet og IFE var støtten til kjerneprosjektet IPN PEANUTS fra Norges forskningsråd på 9,4 mill. kroner. Dette var med på å utløse et tilsvarende beløp fra Scatec, Equinor og TGS. Egenfinansieringen var fordelt med 3,5 mill. kroner fra Scatec, 3,5 mill. kroner fra Equinor og 2,4 mill. kroner fra TGS.

FME-senteret og samarbeidspartnerne uttaler at denne forskningen ikke hadde blitt gjennomført uten finansieringen. Partene trekker frem betydningen av et sterkt, tillitsbasert samarbeid for å muliggjøre forskning og utvikling på sensitive data, og at dette utgjør hele basisen for verktøybyggingen og kompetansebyggingen i dette caset. Finansieringen har gjort det mulig å få god støtte til dette verdikjedesamarbeidet der både softwareutvikler og bruker/dataeier samarbeider tett. Scatec oppgir at støtten fra Forskningsrådet førte til etableringen av et godt forskningssamarbeid mellom Scatec og IFE, og at støtten dermed var avgjørende for å bygge opp et forskningsmiljø i Scatec.

Vi ser ingen tydelige grunner til å trekke i tvil denne redegjørelsen. Vi anslår en addisjonalitetsgrad for dette caset på mellom 25 og 75 prosent. Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet har bidratt til å utløse forskningen og innovasjonseffektene som følger av dette caset. Graden multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats. Vi vurderer at det er lite sannsynlig at forskningen hadde blitt gjennomført i samme omfang uten forskningsmidlene. Derimot har vi tydelige indikasjoner på at teknologiutvikling på det aktuelle feltet har blitt sett på som relativt lønnsomt for næringen, slik at innovasjonene den trolig ville blitt gjennomført på et senere tidspunkt, og/eller i mindre omfang enn med finansiering. Derimot har vi tydelige indikasjoner på at teknologiutvikling på det aktuelle feltet har blitt sett på som relativt lønnsomt for næringen, slik at innovasjonene nok hadde blitt realisert på et litt senere tidspunkt, eventuelt med noe mindre effekt/suksess enn tilfellet var med finansiering Forskningsrådet.

Spredning av forskningsresultater

Kunnskapen fra caset er delt med blant annet fem publikasjoner i fagfellelvurderte tidsskrifter.¹⁶ Forskningens effekter har også fått medieoppmerksomhet, blant annet i en artikkel i Teknisk ukeblad fra 2021, der påvirkningen på Scatecs drift og effektene på produksjonen og lønnsomhet beskrives.¹⁷ Scatec har også utarbeidet en [informasjonsvideo](#) som presenterer resultatene for driften av solcelleparkene, og prosjektet har vært aktivt diskutert i sosiale medier, noe som har bidratt til engasjement og synlighet.

¹⁶ Utvalgte publikasjoner: 1) [Combined estimation of degradation and soiling losses in photovoltaic systems](#), 2) [How much power is lost in a hot-spot? A case study quantifying the effect of thermal anomalies in two utility scale PV power plants](#), 3) [Endogenous soiling rate determination and detection of cleaning events in utility-scale PV plants](#), 4) [Robust and fast detection of small power losses in large-scale PV systems](#) og 5) [General, robust, and scalable methods for string level monitoring in utility scale PV system](#)

¹⁷ Viseth (2021). Ny norsk solcelle-forskning: Scatec kan spare flere titalls millioner. Tilgjengelig [her](#).

3.2 Utslippskutt med CO₂-kjøling av dagligvarebutikker

Oppsummering

I caset har en videreutviklet bruk av CO₂ som kjølemedium i kulde- og varmepumpesystemer i dagligvarebutikker. Alternativet var å bruke HFK-gass, som har en betydelig høyere klimaeffekt. CO₂ som kjølemedium har dermed gitt en betydelig mengde unngåtte klimagassutslipp målt i CO₂e. Om lag 115 000 CO₂-anlegg er foreløpig installert i dagligvarebutikker på global basis. Overgangen til CO₂-baserte anlegg anslås å spare årlige klimagassutslipp med gjennomsnittlig 216 tonn CO₂e per dagligvarebutikk. Dagligvarebutikkene har i tillegg spart energiforbruk med omtrent 30 prosent som følge av installasjon av CO₂-kjøling. Dette tilsvarer en energisparing summert over perioden 2000–2019 på ca. 10 TWh og unngåtte klimagassutslipp på totalt 37–42 Mt CO₂e globalt. Den samfunnsøkonomiske gevinsten for effekter i Norge summert over perioden 2000–2019 anslås til omtrent 5 mrd. kroner.

NØKKELINFORMASJON

Finansiering Forskningsrådet: 30 mill. kroner

Varighet: 2009–2024

Forskningsaktører: SINTEF Energi og NTNU Institutt for energi- og prosesssteknikk (EPT)

Oppnådd TRL-nivå: 9

Næringsaktører: REMA 1000, Danfoss, System Air, Alfa Laval, Dorin, og Enex

Tallfestede effekter	
	Realisert 2000–2019
Energieffektivisering globalt	9,5–10,6 TWh
Reduserte klimagassutslipp globalt	37,4–41,6 Mt CO ₂ e
	Nåverdi 2000–2019
Samfunnsøkonomisk verdi for Norge	4,9–5,2 mrd. kr
Addisjonalitet Forskningsrådet*	25–50 %

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

Da KFK-gasser, som er skadelige for ozon-laget, ble ulovlig å bruke som kjølemedium i dagligvarebutikker, var alternativet å skifte ut teknologien med HFK-gasser. HFK har imidlertid enda sterkere drivhuseffekt enn KFK, og andre alvorlige miljøskadelige konsekvenser.¹⁸ Med lekkasjerater på mellom 10 og 20 prosent per år fra kjøleanleggene, gir utskiftning til HFK betydelige klimagassutslipp.

Videre er de fleste HFK-gasser klassifisert som polyfluorerte alkylstoffer (PFAS). Ved utslipp brytes disse helt eller delvis ned til trifluoroacetic acid (TFA), evighetskjemikalier som blant annet akkumuleres og forurensrer drikkevann. Det er påvist sammenhenger mellom langvarig eksponering av PFAS og TFA og hemmet stoffskifte, leverskader, svekket immunforsvar og andre helseskader. Det er

¹⁸ Den ozon-skadelige KFK-gassen R-22 som ble forbudt som kjølemedium har en GWP=1800. Alternativet til utfasing av R-22 var HFK-404A, som har en GWP=3910. GWP (Global Warming Potential) er et mål på gassers påvirkning på global oppvarming, hvor verdien for en gass sammenlignes med CO₂, og brukes til å omregne utslipp til CO₂-ekvivalenter.

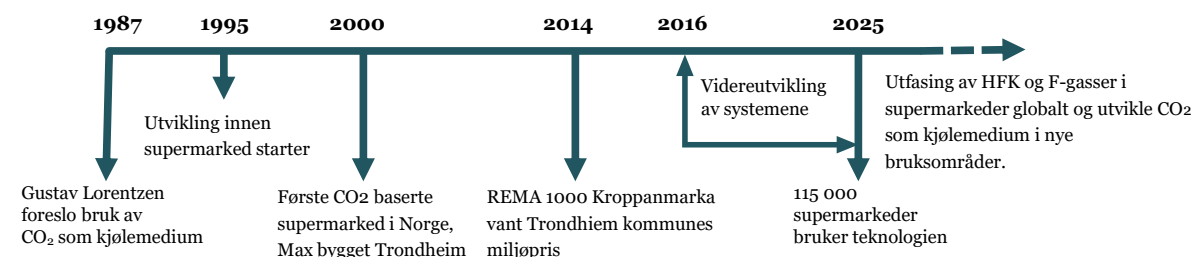
også observert sammenhenger mellom kreft og fosterskader som kan knyttes til PFAS.¹⁹ Disse kjemikalierne kan også føre til andre helseskader i form av, skjoldbruskkjertelsykdom, fedme og fruktbarhetsproblemer. Ved å utvikle og benytte CO₂ som kjølemedium istedenfor HFK-baserte kjølemedier unngår en direkte utslipp av HFK og sparer energibruk.

Forskningsaktiviteter og resultater

I samarbeid mellom SINTEF og NTNU, komponent- og systemleverandører og dagligvarebutikker er det utviklet energi- og kostnadseffektive systemer for CO₂-kjøling. Rema 1000 har vært samarbeidspartner som sluttbruker, og sammen med SINTEF Energi vant de Trondheim kommunes Energisparepris i 2014.²⁰ Sentrale næringsaktører har vært Danfoss, System Air, Alfa Laval, Dorin, Enex, Carrier og Advansor, der mange nå installerer anlegg i stor skala i Norge og internasjonalt. Carrier er et multinasjonalt selskap som har vært en viktig leverandør av anlegg til for eksempel REMA, og de samarbeider med norske entreprenører. Systemer for CO₂-kjøling dominerer markedet i Norge og Norden. De siste årene har denne typen systemer fått økt internasjonal oppmerksomhet og er i ferd med å bli tatt i bruk globalt.

Siden CO₂ er en høytrykksgass som krever maksimaltrykk opp til 120 bar, mot tidligere standard på 25 bar, var det behov for å utvikle nye komponenter, slik som kompressorer, varmevekslere og komponenter for trykkavlastning. Videre krevde bruk av CO₂ utvikling av prosesser for transkritisk²¹ drift, noe som gir utfordringer, men samtidig gode muligheter for å integrere systemene for leveranse av varme eller klimakjøling etter behov. Tidligere var det vanlig å benytte separate anlegg for å dekke ulike behov i bygget; kjøledisker, frysedisker, oppvarming og luftkondisjonering. Med CO₂ har en utviklet et integrert energisystem som tilfredsstiller de ulike behovene, og som krever mindre energiforbruk. Milepæler i forskningen er oppsummert i Figur 3-3.

Figur 3-3: Tidslinje med milepæler for innføring av CO₂ som kjølemedium.



Forskningen har ledet til utvikling av CO₂-baserte kjøle- og varmesystemer, som nå anses som hyllevare. Det anslås at om lag 115 000 CO₂-anlegg har blitt installert globalt, og markedet fortsetter å vokse.

CO₂-basert teknologi har omtrent 30 prosent lavere energiforbruk enn HFK-baserte teknologier. Dette anslaget er basert på erfaringsdata fra konvertering av norske butikkjøleanlegg. Dette innebærer lavere kostnader og mindre belastning på dagens energinett og lavere klimagassutslipp enn HFK-teknologien som alternativ. I Norge har 87 prosent av dagligvarebutikkene tatt i bruk CO₂-teknologien. COOP har allerede faset ut HFK-anlegg i de fleste av sine butikker, mens Bunnpris og Rema 1000 er godt på vei og sikter mot full utfasing innen 2029–2030. Norgesgruppen har redusert bruken av HFK-gasser med

¹⁹ ANEO (2024). F-gasser: Derfor må butikker bytte ut kjølediskene innen 2030. Tilgjengelig [her](#).

²⁰ SINTEF (2014). Energisparepris til SINTEF og Rema. Tilgjengelig [her](#).

²¹ En transkritisk prosess er en kretsprosess der arbeidsmediet har tilstander både over og under det kritiske punktet

97 prosent og planlegger full utfasing innen 2030.²² En av de første butikkene som tok i bruk teknologien ser vi i Figur 3-4.

Figur 3-4:REMA 1000 Kroppanmarka i Tiller, en av de første dagligvarebutikkene som ble bygd med system for kulde- og varmeproduksjon som bruker CO₂ som kuldemedium. Foto: REMA 1000 Norge



Anslåtte realiserte og potensielle effekter

I dag har nesten 90 prosent av 3900 norske dagligvarebutikker tatt i bruk teknologien, sammen med rundt 115 000 dagligvarebutikker globalt. CO₂-kjøling i dagligvarebutikker sammenlignet med HFK-tasser har to effekter som vi tallfester i denne rapporten: høyere energieffektivitet og unngåtte klimagassutslipp knyttet til unngåtte utslipp av klimagasser, i tillegg til redusert miljøbelastning ved unngått nedbrytning av HFK til PFAS.²³

For å beregne effekter av casen, må vi gjøre antagelser om referansescenarioet vi skal sammenligne med, altså utviklingen i bruk av kjølemedier uten CO₂-kjøling som alternativ. Vi legger til grunn at propananlegg gradvis var et alternativ til HFK-gasser i kjøleanlegg fra 2006. Propan brukes i dag i om lag 10 prosent av kjøleanlegg, og har lignende drivhuseffekt og energieffektivitet som CO₂. Det er imidlertid stor usikkerhet om *i hvilket omfang* propan kunne brukes som alternativ til HFK allerede fra 2006. Vi illustrerer usikkerheten med et intervall, hvor vi antar en lineær innfasing av propan som alternativt kjølemedium til CO₂ fra 0 til mellom 50 og 100 prosent fra 2005 til 2020 (tilsvarende reduksjon i andelen HFK som alternativ til CO₂). Videre legger vi til grunn at den addisjonelle effekten av CO₂-teknologien er begrenset til tidsperioden 2000–2019, siden det ble forbudt med etterfylling av fluorholdige klimagasser i kuldeanlegg fra 1.januar 2020 og HFK dermed bortfaller som alternativ.²⁴ Vi legger derfor til grunn at alternativet til CO₂ ville vært propan eller andre kjølemedier fra 2020.

Antall dagligvarebutikker som har tatt i bruk teknologien har økt fra omtrent 0 i år 2000 til 18 000 i 2018, og 115 000 i 2025. Dersom vi antar en lineær vekst mellom 2018 og 2025, gir dette 34 000 dagligvarebutikker med teknologien i 2019. Dette gir en *realisert* effekt i form av energieffektivisering på 10-11 TWh summert over perioden 2000–2019, og reduserte klimagassutslipp på totalt 37-42 Mt CO₂e.

Størrelse på anslåtte effekter globalt av forskningen er oppsummert i Tabell 3-4.

²² Norsk Kjøleteknisk Forening (2025). En reise mot en mer bærekraftig fremtid. Tilgjengelig [her](#).

²³ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

²⁴ Det ble forbudt å etterfylle kuldeanlegg med fluorholdige gasser med en fyllingsmengde på 40 CO₂-ekvivalenter eller mer. Se Miljødirektoratet (2022). Nye forbud for f-gasser. Tilgjengelig [her](#).

Tabell 3-4: Realiserte og potensielle effekter for CO₂-kjøling av dagligvarebutikker globalt summert over perioden 2000–2030.

Type global effekt	Realiserte effekter 2000–2019	Beskrivelse
 Energieffektivisering	9,5–10,6 TWh	Overgang til CO ₂ -kjøling gir 30 % lavere elektrisitetsbehov over året, sammenlignet med bruk av HFK-404A
 Reduserte klimagassutslipp	37,4–41,6 Mt CO ₂ e	Unngår direkte utslipp av sterk drivhusgass, HFK-404A med GWP ₁₀₀ 3900
 Redusert miljøpåvirkning	Positiv effekt	Unngår bruk av fluor-baserte gasser som bidrar til PFAS/TFA produksjon ved nedbrytning i atmosfæren

Økt energieffektivitet kan indirekte føre til reduserte klimagassutslipp, ved å redusere fossil energiproduksjon, og til reduserte miljøskader som følge av lavere utbygging av fornybar energi. Dette er indirekte effekter som vi ser bort fra i denne studien. En annen indirekte ikke-kvantifisert effekt er lavere driftskostnader for dagligvarebutikkene som følge av redusert energibruk.

Den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge over hele perioden anslås til mellom 4,9 og 5,2 mrd. kroner. Beregningene er oppsummert i Tabell 3-5.

Tabell 3-5: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge av CO₂-kjøling i dagligvarebutikker, summert over perioden 2000–2030.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Energieffektivisering	1,15–1,22 mrd.kr
Reduserte klimagassutslipp	3,70–3,99 mrd. kr
Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi	4,9–5,2 mrd. kr
Ikke prissatte virkninger	
Redusert miljøpåvirkning	+

Som tabellen viser, er størsteparten av den samfunnsøkonomiske gevinsten i Norge knyttet til reduserte klimagassutslipp.

Forskningsrådets utløsende effekt

Forskningsrådets sine bidrag har vært instrumentelle, både i tidlig utvikling av teknologien og opp gjennom årene for videreutvikling. Forskningsmiljøene ved SINTEF og NTNU hadde ikke hatt mulighet til å være like involvert uten støtten fra Forskningsrådet. Det er viktig å merke seg at Forskningsrådet har støttet flere prosjekter som har vært avgjørende for utviklingen av dette caset.

Aktiviteten startet først som et prosjekt for utvikling av «CFC-free technology for refrigeration and heat pumps» (KFK-fri teknologi for kuldeanlegg og varmepumper). Dette prosjektet ble gjennomført som en del av Strategisk instituttprogram fra 1995 til 1998. I perioden 2009 til 2013 ble arbeidet videreført

gjennom KMB-prosjektet²⁵ CREATIV (Competence project for Reduced Energy use through Advanced Technology InnoVations). I senere tid har denne aktiviteten blitt en del av FME HighEFF. Totalt anslår vi at Forskningsrådet har bidratt med 30 mill. kroner i tilskudd for forskning i caset.

Vi vurderer Forskningsrådets addisjonalitetsgrad til mellom 25 og 50 prosent for dette caset. Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet utløser forskningen og innovasjonseffektene i caset. Graden multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats. Vi vurderer at det er lite sannsynlig at forskningen hadde blitt gjennomført i samme omfang uten forskningsmidlene. Derimot var det stort behov for forskningen, slik at den med stor sannsynlighet hadde blitt gjennomført på et senere tidspunkt uten finansiering. I case-beskrivelsen har vi redegjort grundig for utviklingen av alternative teknologier og verdien av CO₂-kjøling for samfunnet over tid, med horisont for innfasing etc. Disse modererende aspektene er derfor inkludert i våre caseberegninger før justering for addisjonalitet.

Spredning av forskningsresultater

Caset har fått betydelig mediedekning i både fagpressen og aviser.²⁶ Her er noen eksempler: Historisk sett har det vært flere patenter innen dette feltet, men disse er nå enten utgått eller ikke vedlikeholdt. Teknologien er dermed åpen for alle. Forskningen har også resultert i flere publikasjoner.²⁷

Det har vokst fram flere bedrifter som direkte konsekvens av forskningen. Mange norske entreprenørbedrifter installerer slike anlegg for sluttbrukere som REMA 1000, mens CO₂-racks for installasjon i maskinrom produseres av internasjonale aktører. PTG og Carrier er også bedrifter som utvikler CO₂-anlegg, primært for bruksområder som hotell og industri.

Caset har vært en viktig bidragsyter til andre forskningsprosjekter, spesielt med fokus på tilpasning av systemer til varme klima. SINTEF-NTNU har blant annet ledet prosjektet INDEE, finansiert med norske midler for utvikling i India, og prosjektet fortsetter med INDEE3. EU H-2020 prosjekter, som SuperSmart og MultiPack, der SINTEF-NTNU har deltatt, har også dratt nytte av forskningen.

²⁵ Kompetanseprosjekt for næringslivet

²⁶ Eksempelvis i [Dagligvarehandelen](#), [Enova](#), [Kiwi](#), [ATMOsphere Market Report](#) og [E24](#).

²⁷ Noen eksempler inkluderer 1) [CO2 as working fluid – technological development on the road to sustainable refrigeration](#), 2) [Multi-Ejector Concept: A Comprehensive Review on its Latest Technological Developments](#), 3) [Experimental investigation of CO2 systems for Indian supermarkets with parallel configuration of multiejectors](#).

3.3 Økt kapasitet i kraftnettet med dynamisk drift av kraftledninger

Oppsummering

Lang ventetid på tilknytning til kraftnettet, kombinert med at nettutbygging er tidkrevende og kostbart, gjør effektiv utnyttelse av eksisterende nett stadig viktigere. Forskning i FME CINELDI viser at bruk av Dynamic Line Rating (DLR) gir mulighet for å øke utnyttet kapasitet i nettet med opptil 20 prosent. DLR innebærer å bruke sanntidsdata fra sensorer på kraftledningen til å vurdere den reelle kapasiteten i nettet, avhengig av værforhold og andre eksterne faktorer. Dermed kan nettet driftes tettere opp mot kapasitetsgrensene. Løsningen kan føre til utsatte investeringer i nettutbygging og dermed reduserte kostnader knyttet til kraftnett i hele verden, samt gi inntekter til norske teknologileverandører. Samlet anslås den neddiskonterte samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge til mellom 1,4 og 18,9 mrd. kroner, hovedsakelig knyttet til fremtidige effekter.

NØKKELINFORMASJON

Varighet: 2021–2024

Forskingsaktør: SINTEF Energi, NTNU,

Næringsaktører: Heimdall Power, BKK, Lede, Tensio, Fagne, Linja, Arva, Statnett

Oppnådd TRL-nivå: 9

Video som viser installasjon av sensor [her](#).

FINANSIERING

Forskningsrådet: 5,5 mill. kroner

Nextgrid (Grønn Plattform) – en spin-off – har en omfattende aktivitet knyttet til temaet; og den aktuelle arbeidspakken har et totalbudsjett på 30 mill. kroner.

Tallfestede effekter

	Realisert 2021–2024	Potensielt 2025–2035
Reduserte kostnader globalt	0,12 mrd. kr	6,7–133 mrd. kr
Næringslivspotensial globalt	0,02 mrd. kr	0,8–16,6 mrd. kr
	Nåverdi 2021–2035	
Samfunnsøkonomisk verdi for Norge	1,4–18,9 mrd. kr	
Addisjonalitet Forskningsrådet*	25–75 %	

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

Overføringskapasiteten i det norske kraftnettet er presset, og med elektrifisering framover vil etterspørselen etter kapasitet øke. Nettutbygging er tidkrevende og kostbart, samtidig som antallet søknader om nye tilknytninger har økt de siste årene.²⁸ Det vil være av stor verdi å utnytte det eksisterende nettet bedre for å møte etterspørselen av kraft til elektrifisering, ny industri og ny kraftproduksjon.

Med digitalisering kan nettselskapene få sanntidsdata om tilstanden til nettet, slik at nettet kan driftes tettere opp mot kapasitetsgrensene. Et digitalisert nett vil muliggjøre mer dynamisk drift og økt automatisering hos nettselskapene, som vil være verdifullt i et stadig mer komplekst kraftsystem. De fleste kraftnett opererer i dag basert på statiske sikkerhetsgrenser, erfaringsbaserte modeller og prognoser. De reelle kapasitetsbegrensningene i kraftledninger varierer med værforhold og andre eksterne faktorer, og sanntidsdata brukes i liten grad i driften.

²⁸ NVE (2024). Hvordan sikre raskere nettilknytninger for store kunder. Tilgjengelig [her](#).

Forskningsaktiviteter og resultater

FME CINELDI har gjennom pilotaktivitet²⁹ mål om å utvikle, teste og validere løsninger som utnytter kraftledningenes fleksibilitet og reservekapasitet. En viktig aktivitet har vært en storskala pilot, der Heimdall Power implementerte Dynamic Line Rating (DLR) på totalt 19 kraftledninger over 325 km nett. Det ble installert 102 sensorer (Neuroner™), på ledninger med spenningsnivå fra 22 kV til 132 kV, som vist i Figur 3-5. Totalt deltok seks nettselskaper i hver sin delpilot, med Statnett som systemansvarlig og samtalepartner.

Figur 3-5: Neuroner™ er sensorer som måler blant annet strøm i kraftledningen, vind og lufttemperatur, og gir informasjon om tilgjengelig kapasitet. Foto: Heimdall Power



Piloten hadde fem hovedmålsetninger: (1) økt kapasitet, (2) økt forsyningssikkerhet, (3) mer effektiv nettdrift og nettplanlegging, (4) økt innsikt i kraftsystemets behov og (5) bedre samarbeid og samhandling mellom transmisjonssystemoperatører (TSO) og distribusjonssystemoperatører (DSO). I piloten ble det satt opp målepunkter i kraftnett over hele landet, slik at resultatene fra piloten kan generaliseres til det norske kraftsystemet. Milepæler i piloten er oppsummert i Figur 3-6.

Figur 3-6: Tidslinje med milepæler for Dynamic line Rating (DLR)-piloten.



Fra piloten har nettselskapene fått verdifull oversikt og sanntidsdata fra sine nett, som gjør dem i stand til å drifte nettet mer dynamisk. Dynamisk drift betyr at strømmen i nettet kan tilpasses og justeres etter værforholdene og andre faktorer. Sensorene måler ledertemperatur, strøm, spenning, helning, fasevinkel og effektfaktor i tillegg til værforhold. Når forholdene tillater det, kan kapasitetsgrensene automatisk settes høyere enn de statiske sikkerhetsgrensene, noe som øker den reelle kapasiteten til kraftledningene. Resultatet er at flere kunder kan tilknyttes raskere, og mer strøm kan overføres. Dette kan redusere og utsette behov for nettutbygging.

²⁹ <https://www.sintef.no/projectweb/cineldi/pilot-projects-in-cineldi/fleksibilitet-i-kraftsystemet/>

For å oppnå gevinstene av DLR kreves både installerte sensorer og effektive metoder for utnyttelse av innhentet data. I piloten er det utviklet en metode for å få DLR-data inn i det eksisterende kontrollsystemet på en trygg og effektiv måte. For eksempel kunne et nettselskap ta imot økt kapasitet fra et vindkraftanlegg ved å installere sensorer på to kritiske kraftledninger. Nettselskapet sparte på denne måten rundt 200 mill. kroner i investeringer i nytt nett, og vindkraftprodusenten slapp å vente på økt nettkapasitet.³⁰

Resultatene fra flere delpiloter har avdekket betydelige potensialer for kostnadsbesparelser og kapasitetsøkninger i norske regionalnett. En beregning i en masteroppgave viste at besparelsen av spesialreguleringskostnader³¹ i et norsk regionalnettområde var over ti ganger høyere enn kostnadene knyttet til implementering av DLR over en periode fra oktober 2022 til januar 2024.³² En delpilot viste at kraftledningene hadde mer kapasitet enn hva beregninger med tradisjonelle metoder viste i 70-80 prosent av tiden. En annen delpilot demonstrerte potensialet for at bruk av DLR i større grad kan synliggjøre hvilke nettkomponenter som begrenser dagens kapasitet. På den måten kan nettselskapene i noen tilfeller kunne utsette utbygging av nye linjer ved å lokalisere hvilke komponenter som faktisk er begrensende. I et konkret tilfelle klarte delpiloten å identifisere at ved å heller skifte en strømtransformator til 200 000 kroner, unngikk nettselskapet å bygge en ny kraftledning til 5 mill. kroner per km.

Flere nettselskap har begynt å se potensialet til løsningen. Eksempelvis håper Elvia å øke kapasiteten i sitt nett med 20 prosent ved å installere slike sensorer.³³ Ved å utnytte dagens nett er potensialet for besparelser i form av utsatte eller unngåtte investeringer stort.

Anslåtte realiserte og potensielle effekter

DLR har to hovedeffekter som vi tallfester.³⁴ Den første er reduserte kostnader i form av utsatte eller unngåtte investeringer og unngåtte spesialreguleringskostnader. Den andre er næringslivspotensialet i form av inntekter til den norske bedriften Heimdall Power, som er en tilbyder av den utviklede teknologien.

Beregning av *potensielle* effekter er beheftet med stor usikkerhet, siden de hviler på antagelser om fremtidig utbredelse av teknologien. Med bakgrunn i at piloten hovedsakelig er gjennomført i regionalnettet har vi lagt til grunn at teknologien kan innføres på spenningsnivåer mellom 50 kV og 132 kV. Det norske regionalnettet er omtrent 19 000 km med et totalt effektbehov på over 25 000 MW. Det er stor etterspørsel etter utbygging, og fram mot 2030 forventes en økt etterspørsel på over 5000 MW. Nettet i verden er omtrent 500 ganger så stort som i Norge, og vi antar tilsvarende forskjeller i kapasitetsbehov. Ved å øke utnyttelsen av kapasiteten i dagens nett kan en del av investeringene utsettes. I våre beregninger legger vi til grunn fem års utsettelse. Investering i nett er estimert til om lag 2,4 mill. kroner per MW.³⁵ Kostnadsbesparelsen blir da verdien av å utsette investeringen med fem år. Vi regner med 10 000 kroner i driftskostnader per sensor per år (tilsvarer abonnementspris), og at 1 sensor dekker om lag 3 kilometer nett. Det tilsier et maksimalt teoretisk potensial på 5,3 mrd. kroner nasjonalt, og 2665 mrd. kroner globalt årlig i unngåtte investeringer og spesialreguleringskostnader.

³⁰ Heimdall Power. Norwegian Grid owner increased capacity by 50 MW.

³¹ Spesialregulering er en systemtjeneste som benyttes for å håndtere driftsutfordringer i kraftsystemet. Spesialregulering leder til at produsenter må avvike fra sine optimale produksjonsplaner, som resulterer i en samfunnsøkonomisk kostnad grunnet tap av effektivitet.

³² W. Nilsen and M. Utengen (2024). Leveraging Grid Efficiency Through Dynamic Line Rating and N-o.9. Tilgjengelig [her](#).

³³ Elvia (2024). Montering av sensorer på strømledningene. Tilgjengelig [her](#).

³⁴ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

³⁵ Menon (2025). Studie av samfunnsøkonomiske kostnader av at kunder ikke får tilknytning til strømmettet ved behov. Tilgjengelig [her](#).

Vi antar at teknologien kan utløse 10–50 prosent av det maksimale teoretiske potensialet nasjonalt, og 0,25–5 prosent internasjonalt. Vi forventer lavere markedsandeler internasjonalt grunnet høyere etableringsbarrierer utenfor Norge, sterkere konkurranse, ulike regulatoriske forhold, og sannsynligvis større barriere for å ta i bruk nye avanserte systemer i store deler av det internasjonale markedet. Vi regner effekter frem til år 2035, som tilsvarer at konkurrerende teknologier ville ha oppnådd lignende effekter fra 2035 uavhengig av dette forskningscaset. Det gir en total nåverdi av reduserte kostnader på mellom 530 mill. kroner og 2,65 mrd. kroner i Norge, og mellom 6,7 og 133 mrd. kroner globalt.

For å beregne *realiserte* effekter tar vi utgangspunkt i allerede installerte sensorer. I piloten ble det installert omtrent 100 sensorer, og i dag er totalt 743 sensorer installert i 18 land fordelt på tre verdensdeler. Vi antar at det har vært en gradvis økning i sensorer frem til 2024. Vi har generalisert effektberegningene til å gjelde per installert sensor og gitt et anslag på den realiserte effekten på 120 mill. kroner i reduserte kostnader.

For å beregne næringslivspotensialet har vi tatt utgangspunkt i abonnementsprisen per sensor (10 000 kroner). Deretter antar vi stabile faste kostnader, og at abonnementsprisen dermed blir en direkte økning i inntekt hos Heimdall Power. Estimerte inntekter til norske aktører er dermed mellom 0,8 og 16,6 mrd. kroner i potensielle effekter, og rundt 20 mill. kroner realisert knyttet til allerede installerte sensorer.

Størrelse på anslåtte effekter globalt er oppsummert i Tabell 3-6.

Tabell 3-6: realiserte og potensielle effekter globalt for DLR summert over perioden 2025–2035.

Type global effekt	Realiserte effekter 2021–2024	Potensielle effekter 2025–2035	Beskrivelse
 Reduserte kostnader (nåverdi)	0,12 mrd. kr	6,7–133 mrd. kr	Ved å utnytte mer av dagens nett kan investeringer i kraftnett utsettes eller unngås
 Redusert miljøpåvirkning	Positiv effekt	Positiv effekt	Unngåtte naturinngrep ved utsatte eller unngått utbygging av nytt kraftnett
 Økt forsynings-sikkerhet	Positiv effekt	Positiv effekt	Økt utnyttelse av kapasitet, og ved utfall kan forbruk kobles ut mer presist.
 Norsk næringslivs-potensial (nåverdi)	0,02 mrd. kr	0,8–16,6 mrd. kr	Inntekter til selskapet Heimdall Power

DLR reduserer også negativ miljøpåvirkning. Hvis investeringer kan utsettes eller unngås, unngås inngrep i naturen, spesielt knyttet til bygging av kraftledninger i sårbar natur.

Vi vurderer at DLR også gir økt forsyningssikkerhet, ved å øke den reelle kapasiteten i nettet. Digitalisering gir også bedre informasjon om løpende nettkapasitet, noe som muliggjør tiltak for å

hindre overbelastning av komponenter og risiko for avbrudd. Dette bidrar til effektiv drift ved å unngå frakopling av produksjon.

Teknologien kan også indirekte øke produksjonen av fornybar energi ved å unngå nedregulering av uregulerbar kraftproduksjon. Samtidig kan ny produksjon tilknyttes raskere som følge av økt tilgjengelig kapasitet i kraftnettet, og dermed tilrettelegge for elektrifisering.

Den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge over perioden 2021–2035 anslås til mellom 1,4 og 18,9 mrd. kroner, se Tabell 3-7. Gevinsten består av reduserte kostnader knyttet til kraftnettet i Norge, og inntekter til Heimdall fra installerte systemer i utlandet. Ved beregning av samfunnsøkonomisk gevinst trekker vi fra salgsinntekter innenfor Norge, fordi dette er en fordelingsseffekt mellom ulike norske aktører. I tillegg kommer økt forsyningssikkerhet og redusert miljøpåvirkning, som ikke er tallfestet.

Tabell 3-7: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge av DLR i perioden 2021–2035. Om lag 90 mill. kroner er realisert.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Reduserte kostnader	0,6–2,7 mrd. kr
Næringslivspotensial	0,8–16,2 mrd. kr
Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi	1,4–18,9 mrd. kr
Ikke prissatte virkninger	
Økt forsyningssikkerhet	+
Redusert miljøpåvirkning	+

Omstillingskostnader er den største barrieren mot å realisere effektene. Teknologien er moden, men det kreves systemendringer både IT-teknisk, sikkerhetsmessig og knyttet til arbeidsprosesser og muligens også organisering internt i nettselskapene, for å realisere potensialet. Det er også behov for økt datautveksling mellom nettselskaper og mellom nettselskaper og Statnett (TSO) for å utnytte hele potensialet. Både korttidsplanlegging og langtidsplanlegging må ta hensyn til at driften skal være dynamisk.

Forskningsrådets utløsende effekt

Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet har bidratt til å utløse forskningen og innovasjonseffektene i caset. Graden (prosent) multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats. Basert på tilbakemeldinger gjennom intervjuer har vi vurderer at forskningsmidlene har vært avgjørende for at innovasjonen raskt kunne realiseres og oppskaleres. Sensorer og bruk av sanntidsdata har vært på agendaen i bransjen over lengre tid. Det finnes konkurrerende løsninger fra eksempelvis Avju og Safebase og også internasjonale løsninger som kan gi tilsvarende effekter. Vi vurderer derfor at løsningen hadde blitt realisert i markedet også uten Forskningsrådets bidrag, men at det hadde tatt vesentlig lengre tid uten finansieringen i dette caset, da utviklingsløpet i større grad ville vært opp til hvert enkelt selskap. Da hadde man mistet fordelene av koordinering og synergier i prosjektet, som flere peker på som et «bransjeløft». Vi setter addisjonalitetsgrad til mellom 25 og 75 prosent for dette caset.

Spredning av forskningsresultater

Prosjektet har fått oppmerksomhet i media blant annet ved en artikkel i Energiteknikk³⁶, NRK³⁷, Gemini³⁸ og fire artikler i Teknisk Ukeblad³⁹ mellom 2019 og 2024. Den viktigste publikasjonen er nylig publisert i Institute of Electrical and Electronics Engineers og handler om mulighetene ved bruk av DLR.⁴⁰ Samtidig har det vært flere bloggpubliseringer i tillegg, blant annet fra to sommerforskere som gjennomførte analyser tilknyttet piloten.⁴¹ Det har ikke vokst fram noen nye bedrifter som følge av forskningen, men aktiviteten i Heimdall Power har økt som en direkte følge av caset.

Forskningsrådet har stimulert ytterlige forskning og innovasjon knyttet til prosjektet, illustrert av Nextgrid, en spin-off i Grønn Plattform. Samlet budsjett fra alle partnerne i dette prosjektet er på 30 mill. kroner (inkluderer inkind fra prosjektpartnere og støtte fra Innovasjon Norge og Forskningsrådet og SIVA) i den relaterte arbeidspakken. CINELDI-piloten har inkludert 500 000 kroner til to sommerjobber, og totalt 2700 timer fordelt på ulike arbeidspakkeaktiviteter hos SINTEF og NTNU, samt betydelig intern tid hos Heimdall Power og samarbeidende nettselskaper. I tillegg pågår det prosjekter relatert til Heimdall Power og konkurrenten Avju, hvor noen også kan ha fått støtte fra Forskningsrådet. Et nytt prosjekt, MaksGrid, startet også opp i 2024, der SINTEF bygger videre på erfaringen fra dette prosjektet. I MaksGrid testes ut løsninger for å øke utnyttelsen av strømmettet, og arbeidet vil også være en del av FME SecurEL (2025–2032).

³⁶ Abelsen (2024). Heimdall vant Cineldi-pris for forskningssamarbeid. Tilgjengelig [her](#).

³⁷ Nyhus (2024). Magisk ball skal redusere straumrekninga. Tilgjengelig [her](#).

³⁸ Mathisen (2024). Kule på tråden gir billigere strømregning. Tilgjengelig [her](#).

³⁹ Sandvin (2024). Strømmettet er fullt – eller er det egentlig det? Tilgjengelig [her](#).

Godske (2024) Kuler på kraftledninger kan overføre mer energi. Tilgjengelig [her](#).

Valle (2022). Overvåkning kan gi bedre utnyttelse av strømmettet. Tilgjengelig [her](#).

Zeiner (2019). Kule overvåker strømmett og finner feil. Tilgjengelig [her](#).

⁴⁰ S. Sandell and I. B. Sperstad (2025). Evaluating grid development strategies for a regional grid using dynamic line rating sensors. Tilgjengelig [her](#).

⁴¹ Pavlak (2022). Bedre utnyttelse av strømmettet med dynamiske kapasitetsgrenser. Tilgjengelig [her](#).

Hermundstad (2024). Fleksibilitet i strømmettet med dynamisk styrte nett. Tilgjengelig [her](#).

3.4 Billigere transport av CO₂ på skip ved bruk av lavtrykksteknologi

Oppsummering

Transport av CO₂ med skip er en fleksibel løsning sammenlignet med rørtransport for tidligfase implementering av CCS. Betingelser for trykk og temperatur er avgjørende faktorer for lønnsomheten ved å transportere CO₂ på skip. Ved å redusere trykket fra 15 til 7 bar(g), har forskning vist et potensial for kostnadsbesparelser for et bredt spekter av transportvolumer og avstander. Besparelsene varierer med avstand og fraktede tonn per skip. Gitt en antagelse om 30 prosent besparelse og en gjennomsnittsdistanse på 1000 km, tilsvarer besparelsen omtrent 113 kroner per tonn CO₂ (10 €/tCO₂). De potensielle reduserte kostnadene i Europa kan da beløpe seg til 7–21 mrd. kroner summert over perioden 2030–2040. I Norge kan den samfunnsøkonomiske gevinsten bli mellom 0 og 1,1 mrd. kroner summert over samme periode.

NØKKELINFORMASJON

Forskningsrådet finansiering: ca. 34 mill. kr

Varighet: 2017–2024

Forskningsaktør: SINTEF Energi, SINTEF Industri

Næringsaktører: Equinor, TotalEnergies, GASSCO, SLB Capturi, Altera

Oppnådd TRL-nivå: 5

Blogg om prosjektet [her](#).

Tallfestede effekter

	Potensielt 2030–2040
	Nåverdi 2030–2040
Reduserte kostnader globalt	7–21 mrd. kr
Samfunnsøkonomisk verdi for Norge	0–1,1 mrd. kr
Addisjonalitet Forskningsrådet*	50–75 %

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

Transport av CO₂ fra utslippspunkt til dit CO₂-en skal lagres er et sentralt ledd i netto effekter av karbonfangst og -lagring (CCS). Reduserte transportkostnader kan gi mer kostnadseffektiv håndtering av CO₂. Transport av CO₂ på skip er kostnadseffektivt i kombinasjon av lange avstander og mindre volumer. Andre fordeler er lave kapitalinvesteringer, fleksibilitet og samutnyttelse av infrastruktur.

I dag transporteres CO₂ med et trykk på 15 bar(g), både globalt og i den norske fullskala CCS-kjeden. Skipstransport kan framskynde CO₂-transport mellom utslippspunkt og lagringssted ettersom investeringsbehovet i infrastruktur reduseres. I en nylig publisert artikkel viser forskere ved SINTEF at lavtrykks skipstransport kan være den mest kostnadseffektive transportmetoden.⁴²

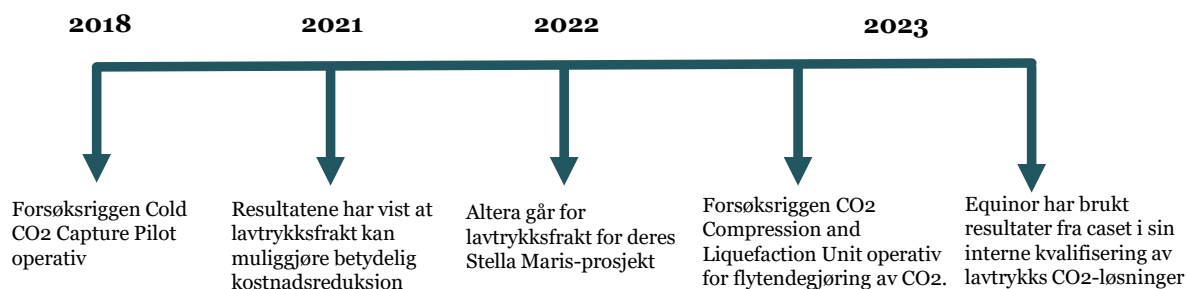
Forskningsaktiviteter og resultater

NCCS har gjennomført tekno-økonomiske analyser av lavtrykkstransport, eksperimentell validering av flytendegjoring ved lavere trykk, og utviklet en ny metodikk for å identifisere optimale transportbetingelser for frakt av CO₂ på skip. Metodikken har kvantifisert potensialet for

⁴² Eggen Holm, S., Winther, M. S., Straus, J., & Roussanaly, S. (2025). How to best transport CO₂ to offshore storages? Tilgjengelig [her](#).

kostnadsreduksjoner i tilfeller der lavtrykkstransport (7 bar) kan erstatte dagens løsning (mellomtrykk, 15 bar). Viktigste milepæler i forskningen er vist i Figur 3-7.

Figur 3-7: Tidslinje med milepæler for lavtrykk skipstransport.



Resultatene viser at reduksjon av transporttrykket til 7 bar(g) kan være mulig og hensiktsmessig.⁴³ Forskjellene mellom lavtrykk og mellomtrykk ligger blant annet i temperaturen og hvilken type skip som behøves for å frakte CO₂. Flytendegjøring ved lavere trykk krever mer energi, men gir betydelige skalafordeler da større skip kan brukes. Dette gir potensial for betydelig kostnadsreduksjon for et bredt spekter av transportvolumer og avstander. Resultatene viser at lavtrykks transport særlig er relevant for avstander over 750–1000 km, som dermed er representative for frakt av CO₂ fra de europeiske hovedhavnene til Norge.

Lavtrykks skipstransport kan også erstatte mellomtrykks skipstransport. Dersom et mottak for lagring av CO₂ krever mellomtrykks-CO₂ kan lavtrykks-CO₂ konverteres før lasten overføres til neste ledd i CCS-kjeden. Dette bidrar til å gjøre teknologien mer fleksibel, da den kan ta over transporten for strekninger der mellomtrykk er planlagt.

Figur 3-8: Labanlegg for separasjon og flytendegjøring av CO₂. Foto: SINTEF



Selv om flytendegjøring av CO₂ ved lavtrykksfrakt er noe dyrere enn ved middels trykksfrakt (~1€/tCO₂), finner forskning en total kostnadsreduksjon ved lavtrykksfrakt av CO₂. Fraktlogistikken ved lavtrykksfrakt er vanligvis betydelig mindre kostbar enn ved middels trykk. Eksempelvis er et lavtrykkskip billigere enn et mellomtrykkskip (ved 10ktCO₂/skip er det 40–50 prosent billigere), gitt tilsvarende mengde transportert CO₂. Blant grunnene til kostnadsbesparelsene er:

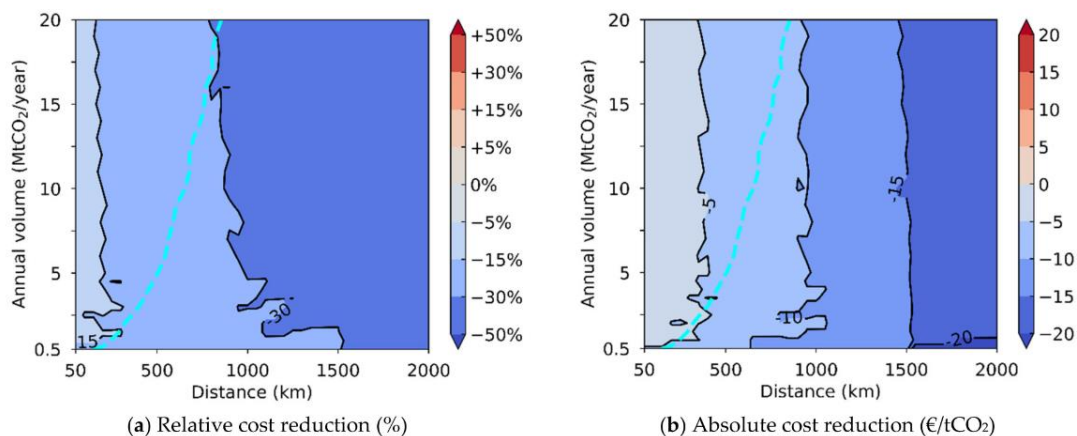
- Lavtrykk CO₂ kan fraktes i større volum, og større skip kan derfor benyttes, som kan gi billigere innkjøp totalt. Eksempelvis ved å heller investere i et 50 ktCO₂-skip kontra fem mindre og 10 ktCO₂-skip.

⁴³ Forsøkene i NCCS viste ingen faststoffdannelse for 5,2–5,9 bar trykk når vanninnholdet var under 50 ppm⁴³. Også med 100 ppm vann kan CO₂ flytendegjøres ned til 5,2 bar uten faststoffdannelse. Ved 200 ppm vann ble faststoff påvist ved 6,7 bar.

- Større skipsstørrelser medfører sparte driftskostnader knyttet til mannskap, vedlikehold og drivstoff.
- Bufferlagre ved havnene er billigere

Figur 3-9 viser hvordan kostnadsreduksjonen ser ut ved en overgang fra mellomtrykks- til lavtrykks-skipstransport. Reduksjonen varierer i stor grad basert på avstand, men også noe på årlig fraktvolum.

Figur 3-9: Oversikt over reduksjon av transportkostnader avhengig av årlig transportvolum og transportavstand mellom to havner. Den blå stiplede linjen markerer grensen hvor det er mer kostnadseffektivt å transportere CO₂ med rørledning til venstre og med skip til høyre. Kilde: Roussanaly et al. (2021)⁴⁴



Anslåtte potensielle effekter

Usikker utvikling innen CCS de neste årene er usikker gjør det krevende å anslå effektene av forskningen på lavtrykks skipstransport. Realisering av effektene er avhengig blant annet av politisk vilje til å lagre CO₂ i stor skala nasjonalt og internasjonalt og hvilke teknologier som vil bli dominerende innen transport av CO₂. I beregning av effekter tar vi utgangspunkt i et scenario hvor CO₂-lagring skjer i stor skala, og nåværende kostnadsberegninger for transport ligger til grunn. Vi beregner effekter frem til år 2040. Det betyr at vi antar at de samme kostnadsbesparelsene ville blitt nådd fra 2040 uavhengig av dette forskningscasets resultater.

I beregningene må vi gjøre antagelser om andel av lagret CO₂ som blir fraktet med lavtrykksskip, og kostnadsbesparelse knyttet til dette. Resultatene fra prosjektet kan i teorien brukes på all ny skipstransport av CO₂, også der mellomtrykksløsninger allerede er planlagt. Frem mot 2040 antar vi at resultatene vil anvendes på CO₂ lagret i Europa. EUs ambisjon er å lagre 50 mill. tonn årlig innen 2030,⁴⁵ og ambisjonen innen 2040 er 280 mill. tonn årlig.⁴⁶ Disse målene er brukt for å lage et scenario for totalt lagret CO₂ i Europa. En artikkel fra 2021 estimerer at 10–15 prosent optimalt bør fraktes med skip.⁴⁷ Basert på forskningen som viser at lavtrykk er rimeligere for alle aktuelle distanser, antar vi at mellom 5 og 15 prosent av lagret CO₂ i Europa fraktes med lavtrykks skipstransport. Basert på forskningen⁴⁸ som viser at lavtrykk er rimeligere for alle aktuelle distanser, antar vi at mellom 5 og 15

⁴⁴ Roussanaly et al. (2021). At what Pressure Shall CO₂ Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping. Tilgjengelig [her](#).

⁴⁵ Regjeringen (2024). Net-zero Industry Act – Forordning om produksjon av nullutslippsteknologi (NZIA). Tilgjengelig [her](#).

⁴⁶ NCCS (2024). European Commission publishes Industrial Carbon Management strategy. Tilgjengelig [her](#).

⁴⁷ d'Amore et al. (2021). Optimal design of European supply chains for carbon capture and storage from industrial emission sources including pipe and ship transport. Tilgjengelig [her](#).

⁴⁸ Eggen Holm, S., Winther, M. S., Straus, J., & Roussanaly, S. (2025). How to best transport CO₂ to offshore storages? Tilgjengelig [her](#).

prosent av lagret CO₂ i Europa fraktes med lavtrykks skipstransport. Vi antar at lavtrykks skipstransport av CO₂ øker parallelt med totalt lagret CO₂ fra 2030 til 2040 basert på målene til EU.

Som proxy for gjennomsnittlig transportlengde, benyttes avstanden mellom Rotterdam og Bergen på omtrent 1000 kilometer. Avstandene vil i realiteten variere, og alle forutsetninger vil være heftet med mye usikkerhet.⁴⁹ Som illustrert i Figur 3-9, forventes en absolutt kostnadsreduksjon per tonn CO₂ på om lag 10 euro. Med dagens kurs tilsvarer dette 113 kroner per tonn.⁵⁰

De reduserte kostnadene representerer et næringslivspotensial for Norge. Potensialet avhenger av at norske aktører tar i bruk teknologien. Det samme gjelder reduserte klimagassutslipp i form av redusert drivstoffbruk grunnet lettere last per tonn fraktet CO₂. Det er også mulig at billigere CO₂-frakt vil kunne øke bruken av CCS, og dermed redusere CO₂-utslipp. Disse effektene er vanskelige å anslå og ikke tallfestet.

De potensielle effektene globalt er oppsummert i **Feil! Fant ikke referansekilden.** Tabell 3-8**Feil! Fant ikke referansekilden..** Som tabellen viser, anslår vi mellom 7 og 21 mrd. kroner globalt i reduserte fraktkostnader. Det er stor usikkerhet knyttet til tallet. Dersom vi hadde antatt at teknologien vil gi effekter i hele verden i tidsperioden, i stedet for bare Europa, hadde tallet blitt betydelig større. På en annen side er beregningene basert på ambisiøse målsetninger om antall tonn lagret CO₂.

Tabell 3-8: Potensielle effekter globalt for lavtrykks skipstransport summert over perioden 2030–2040.

Type global effekt	Potensielle effekter 2030–2040	Beskrivelse
 Reduserte kostnader (nåverdi)	7–21 mrd. kr	Reduserte fraktkostnader
 Reduserte klimagassutslipp	Positiv effekt	Redusert drivstofforbruk og billigere CCS
 Norsk næringslivspotensial	Positiv effekt	Høyere lønnsomhet og omfang hos norske aktører som tar i bruk teknologien

Den samfunnsøkonomiske prissatte gevinsten som tilfaller Norge vil være knyttet til reduserte kostnader for CO₂-håndtering av norske utslipp. Her legger vi til grunn at mellom 0 og 100 prosent av lagret CO₂ fraktes med lavtrykks skipstransport. Totalt er det utredet for lagring rundt 2,5 MtCO₂ årlig i Norge, som er aktuell for lavtrykk.⁵¹ Vi antar gradvis, lineær økning i lagring, fra 0 i 2029 til 2,5 Mt i 2040. Vi anslår at den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge ligger mellom 0 og 1,1 mrd. kroner i nåverdi, som er oppsummert i Tabell 3-9. I tillegg kommer næringslivspotensial og reduserte klimagassutslipp, som ikke er prissatt.

⁴⁹ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

⁵⁰ Roussanaly et al. (2021). At what Pressure Shall CO₂ Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping. Tilgjengelig [her](#).

⁵¹ Anslaget er basert på en liste med utredede prosjekter tilsendt fra NCCS. Langskip er planlagt for mellomtrykk, og er holdt utenfor anslaget.

Tabell 3-9: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge av lavtrykks skipstransport summert over perioden 2030–2040.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Reduserte kostnader	0–1,1 mrd. kr
<i>Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi</i>	0–1,1 mrd. kr
Ikke prissatte virkninger	
Næringslivspotensial	+
Reduserte klimagassutslipp	+

Flere barrierer kan begrense de potensielle effektene. Selv om lavtrykkstransport av CO₂ kan bidra til å kommersialisere CCS, krever slike prosjekter store investeringer grunnet store mengder CO₂ og bufferlagring. Det innebærer en økonomisk risiko for å utvikle og demonstrere fullskala transport basert på lavtrykks skipstransport. Dette har vært et tema for Yinson Production prosjekt Stella Maris. De ble nylig tildelt 225 mill. euro fra Europakommisjonen for STARFISH-prosjektet, som har bidratt til å senke denne risikoen. Industrien frykter også risiko for at det dannes tørris, noe som kan skape driftsproblemer. Til slutt vil det å finne kostnadseffektive kvalifiserte materialer for lavtrykkstanker også være viktig for å redusere kostnadene.

En annen sentral barriere er bruken av andre transportmidler, som blant annet rørledninger. Selv om rørledninger utgjør en betydelig konkurranse til lavtrykks skipstransport, er det fortsatt nødvendig å ivareta behovet for transport til terminaler som har rørtilknytning til lagringsinfrastruktur.

Forskningsrådets utløsende effekt

Forskningsrådets bidrag har vært avgjørende for å realisere en lang rekke av prosjektene som over tid har bygd nødvendig kompetanse og FoU-resultater i dette caset. Vi vurderer at det er usannsynlig at forskningen hadde blitt gjennomført uten forskningsmidlene. Det er lang vei til kommersialisering og velfungerende systemer for CCS-verdikjeden. Det tilsier at alternativ finansiering er vanskelig å finne. Når dette er sagt er det et stort behov for forskning på CO₂-håndtering, med klart økende interesse for nye løsninger innen skipstransport senere år. Med dette som bakgrunn er det trolig at forskningen kanskje hadde blitt gjennomført på et senere tidspunkt, men nok i noe mindre omfang dersom finansieringen hadde uteblitt. Med dette som bakgrunn setter vi addisjonalitetsgrad til mellom 50 og 75 prosent for dette caset. Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet har bidratt til å utløse forskningen og innovasjonseffektene i caset. Graden multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats.

Spredning av forskningsresultater

Flere industrielle aktører har hatt stor nytte av forskningen. Altera Infrastructure, og nå Yinson Production, har vært mest aktive i å få lavtrykks skipstransport til live via Stella Maris-prosjektet, og de har blitt tildelt 225 mill. euro i EU-midler til dette. Prosjektet utvikler en infrastruktur or å transportere og lagre 5 MtCO₂/år basert på lavtrykks skipstransport. Equinor har også brukt resultater fra caset i sin interne kvalifisering av lavtrykks CO₂-løsninger. Lavtrykksteknologien er relevant for kunder med større volum/avstand der en kan bruke færre skip sammenlignet med bruk av mellomtrykk-teknologi. SLB Capturi (tidligere Aker Carbon Capture) har søkt om et patent med utspring fra IPN-prosjektet Just Hydrogen som handler om CO₂-separasjon via lavtrykks-flytendegjøring.⁵²

⁵² WO2023242144A1 – Method and plant for separation of carbon dioxide (CO₂) – Google Patents. Tilgjengelig [her](#).

Forskningen har fått en del offentlig oppmerksomhet og har resultert i flere publikasjoner, som er sitert og vist til i annen forskning.⁵³ SINTEF Energi har organisert flere arrangementer hvor disse resultatene ble presentert og diskutert, inkludert et webinar⁵⁴ som samlet mer enn 100 deltakere. Det er også skrevet blogginnlegg om forskningen. Prosessmodellene og de tekno-økonomiske modellene som er utviklet har blitt brukt til å støtte ulike aktører i å forstå hvordan de best kan planlegge for CO₂-transport med skip i deres prosjekter. Dette inkluderer:

- PreemCCS: Preem-raffinerier i Sverige
- EU TILGANG: Flere industrianlegg (sement, avfall-til-energi-masse og papir)
- CCS Midt-Norge: Industrielle aktører fra Midt-Norge
- CCS Haugalandet: Industriaktører i regionen Haugalandet
- Lokale CCS-verdikjeder: Industriaktører i regionen Haugalandet
- EU-jubel: Europeiske raffinerier

⁵³ Utvalgte publikasjoner, antall siteringer i Google Scholar i parantes: [Techno-economic analyses of CO₂ liquefaction: Impact of product pressure and impurities](#) (125), [At what Pressure Shall CO₂ Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Bar](#) (65), [Deploying a shipping infrastructure to enable carbon capture and storage from Norwegian industries](#) (27), [CO₂ Liquefaction Close to the Triple Point Pressure](#) (20).

⁵⁴ 1) <https://www.sintef.no/en/events/archive/2021/webinar-shall-shipping-of-co2-move-toward-low-pressure-shipping/>
2) <https://nccs.no/webinar/novel-co2-capture-concept-for-hydrogen-production-the-role-of-low-temperature-carbon-capture-and-experimental-validation/>

3.5 Utslippskutt og lavere energibruk med høytemperatur varmepumper

Oppsummering

Varmepumper som erstatning for konvensjonelle fossil- og elkjeler kan gi store utslippskutt og redusert energibruk for deler av industrien. Norge har lenge vært faglig verdensledende innen varmepumpeteknologi, og har utviklet kunnskap som har ført til produksjon av høytemperatur industrielle varmepumper som kan brukes i kommersiell sammenheng. Vi estimerer at den norske forskningen bidrar til at høytemperatur varmepumper i industrien globalt kan redusere energibruket med mellom 255 og 1002 TWh, og kutte utslipp med mellom totalt 84 og 337 mill. tonn CO₂ totalt de neste 20 årene. Den anslåtte samfunnsøkonomiske gevinsten som tilfaller Norge ligger på mellom 1,5 og 8,7 mrd. kr.

NØKKELINFORMASJON

Forskningsrådet finansiering: 40 mill. kroner (anslag)

Varighet: 2015–2024

Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, NTNU

Næringsaktører: Gassco, Glencore Nikkel, Mo Industripark, Equinor, Finnfjord, Mo Industripark, Orkla, Pelagia

Teknologileverandører: Epcon, Alfa Laval, Johnson Controls International, Cadio, Dorin, Skala, Mayakawa, ToCircle, Aneo

Tallfestede effekter		
	Realisert 2018–2024	Potensielt 2025–2044
Reduserte klimagassutslipp globalt	0,2 mill. tonn CO ₂ e	77–307 mill. tonn CO ₂ e
Energieffektivisering globalt	1,6 TWh	255 TWh–1002 TWh
	Nåverdi 2018–2044	
Samfunnsøkonomisk verdi for Norge	1,5–8,7 mrd. kr	
Addisjonalitet Forskningsrådet*	25–50 %	

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

Næringsmiddelindustri, prosessindustri og kjemisk industri bruker og skaper mye prosessvarme, og energiforbruket er høyt. Varmepumper kan levere varme med mye lavere energibruk enn tradisjonelle metoder. Prosessene i industrien er imidlertid avhengig av høytemperatur varme, som varmepumper tradisjonelt sett ikke har klart å levere. Varmepumper leverer i hovedsak en temperatur på opp mot 60–70°C, og i enkelte tilfeller opp mot 80°C, mens store deler av industrien har et varmebehov på mer enn 100°C.

Varmebehov i industrien dekkes derfor i dag i stor grad med fossile brensler, som bidrar til betydelige utslipp. Behovene kan alternativt dekkes ved direkte bruk av elektrisitet, som er stadig vanligere i Norge, men medfører samtidig sterk økning av i kraftbehovet.

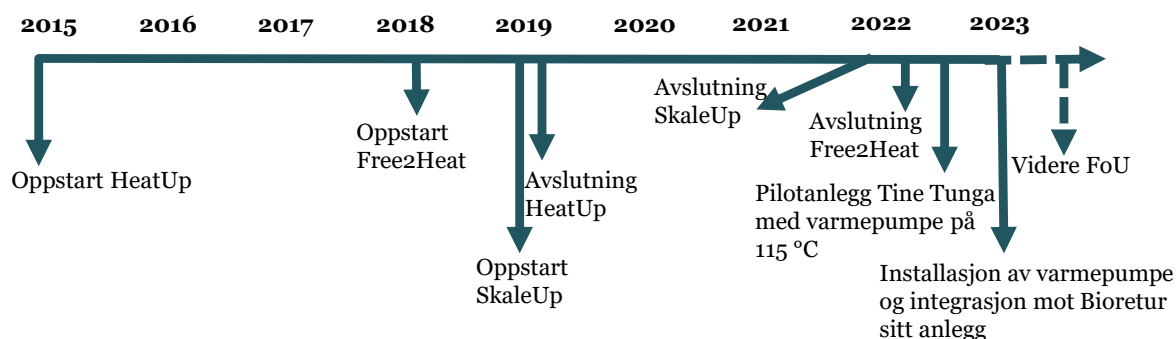
Med relativt lave strømpriser sammenlignet med prisen på fossile brensler, har varmepumpe vært mer relevant som alternativ til fossil oppvarming i Skandinavia enn i andre land, også i industrien. Norge har naturlig tatt en ledende rolle i å utvikle teknologi i dette segmentet.

Forskningsaktiviteter og resultater

Norske forskere, blant annet fra SINTEF, har med utgangspunkt i kunnskap og teknologi bidratt til å utvikle relevant varmepumpeteknologi for industrien. Ettersom industrielle varmepumper krever annen type drift og oppfølging enn ordinære varmepumper for bygg/husholdninger, har det vært behov for utvikling av teknologier og løsninger langs hele verdikjeden. Dette gjelder alt fra komponentutvikling til arbeidsmedier og systemutvikling. Forskningen har ledet fram til industrielle høytemperatur varmepumper som kan brukes ved temperaturbehov typisk i området 100–200°C når en har egnede varmekilder tilgjengelig.

Forskere har drevet med teoretisk modellering og analyse, og uttesting av ulike konsepter i laboratoriet [HighEFFlab](#) og i felt. Det er gjennomført en rekke case-studier for ulike bedrifter og sektorer. De ulike case-studiene varierer i kapasitet, temperaturkrav og grensebetingelser generelt. Ulike forskningsprosjekter har inngått i caset, som vist i tidslinjen under (Figur 3-10). Prosjektene [HeatUP](#), [SkaleUP](#), og [Free2Heat](#) har vært spesielt viktige.

Figur 3-10: Tidslinje med milepæler for utvikling av høytemperatur varmepumper.



Industrielle høytemperatur varmepumper har potensial til å erstatte tradisjonell oppvarming med fossil- eller elkjel for varmebehov opp mot 200°C, og kanskje opp mot 250-300°C på sikt. Varmepumpene kan gi tilsvarende varme som tradisjonelle systemer med lavere energibruk, typisk over 50 prosent reduksjon. Redusert energibruk kommer av at varmepumpene utnytter spillvarme som varmekilde, og løfter temperaturen opp til ønsket nivå for den industrielle prosessen som skal betjenes.

Høytemperatur varmepumpe er allerede kommersialisert, og det er installert et tosifret antall slike varmepumper i Norge. Et eksempel er hos Fellesskjøpet i Trondheim, som illustrert i Figur 3-11. I tillegg har bedrifter som Tine, og fiskeprodusenten Pelagia tatt i bruk slike varmepumper. Tine har også deltatt i forskningen gjennom å være vertskap for pilotanlegg, se Tekstboks 3-1.

Figur 3-11: Høytemperatur varmepumpe ved Felleskjøpet i Trondheim som produserer damp ved ca. 120°C. Foto: Aneo Industry



Tekstboks 3-1: Pilotanlegg som har tatt i bruk høytemperatur varmepumper.

I 2021 ble en høytemperatur varmepumpe bygget og integrert ved TINE meieri Tunga i Trondheim. Dette pilotanlegget ble satt i drift sommeren 2021 og opererte totalt i 5050 timer over en periode på 10 måneder. To forskjellige driftsmoduser ble testet, med 1) is-vann og 2) overskuddsvarme fra det eksisterende kjøleanlegget som varmekilde. Varmepumpen kan produsere prosesskulde, dvs. is-vann ved 0°C, og prosessvarme, dvs. trykksatt varmt vann ved 115°C, samtidig. Det reduserte energiforbruket sammenlignet med direkte elektrisk oppvarming var rundt 55 prosent. Dette inkluderer besparelser på grunn av lavere bruk av det eksisterende kjøleanlegget under is-vannproduksjonsmodus.

Mer informasjon om pilotanlegget på Tine Tunga finnes [her](#).

Anslåtte realiserte og potensielle effekter

De viktigste effektene ved økt bruk av høytemperatur varmepumper er lavere energibruk, samt reduserte klimagassutslipp knyttet til at varmepumper kan erstatte fossildrevne varmesystemer.

I kvantifisering av energieffektivisering og reduserte klimagassutslipp gjør vi en rekke antakelser.⁵⁵ Vi antar energisparing på 66 prosent, altså 66 GWh spart per 100 GWh i forbruk erstattet med varmepumpe. Utslippskutt vil være betydelige der hvor varmepumpe erstatter fossildrevne varmforsyningssystem. I Norge er en stadig økende andel av industrien basert på elkjeler, som ikke medfører utslipp sett vekk fra eventuelle utslipp i produksjonen av elektrisk energi. Som en forenkling antar vi at alternativet til å installere ny varmepumpe i Europa ville vært å installere nye fossildrevne varmforsyningsprosesser, mens alternativet til å installere ny varmepumpe i Norge ville være å installere ny elkjel.

Forskningen har allerede ført til installasjon av pilotanlegg i Norge og Europa, og i noen grad kommersielle varmepumper. Basert på informasjon fra bransjeaktører er det installert et tosifret antall slike varmepumper i Norge, hvor den første ble installert rundt 2018. Basert på denne informasjonen kan vi anta at høytemperatur varmepumper leverer omtrent 300 GWh årlig i Norge i dag, som tilsvarer 200 GWh energi spart årlig. Omfanget av varmepumper i Europa som følge av forskningen er mer usikkert, men vi antar at det tilsvarer omtrent omfanget i Norge. Det gir tilsvarende redusert energibruk

⁵⁵ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

som i Norge, og i tillegg utslippskutt på 60 kilotonn CO₂ årlig (basert på studien omtalt nedenfor). Vi antar at antall varmepumper har fulgt en lineær utvikling fra 2018.

Vi beregner potensielle effekter globalt med grunnlag i en anerkjent studie av potensialet for høytemperatur varmepumper i Europa.⁵⁶ Studien peker på at totalt teoretisk mulig marked for varmepumper er 730 TWh årlig, tilsvarende om lag en tredjedel av Europas industrielle varmeprosesser. Gitt at dette teoretiske potensialet utnyttes, vil varmepumper bidra til redusert energibruk på 487 TWh og utslippsreduksjon på 146 mill. tonn CO₂. I konservativt scenario antar vi at den norske forskningen utløser varmepumper i 0,25 prosent av det europeiske markedet årlig, tilsvarende 5 prosent etter 20 år. I optimistisk scenario anslår vi 1 prosent av markedet årlig, tilsvarende 20 prosent etter 20 år. Vi antar at varigheten av effekter er 20 år, basert på at levetiden til varmepumper er rundt 20 år. Fra 2045 antar vi altså at andre forskningsmiljøer ville utviklet tilsvarende eller bedre løsninger, i et scenario hvor den norske forskningen ikke hadde skjedd.

Effektene globalt av forskningscasen er oppsummert i Tabell .

Tabell 3-10: Realiserte og potensielle effekter globalt av høytemperatur varmepumper fra forskningscasen.

Type global effekt	Realisert effekt 2018–2024	Potensielle effekter 2025–2044	Beskrivelse
 Reduserte klimagass-utslipp	0,2 mill. tonn CO ₂ e	77–307 mill. tonn CO ₂ e	Reduserte utslipp av CO ₂ ved erstatning av fossilbaserte varmeforsyningssystemer i Europa.
 Energi-effektivisering	1,6 TWh	255 TWh–1002 TWh	Redusert energibruk ved bruk av varmepumpe som erstatning for fossil-/elkjel
 Økt forsynings-sikkerhet	Positiv effekt	Positiv effekt	Økt forsynings-sikkerhet ved lavere bruk av elektrisk energi og dermed mindre belastning på strømnettet.

I tillegg vil varmepumpe indirekte bidra til reduserte klimagassutslipp ved å redusere energiforbruk, der deler av energimiksen kommer fra ikke-fornybare kilder.

Økte installasjonskostnader vil også isolert sett gi høyere kostnader ved varmepumper sammenlignet med alternativ teknologi, selv om lavere energibruk vil medføre lavere driftskostnader.

I beregning av samfunnsøkonomisk gevinst for Norge estimerer vi nåverdi av realiserte og potensielle effekter fra installasjon av varmepumper i Norge. Vi legger til grunn at høytemperatur varmepumper tilsvarende 300 GWh allerede er installert. Ifølge bransjeaktører vi har snakket med, er totalt realistisk potensial for varmepumpe i Norge rundt 6 TWh, som tilsvarer en total årlig energisparing på 4 TWh. I et optimistisk scenario antar vi at varmeforsyningsprosesser tilsvarende hele potensialet gradvis byttes ut med høytemperatur varmepumper i løpet av de neste 20 årene. I et konservativt scenario antar vi at 20 prosent av markedet gradvis blir byttet ut med varmepumpe i samme tidsperiode.

Vi ser foreløpig ikke at norske aktører kapitaliserer på denne kunnskapen internasjonalt. Den samfunnsøkonomiske gevinsten er derfor sannsynligvis begrenset til fordelene ved bruk av varmepumper i Norge. Det er likevel mulig at norske selskaper kan ekspandere til utlandet. Det er mulig

⁵⁶ de Boer, m.fl. (2020). Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat. Tilgjengelig [her](#).

at Norge kan få inntekter fra salg av varmepumpeteknologi til utlandet, men denne effekten er usikker og ikke prissatt.

Lavere kraftbehov gir også lavere effektbehov, og dermed økt forsyningssikkerhet av elektrisk strøm i Norge. Høytemperatur varmepumper vil kunne avlaste et overbelastet strømmnett og bidra til å lette utfordringene med at mange kommuner må si nei til forespørsler om tilknytning til strømmettet. Økt forsyningssikkerhet er vanskelig å verdsette, og vi inkluderer derfor denne som en ikke prissatt, men positiv, virkning.

Den prissatte samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge ligger på mellom 1,5 og 8,7 mrd. kroner, som oppsummert i Tabell 3-11.

Tabell 3-11: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge av implementering av høytemperatur varmepumper, fra 2018 og fram til 2045.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Redusert energibruk	3,1–13,5 mrd. kr
Økt installasjonskostnad	-1,6–4,8 mrd. kr
Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi	1,5-8,7 mrd. kr
Ikke prissatte virkninger	
Inntekter til Norge ved salg av varmepumpeteknologi	+
Økt forsyningssikkerhet	+

Det finnes flere barrierer som begrenser utbredelse av høytemperatur varmepumper. Barrierer inkluderer lav risikovillighet hos sluttbrukere knyttet til implementering av ny teknologi, lavt kunnskapsnivå om teknologien og dens potensial og tekniske og kostnadmessige integrasjonsutfordringer. Den største barrieren er sannsynligvis høye installasjonskostnader sammenlignet med konvensjonell teknologi. Forventet utvikling i gasspriser og politisk ønske om å bli mindre avhengig av gass har også betydning for om varmepumper blir et relevant alternativ til oppvarming i industrien. Høye strømpriser og/eller høye CO₂priser vil insentivere en raskere utskifting. Krav til elektrifisering og begrensninger på tilgjengelig kapasitet i strømmettet kan fungere som en pådriver for varmepumpeintegrasjon. I sum vil det ta tid før teknologien er kommersialisert, og utskifting til varmepumpe vil skje gradvis.

Ulike barrierer begrenser næringslivspotensialet i Norge, og fører til at norske leverandører sliter med å kapitalisere på den kunnskapen som er bygget opp, og derigjennom skalere og satse internasjonalt. Bransjerepresentanter forteller at det har vært vanskelig å finne risikokapital for å kommersialisere teknologien, og at vektlegging av kunnskapsdeling og publikasjoner fremfor patenter i norske forskningsmiljøer fører til at kunnskapen tas videre og er i ferd med å kommersialiseres av utenlandske aktører fremfor norske. FME-ene har en klar intensjon fra Forskningsrådet om å vektlegge kunnskapsdeling, publikasjoner og internasjonalt samarbeid. Samarbeidsavtalene oppfordrer til patentering av resultater om dette er aktuelt, men vil i praksis skje i dialog med industripartnere om de ønsker å finansiere slik aktivitet.

Forskningsrådets utløsende effekt

Forskere ved SINTEF oppgir at støtte fra Forskningsrådet var utløsende for å realisere forskningen. Det er dermed ikke sikkert at forskningen ville skjedd uten deres finansiering. Varmepumper har et stort potensial i industrien, men teknologien er foreløpig langt fra konkurransedyktig i de fleste land på grunn av lave gasspriser og høye strømpriser. Samtidig er det stor etterspørsel etter, og behov for teknologi, som kan redusere energibruk og utslipp i industrien.

Basert på intervjuer og markedsvurderinger har vi satt addisjonalitetsgrad til mellom 25 og 50 prosent for dette caset. Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet utløser forskningen i caset. Graden multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats. Vi vurderer at det er lite sannsynlig at forskningen hadde blitt gjennomført i samme omfang uten forskningsmidlene. Det er imidlertid mulig at forskningen ville blitt gjennomført på et senere tidspunkt, og i mindre omfang enn med finansiering.

Spredning av forskningsresultater

Resultatene fra forskningscasen er spredt i flere ulike kanaler, fra mediebidrag til vitenskapelige publikasjoner, som oppsummert i Tabell 3-12.

Tabell 3-12: spredning av forskningsresultater fra FMEet HighEFF og prosjekter som har bidratt til utviklingen av høytemperatur varmepumper.

Prosjekt	Publikasjoner
HighEFF	• 26 mediebidrag • 15 konferanseartikler • 1 bok • 9 rapporter/avhandlinger • 13 journalartikler
HeatUP	• 12 konferanseartikler • 4 mediebidrag • 4 rapporter/avhandlinger • 4 journalpublikasjoner
SkaleUP	• 2 konferanseartikler

Kunnskapen fra casen har blitt anvendt kommersielt. En rekke nye bedrifter har etablert seg eller videreutviklet kunnskap som følge av casen, inkludert Aneo Industri, Cadio, ToCircle, Olvondo, Enerin, og Epcon i Norge, samt en rekke globalt. Norge har vært tidlig ute med å utvikle varmepumpeteknologi, og det har vokst fram flere teknologileverandører sammen med forskningen. I dag lager rundt 50 bedrifter internasjonalt ulike komponenter til høytemperatur varmepumper, cirka en tidobling på ti år. I Norge fins det cirka 5 slike bedrifter.

Forskningscasen har også blitt brukt inn i andre forskningsprosjekter, eksempelvis for firmaet ToCircle, som er et samarbeid mellom SINTEF, NTNU og ToCircle, som leverer varmepumper til industrien.

3.6 Redusert fare for havari i vannturbiner

Oppsummering

Høy risiko for havari av turbiner i vannkraftverk ledet til forskningsprosjektet HiFrancis. Resultatene har ført til nye retningslinjer for design av høytrykks Francis-turbiner, som reduserer risiko for havari med 5 prosentpoeng i første leveår. Vi estimerer totalt 13-19 unngåtte havari i Norge og 57–211 unngåtte havari globalt dersom en gradvis bytter til turbiner med lavere havaririsiko i eksisterende og nye kraftverk. Det gir sparte reparasjonskostnader med en nåverdi mellom 1,4 og 2,9 mrd. kroner, og økt kraftproduksjon på mellom 19 og 48 TWh. Til sammenligning produserer norsk vannkraft omtrent 137 TWh årlig. Omtrent en tidel av disse effektene tilfaller Norge. Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge er mellom 1,3 og 1,7 mrd. kroner.

NØKKELINFORMASJON

Varighet: 2015–2019

Forskningsaktør: NTNU

Næringsaktører: EDR Medeso, Statkraft, Aker Solutions Hydropower, Voith Hydro, GE, Andritz

Oppnådd TRL-nivå: 9

Kort video om prosjektet [her](#).

FINANSIERING

Forskningsrådet: 8,8 mill. kr

Industri: 3,8 mill. kr

NTNU: 1,1 mill. kr

Tallfestede effekter

	Realisert 2019–2024	Potensielt 2025–2064
Økt produksjon av fornybar energi globalt	6,7 TWh	12,3–41,0 TWh
Reduserte kostnader globalt	0,8 mrd. kr	0,6–2,0 mrd. kr
	Nåverdi 2019–2064	
Samfunnsøkonomisk verdi for Norge		1,3–1,7 mrd. kr
Addisjonalitet Forskningsrådet*		50–75 %

*Tolkes som andel av effekter som kan tilskrives finansiering fra Forskningsrådet.

Bakgrunn for caset

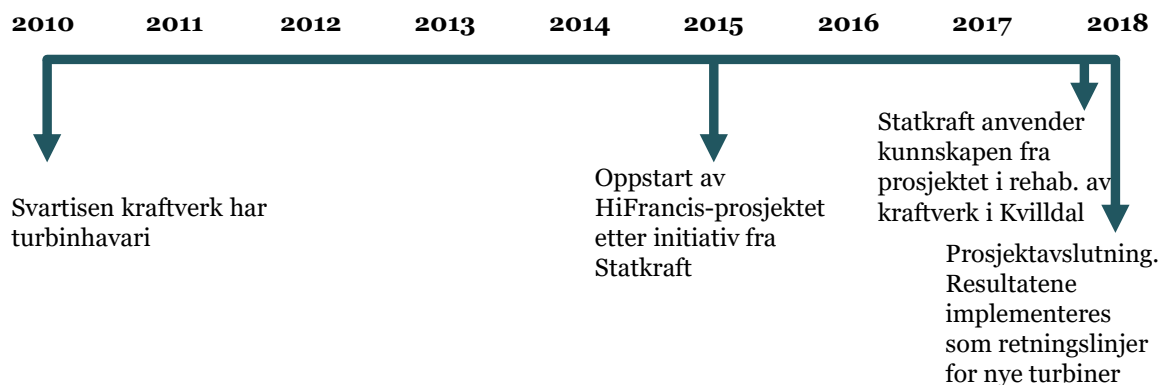
I et deregulert kraftmarked er det mer variasjon og større endringer i produksjonsmønstrene for vannkraften. Det innebærer hyppigere lastendringer, høyere oppetid og mer start og stopp av kraftverkene. Vannkraft er en regulerbar fornybar energikilde som kan balansere ut variabel produksjon fra uregulerbare kilder som solkraft og vindkraft. Produksjonen er derfor høyere i perioder med lite sol og vind, og omvendt. Endrede driftsmønstre har gitt hyppigere kjøring av kraftverkene på driftspunkt med større belastning, som også har gitt større slitasje på turbinene. Dette gjør at vannkraftverk må være mer robuste enn tidligere.

Mange av Norges vannkraftverk har installert høytrykks Francis-turbiner, som har vært beheftet med høy risiko for havari. Havari av turbinene fører til driftsstans ved vannkraftverk. Ofte oppstår havari i første driftsår, dersom det viser seg at turbinen ikke er tilpasset driftsmønsteret i kraftverket. Erfaringsdata viser at det historisk har vært 10 prosent sannsynlighet for at en ny Francis turbin med fallhøyde over 350 meter havarerer i løpet av første driftsår. Hovedproblemet er dannelsen av sprekker i turbinløpehjulet som stammer fra høye trykkamplituder eller resonans, som gjør at turbinen må byttes ut. Havari innebærer store økonomiske kostnader ved utskifting av turbin, driftsstans og tapt produksjon av energi på grunn av nedetid på kraftverket.

Forskningsaktiviteter og resultater

I 2010 måtte et 250 MW aggregat i Svartisen stanses på grunn av havari.⁵⁷ Det ble oppdaget sprekker i turbinen kort tid etter oppstart. Tilsvarende problemer opplevde en etter rehabilitering av Driva kraftverk og ved nye Lysebotn 2. I etterkant av havariet på Svartisen initierte Statkraft et forskningssamarbeid med FME-et HydroCen om forskningsprosjektet HiFrancis. Målet med prosjektet var å redusere sannsynligheten for havari. Tidslinjen for prosjektet er oppsummert i Figur 3-13.

Figur 3-12: Tidslinje med milepæler for HiFrancis-prosjektet.



Forskningen resulterte i utviklingen av forbedrede simuleringsmetoder for å forstå hvorfor det dannes sprekker. Forskningsaktiviteter inkluderte omfattende målinger og eksperimenter for å forstå fysikken i turbinenes løpehjul. Turbinprodusenter kan bruke denne kunnskapen for å designe mer robuste turbiner, som reduserer risikoen for resonans og havari. Sannsynligheten for havari i første leveår er antatt redusert fra 10 til 5 prosent for nye høytrykks Francis-turbiner som følge av forskningen. Hovedresultatet fra prosjektet var forbedrede metoder for beregning av fare for resonans som ville gi uønskede, store belastninger og sprekker. Som del av prosjektet ble det også utarbeidet en "Buyers guide" som gir kraftselskapene veiledning om hvilke krav de skal stille til leverandørene for at disse skulle dokumentere at de hadde tatt i bruk metodene ("beste praksis"). Forskningsresultatene er publisert og åpent tilgjengelige for alle å bruke.

Forskningsresultatene ble første gang anvendt da Statkraft planla fornyelse av turbinparken for Norges største vannkraftverk i Kvilldal i 2018. Løsningen kan anvendes i alle nye kraftverk som skal bruke høytrykks Francis-turbiner, eller ved utskifting av turbiner i eksisterende kraftverk.

Figur 3-13: Francis-turbin i lab. Foto: Juliet Landrø



⁵⁷Bjørkli (2010). Havari i Svartisen. Avisa Nordland. Tilgjengelig [her](#).

Anslåtte realiserte og potensielle effekter

Redusert risiko for havari har to hovedeffekter som tallfestes i denne forskningen.⁵⁸ For det første vil unngått produksjonsstans ved havari øke produksjonen av fornybar energi. For det andre vil færre havari innebære unngåtte reparasjonskostnader. I tillegg vil caset øke forsyningssikkerheten av kraft i Norge. Når risikoen for havari av vannkraftturbiner reduseres, øker stabiliteten i energiproduksjonen. Dette reduserer behovet for reservekapasitet.

Resultatene fra HiFrancis-prosjektet vil kunne anvendes ved utskifting av alle eksisterende høytrykks Francis-turbiner, samt ved installasjon i nye kraftverk. Norge har i underkant av 300 turbiner i drift, mens det trolig er over 3000 turbiner i verden.⁵⁹ Turbinene byttes ut omtrent hvert førtiende år, som vil si 7 nye turbiner nasjonalt og 80 nye turbiner globalt knyttet til utskifting. I tillegg vil det årlig installeres turbiner i nye kraftverk og i eksisterende kraftverk med behov for effektutvidelse, ca. 1 turbin årlig i Norge, og 10 i resten av verden.

En viktig forutsetning for beregning av effekter er spredning av forskningsresultatene, altså hvor mange turbiner som vil anvende resultatene. Vi antar at resultatene fra HiFrancis maksimalt kan tas i bruk for alle nye høytrykks Francis-turbiner i Norge og utlandet. Med førti års gjennomsnittlig levetid per turbin vil 5 prosentpoeng redusert sjanse for havari medfører maksimalt 0,4 unngåtte havari årlig i Norge, og maksimalt 4,5 unngåtte havari årlig i verden, gitt at alle turbiner anvender kunnskapen fra forskningscasen.

En annen viktig forutsetning er antatt *levetid* av innovasjonen, altså varighet av effektene. Vi antar at resultatene er maksimalt utnyttet fra 2019 til 2024, for alle nye turbiner globalt. Vi antar at effektene vil gi maksimal effekt fra 2019–2024. De neste 40 årene antar vi at 70–100 prosent av nye turbiner i Norge, og 30–90 prosent av turbiner totalt i verden får full effekt av resultatene. Det kan tolkes som at utbredelsen av resultatene ikke anvendes i alle nye turbiner, og/eller at det vokser fram alternative løsninger som gir redusert effekt. Etter 40 år antar vi at forskningsresultatene ikke lenger har en effekt på havari, fordi det brukes andre typer turbiner, og/eller det eksisterer andre løsninger som reduserer havaririsiko.

Totalt beregner vi 13–19 unngåtte havari i Norge og 57–211 unngåtte havari globalt. Størrelse på anslåtte effekter av unngått havari globalt er oppsummert i Tabell 3-13.

Tabell 3-13: Anslåtte effekter av redusert havari i Francisturbiner globalt. Om lag en tidel av effektene tilfaller Norge.

Type global effekt	Realisert effekt 2019–2024	Potensielle effekter 2025–2064	Beskrivelse
 Økt produksjon av fornybar energi	6,7 TWh	12,3–41,0 TWh	Økt produksjon som følge av unngått nedetid ved havari.

⁵⁸ Metode for beregning av effekter er nærmere beskrevet i Vedlegg A og Vedlegg B.

⁵⁹ Antall relevante turbiner i Norge er beregnet med utgangspunkt i [NVEs oversikt over vannkraftverk](#). Totalt antall relevante turbiner globalt er basert på data for totalt installert turbiner og framskriving om nye kraftverk fra [IHA World Hydropower Outlook](#).

Type global effekt	Realisert effekt 2019–2024	Potensielle effekter 2025–2064	Beskrivelse
 Reduserte kostnader (nåverdi)	0,8 mrd. kr	0,6–2,0 mrd. kr	Sparte reparasjonskostnader ved havari.
 Økt forsynings-sikkerhet	Positiv effekt	Positiv effekt	Økt forsyningssikkerhet ved mer stabil energiproduksjon med redusert risiko for avbrudd.
 Reduserte klimagassutslipp	Positiv effekt	Positiv effekt	Billigere og mer stabil fornybar energiproduksjon kan potensielt erstatte fossil energiproduksjon. (indirekte effekt)

Økt produksjon av fornybar energi kan også indirekte bidra til reduserte klimagassutslipp, dersom denne erstatter fossil energiproduksjon.

Vi anslår at den samfunnsøkonomiske gevinsten for Norge ligger på mellom 1,3 og 1,7 mrd. kroner, som oppsummert i Tabell 3-14. Denne gevinsten inkluderer kun verdiene som tilfaller Norge, og gevinsten for verden totalt sett er omtrent ti ganger høyere.

Tabell 3-14: Anslått samfunnsøkonomisk gevinst for Norge summert over perioden 2019–2064. Om lag en tredjedel av verdien er realisert.

Samfunnsøkonomisk nåverdi for Norge	
Prissatte virkninger	
Økt produksjon av fornybar energi	1 081–1 395 mill.kr
Reduserte reparasjonskostnader	218–281 mill. kr
Samfunnsøkonomisk prissatt netto nåverdi	1 299–1 676 mill. kr
Ikke prissatte virkninger	
Økt forsyningssikkerhet av fornybar strøm	+

Det er ingen åpenbare barrierer mot å realisere effekter fra forskningscasen. Det kan eksistere spredningsbarrierer dersom relevante aktører, særlig utenfor Norge, ikke har kjennskap til resultatene. På en annen side er kunnskapene fra prosjektet publisert og fritt tilgjengelig, og brukergruppene er profesjonelle aktører, inkluderte de viktigste globale leverandørene, med teknologisk spisskompetanse på feltet. Det er heller ikke forbundet med ekstra kostnader å ta i bruk kunnskapen.

Forskningsrådets utløsende effekt

HydroCen rapporterer at prosjektet ikke hadde blitt utløst uten forskningsmidlene fra NFR. Forskningsmidlene utløste også ekstern finansiering. Om lag 30 prosent av forskningsmidlene kom fra Statkraft og andre norske kraftselskap. Erfaringsmessig legger kraftselskapene stor vekt på NFRs faglige vurdering av prosjektforslagene som kommer fra FoU-sektoren i fellesfinansierte forskningsprosjekt. Det er derfor sannsynlig at prosjekter som ikke får tilsagn fra NFR heller ikke får støtte fra selskapene. Dette handler altså både om faglig evaluering og penger.

Oppsummert setter vi følgelig addisjonalitetsgraden til mellom 50 og 75 prosent for dette caset. Addisjonalitetsgrad henviser til i hvilken grad Forskningsrådet utløser forskningen i caset. Graden multipliseres med det beregnede verdibidraget ovenfor, for å anslå selve effekten av Forskningsrådets innsats. Vi vurderer at det er lite sannsynlig at forskningen hadde blitt gjennomført i samme omfang uten forskningsmidlene. Derimot var det stort behov for forskningen, slik at den kanskje hadde blitt gjennomført på et senere tidspunkt, og i mindre omfang enn med finansiering.

Spredning av forskningsresultater

HiFrancis-prosjektet har bidratt til å vise hva datasimuleringer kan bidra med for å utvikle vannkraftsindustrien. Prosjektet var en start på videre forskningsaktivitet som blir stadig mer relevant i et marked med økende etterspørsel etter regulerbar kraft.

Kunnskapen fra HiFrancis-prosjektet bygges videre på blant annet i [RenewHydro](#), som er en videreføring av FME-et HydroCen. Kunnskapen er blant annet relevant for utviklingen av pumpekraft, som innebærer at vann pumpes tilbake i vannreservoarer. Det innebærer hard kjøring av vannturbiner, som gir høyere sjanse for havari. Kunnskapen er grunnlag for det fullførte Horizon 2020-prosjektet «[HydroFlex](#)» og prosjektet «[Variabel drift av turbiner](#)».

Prosjektet har også hatt ringvirkninger til annen forskningsaktivitet. EDR Medeso, som er partner i prosjektet og jobber med utvikling og anvendelse av simuleringer, har firedoblet FoU-aktiviteten innen vannkraft etter oppstarten av HiFrancis. Resultatene fra HiFrancis-prosjektet kan også potensielt anvendes til beregninger knyttet til resonansproblemer i andre roterende maskiner, for eksempel kompressorer og sentrifugalpumper.

Totalt 27 vitenskapelige artikler har blitt publisert som del av HiFrancis, se oversikt [her](#).

CASEKATALOG

Vannkraft



Vindenergi



Solenergi



Biodrivstoff



Energibruk i bygg og områder



Energieffektivisering i industrien



Nullutslippstransport



Energisystemer



Co₂-håndtering



Vannkraft	TRL	Vindenergi	TRL	Solenergi	TRL
HiFrancis-turbiner - redusert fare for havari	8	Webapplikasjon for lokalisering av vindkraftverk	5	Avanserte metoder for drift og vedlikehold av solkraftverk	9
Feildeteksjon og prediksjon av levetid	6	Optimalisering av strømmettet til havs	5		
Oppgradering av sandfang i vannkraft-tuneller	8	Videreutviklet simulator for havvindturbiners respons på ulike sjø- og vindforhold	8	Flytende solkraftverk	7
ProdRisk-SHOP simulator for investeringsanalyser	7	Vindturbin simulator SIMA videreutvikling	7	Produksjon av høyren kvarts til produksjon av solcellematerialer	9
Miljø-DNA for overvåking av økologisk tilstand	7	Miljøvennlige sjøkabler for strømmett til havs	7		
Nye løsninger for sikker nedvandring av fisk forbi kraftverksinntak	8	Kostnadseffektiv produksjon av understell til havvindturbiner	4	Produksjon av monokrystallinsk silisium	9
Variabel hastighet for turbin og generator	5	Verktøy for å optimalisere marine operasjonerinstallasjon forav havvind	5		
Pumpekraft - ombygging og utvidelse av eksisterende kraftverk	7	SKARV: Metode for å unngå kollisjoner mellom fugler og vindturbiner	3		
Biodrivstoff	TRL	Energibruk i bygg og områder	TRL	Energieff. i industrien	TRL
Ressurstilgang til biodrivstoffproduksjon	9	Realisering av nullutslippsbygninger (ZEB-metoden)	8	CO2-baserte kjøle- og varmepumpesystem for supermarkeder	9
Utvidelse av biogassverdikjede	8	Energifleksibilitet og reduksjon/flytting av topplast	7	Økt utnyttelse av lavtemperatur overskuddsvarme	7
Biodrivstoff fra avfall	5	Energieffektivisering gjennom energiomlegging i bygg og områder	6	Integrerte energisystem for industrien	7
			7	Bruk av høytemperatur varmepumper i industrien	7
Prosess for å produsere bioolje	7	Smart ventilasjon med lave utslipp	7	Resirkulering av gass i metallproduksjon	6
HTL-basert produksjon av biodrivstoff	8	Metode for nullutslippsområder (ZEN)	7	Termisk energilagring og fleksibilitet	7
Nullutslippstransport	TRL	Energisystemer	TRL	CO ₂ -håndtering	TRL
Silisumbaserte nanomaterialer for litium-ion-batterier	6	Metode for risikobasert nettdrift	8	NCCS' bidrag for å muliggjøre fullskalaprojekt	7
		Transformatorforvaltning	9	CO2-fangst fra skip	7
PEM vannelektrolyse for tungtransport og industri	7			Fiskale målinger for flytende CO2	4
EIS-verktøy for levetidsstudier av brenselcelle	6	Feil- og avbruddshåndtering	7	Kostnadseffektive metoder for overvåking av CO2-lagring i undergrunnen	5
		Dynamisk drift av kraftledninger	9	Lavtrykks skipstransport av CO2	5
Laboratorium for batteri- og hydrogengasseksplasjonstester	6	Økt overføringskapasitet på kraftkabler	9	Lavutslipp hydrogenproduksjon basert på membran teknologi	5
		Ladeinfrastruktur i kraftsystemet		Redusert tap av solventer ved fangst av CO2	7
Verktøy for beregning av energi og utslipp i sjøtransport	7		7	Ren og effektiv forbrenning av hydrogen i gasturbiner	6
ZETruck-metode for integrert kostnads- og miljøanalyse av nullutslippslastebiler	-	Industriell fleksibilitet opp mot kraftsystemet	7	Økt lagringskapasitet og redusert risiko gjennom forkastningsanalyser	5
		Planlegging av kraftnett hensyntatt fleksibilitet	6	Modell for beregning av løpende brudd i CO2-rørledninger	4

4 Introduksjon til casekatalogen

Casekatalogen inneholder et utvalg av 60 innovasjoner, caser, fra ni ulike forskningsområder, se Tabell 4-1. Hvert forskningsområde er representert med mellom 4 og 10 case. Et case er avgrenset og definert av innovasjonen som blir bragt fram, og kan være sammensatt av flere forskningsprosjekter. Casene omfatter ikke bare forskningsaktivitet innenfor FME-ene, men også tilknyttet forskning innenfor forskningsområdene. Det betyr at caser kan inneholde prosjekter som er dekket av andre deler av virkemiddelapparatet enn FME-ordningen.

Casene er valgt ut og beskrevet casene av FME-er innenfor hvert forskningsområde, og Menon Economics og Multiconsult har sammenstilt og redigert informasjonen. Tallfestede effekter er beregnet av FME-ene. Menon Economics og Multiconsult har gjort rimelighetsvurderinger, men ikke vurdert FME-enes anslag utover dette. Det betyr at FME-ene står bak innholdet i casene. Tabell 4-1 gir oversikt over FME som har bidratt til casekatalogen.

Tabell 4-1: Oversikt over FME som har definert case innenfor hvert forskningsområde.

Tematisk område	FME
Vannkraft	HydroCen
Vindenergi	NorthWind
Solenergi	SuSolTech
Biodrivstoff	Bio4Fuels
Energibruk i bygg og områder	ZEN
Energieffektivisering i industrien	HighEFF
Nullutslippstransport	MoZEES
Energisystemer	CINELDI
CO ₂ -håndtering	NCCS

Rapporten tar utgangspunkt i syv potensielle effekter, beskrevet i Tabell 4-2. Hvert case er skjønnsmessig huket av for hvilke typer effekter caset har. Avkryssede effekter er direkte og betydelige, de kan være oppnådd eller de kan forventes å bli utløst i fremtiden. Antall avkryssede effekter ikke sier noe om total sammenlagt effekt av et case, fordi størrelse på avkryssede effekter varierer.

Casene kan i tillegg ha bidratt til effekter som ikke er avkrysset, enten indirekte eller i mindre grad. For eksempel vil økt fornybar energi som regel føre til reduserte klimagassutslipp. Dette er imidlertid en indirekte, annenordens og mer usikker effekt som ikke forsøkes anslått.

Tabell 4-2: Definisjon av effekter.

Type effekt	Beskrivelse
Økt produksjon av fornybar energi	Oppstår ved å muliggjøre mer utbygging av fornybare energikilder, redusert nedetid av produksjon.
Energieffektivisering	Oppstår ved redusert energibruk per produserte eller konsumerte enhet, dvs. mer effektiv energibruk.
Reduserte klimagassutslipp	Oppstår ved å fortrenge fossile drivstoff, fortrenging av utslippsintensiv teknologi, eller ved fangst av klimagassutslipp.

Type effekt	Beskrivelse
Redusert miljøpåvirkning	Oppstår ved mindre belastning på natur og miljø, for eksempel ved redusert materialbruk, eller færre/mer skånsomme naturinngrep.
Økt forsyningssikkerhet	Oppstår ved å øke energitilgang, effektsikkerhet, leveringspålitelighet av strøm, eller ved økt energifleksibilitet.
Reduserte kostnader	Oppstår ved å lavere produksjonskostnader, lavere investeringskostnader, lavere kostnader til drift/vedlikehold, etc.
Næringslivspotensial	Oppstår ved økt verdiskaping.

Oppgitt TRL-nivå indikerer innovasjonens modningsnivå, som illustrert i Figur 4-1. Når ulike deler av caset har oppnådd ulike TRL-nivå, eller nivået ligger mellom ulike tall har vi skjønnsmessig satt TRL-nivå. For andre case ikke er naturlig å sette TRL-nivå, der er TRL-skalaen utelatt. Årsaker kan være at innovasjonen er av en type TRL-skalaen tradisjonelt ikke benyttes, for eksempel når innovasjonen er et utviklet metodeverk, definisjon eller ved kartlegging.

Figur 4-1: Beskrivelse av ulike TRL-nivå.

TRL-nivå	Beskrivelse av teknologiens modningsnivå	Kategorisering
1	Basale prinsipper observert gjennom basalforskning	Forskning
2	Formulering av teknologiske konsepter gjennom anvendt forskning	Forskning
3	Eksperimentell støtte for konseptets validitet	FoU
4	Validering av teknologien i laboratorium	FoU
5	Validering av teknologien i et relevant miljø (industriell relevans)	Pilot
6	Demonstrasjon av teknologien i et relevant miljø (industriell relevans)	Pilot/demo
7	Demonstrasjon av en prototype i et operasjonelt (drifts-)miljø	Demo
8	Kvalifisering(sertifisering) og ferdigstilling av teknologien/systemet	Demo
9	Teknologien/systemet er påvist drivverdig (konkurransedyktig og relevant)	Markedsintro

5 Vannkraft



5.1 HiFrancis-turbiner – redusert fare for havari

Høytrykks Francis (HF) vannkraftturbiner har ved flere tilfeller havarert som følge av resonans i løpehjulet i turbinen. Utviklede metoder og prosedyrer som turbinprodusentene kan anvende når nye turbiner skal designes, halverer sannsynligheten for havari i nye HF-turbiner.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Vi estimerer totalt 13-19 unngåtte havari i Norge og 57–211 unngåtte havari i resten av verden
- Det gir sparte reparasjonskostnader globalt med en nåverdi mellom 1,4 og 2,9 mrd. kroner, og økt fornybar kraftproduksjon globalt på mellom 19 og 48 TWh

Forskningsaktører: NTNU

Næringsaktører: EDR Medeso, Statkraft, Aker Solutions, Voith Hydro, GE, Andritz



Francisturbin i lab. Foto: Juliet Landrø

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓	✓	✓

Prosjektet fokuserte på utfordringer knyttet til høytrykks Francis (HF) vannkraftturbiner, som ved flere anledninger har havarert på grunn av resonans i løpehjulet. Erfaringsdata viser at det er 10 prosent sannsynlighet for at en ny HF-turbin havarerer i løpet av det første driftsåret. For å adressere dette ble HiFrancis-prosjektet initiert, der omfattende målinger og eksperimenter ble gjennomført for å forstå fysikken i turbinenes løpehjul.

Forskningen resulterte i utviklingen av nye simuleringsmetoder og validerte prosedyrer som turbinprodusenter kan bruke for å designe mer robuste turbiner. Dette reduserer risikoen for resonans og havari.

Effekter:

- Økt produksjon av fornybar energi: Redusert risiko for produksjonsstans og strømutkoblinger øker forsyningssikkerheten og reduserer samfunnskostnader.
- Reduserte klimagassutslipp: Økt fornybar energiproduksjon erstatter behovet for fossil energi, noe som bidrar til lavere klimautslipp både nasjonalt og globalt.
- Redusert miljøpåvirkning: Ved å øke energiproduksjonen i eksisterende vannkraftverk uten ytterligere miljøpåvirkning, unngår en negative konsekvenser knyttet til fossil energiproduksjon.
- Økt drifts- og forsyningssikkerhet: Sannsynligheten for resonans og havari i nye HF-turbiner antas å reduseres fra 10 til 5 prosent.

Samlet sett bidrar forskningen til mer pålitelig og bærekraftig vannkraftproduksjon, med betydelige økonomiske og miljømessige gevinster.

5.2 Feildeteksjon og prediksjon av levetid

Feildeteksjon i elektriske maskiner kan spare industrien for enorme summer. Ved bruk av smarte sensorer og kunstig intelligens overvåkes tilstanden til elektriske maskiner. Dette gjør det mulig å minimere uplanlagt nedetid og forlenge levetiden til utstyret.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Tidlig feilavdekking øker leveringspålidelighet, spesielt i kritiske perioder som vinterhalvåret for magasinkraftverk og snøsmelting for elvekraftverk.
- Tidlig deteksjon av feil som statorviklingsfeil kan unngå kostbare reparasjoner og lang nedetid.

Forskningsaktører: NTNU

Næringsaktører: Statkraft, Hafslund ECO (Eidsiva), Vattenfall



Ny teknologi utnytter magnetfelt for å oppdage feil i generatorer. Foto: Juliet Landrø

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓	✓		✓	✓	✓	✓

Det genereres mye driftsdata gjennom lokal-kontroll og vern, men disse dataene brukes i liten grad til beslutninger om vedlikehold og reinvesteringer. Dette caset startet med en henvendelse fra Eidsiva (nå Hafslund) og Vattenfall om bruk av data fra SCADA-systemet i kraftstasjonene for å kunne finne visse typer feil i generatoren. Dette viste seg ikke å føre fram. Imidlertid viste deg seg at en kunne finne flere typer feil i generatoren ved å måle magnetfeltet inne i maskinen (luftgapet) kombinert med signalanalyse. Prosjektet har derfor hatt som mål å kunne detektere et bredt utvalg av feil ved bruk av lavkost sensorer kombinert med avansert signalanalyse.

Med dette som bakgrunn ble et PhD-prosjekt definert og startet opp i 2018. Ganske raskt viste deg seg at en kunne oppnå nesten samme resultat ved å måle det magnetiske sprefeltet rett utenfor generatoren. Dette er mye enklere og kan gjøres med veldig rimelige sensorer. Imidlertid må en bruke ulike avanserte metoder for signalanalyse for å kunne finne typen feil og noen ganger alvorlighetsgrad. Metoden har høy følsomhet, slik at feil kan detekteres tidlig. Arbeidet har bestått i numerisk analyse av generatorer med ulike feil, for ved bruk av signalanalyse å identifisere den "magnetiske signaturen" til ulike feil. Simuleringene er verifisert i NTNU sine laboratorier og ved ulike felt-tester hos Statkraft og Eidsiva (Hafslund).

Den utviklede metoden har vist seg effektiv i å identifisere 7-8 typer feil i generatoren. I tillegg kan metoden sannsynligvis detektere flere typer feil også i andre typer elektriske maskiner. Det er utviklet sensorer og system for innhenting og analyse av måledata. Metoden er patentert og danner noe av IPR for selskapet AIMSES AS. Metoden kan øke produksjonen i høyprisperioder og har potensial for anvendelse i andre sektorer, som maritime og offshore. AIMSES AS har utviklet et monitoreringssystem basert på metoden, som kan bidra til verdiskapning og eksport.

5.3 Oppgradering av sandfang i vannkraft-tuneller

En innovativ løsning for forbedring av sandfang i norske vannkraftverk kan øke effektiviteten og redusere vedlikeholdskostnader. Estimer viser at løsningen kan gi 7,5 GWh økt produksjon og spare 5 mill. kroner i reparasjonskostnader årlig på nasjonalt nivå.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Viktige effekter:

- Estimer viser at løsningen kan øke virkningsgraden ved Tonstad kraftverk med 0,11 prosent, som tilsvarer 1,5 GWh ekstra, og redusere risikoen for skade på turbiner med 1 mill. kroner årlig fra 2025.
- Hvis flere kraftverk tar i bruk denne løsningen, kan det føre til 7,5 GWh økt produksjon og spare 5 mill. kroner i reparasjonskostnader per år nasjonalt.



Forskningsaktører: NTNU

Næringsaktører: Sira-Kvina kraftselskap

Optimal fangst av sedimenter før de havner inne i turbinen kan spare kraftprodusentene for store beløp i vedlikeholdskostnader. Foto: Livia Pitorac

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓				✓	✓	✓

Vannkraftverk i Norge er en viktig kilde til fornybar energi, men mange står overfor utfordringer knyttet til sand og stein som følger med vanninntaket. Dette kan skade turbiner, ventiler og andre deler av kraftverket, noe som reduserer virkningsgraden. En kartlegging utført av HydroCen har vist at kraftverk med en kapasitet på over 5000 MW er berørt av dette problemet. Dagens løsning, sandfang, fungerer ikke optimalt, og vedlikeholdet er både tidkrevende og kostbart.

NTNU, Sira-Kvina kraftselskap og Graz tekniske universitet har samarbeidet om å utvikle en kostnadseffektiv løsning for å forbedre eksisterende sandfang. Målet har vært å lage en teknologi som kan installeres raskt og enkelt, uten behov for store inngrep som sprengning. Løsningen har blitt testet både gjennom numeriske simuleringer og fysiske modellforsøk ved NTNU. Sira-Kvina har fått støtte fra ENOVA for å bygge en pilotløsning, som nå er i ferd med å ferdigstilles ved Tonstad kraftverk, og skal settes i drift våren 2025.

Forskningen har ført til utviklingen av en innovativ løsning som er gjennomtestet og klar for implementering i et av Norges mestproduserende kraftverk, Tonstad. Denne teknologien har gått hele veien fra idé til kommersiell beslutning, og den har potensial til å øke effektiviteten i norske vannkraftverk.

5.4 ProdRisk-SHOP simulator for investeringsanalyser

Kraftprodusentene ønsker å oppnå kostnadseffektiv drift av komplekse vassdrag samtidig som de tar hensyn til miljø og livet i vassdragene. Gjennom forskningen er det utviklet et nytt simulatoroppsett for teknisk-økonomiske analyser av lønnsomhet og konsekvenser av potensielle effektutvidelser for vannkraft.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Simulatoren kan bidra til investeringsbeslutninger for 5-10 GW ny og oppgradert vannkraft. Oppgraderingene kan føre til ca. 5 % bedre utnyttelse av eksisterende energiresurser.
- Simulatoren har et direkte økonomiske potensial på 5-10 mill. kr per år, målt i potensielle analyseoppdrag.
- Simulatoren kan bidra til å redusere investeringsrisiko for produsenter.

Forskningsaktører: SINTEF Energi

Næringsaktører: Statkraft, Eviny, Hafslund



Utviklingen ble gjort i nært samarbeid med brukerpartnerne.

Foto: Juliet Landrø

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓	✓	✓

Caset fokuserte på tekno-økonomiske analyser for effektutvidelse i eksisterende vannkraftsystemer. For å gjøre robust vurdering, må det tas hensyn til fleksibiliteten i vannkraftsystemet og samspillet med resten av kraftsystemet. Dette krever god representasjon av både fysiske detaljer og usikkerheter knyttet til tilsig og markedspriser. Prodrisk og SHOP, to vel-etablerte teknisk-økonomiske modellverktøy, ble brukt for å adressere disse utfordringene og gjennomføre konsistente analyser.

En modellkobling kalt Prodrisk-SHOP simulator ble utviklet for å kombinere styrkene til Prodrisk (sesong planlegging av vannkraftproduksjon under usikkerhet) og SHOP (detaljert fysisk representasjon av vannkraftsystem). En prototype ble utviklet i HydroCen og gjort tilgjengelig for bransjen. Simulatoren ble videre brukt i analyseprosjekter for vannkraftaktører, og kunnskapsformidling ble gjennomført via opplæring og diskusjoner.

Forskningen etablerte en beste praksis for investeringsanalyser, spesielt for effektutvidelser. Prodrisk-SHOP muliggjør en mer systematisk og robust vurdering av både økonomiske og tekniske aspekter, med hensyn til usikkerhet og detaljert representasjon av vassdrag. Dette gir bedre beslutningsgrunnlag for effektutvidelser, spesielt ved å redusere usikkerhet og risiko for investeringer. Simulatoroppsett har allerede ført til flere analyseprosjekter i bransjen. Videreutvikling av simulatoren kan på sikt åpne for kommersialisering og utstrakt bruk av simulatoren i investeringsanalyser for effektutvidelser.

5.5 Miljø-DNA for overvåking av økologisk tilstand

En ny metode basert på miljø-DNA (eDNA) gir bedre innsikt i hvordan vannkraft påvirker biologisk mangfold i norske elver. Metoden er enkel, kostnadseffektiv og vil gjøre det lettere å overvåke økologisk tilstand og effekten av miljøltiltak over tid.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Viktige effekter:

- Metoden gjør miljøovervåking enklere og billigere, og åpner for overvåking av flere elver.

Forskningsaktører: NINA, SINTEF

Næringsaktører: Miljødirektoratet, Hafslund Eco, Agder Energi, Vattenfall



Miljø-DNA kan samles inn ved å ta en enkel vannprøve og presse det gjennom et filter.

Foto: Juliet Landrø

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓		✓	

Vannkraft er en viktig energikilde for Norge, men produksjonen kan påvirke det biologiske mangfoldet i elvene. Dagens metoder for å overvåke denne påvirkningen er dyre og tidkrevende, samtidig som kravene til bærekraftig drift øker, særlig i lys av EU-taksonomien. Det er derfor behov for nye og mer effektive verktøy for å vurdere miljøtilstanden i elver.

I dette prosjektet har forskere gjennomført en landsdekkende studie av biologisk mangfold i elver med ulik påvirkning av vannkraft. Et stort antall miljø-DNA prøver er samlet inn fra flere hundre elver, med fokus på analyser av bunndyr og fisk. Samarbeidet har involvert både forskningsmiljøer og kraftprodusenter, og har blitt støttet av HydroCen.

Resultatene er fortsatt under analyse, men miljø-DNA har allerede vist seg å være lovende: metoden gir en mer kostnadseffektiv vurdering av økologisk tilstand, og som inkluderer informasjon om langt flere arter, enn dagens metoder. Miljø-DNA gjør det lettere å overvåke endringer over tid, og rimelige analyser gjør det enklere for flere aktører å samle inn viktige data.

I sum gir Miljø-DNA en mer helhetlig informasjon om effekten av vannkraft på biologisk mangfold. Metoden gjør miljøovervåking enklere og billigere, og åpner for overvåking av flere elver. Metoden støtter også næringslivet i å dokumentere økologisk tilstand og overvåke tiltak i tråd med EU-taksonomien.

5.6 Nye løsninger for sikker nedvandring av fisk forbi kraftverksinntak

En innovativ løsning for tryggere nedstrøms fiskepassasje ved kraftverksinntak har vist imponerende resultater. Ved å kombinere et flytende ledegjerde og vannstrømbasert styring, oppnådde prosjektet både høy effektivitet og et betydelig teknologisk gjennombrudd.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Andelen fisk som passerte trygt økte fra under 20 til 80 prosent, med betydelig lavere kostnader enn tradisjonelle løsninger.
- Ledegjerder kan installeres med lite eller ingen krafttap.
- Teknologien kan brukes der fisk i dag ikke er beskyttet.
- Teknologien markedsføres nå i Norge og Europa, med det første norske anlegget implementert i Mandalselva.



Foto: Steis Mek. Verksted AS

Forskningsaktører: NINA, NTNU, SINTEF, ETH Zürich

Ledegjerdet i Mandalselva, ved inntaket til Laudal kraftverk, var en imponerende suksess.

Næringsaktører: Å Energi, Steis Mekaniske Verksted AS

Foto: Steis Mekaniske verksted

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓		✓	✓

Fisk som vandrer nedstrøms i elver med vannkraftverk møter ofte store utfordringer. Mange blir skadet eller drept av turbinene, og dagens løsninger for å beskytte fisken er ofte dyre, teknisk krevende og lite effektive. Dette skaper store problemer for fiskebestander og truede arter i regulerte vassdrag. Derfor har det vært et akutt behov for å utvikle mer kostnadseffektive og bærekraftige løsninger som kan beskytte både fisk og kraftproduksjon.

Med støtte fra FME HydroCen og internasjonale samarbeidspartnere ble et innovativt prosjekt gjennomført i Mandalselva. Et 85 meter langt flytende ledegjerde ble installert foran et kraftverksinntak for å lede fisken trygt forbi turbinene. Prosjektet inkluderte forskere fra Norge og ETH Zürich, tekniske eksperter og biologer, og strakk seg over flere år.

Ledegjerdet viste en effektivitet på nær 80 prosent, og teknologien nådde et modent utviklingsnivå. Den innovative bruken av vannstrømmer viste også seg å være svært effektiv. Dette åpner for nye muligheter innen bærekraftig forvaltning av elveøkosystemer og gjør det enklere å kombinere kraftproduksjon med miljøhensyn.

5.7 Variabel hastighet for turbin og generator

Modifikasjoner til Francis-turbinen kan gjøre den bedre tilpasset til å operere med variable turtall. Vannkraft-turbiner med variabel rotasjonshastighet (turtall) vil muliggjøre mer ikke-regulerbar fornybar energi i energisystemer.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Muliggjør mer ikke-regulerbar fornybar energi i energisystemer
- Vannkraft-turbiner balanserer energiproduksjon og -forbruk, som igjen øker forsyningssikkerheten.
- Bedre utnyttelse av eksisterende kraftverk reduserer behovet for nye kraftverk.



Forskningsaktører: NTNU, SINTEF

Næringsaktører: Aker solutions, Statkraft, Eidsiva Energi, Multiconsult

Forskning viser at design og modifikasjoner til Francis-turbinen kan gjøre den bedre tilpasset til å operere med variable turtall. Foto: Juliet Landrø

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓				✓	✓	✓

Kjøring på driftspunkter som avviker sterkt fra beste driftspunkt er en viktig årsak til belastning og slitasje i vannkraftverk. Variabelt turtall kan gjøre det mulig å utnytte turbinene bedre, med mindre skadelig belastning. Prosjektet har fokus på hvilke endringer i turbindesign som er ønskelig for en maskin som skal kjøres med variabelt turtall.

Det er gjennomført design av en Francis turbin som skal operere med variabelt turtall. Turbinen er testet i [Vannkraftlaboratoriet](#) og resultatene verifiserer de numeriske og teoretiske beregningene om fleksibilitet. Forskningen har resultert i utvikling av designverktøy for Francis turbiner og verifisering av fleksibilitet for nye turbindesign.

Effekter av resultatene:

- 1) Vannkraft-turbiner med variabel rotasjonshastighet muliggjør mer ikke-regulerbar fornybar energi.
- 2) Reduksjon av fossile energikilder. Andel av fornybar energi kan økes kraftig da vannkraft turbiner med variabel rotasjonshastighet kan balansere større andel av ikke-regulerbare fornybare energikilder som for eksempel vind og sol. Dette vil redusere klimautslipp betydelig.
- 3) Vannkraft-turbiner vil være en av de store aktørene som kan balansere energi-produksjon og energi-forbruk. Da ikke-regulerbare energikilder ikke kan balansere dette, vil vannkraftverk kunne være den energikilden som balanserer dette. Når vi introduserer variabel rotasjonshastighet, vil forsyningssikkerheten øke da dette øker fleksibiliteten og kapasiteten til å balansere energisystemet.
- 4) Med bedre utnytting av de ikke-regulerbare energikildene, kan kostnader reduseres med færre kraftverk.
- 5) Turbin-, generator- og frekvensomformer-leverandører kan utnytte dette potensialet. I tillegg vil kraftselskap som investerer i denne type teknologi kunne levere mer energi og effekt.

5.8 Pumpekraft – ombygging og utvidelse av eksisterende kraftverk

Ombygging og utvidelse av eksisterende vannkraftverk til pumpekraftverk kan tillate økende innfasing av uregulerbar vind- og solenergi, samtidig som store økonomiske og naturmessige kostnader unngås ved å oppgradere eksisterende vannkraftverk.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Pumpekraftverk bidrar til å balansere uregulerbar sol- og vindkraft.
- Ved å bygge om to av kraftverkene i caset til pumpekraftverk vil inntekten til kraftverkene øke med 1,7 prosent.
- For de fire kraftverkene i caset ga ombygging kostnader på 13-33 prosent sammenlignet med bygging av helt nye pumpekraftverk, noe som tilsvarer sparte kostnader på 1550–3500 mill. kroner per kraftverk.



Forskningsaktører: NTNU

Næringsaktører: Sira-Kvina kraftselskap, Statkraft.

Vannmagasiner kan lagre enorme mengder energi som kan brukes til pumpekraft.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓	✓	✓

Caset fokuserte på muligheten for å oppgradere eksisterende vannkraftverk til pumpekraftverk, noe som kan gi fleksibilitet til å pumpe vann tilbake til magasiner i perioder med lav etterspørsel, og lagre det til etterspørselen blir høy. Dette reduserer behovet for å bygge nye og kostbare pumpekraftverk, da eksisterende vannkrafttunneler kan utnyttes. Imidlertid måtte det testes om tunnelsystemene vil tåle de ekstra påkjenningene fra pumping, og hvilke tiltak som eventuelt måt gjøres.

Prosjektet undersøkte oppgradering av vannkraftanlegg, med spesielt fokus på Roskrepp kraftverk eid av Sira-Kvina, og studerte allerede aktive pumpekraftverk i Norge for å identifisere løsninger på utfordringer knyttet til tunnelsystemer. Forskningen konkluderte med at det er mulig å oppgradere Roskrepp kraftverk til pumpekraftverk med mindre endringer på tunnelsystemet. Hovedfokuset var å utbedre svingekammeret for å håndtere reversert vannstrøm under pumping, og det ble funnet at bekkeinntak har en positiv effekt på trykkreguleringen i tunnelen.

Ved å bygge om to av de undersøkte kraftverkene i caset til pumpekraftverk vil inntektene til kraftverkene øke med 1,7 prosent, siden dette gir kraftprodusenten mulighet til å planlegge produksjonen etter når prisene er høyest. En annen effekt er sparte kostnader ved å bygge om eksisterende vannkraftverk, kontra å bygge helt nye pumpekraftverk. For de fire undersøkte kraftverkene i caset ga ombygging kostnader på 13-33 prosent sammenlignet med bygging av helt nye pumpekraftverk, noe som tilsvarer sparte kostnader på 1550–3500 mill. kroner per kraftverk.

6 Vindenergi



6.1 Webapplikasjon for lokalisering av vindkraftverk

ConSite Wind er en nettbasert applikasjon for å balansere sosio-økologiske og økonomiske avveininger i lokalisering og planlegging av vindkraftprosjekter. Med ConSite Wind blir planleggingen av vindkraft mer bærekraftig, inkluderende og effektiv – til fordel for både naturen og samfunnet.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- ConSite Wind predikerer og visualiserer områder for mulig vindkraftutbygging, mht. restriksjoner, sosiale og økologiske interesser, vind- og produksjonspotensial, nettilgang og produksjonskostnader.
- Verktøyet kan brukes til å finne egnede utviklingsområder, områder hvor avbøtende tiltak er påkrevd, og områder som bør unngås på grunn av høyt konfliktnivå per kWh.



Forskningsaktører: NINA

Næringsaktører: Vindkraftutbyggere

ConSite Wind – skjermbilde av kartbaserte planverktøyet. Bilde: NINA

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓		✓	✓

Utbygging av vindkraft er en viktig del av det grønne skiftet, men planleggingen av nye anlegg møter ofte motstand og utfordringer. Konflikter mellom utbyggere, myndigheter, lokalsamfunn og naturverninteresser kan forsinke eller stoppe prosjekter. Det er derfor avgjørende med verktøy som sikrer en mer balansert, gjennomiktig og effektiv beslutningsprosess for lokalisering av vindkraftverk.

For å møte dette behovet har forskere utviklet [ConSite Wind](#), et digitalt verktøy for planlegging av vindkraftprosjekter. Verktøyet kombinerer metoder for beslutningsanalyse og arealplanlegging, og tar hensyn til teknologiske, miljømessige og samfunnsmessige faktorer. Forskningen er et samarbeid mellom akademia, industri og myndigheter, med støtte fra flere forskningsprosjekter, inkludert FME-sentre. Betaversjoner av nettapplikasjonen og datakatalogen er i drift, og vil videreutvikles i 2025.

ConSite Wind gjør det mulig å identifisere egnede områder for vindkraftutbygging, områder med moderat konfliktpotensial som krever avbøtende tiltak, og områder som bør unngås. Verktøyet baserer seg på ulike kartlag og datakilder, brukerdefinerte preferanser og en "trafikklysmode" som gir en visuell fremstilling av utbyggingsmuligheter. Dette gir beslutningstakere en solid kunnskapsbase for mer presise vurderinger og reduserer risikoen for konflikter i senere faser.

Verktøyet øker forutsigbarhet og transparens i planleggingen, bidrar til å effektivisere søknadsprosessen ved tidlig identifisering av konfliktområder og mulighetsrom, og bidrar til å sikre bedre integrering av miljøhensyn og samfunnsinteresser i utbyggingsplaner. Dette reduserer kostnader og tidsbruk for utbyggere og myndigheter.

6.2 Optimalisering av strømmettet til havs

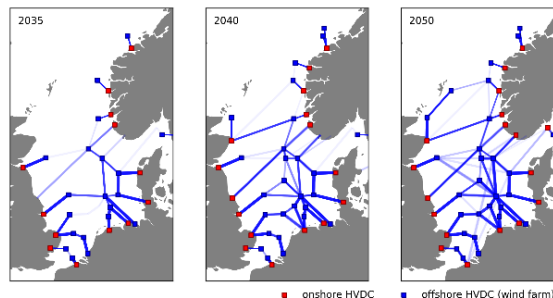
Det er store ambisjoner for havvindutbygging, og et sentralt spørsmål er hvordan tilhørende nettinfrastruktur til havs bør bygges ut slik at den gir mest verdi for samfunnet. Ved hjelp av optimaliseringsverktøyet PowerGIM reduseres total kostnadene ved slik utbygging med 6 prosent.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- 6 prosent lavere total kostnader (investeringer pluss strømproduksjonskostnad) med optimalisert nett sammenlignet med direkte tilkobling av hver vindpark til strømmettet på land*
- Økt fornybar energi og reduserte CO₂-utslipp gjennom raskere utbygging av havvind
- Teknologiekspert og arbeidsplasser hos norske leverandører.



Illustrasjon av optimalisert havnettutbygging i Nordsjøen. Illustrasjon: SINTEF

Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU

Næringsaktører: Fred Olsen Seawind, Hafslund, DeepWind Offshore, Statnett

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓		✓	

Utbygging av strømmettet krever enorme investeringer med lang levetid, samtidig som det alltid vil være usikkerhet om framtidens energisystem. Ettersom utbyggingen av strømmettet til havs vil skje steg for steg er det viktig å identifisere de mest effektive tiltakene som best balanserer langsiktig og kortvarig nytte.

SINTEF Energi og NTNU har over mange år utviklet og anvendt numeriske optimaliseringsverktøy som PowerGIM for å identifisere økonomisk gunstige investeringer i nettinfrastruktur til havs. Den nyeste videreutviklingen har fokusert på metodeutvikling for å regne mer effektivt med usikre parametre, dataprosessering og analyser for tolking og illustrasjon av resultater, samt case-studie-analyser med 30 GW havvind i Norge.

OceanGrid prosjektet ved SINTEF Energi har ført til 1) identifikasjon av generelle utbyggingstrekk som bidrar til optimal utbygging, 2) analyser med fokus på Nordsjøen og 30 GW norsk havvind som viser betydelig forbedring i kost-nytte med optimalisert nett, 3) oppdatert åpen kildekode for å regne på optimal stegvis nettutbygging til havs.

Et optimalisert nett gir 6 prosent lavere total kostnader for samfunnet sammenlignet med radiale tilkoblinger av hver vindpark til strømmettet på land, og bedre utnyttelse av utbygd kapasitet til havs. En mer optimalisert nettutbygging vil også muliggjøre en bedre ressursutnyttelse som gir mindre tap av «innesperret energi» i perioder med høy produksjon, bedre utbyggingstakt og høyere verdi av eksisterende kraftproduksjon. Videre kan arbeidet gi teknologiekspert og arbeidsplasser hos norske leverandører som Aker Solutions, Nexans, Aibel osv.

6.3 Videreutviklet simulator for havvindturbiners respons på ulike sjø- og vindforhold

Det integrerte simuleringsverktøyet 3DFloat muliggjør utvikling av bunnfaste og flytende havvindteknologi gjennom realistiske simuleringer av havvindturbiner i ulike værforhold.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Lavere kostnader gjennom redusert risiko og redusert bruk av materialer
- Muliggjør flytende havvindteknologi

Forskningsaktører: IFE

Næringsaktører: Equinor, Statkraft, Aibel, Dr. Techn Olav Olsen, Nexans, Fred Olsen, med flere.



3DFloat er et integrert simuleringsverktøy for havvindturbiner.

Illustrasjon: IFE

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓					✓	✓

Havvindturbiner er kompliserte og sammensatte systemer som involverer mange fagfelt. Numeriske simuleringer er en viktig del av design- og utviklingsprosessen for vindturbiner. Ved hjelp av simulering kan en modellere turbinens dynamikk på en realistisk måte, og vise at den tåler de strukturelle belastningene under drift ute på havet.

3DFloat er et verktøy for simuleringer av bunnfaste og flytende havvindturbiner. Verktøyet simulerer hele strukturens oppførsel i et ytre miljø med både hav og vind. Verktøyet kombinerer blant annet modeller for både vindfelt og bølger, den mekaniske strukturelle dynamikken, turbinens reguleringssystem, forankring og kabler samt geotekniske variabler.

3DFloat har i stor grad bidratt til utviklingen av konsepter og komponenter for flytende havvind i Norge, og brukes også i forskning og utvikling internasjonalt. Simulatoren bidrar også til minimering av materialbruk i konstruksjonene. Den tidligere effektstudien for vindenergi fra 2017⁶⁰ analyserte 3DFloat sammen med simuleringsverktøyet SIMA. Netto forventet nåverdi i 2017 ble estimert til 2500 mill. Euro i et scenario for utbygging av havvind i Europa. Videreutviklingen av simuleringsverktøy sikrer at det forblir relevant.

⁶⁰ Potential and realized economic impacts of NOWITECH innovations (Impello Management, 2017)

6.4 Vindturbinsimulator SIMA videreutvikling

Simuleringer av marine operasjoner og flytende systemer bidrar til økt sikkerhet og reduserte kostnader. Utvikling av nytt element til simuleringstøytøyet SIMA/RIFLEX kan brukes i analyse av kabler, riser og rør med armering til havvindutbygging.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

Viktige potensielle effekter:

- Økt fornybar energi ved å muliggjøre teknologi
- Reduserte kostnader gjennom lengre levetid og mindre nedetid
- Økt forsyningssikkerhet og reduserte kostnader gjennom lengre levetid og mindre nedetid



Forskningsaktører: SINTEF Ocean, NTNU

Næringsaktører: Nexans, NKT

Flytende vindturbin med kabler.

Illustrasjon: Shutterstock/Headspin for SINTEF.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓				✓	✓	

SIMA digital arbeidsbenk er en løsning for simulering og analyse av marine operasjoner og konstruksjoner. SIMA oppdateres kontinuerlig for å avbilde eksisterende teknologi og å muliggjøre framtidsrettet teknologisk videreutvikling. Et eksempel er armering som gjør kabler, stigerør og rør mer robuste mot ytre påvirkninger.

RIFLEX er et program for modellering og analyse av slanke marine konstruksjoner og en sentral modul i SIMA. Med RIFLEX kan en beregne hvordan ankerliner, stigerør og kabler vil oppføre seg i bølger og strøm, også når de er koblet til en flytende konstruksjon. Det er viktig å kunne forutse ekstreme belastninger som vil kunne oppstå i en storm, men like viktig er det å kunne estimere effekten av kabelens dynamiske belastninger over tid. Dette siste vil kunne føre til utmattingsbrudd, og en må forsikre seg om at dette ikke inntreffer innenfor kabelens planlagte levetid. En strømkabel til en flytende vindturbin er en kompleks konstruksjon, og avanserte modelleringsmetoder kreves for å forutsi hvilke spenninger som vil opptre i de forskjellige komponentene i kabelen. En viktig komponent er kabelens armering, og her er det utviklet og testet ny teori som gjør oss bedre i stand til å simulere hvordan armerte kabler vil oppføre seg når de utsettes for en kombinasjon av strekk, bøyning og vridning. Når denne metoden er implementert i RIFLEX vil en med bedre presisjon forutsi om en kabel vil tåle en ekstremstorm, samt forsikre seg om at utmattingsbrudd ikke skjer i kabelens levetid. Den tidligere effektstudien for vindenergi (2017)* estimerte netto forventet nåverdi av SIMA og 3DFloat sammen til 2500 mill. Euro med å anta at simuleringsverktøyene brukes for alle nye havvindinstallasjoner i Europa i perioden 2020–2030. Oppdatering og videreutvikling av SIMA og modulen RIFLEX sørger for at simulatoren forblir like relevant for nye installasjoner i årene framover.

*Potential and realized economic impacts of NOWITECH innovations (Impello Management, 2017)
Menon Economics & Multiconsult

6.5 Miljøvennlige sjøkabler for strømmett til havs

Blyfrie sjøkabler er mer miljøvennlige og medfører 10–20 prosent økonomiske besparelser på materialproduksjon. Kablenes lavere vekt reduserer i tillegg kostnader knyttet til transport og installasjon.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Redusert miljøpåvirkningen ved å unngå bly
- Reduserte kostnader på materialproduksjon for blyfrie kabler er 10–20 prosent
- Reduserte kostnader for produksjon, transport og installasjon pga. lavere vekt
- Reduserte driftskostnader gjennom høy fleksibilitet og lang levetid



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU

Næringsaktører: Nexans Norway, Statnett, Equinor, Borealis

Deler av en høyspent sjøkabel undersøkes i SINTEF laboratoriet. Foto: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓		✓	✓

Høyspente undervannskabler har tradisjonelt vært beskyttet med en ytre blykappe for å hindre at sjøvann trenger inn. Nå fører både miljøhensyn og et mulig EU-forbud til at bly fjernes fra fremtidens kabler. I tillegg gir blyfritt design lavere vekt, noe som reduserer kostnader knyttet til produksjon, transport og installasjon. Uten bly oppstår imidlertid en utfordring: vann kan trenge inn i isolasjonen og danne såkalte "vanntreer". Disse vannfylte mikrostrukturene svekker isolasjonen og kan over tid føre til alvorlige skader på kabelen.

I Ocean Grid-prosjektet ved SINTEF Energi er det satt i gang en omfattende studie for å forstå denne utfordringen. I samarbeid med ledende materialeeksperter, kabelprodusenter og forskningsinstitusjoner, og ved hjelp av avanserte analyser og mikroskopiteknikker, er det undersøkt hva som skjer med kabelmaterialene når vann får tilgang til isolasjonen. Studien omfatter både laboratorieforsøk og fullskalastudier, for å simulere reelle havforhold.

Det er avdekket at tilstedeværelsen av spesifikke fremmedelementer i materialene som er brukt i kablene ligger bak dannelsen av vanntreer i høyspente kabler. Denne kunnskapen gir oss et viktig verktøy: ved å fjerne disse forurensningene kan vi hindre prosessen og dermed forlenge blyfrie kablens levetid.

Resultatene fra prosjektet gir flere positive effekter, inkludert miljøfordeler ved at blyfrie kabler reduserer miljøbelastningen. Blyfrie kabler er billigere å produsere, frakte og installere. De mekaniske egenskapene gjør dem i tillegg mer fleksible og innebærer lang levetid, noe som ytterligere reduserer kostnader.

6.6 Kostnadseffektiv produksjon av understell til havvindturbiner

Masseproduksjon og avanserte produksjonsteknologier vil bidra til å øke produksjonskapasiteten, forbedre produktiviteten og redusere produksjonskostnadene for understell til havvind. Dette vil muliggjøre storskala utbygging av havvindparker.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)*

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

*Ulike deler av av caset har oppnådd ulike TRL-nivå.

Viktige potensielle effekter:

- Økt produksjonskapasitet med 50 %
- Reduserte kostnader med 15–25 %
- Reduserte CO₂-utslipp med 30–50 %
- Økt eksport med 30–50 %

Forskningsaktører: SINTEF Industri, SINTEF Manufacturing, Manufacturing Technology Norwegian Catapult (MTNC)

Næringsaktører: Aker Solutions, Aker Offshore Wind, Aibel, Force Technology



Robotsveising i SINTEF laboratoriet.

Foto: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓			✓	✓

Rask og storskala utbygging av havvindparker er et viktig ledd i å øke produksjonen av fornybar energi, akselerere energiomstillingen og oppnå nasjonale og globale klimamål. Når det gjelder understell for havvind, mangler både Norge og Europa tilstrekkelig kapasitet til masseproduksjon. Dette er allerede identifisert som en begrensende faktor for utviklingen av nye vindparker. I tillegg utgjør understell 19–36 prosent av de totale kostnadene for vindturbiner og anses som et område med stort markedspotensial for norsk offshoreindustri.

For å redusere produksjonskostnadene for understell til havvind utvikles: 1) robotisert og automatisert produksjon med adaptive prosesskontrollmetoder, 2) effektive sveiseprosesser som hybrid laserbuesveising, som kan øke produktiviteten betydelig, 3) ikke-destruktiv testing (NDT) og kvalitetskontroll ved bruk av roboter, og 4) robotbaserte forsamling av store og tunge understell, som jakket.

FME NorthWind og andre pågående parallelle prosjekter har demonstrert potensialet til hybrid laserbuesveising for å øke produktiviteten. Det er også utviklet fysikkbaserte sveiseplanleggingsverktøy, som er avgjørende for adaptiv robotsveising, samt robotslipemetoder som vil redusere store mengder manuelt arbeid.

6.7 Verktøy for å optimalisere marine operasjoner for havvind

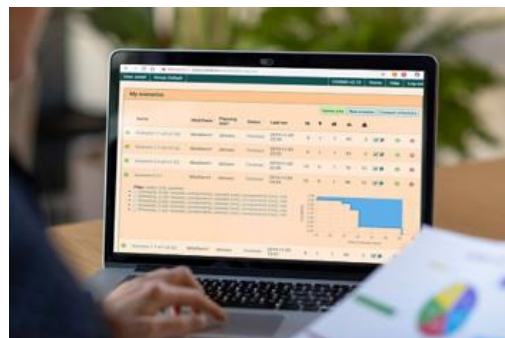
COSMO (Computer tool for Optimisation and Simulation of Marine Operations) er et nettbasert verktøy for å optimalisere den maritime logistikken knyttet til installasjon og vedlikehold av havvindparker. COSMO effektiviserer logistikkoperasjonen ved å minimere kostnader og tid, og gir informasjon om risiko for planlagte operasjoner knyttet til værforhold.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Reduserte kostnader og redusert risiko knyttet til maritime logistikkoperasjoner for havvind
- Reduserte klimagassutslipp som følge av mer effektive maritime logistikkoperasjoner.
- Redusert miljøpåvirkning som følge av færre, mer effektive marine operasjoner



Forskningsaktører: SINTEF Ocean, SINTEF Digital

Næringsaktører: Equinor, Mainstream Renewable Power, DOF, Vard,

COSMO – skjermbilde av scenario management systemet. Foto: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓		✓	✓

Installasjon av havvind innebærer svært kostbare og komplekse maritime operasjoner, ofte under vanskelige værforhold. Et godt verktøy for analyse og planlegging er derfor svært viktig. [COSMO](#) er utviklet for å effektivt kunne analysere kostnader, tid og risiko for installasjon og vedlikehold. Verktøyet er utviklet over mange år sammen med Equinor, siden oppstart i 2016. Siden 2021 har verktøyet blitt testet og FME NorthWind har utviklet utvidet funksjonalitet i samarbeid med industriaktører.

Dagens COSMO verktøy kan brukes av utviklere av havvindparker, teknologiutviklere og tilbydere av analyse av den maritime logistikken knyttet til installasjon og vedlikehold. COSMO optimaliserer logistikkoperasjonene basert på total kostnad og total operasjonstid, og foreslår løsninger som brukerne av verktøyet enkelt kan sammenligne. COSMO gir også risikoprofil for operasjonsplanen knyttet til værforhold. COSMO gir effektive analyser av installasjonskampanjer og vedlikehold, og dermed minimering av kostnader, tid og risiko. Verktøyet fungerer også til uttesting av teknologiløsninger for logistikksystemet for havvindparker i en tidlig fase.

Optimalisert logistikk gir mer effektiv bruk av fartøy, redusert drivstofforbruk, og dermed reduserte klimagassutslipp. Generelt sett utgjør logistikk-kostnader for havvindprosjekter minst 18 prosent av «levelized cost of energy» (LCOE) (1). For å lettere forstå hva dette tallet innebærer i praksis kan en anta at logistikk-kostnadene utgjør 18 prosent av de totale kostnadene. For Sørlege Nordsjø II har NVE estimert totale investeringskostnader på 6,7 mrd. euro (2). Et konservativt estimat på 10 prosent knyttet til logistikk vil da utgjøre 0,67 mrd. euro. Dersom en antar et relativt kortsiktig forbedringspotensial relatert til dagens havvind logistikkoperasjoner på 10 prosent vil COSMO bidra til å utløse reduserte kostnader i størrelsesorden 67 mill. euro.

6.8 SKARV: Metode for å unngå kollisjoner mellom fugler og vindturbiner

SKARV reduserer antall kollisjoner mellom fugler og vindturbiner, samtidig som kraftproduksjonen opprettholdes. Dette gjør vindkraft mer miljøvennlig, øker samfunnsaksepten og bidrar dermed til økt fornybar energi.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Viktige potensielle effekter:

- Redusert fugledødelighet forårsaket av vindparker ved å forhindre fuglekollisjoner
- Økt samfunnsaksept
- Økt fornybar energi gjennom utvidete arealmuligheter pga. redusert fugledødelighet og økt samfunnsaksept



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NINA, NTNU

Næringsaktører: Equinor, TotalEnergies, ABB, Siemens Gamesa, Spoor

Illustrasjon av SKARV-konseptet som reduserer kollisjoner mellom fugler og vindturbiner. Illustrasjon: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓			✓

Utbygging av vindparker vekker bekymring omkring påvirkning på fuglebestander. Miljøpåvirkninger inkluderer tap av leveområder, barrierer for trekk- og hekkeområder, samt dødelighet som følge av kollisjoner med vindturbiner.

SKARV-konseptet tar sikte på å redusere antall kollisjoner mellom fugler og roterende vindturbinblader. Dersom en fugl kommer nær en turbin vil den bli oppdaget og sporet av et sensorsystem som kommuniserer med rotorens reguleringssystem. Dersom fuglen er på kollisjonskurs, kan rotorens omdreiningshastighet justeres opp eller ned slik at kollisjon unngås. Ettersom systemet designes for å unngå full stans, er dette en løsning som opprettholder kraftproduksjonen.

Fordeler og ulemper med eksisterende metoder for å redusere antall fuglekollisjoner i vindparker har blitt evaluert i forbindelse med FME NorthWind, med hovedfokus på metoder som har blitt testet i praksis. SKARV er nå under utvikling som et skånsomt alternativ for å unngå forstyrrelser av dyreliv og betydelig tap av kraftproduksjon.

Forventede effekter inkluderer reduserte negative konsekvenser av vindparker på fuglebestander, økt samfunnsaksept, effektivisering av utbygging av vindparker, økt produksjon av fornybar energi. Løsningen har stort markedspotensial.

7 Solenergi



7.1 Avanserte metoder for drift og vedlikehold av solkraftverk

Utbygging av solkraftverk vokser i et raskt tempo, og små marginer i driften kan utgjøre store forskjeller i global energiproduksjon. I dette forskningscaset ble det utviklet flere nye metoder basert på analyse av produksjonsdata og dronebilder for å gjøre det mulig å utforme lønnsomme strategier for drift og vedlikehold i storskala solparker.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- 2 prosent redusert produksjonstap i Scatecs solparker.
- 0,2 TWh økt produksjon hittil som følge av implementerte metoder.
- Hvis metodene implementeres globalt, kan den globale produksjonen av solkraft øke med mellom 24,5 og 122,5 TWh samlet over de neste seks årene.



Forskningsaktører: IFE

Næringsaktører: Scatec, Prediktor / TGS, Equinor

Avanserte driftssystemer bidratt til økt produksjon i store solparker.
Foto: SuSolTech

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓				✓	✓	✓

Lønnsomheten til solkraftverk baseres på at de leverer strøm som planlagt i en driftsperiode på 20 til 30 år. Intelligente datasystemer er sentrale for å redusere tap i produksjonen og samtidig sikre lave driftskostnader. Solkraftverk kan ha millioner av komponenter, og selv om én enkelt feil i disse har relativt liten effekt på kraftverkenes totalproduksjon, kan summen av feil være betydelig. Avansert drift av solcelleparker muliggjør feildeteksjon og forbedrer vurderingen av feilens alvorlighetsgrad, og kan effektivisere driften av solcellekraftverkene.

Prosjektet har utviklet flere nye metoder basert på analyse av produksjonsdata og dronebilder for å gjøre det mulig å utvikle lønnsomme strategier for drift og vedlikehold i storskala solparker. Dette er oppnådd gjennom flere ulike forbedringer, inkludert bedre metoder og rutiner for vasking av solcellepaneler, reduserte skyggetap, bedre håndtering av snø, bedre metoder for deteksjon og diagnostikk av avvik og feil og redusert nedetid for strømomformere, strenger av solcellepaneler og solfølgende trackere.

Det kontrollerbare tapet i Scatecs portefølje har blitt redusert fra i overkant fire prosent i 2020 til i overkant av to prosent i 2024. Kontrollerbare tap er definert som de tapene i produksjon det er mulig å gjøre noe med. Den økte produksjonen kommer fra implementering av en rekke verktøy og algoritmer som optimaliserer driften av solparker.

7.2 Flytende solkraftverk

Flytende solkraftverk er en relativt ny teknologi i rask vekst internasjonalt, som gjør det mulig å utnytte nye arealer for utbygging av kraftproduksjon. Forskning og innovasjon er en viktig basis for en rekke norske aktører som i dag ønsker å ta større markedsandeler i dette feltet.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Flere norske selskaper har fått i gang kommersielle flytende solkraftanlegg
- Flere pilotanlegg i drift rundt om i verden
- Norske selskaper og forskningsmiljøer er internasjonalt anerkjent innen feltet



Forskningsaktører: IFE, NIVA, NTNU, SINTEF, UiP

Næringsaktører: Ocean Sun, Scatec, TGS, Multiconsult, Hydro REIN, Statkraft

Flytende solkraftverk fra det norske selskapet Ocean Sun. Selskapet har gjennom flere forskningsrådsfinansierte prosjekter utviklet teknologi fra konseptskala til fullskala pilotkraftverk flere steder i verden. Foto: OceanSun

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓		✓

Tilgang til arealer for utbygging av solkraftverk er en voksende utfordring. Dette har skapt et stort mulighetsrom for flytende solkraftverk. En rekke norske selskaper med sterk kompetanse innen både marinteknikk og solkraft jobber i dag med å utvikle ulike innovative teknologier for å ta større markedsandeler i en allerede betydelig bransje globalt.

Flytende solkraft har vært tema for flere kompetanseprosjekter (KSP FLOW, HYDROSUN) og innovasjonsprosjekter med norske utviklere av teknologier for flytende solkraft (Ocean Sun med ProSun, IMPRESS og EcoFiX, Sunlit Sea med MariSol og Fred Olsen 1848 med Enhancing Brizo). Et godt eksempel er kompetanseprosjektet KSP HYDROSUN (2021–2024), en del av satsningen på Grønn Plattform som ble ledet av IFE med NIVA, NTNU, SINTEF og UiO som forskningspartnere. Norske selskaper og forskningsmiljøer gjør det også godt i konkurransen om EU-finansierte prosjekter innen temaet (SUREWAVE, BOOST, SuRE).

KSP HYDROSUN har sett på flere viktige temaer knyttet til utvikling og bruk av flytende solkraftverk. Ytelse og pålitelighet har vært forskningstema, og dokumentasjon på dette er kritisk viktig for å få på plass storskala investeringer. Forskingen har også vist at flytende solkraft kan ha både positive og negative miljøvirkninger. Prosjektet så også på muligheten for å utvikle og drifte hybride kraftverk bestående av flytende solkraftverk på vannkraftreservoarer, og har vist at dette kan både bedre lønnsomhet og samtidig gi økt og mer stabil kraftproduksjon enn vannkraftverket evner å levere alene.

Store norske selskaper som Hydro, Equinor, Multiconsult, Scatec og Statkraft har jobbet tett med norske teknologiutviklere i dette feltet, og flere piloter er nå i drift. Erfaring med samdrift av flytende sol- og vannkraftverk viser at det er mulighet for økt lønnsomhet.

7.3 Produksjon av høyren kvarts til produksjon av solcellematerialer

Den globale solkraftindustrien er avhengig av høyrene kvartsmaterialer som innsatsvare. Norske The Quartz Corp er i dag en viktig leverandør internasjonalt, og selskapet jobber kontinuerlig med forskning og innovasjon for å sikre konkurransedyktighet i et enormt, men samtidig krevende globalt marked.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Økning av industriell aktivitet og nye investeringer hos The Quartz Corp
- Fremstilling av monokrystallinsk silisium med stadig høyere materialkvalitet.
- Reduksjon av kostnader forbundet med fremstilling av monokrystallinsk silisium
- Fremstilling av solceller med høyere virkningsgrader
- Lavere kostnader for solcellepaneler og solkraft



Forskningsaktører: IFE, NTNU, SINTEF, UiO
Næringsaktører: The Quartz Corp

Et bilde av The Quartz Corp sitt produksjonsanlegg i Drag i Nordland. Foto: The Quartz Corp

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓	✓	✓

Om lag 98 prosent av alle solcellepaneler i verden lages i dag av monokrystallinsk silisium. For å sikre høy virkningsgrad og pålitelighet på solcellepanelene kreves tilgang til svært rene silisiumkrystaller. Fremstillingen av dette materialet krever tilgang til digler laget av høyren kvarts. En av verdens ledende leverandører av dette materialet er det norske selskapet The Quartz Corp.

I forskningssenteret FME SUSOLTECH har kvartsdigler og deres oppførsel under, og påvirkning på, produksjonsprosessene for monokrystallinsk silisium vært et viktig tema. I tillegg til The Quartz Corp har forskere, studenter og stipendiater fra NTNU, SINTEF, IFE og UiO vært involvert i arbeidet. Store industriskala eksperimenter av effekten diglene har på materialkvaliteten har blitt gjennomført hos Norsun innenfor rammene av senteret.

The Quartz Corp har et anlegg for raffinering av kvarts i Drag i Nordland fylke. Her er prosessene for raffinering i konstant utvikling for å holde tritt med nye krav til både renhet og pris fra kunder rundt om i verden. Resultatene fra FME SUSOLTECH har bidratt med ny kunnskap som er brukt til å utvikle forbedrede kvartsmaterialer, samt en bedre forståelse av betydningen og verdien til renhet i dette markedet.

7.4 Produksjon av monokrystallinsk silisium

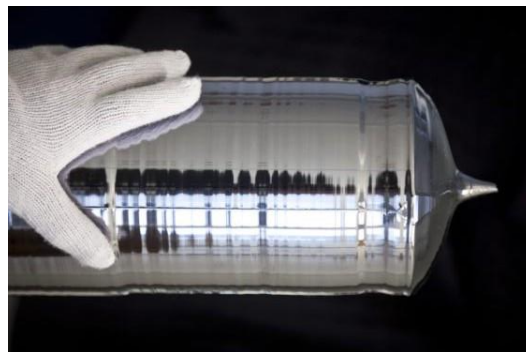
I dag bruker solcelleindustrien opp mot 100 milliarder tynne skiver (wafere) av monokrystallinsk silisium i året. Monokrystallinsk silisium er et av verdens mest perfekte materialer som fremstilles i storskalaproduksjon, og det norske selskapet Norsun har vært en viktig leverandør.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Solcellepanelene fremstilt av materialer fra Norsun har hittil produsert ~12 TWh og bidratt til en CO₂-reduksjon fra kraftproduksjon på ~3,5 mill. tonn
- Med en estimert levetid på 20–25 år for disse solcellepanelene vil de til slutt ha produsert mellom 60 og 75 TWh.



Forskningsaktører: IFE, NTNU, SINTEF, UiO

Næringsaktører: Norsun, PVA Tepla, Norwegian Crystals, REC Solar Norway, The Quartz Corp

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓			✓	✓	✓	✓

Så godt som alle solcellepaneler i verden lages av monokrystallinsk silisium. For å sikre høy virkningsgrad og pålitelighet kreves tilgang til svært rent silisium. Det norske selskapet Norsun etablerte tidlig produksjon av dette materialet i Årdal. Forskning og innovasjon har vært essensielt for både å øke produksjon og materialkvalitet, og samtidig redusere kostnader i tråd med kostnadene i solkraftindustrien for øvrig.

I forskningssenteret FME SUSOLTECH har fremstilling av monokrystallinsk silisium vært et eget forskningstema og den største aktiviteten i senteret. I tillegg til Norsun har The Quartz Corp og PVA Tepla (Tyskland) vært viktige industripartnere, og IFE, NTNU, SINTEF og UiO viktige forskningspartnere. Norsun har i tillegg ledet og deltatt i en rekke innovasjonsprosjekter.

Forskningen har bidratt til høyere materialkvalitet og forbedrede produksjonsprosesser for monokrystallinsk silisium. Bærekraftige fremstillingsprosesser har også vært sentrale. Et viktig tema for produksjonskostnader har vært å redusere såkalte strukturtap, en uønsket situasjon i fremstillingsprosessen der den perfekte krystallstrukturen går tapt og en må smelte ned materialet og begynne den tid- og energikrevende prosessen på nytt.

I perioden 2017 til 2024 har Norsun har bidratt med en produksjon av monokrystallinsk silisium som har gått inn i solcellepaneler med en samlet effekt på om lag 2,5 GWp. Disse solcellepanelene har hittil produsert om lag 12 TWh og bidratt til en CO₂-reduksjon fra kraftproduksjon på om lag 3,5 mill. tonn, med en antakelse om en oppnådd reduksjon på 300 gCO₂/kWh. Kraftproduksjonen fortsetter hvert eneste år. Med en estimert levetid på 20–25 år for disse solcellepanelene vil de til slutt ha produsert mellom 60 og 75 TWh, med en tilsvarende CO₂-reduksjon.

8 Biodrivstoff



8.1 Ressurstilgang til biodrivstoffproduksjon

Prosjektet har analysert optimal geografisk plassering av fabrikker for biodrivstoffproduksjon ved bruk av en skogsektormodell. Modellen kan brukes til å vurdere konkrete plasseringer av anlegg i Norge. Dette kan gi bedre økonomiske betingelser for biodrivstoffproduksjon, og bedre utnyttelse av biomasse, både for produksjon av konvensjonelt og avansert biodrivstoff.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Prosjektet kan bidra til økt, og mer lønnsom, produksjon av flytende fornybart drivstoff.
- Nesten alt biodrivstoff blir importert. Norsk produksjon vil redusere importavhengighet.
- Verdiskapingspotensialet er betydelig siden det er vedtatt høye mål for andelen biodrivstoff i Norge.

Forskningsaktører: NMBU, NTNU, NIBIO

Næringsaktører: Silva Green Fuel, Statkraft, Biozin



Modellen bidrar til bedre utnyttelse av skogressurser, tømmer og andre biomasse.

Foto: Wikimedia free lisense commons.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓		✓		✓		✓

Biodrivstoffproduksjon krever store mengder skogbiomasse, ofte fra store områder. Tømmer og annen biomasse fra skog er kostbart å transportere på grunn av lav bulkdensitet. Derfor er plasseringen av anlegg for produksjon av skogbasert biodrivstoff viktig for kostnadene og for en investeringsbeslutning.

I caset har vi analysert best mulig plassering av biodrivstoffanlegg i Norge, og virkningene disse kan få på skogsektoren i de nordiske landene. Analysen er gjort med en skogsektormodell utviklet for nordiske forhold ([NFSM](#)). Modellen er en partiell likevektsmodell som maksimerer samfunnsmessig overskudd, og gir den løsningen med lavest kostnader til råstoff (biomasse), ved et gitt produksjonsnivå av biodrivstoff.

Basert på data fra partnerne i Bio4Fuels er modellen utvidet slik at biomassetilgangen estimeres på kommunenivå. Data over transportavstander og transportkostnader mellom kommuner gjør det mulig å beregne optimal plassering av biodrivstoffproduksjon for ulike størrelser og ulikt antall fabrikker totalt i Norge. Resultatene antyder at hvis det etableres små og få fabrikker, er det mest lønnsomt å plassere disse i innland med uutnyttede skogressurser. Øker antallet og/eller størrelsen vil det være optimalt å plassere anleggene ved jernbane og andre knutepunkter. Blir behovet for biomasse stort, bør fabrikkene plasseres ved havner. Modellen viser også at råstoffbehovet i Norge initielt vil bli tilfredsstillt ved redusert eksport. Ved større behov, vil biomasse bli importert inn til Norge.

Modellen kan brukes til å gjøre vurderinger av konkrete mulige plasseringer av anlegg for biodrivstoffproduksjon i Norge. Resultatene er brukt til videre vurderinger av bærekraft gjennom LCA.

8.2 Utvidelse av biogassverdikjede

Flere prosjekter har hatt som mål å optimalisere biogassprosesser, som resulterer i økt produksjon av biometan til bruk i langdistansetungtransport.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Økt produksjon av biometan.
- Billigere produksjon av biometan.
- Produksjon av biorest av bedre kvalitet som brukes som gjødsel.
- Bedre håndtering av organisk avfall gir økt miljøgevinst.

Forskningsaktører: SINTEF, NMBU, USN, NTNU.

Næringsaktører: St1 Biokraft, Scandinavian Biogas Fuel AB, Den Magiske Fabrikken



Biogassanlegget på Skogn er blitt studert for digitalisering og optimalisering som kan bidra til bedre utnyttelse av substrater for å utvikle biogass-verdikjeden. Foto: St1 Biokraft biogassanlegg i Skogn.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓		✓			✓	✓

En betydelig andel av organisk avfall som anvendes i biogassanlegg blir ikke omdannet til biometan på grunn av lav hydrolyse. Det finnes et stort potensial for optimalisering av prosessen for å bidra til å utnytte en større andel av avfallet, og derigjennom øke produksjon av biometan.

Forskningsaktivitetene har fokusert på bedre kontroll av biogassprosessen ved bruk av digitale teknologier (sensortechnologi, avanserte modeller, logging av data, osv). Bedre kontroll og optimalisering av biogassproduksjon kan også bidra til at en større andel av organisk avfall kan gjøres om til biometan.

[Biokraft i Skogn](#) og [Den Magiske Fabrikken](#) i Sem har blitt studert som mulige anlegg hvor prosessoptimalisering og økt kapasitet (bruk av mer organisk avfall) gjennom termokjemiske teknologier kan bidra til å utvide biogass-verdikjeden. Flere biogassanlegg i Norge har utvidet sin kapasitet med å bygge nye prosesslinjer. Dette har gitt bedre kapasitet slik at mer organisk avfall kan prosesseres. Dette øker samfunnsnyttene av prosesseffektiviseringer.

Synergieffekten av å kombinere ulike prosesser som pyrolyse/gassifisering med et biogassanlegg kan øke biometanproduksjon betraktelig. Biogass har en klimagevinst på litt over 90 prosent. Hvis gevinsten for biogjødselproduksjon inkluderes blir den totale miljøgevinsten over 100 prosent.

8.3 Biodrivstoff fra avfall

Forskningsarbeidet har ført til en bedre forståelse av den komplekse og heterogene biomassen som stammer fra avfall. Dette kan bidra til å starte produksjon av biodrivstoff fra kommunalt avfall.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Bruk av kommunalt avfall til produksjon av biodrivstoff bidrar til redusert utslipp i transportsektoren.
- 99 prosent av alt brukt biodrivstoff blir importert, men lokal produksjon kan redusere importavhengigheten.
- Avfall fra Oslo og andre steder eksporteres ofte til Sverige; dette gir en alternativ utnyttelsesverdi til forbrenning med CCS eller gassifisering.



Forskningsaktører: SINTEF, USN

Næringsaktører: EGE (Oslo gjenvinning)

Forskningsarbeidet kan føre til at mer avfall brukes i produksjon av biodrivstoff. Foto: Rawpixels free lisense commons

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓		✓	✓	✓		✓

Avfall som brukes som råstoff for pyrolyseprosessen har en kompleks sammensetning. Avfallet er veldig heterogent, og kan inneholde uønskede stoffer som kan gjøre det vanskelig å prosessere. Prosessoptimalisering er dermed utfordrende for dannelse av stabile produkter.

Caset har fokusert på behandling av ulike fraksjoner fra sorteringsanlegget for å kartlegge hvilke fraksjoner som er best for videre prosessering og hvordan sorteringen av avfall kan gi best resultat. Forskningsaktivitetene er varierte og inkluderer modellering i ASPEN-HYSYS, ASPEN-PLUS og Barracuda, konseptuelt design, masse- og energibalanser av prosessene, reaktordesign for oppskalering, eksperimentelle forsøk, produktsfordeling og sammensetning.

Resultatene viser at det er mulig å konvertere noen avfallsfraksjoner til biodrivstoff. Forskningsarbeidet har dokumentert hvilke fraksjoner som er lettest å konvertere, og kartlagt ressursgrunnlag i Europa.

Biodrivstoff fra avfall er et viktig bidrag til reduksjon av utslipp i transport sektor. Arbeidet kan bidra til økt utnyttelse av kommunalt avfall til produksjon av biodrivstoff. I dag importeres 99 prosent av alt biodrivstoff som brukes i det lovpålagte innblandingskravet i drivstoff. Det er begrenset tilgang til biomasse, og prosesser som utnytter lokalt avfall kan redusere importavhengighet og redusere eksport av avfall til Sverige. Flytendegjøring av avfall kan gi en alternativ verdikjede for utnyttelse til forbrenning + CCS eller gassifisering.

8.4 Prosess for å produsere bioolje

Det er utviklet en to-trinns prosess for raffinering av bioolje, som kan være en viktig ressurs for produksjon av drivstoff.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Muliggjør produksjon av bioolje som kan omgjøres til biodrivstoff
- Biodrivstoff produsert fra verdikjeden fra biooljen gir reduksjon av klimagassutslipp
- Integrering av bioolje produksjon med eksisterende raffineriprosesser unngår bygging av nye infrastruktur



Forskningsaktører: SINTEF

Næringsaktører: Equinor

*Bioolje kan erstatte fossilolje og dermed bidra til reduksjon i klimagassutslipp, særlig fra skip og fly.
Foto: Flickr under free lisense commons*

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓		✓			✓	✓

Oppgradering av bioolje for videre foredling til marin og flydrivstoff er mer komplisert enn tilsvarende prosess for fossil olje, blant annet på grunn av høyt oksygeninnhold. Dette betyr at det må utvikles en spesielt tilpasset prosess som reduserer oksygeninnhold til det lave nivået som kreves.

Det er gjort en systematisk studie i lab og pilot for å kartlegge og forstå kjemien og prosessbetingelser som kan danne basis for en oppskalert raffinering av bioolje.

Resultatene er utvikling av en to-trinns prosess hvor det siste trinn kan utføres som en del av eksisterende raffineriprosesser. Konseptet er nå under evaluering av ulike raffineri i Europa og det er utviklet en dedikert minipilot for videre validering og kvalifisering for industri.

Proessen er et viktig trinn i integrering av biodrivstoffproduksjon i eksisterende raffinerier. Dette kan gi en rask vei til produksjon, siden det ikke krever bygging av nye raffinerier. Biodrivstoff produsert fra biooljer bidrar til reduksjon av klimagassutslipp fra transportsektoren, spesielt siden det kan brukes av eksisterende motorer i fly og skip. Integrering av biooljeproduksjon ved eksisterende raffineriprosesser kan gi en raskere vei til implementering og oppskalering.

8.5 HTL-basert produksjon av biodrivstoff

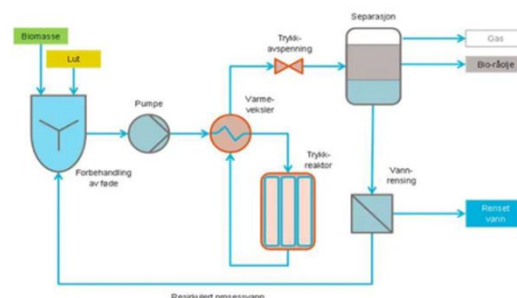
Hydrotermisk flytendegjoring (liquefaction – HTL) vil muliggjøre konvertering av biomasse til flytende drivstoff. Forskning har bidratt til mange timer operasjon på pilotanlegg.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Utvikling av verdikjede for ny type biodrivstoffproduksjon
- Biodrivstoff produsert fra HTL-olje gir reduksjon av klimagassutslipp
- Integrering av HTL-oljeproduksjon med eksisterende raffineriprosesser reduserer behov for ny infrastruktur



Forskningsaktører: SINTEF, NMBU

Næringsaktører: Silva Green Fuel

HTL-teknologien, fra innførsel av biomasse til biodrivstoffet er produsert. Illustrasjon: Silva Green Fuel.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓		✓		✓		✓

Nesten 99 prosent av biodrivstoff brukt i transport i Norge importeres, til tross for at vi har betydelige bioressurser som kan brukes til biodrivstoffproduksjon.

Hydrotermisk flytendegjoring (HTL) er en lovende teknologi som muliggjør konvertering av biomasse til et flytende drivstoff. Siden prosessen utføres under veldig høy trykk og temperatur, har det vært viktig å ha tilgang til relevant forskningskompetanse for å støtte utvikling av prosessen som legger grunnlag for produksjon i Norge.

Det er utført flere forskningsaktiviteter som har gitt kunnskapsgrunnlag for prosessutvikling, blant annet, kartlegging av ressursgrunnlaget, offentlig godkjenning, tilknytning til relevante EU-nettverk, samt tilgang til lab for å generere relevante testresultater.

HTL-prosessen er et viktig trinn i integrering av biodrivstoffproduksjon i eksisterende raffinerier, hvor produktet fra HTL-prosessen raffineres til biodrivstoff. Dette kan gi en rask vei til produksjon, siden det ikke krever bygging av ny produksjonsinfrastruktur. Biodrivstoff produsert fra HTL-prosessen bidrar til reduksjon av klimagassutslipp fra transportsektoren, spesielt siden det kan brukes i eksisterende motorer installert i fly og skip. Integrering av HTL-oljeproduksjon ved eksisterende raffineriprosesser kan gi en raskere vei til implementering og oppskalering. SGFs demonanlegg er det største HTL-anlegget i verden og legger grunnlag for bygging av kommersiell produksjon i Norge og Norden.

9 Energibruk i bygg og områder



9.1 Realisering av nullutslippsbygninger (ZEB-metoden)

Metoden for planlegging og evaluering av nullutslippsbygninger er utviklet for å redusere klimapåvirkningen fra bygninger. Nullutslippsbygg er bygninger som optimaliserer material- og energibruken, og produserer nok fornybar energi til å kompensere for bygningens totale klimagassutslipp gjennom hele levetiden.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

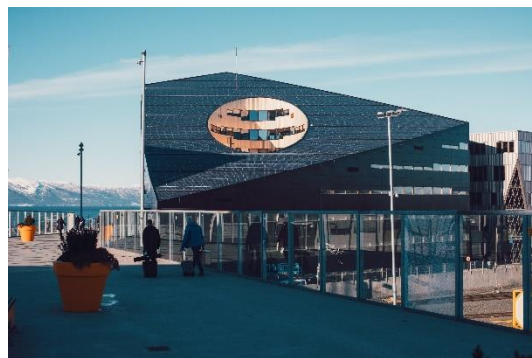
- Metoden er brukt i standarder og vist til ved revisjons av EUs bygningsenergidirektiv.
- Enkeltbygg har fått reduserte klimagassutslipp med opp mot ca. 50 prosent ift. byggeforskrift.

Viktige potensielle effekter:

- Reduksjon i levert energi på 13 TWh (15 %) i 2030 og 40 TWh (48 %) i 2050.

Forskningsaktører: NTNU, SINTEF

Næringsaktører: Skanska, Caverion, Weber, Isola, Glava, Protan, Hydro Aluminium, NorDan, DuPont, Brødrene Dahl, Multiconsult, Snøhetta, ByBo, Sør-Trøndelag fylkeskommune, Entra Eiendom, Forsvarsbygg, Statsbygg, Enova, Husbanken, DiBK, BNL, Norsk Teknologi.



Ett av ni pilotprosjekter i FME ZEB, Powerhouse Brattørkaia. Foto: Thomas Klungland.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓	✓	✓	✓	✓		

Bygninger står for en betydelig del av verdens energibruk og klimagassutslipp. For å møte klimamålene, er det nødvendig å utvikle bygninger med minimale utslipp fra material- og energibruk, og som kan produsere nok fornybar energi til å kompensere for utslippene. Forskningssenteret FME ZEB, ledet av NTNU og SINTEF, utviklet ZEB-metoden (Zero Emission Buildings).

Det er utviklet metodikk for hva som utgjør et nullutslippsbygg, inkludert ulike nivåer av nullutslippsbygg. Teknologiske nyvinninger inkluderer metoder for å beregne energibruk og klimagassutslipp, samt løsninger for integrering av fornybar energi i bygninger. Prosjektet involverte et bredt spekter av aktører fra offentlig forvaltning og næringsliv. Det er gjort praktiske eksperimenter og bygging av pilotprosjekter for å teste og validere metoden.

Det nye bygningsenergidirektivet har som hovedmål at alle nybygg er nullutslipp fra 2030 og hele bygningsmassen fra 2050. ZEB-metoden sier noe om hvordan dette kan oppnås. Implementering av nullutslippsbygninger vil gi en betydelig økning i produksjon av lokal solenergi og varmeproduksjon fra varmepumper. Estimert solstrømsproduksjon er 4 TWh i 2030 og 12,5 TWh i 2050. Forventet reduksjon i levert energi er 13 TWh (15 prosent) til 2030 og 40 TWh (48 prosent) til 2050, sammenlignet med 2020. Bygg- og anleggssektoren i Norge står for 18 mill. tonn klimagassutslipp årlig. Produksjon, transport og import av byggevarer utgjør halvparten. Materialbruk kan reduseres med 35 prosent uten økte kostnader. Utslipp fra energibruk og mobilitet kan reduseres med 60 prosent innen 2050, sammenlignet med 2020. Stort potensial for produksjon og verdiskaping i BAE- og energisektorene, samt økt sysselsetting og eksport. Sysselsettingeffekten er beregnet til 21000 årsverk bestående av nye arbeidsplasser. Redusert effektbehov er beregnet til 3 GW i 2030 og 6 GW i 2050.

9.2 Energifleksibilitet og reduksjon/flytting av topplast

Energifleksibilitet er avgjørende for å håndtere variabel fornybar energiproduksjon og redusere toppbelastninger på strømmettet. Dette caset utforsker hvordan avanserte styringssystemer kan optimalisere energibruken i bygninger.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Arbeidet har vist at opptil 80 prosent av energibruken kan flyttes bort fra høylastperioder, samtidig som brukernes tilfredshet opprettholdes.

Forskningsaktører: NTNU, SINTEF

Næringsaktører: Rådgivere: Asplan Viak, Multiconsult, SWECO
Energi: Energi Norge, Norsk Fjernvarme, Elvia
Entreprenører: Statsbygg, GK Oslo
Kommuner: Elverum og Trondheim kommune
Myndigheter: NVE



Bilde av ZEB-laboratoriet som er brukt til forskning på energifleksibilitet. Foto: m.c.herzog / visualis-images.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
				✓	✓	✓

Energifleksibilitet er avgjørende for å håndtere en økende andel fornybar energi i kraftsystemet, som sol- og vindkraft, som varierer over tid. Det er nødvendig å redusere toppbelastninger på strømmettet og forbedre energieffektiviteten i bygninger og nabolag. Caset, gjennomført i FME ZEN og ENERGIX-prosjektet FlexBuild, har involvert praktisk implementering av avanserte styringssystemer, spesielt modellprediktiv styring (MPC), i ulike bygninger. Implementeringen har blitt testet i ZEB Living Lab, ZEB-laboratoriet, skoler i Trondheim og byggefeltet Ydalir i Elverum, samt kontorbygninger i Evenstad og Oslo.

Arbeidet har vist at opptil 80 prosent av energibruken kan flyttes bort fra høylastperioder, samtidig som brukernes tilfredshet opprettholdes. Teknologiske nyvinninger inkluderer utviklingen av verktøyene PROFet og FLEXor, som bruker reelle måledata for å generere lastprofiler og optimalisere energibruken. Verktøyene er tatt i bruk i bygningsautomasjonssystemer, noe som er avgjørende for storstilt bruk av MPC.

Effekter av tiltakene inkluderer en økning i produksjon av fornybar energi, der fleksibel energibruk tilpasses variabel fornybar energiproduksjon. Mer fornybar energi muliggjør også utslippskutt. Energieffektivisering oppnås gjennom bedre koordinering mellom teknologier som varmepumper, beredere, og lading av elbiler, samt et økt egenforbruk av solenergi. Forsyningssikkerheten øker ved at effektbelastningen kan reduseres med opptil 80 prosent i enkelte bygninger, og med 10–20 prosent for hele bygningsmassen. Kostnadene reduseres også, da behovet for nettførsterkning og tilhørende kostnader minsker. Det er et betydelig næringslivspotensial, gjennom økt automatisering og utvikling av datatjenester i bygningsmassen, noe som kan føre til verdiskaping og eksportmuligheter.

9.3 Energieffektivisering gjennom energiomlegging i bygg og områder

Energieffektivisering og økt bruk av fjernvarme og varmepumper i vannbårne varmesystemer i bygg kan bidra til å møte utfordringene det norske kraftsystemet står overfor grunnet det økende strømbehovet hos transport og industri.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Reduksjon i energibruk i bygg på 16 % (13 TWh) innen 2050 fra 2020-nivået.
- Reduksjon i elektrisitetsbehov på 26 % (17 TWh) innen 2050 fra 2020-nivået.
- Reduserte energikostnader med 14 % innen 2050.
- Reduksjon i topplastbehov for strøm med opptil 35 % (10 GW) fram mot 2050 sammenlignet med 2020.



Forskningsaktører: SINTEF og NTNU

Næringsaktører: Norsk Fjernvarme, Fornybar Norge, Hafslund Oslo Celsio, Statkraft Varme

Energieffektivisering og økt bruk av fjernvarme har stort potensial for å avlaste kraftnettet i tettbeboede områder. Foto: Hanne Kauko, SINTEF Energi.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓			✓	✓	

Det norske kraftsystemet står overfor betydelige utfordringer i overgangen til et fossilfritt samfunn, drevet av elektrifisering av transport og industri. Samtidig er ineffektiv bruk av strøm til oppvarming av bygg hovedårsaken til de høye effekttoppene om vinteren. For å møte det økende behovet for strøm og overføringskapasitet, er det nødvendig å undersøke potensialet for energieffektivisering og økt bruk av varmepumper og fjernvarme for bygningsoppvarming.

Prosjektet er gjennomført i FME ZEN, med deltakelse fra forskningspartnerne SINTEF og NTNU, samt næringsaktører som Norsk Fjernvarme, Fornybar Norge, Hafslund Oslo Celsio og Statkraft Varme. Tidsperioden for kjerneprosjektet har vært 2022–2024. Resultatene fra prosjektet er formidlet bl.a. på Arendalsuka, ZERO-konferansen og i Teknisk Ukeblad.

Studien har vist at uten tiltak vil strømbehovet øke med 3 prosent fram til 2030 og 7 prosent fram mot 2050. Maksimal bruk av fjernvarme, uten ambisiøse energieffektiviseringstiltak, kan stabilisere strømbehovet på 2020-nivå, med en reduksjon i topplastbehovet på 1 prosent innen 2030 og 5 prosent innen 2050. Kombineres maksimal bruk av fjernvarme i urbane strøk med ambisiøse energieffektivisering, og varmepumper i distriktene, kan det totale strømbehovet reduseres med 12 prosent innen 2030 og 26 prosent innen 2050, mens topplastbehovet kan reduseres med henholdsvis 17 og 35 prosent.

9.4 Smart ventilasjon med lave utslipp

Caset fokuserer på å redusere klimagassutslipp fra ventilasjonssystemer gjennom forbedret systemdesign og varmevekslertechnologi, samt bruk av sensorer for bedre kontroll av luftkvalitet. Forskningen har resultert i betydelige teknologiske nyvinninger og miljøgevinster.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Redusert utslipp på 15 prosent fra ventilasjonssystemet, inklusiv fra drift og redusert materialbruk.
- Reduksjon av materialutslipp på 20-40 prosent fra en bygnings tekniske installasjoner (grunnet bedre materialvalg, gjenbruk, resirkulering og økt levetid).



Forskningsaktører: NTNU og SINTEF

Community

Næringsaktører: Flexit, Multiconsult, GK, Asplan Viak, Trondheim kommune

Eksempel på del av ventilasjonssystem.

Foto: Laurent Georges, NTNU.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓			✓

Ventilasjonsystemer står for betydelige innebygde utslipp (knyttet til bruk av materialer) og utslipp under drift, noe som utfordrer målet om reduserte klimagassutslipp i byggsektoren. Det har vært behov for forskning på systemdesign, drift og varmevekslertechnologi for å minimere utslippene og forbedre luftkvalitet og energieffektivitet.

Forskningsaktivitetene inkluderte beregning av materialutslipp, utvikling av en LCA-ventilasjonsdatabase, utvikling av optimeringsverktøy for kanalnett mht. å minimere totale utslipp fra material og drift, forbedring av varmevekslertechnologi, og implementering av rimelige sensorer for bedre luftkvalitetskontroll.

Prosjektet resulterte i flere teknologiske nyvinninger, inkludert en modell for langsgående varmeledning i varmevekslere, som Flexit bruker til å utvikle nye produkter. Det er implementert modeller for lavt trykkfall i ventilasjonssystemer, som gir mindre effekt- og energibruk, og utviklet kontrollstrategier basert på ny sensortechnologi som måler luftkvalitet på en bedre måte.

Effektene inkluderer flere aspekter av energieffektivisering og miljøforbedringer. For det første oppnås energieffektivisering ved å øke temperaturvirkningsgraden i varmevekslere fra 80 til nær 90 prosent, noe som reduserer behovet for ettervarmebatteri og gir et enklere system. Optimaliseringsverktøyet for kanalnett kan redusere årlige utslipp, inklusiv fra drift og materialer, fra ventilasjonssystemet med rundt 15 prosent. I tillegg kan det redusere materialutslipp fra bygningsinstallasjoner med 20-40 prosent gjennom bedre materialvalg og økt gjenbruk og resirkulering. Forbedret luftkvalitet har også positive effekter på helse og sykefravær. Økonomisk er det utviklingsmuligheter for nye produkter og tjenester innen smart ventilasjon.

9.5 Metode for nullutslippsområder (ZEN)

Caset omhandler utviklingen av en detaljert og analytisk metode for nullutslippsområder (Zero Emission Neighbourhoods – ZEN), med mål om å estimere og dokumentere klimagassutslipp i både planleggings- og driftsfasen. Dette er viktig for å sikre at prosjekter oppnår netto nullutslipp over en 50-årsperiode.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

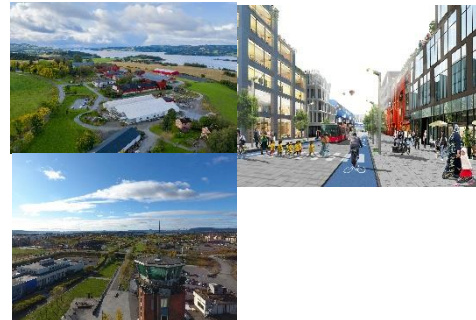
1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

Ny metode og nye verktøy for å kunne oppnå nullutslippsområder i praksis.

Forskningsaktører: NTNU, SINTEF Community, SINTEF Energi

Næringsaktører: Rådgivere (Snøhetta, Afry, Asplan Viak, Multiconsult, SWECO, Civitas, Future-Built), energiaktører (Energi Norge, Norsk Fjernvarme, NTE, Statkraft Varmer), byggevarerindustri (Hunton, Moelven, Heidelberg Materials, Smart Grid Services Cluster), entreprenører: Skanska, GK Oslo, utbyggere (Statsbygg, ByBo, Elverum Vekst, TOBB), kommuner (Bergen, Trondheim, Bærum, Bodø, Elverum, Steinkjer, Trøndelag fylkeskommune) og myndighetsorgan (NVE, DiBK).



Fire av pilotområdene i FME ZEN. Foto fra Zeiner Media (Mære), Bærum kommune ved E. Guneriussen (Fornebu), A. Kokkvoll (Ydalir skole og barnehage) og Oslo Plan- og bygningsetaten (Furuset, Oslo).

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
✓	✓	✓	✓	✓		

For å kunne planlegge og realisere et områdeprosjekt med ambisjoner om å bli et nullutslippsområde (ZEN), er det nødvendig å kunne estimere og dokumentere prosjektets samlede direkte og indirekte utslipp av klimagasser både i planleggingsfasen og etter bygging. Forskningen er gjennomført i FME ZEN av NTNU og SINTEF i samarbeid med en rekke næringsaktører, offentlige partnere og kommuner. Hovedaktiviteten har vært konsentrert i perioden 2016–2024, med betydelig innsats i utvikling og testing av metodikk og verktøy.

Det er utviklet en metode, inkludert kategorier som klimagassutslipp, energi, effekt, byform og arealbruk, mobilitet og økonomi. En prosessveileder og Norsk Spesifikasjon (NSPEK) er også utviklet for å implementere metoden ved planlegging, tilrettelegging og evaluering av et nullutslippsområde.

Effektene av tiltakene inkluderer en betydelig økning i produksjonen av fornybar energi gjennom lokal solenergi og varmepumper, hvor synergier mellom enkeltbygg forventes å gi bedre resultater enn ZEB-metoden. Energieffektivisering oppnås med store forbedringer gjennom plussenergiløsninger. Det langsiktige målet er å oppnå netto null klimagassutslipp over 50 år ved å utvide systemgrensene fra enkeltbygg til hele områder, noe som reduserer utslipp fra bygninger, infrastruktur, mobilitet og landskap. Byggefasen står for omtrent 2,2 mill. tonn CO₂e årlig i Norge, som kan spares ved å bruke nullutslippsteknologi. Mobilitet, som utgjør 40-50 prosent av det totale utslippet i områdene, kan reduseres, spesielt fra personlige kjøretøy. Redusert miljøpåvirkning er dokumentert i LCA-studier, som viser at et ZEN-prosjekt gir miljøgevinster i flere kategorier. Forsyningssikkerheten øker gjennom bedre lokal energiproduksjon og fleksibilitet, hvor enkeltbygninger kan redusere effektbelastningen med opptil 80 prosent, og hele bygningsmassen med 10–20 prosent.

10 Energieeffektivisering i industrien



10.1 CO₂-baserte kjøle- og varmepumpesystem for dagligvarebutikker

Forskningsgruppen har utført banebrytende forskning om bruk av CO₂ som kjølemedium i kulde- og varmepumpesystemer. Disse erstatter tidligere systemer som brukte kjølemedier med høy drivhuseffekt, og dermed reduseres utslippene betraktelig, og også strømforbruk. Om lag 115 000 CO₂-anlegg er foreløpig installert på global basis.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- 30 prosent lavere årlig elektrisitetsbehov, utgjør i dag 307 MNOK i reduserte strømkostnader, 8604 for Europa*
- Eliminere utslipp av sterk drivhusgass (HFK-404A med GWP₁₀₀ 3920) med 1,2 Mt CO₂eq reduserte utslipp per år i Norge, 36 Mt i Europa, og unngår bruk av fluor-baserte gasser som bidrar til PFAS/TFA produksjon ved nedbrytning i atmosfæren*



REMA1000 Kroppanmarka, et av de første dagligvarebutikkene som ble bygd med system for kulde- og varmeproduksjon som bruker CO₂ som kuldemedium. Foto: REMA1000 Norge

Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU EPT

Næringsaktører: REMA1000, Danfoss, System

Air, Alfa Laval, Dorin

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Dagligvarebutikker er meget energikrevende bygg og har vært beheftet med store direkte utslipp av kjølemedier med høy drivhuseffekt, hydrofluorkarboner (HFK). Det finnes om lag 3900 dagligvarebutikker i Norge, og ved å benytte CO₂ som kjølemedium til erstatning for fluor-baserte kjølemedier unngår en direkte utslipp av klimagasser. HFK-404A, som tidligere var i utstrakt bruk som kjølemedium, er en kraftig drivhusgass med GWP nær 4000. Dette utgjorde betydelige utslipp, tatt i betraktning at anleggene historisk sett hadde lekkasjerater på mellom 10 og 20 prosent av fyllingen årlig.

I samarbeid mellom forskningsinstitusjoner som SINTEF og NTNU, komponent- og systemleverandører, samt sluttbrukere fra butikkjedene, har det blitt utviklet energi- og kostnadseffektive systemer for CO₂-kjøling som nå dominerer markedet i Norden, og er i ferd med å få global utbredelse. Kostnadseffektivitet illustreres ved at de store butikkjedene har, eller er i ferd med å konvertere til CO₂-systemer (87 prosent).

Med CO₂ har en utviklet et integrert energisystem som tilfredsstiller alle behovene med et anlegg, også tidligere behov med kjøledisker, frysedisker, oppvarming og luftkondisjonering i separate anlegg. Dette gir sterk reduksjon i energiforbruk. Siden CO₂ er en høytrykksgass som krever maksimaltrykk for komponenter opp til 120 bar, mot tidligere standard på 25 bar, var det behov for å utvikle nye komponenter, slik som kompressorer, varmevekslere og komponenter for trykkavlastning. Videre krevde bruk av CO₂ utvikling av prosesser for transkritisk drift, noe som gir utfordringer, men samtidig gode muligheter for å integrere systemene for leveranse av varme eller klimakjøling etter behov. Det anslås at om lag 115 000 CO₂-anlegg nå er installert på global basis, og markedet fortsetter å vokse.

* Forutsetningene for dette anslaget (blant annet størrelse på supermarked, og referansebane for alternativ utslippsbane) avviker fra forutsetningene for dybdestudien i kapittel 3.2. Beregningsresultatene er derfor ikke direkte sammenlignbare.

10.2 Økt utnyttelse av lavtemperatur overskuddsvarme med varmepumpe

Industrien avgir store mengder overskuddsvarme med lav temperatur. Overskuddsvarmen kan oppgraderes med en varmepumpe til et temperaturnivå som kan utnyttes internt i bedriften. Forskningsgruppen har utviklet nye integrerte varmepumpesystemer som gir sterkt redusert energiforbruk og lavere utslipp.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- 38 prosent redusert energiforbruk ved bruk av teknologien ved Tine sitt nye meieri i Bergen
- 42 prosent reduksjon i klimagassutslipp
- Bruk av naturlige kjølemedier som eliminerer direkte klimagassutslipp
- Løsning egnet for en rekke ulike industrier

Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, SINTEF Ocean, NTNU

Næringsaktører: Tine, Hydro, Alcoa, Finnfjord, Mo Industripark, Orkla, Pelagia



*Det nye meieriet til Tine Bergen ble satt i drift i 2018, og bruker lavtemp. overskuddsvarme.
Foto: Bjarne Ragnar Horntvedt*

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Overskuddsvarme fra industrien bør utnyttes for å øke den totale energieffektiviteten i energisystemet. Lavtemperatur varme er imidlertid vanskelig å utnytte direkte til nyttige formål. Utnyttelse av lavtemperatur overskuddsvarme fra industrien som varmekilde for varmepumper kan gi sterk reduksjon i energiforbruk og erstatte fossile brensler til varmeproduksjon. Når varmepumpene benytter naturlige kjølemedier, reduseres også direkte utslipp av fluor-baserte gasser, som ville bidratt til klimagassutslipp og PFAS/TFA-nedbrytningsstoffer i atmosfæren.

I HighEFF er det utviklet systemløsninger og utført en rekke studier for å illustrere potensialet for redusert energiforbruk og utslipp ved bruk av varmepumper i industrien. Realiserte anlegg har blitt fulgt opp og predikterte besparelser har blitt verifisert. Effektene vil naturlig nok variere avhengig av applikasjon, men kvantifisering som for Tine-anlegget beskrevet som eksempel nedenfor anses å være generelt representative.

Ved Tine sitt nye meieri i Bergen er det dokumentert 38 prosent redusert energiforbruk ved bruk av varmepumper som utnytter lavtemperatur varme. Videre har en oppnådd 42 prosent reduksjon i klimagassutslipp ved redusert bruk av fossile brensler. Bruk av naturlige kjølemedier i varmepumpene bidrar videre til reduserte direkteutslipp av klimagasser. Varmepumpene bidrar til redusert kraftbehov som følge av høyere energieffektivitet. Implementering av lignende system ved alle tilsvarende norske meierier er estimert å kunne spare 72 GWh/år og redusere deres klimagassutslipp med 1,5 kt/år. Ved å utnytte energilagere for kulde og varme ble det også demonstrert redusert behov for kraft i perioder hvor det kan være en utfordring.

HighEFF har også bidratt til et [white-paper](#): “The Role and Impact of Energy Efficiency in Decarbonising European Industry” som ble publisert Juni 2024. Tine Bergen ble benyttet som et eksempel i denne publikasjonen.

10.3 Integrerte energisystem for industrien

Integrerte energisystem kan utnyttes innad i en industribedrift til økt energieffektivitet, men dette begrenses ofte av interne behov i de ulike prosessene og bedriftene. Større effekt kan oppnås ved at flere bedrifter organiseres i industriklynger, hvor det utveksles overskuddsstrømmer av energi- og materialer mellom de ulike bedriftene.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Utnyttelse av energi som ellers ville gått til spille. Mo Industripark gjenvinner mer enn 400 GWh/år (potensial anslått 900 GWh/år)
- Gjenbruk av strømmer som ellers går tapt, 19 prosent reduksjon av spesifikt energiforbruk med CO avgass fra FeMn til tørking og forvarming
- Økt total energieffektivitet i industriklyngen
- Grunnlag for nye industribedrifter og økt konkurransedyktighet for eksisterende



Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, SINTEF Ocean, NTNU

Næringsaktører: Mo Industripark, REMA1000, Eramet, Equinor, Finnfjord, Orkla, Pelagia

Mo Industripark tilrettelegger for utstrakt utveksling av energi- og materialstrømmer mellom de ulike industribedriftene lokalisert i industriklyngen. Foto: Benjamin Strøm Bøen / Mo Industripark

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

I det fremtidige energisystemet stilles det høyere krav til energieffektivitet for å redusere behovet for ny fornybar kraft og de miljøbelastningene slik kraftproduksjon medfører. Lokalisering av ulike bedrifter i en industriklynge kan bidra til dette, hvor ulike bedrifter utnytter overskudds energi- og materialstrømmer seg imellom. På denne måten kan mellom- til høytemperatur varme som er overskudd fra eksempelvis metallproduksjon utnyttes til formål som tørking i andre prosesser. Denne produksjonen ville alternativt kreve tilførsel av energi fra kraftnettet eller i form av fossile brenslers.

I HighEFF er det med utgangspunkt blant annet i Mo Industripark utviklet verktøy for å analysere energi- og materialflyt mellom ulike bedrifter i industriklynger. Videre er det gjort studier av hvordan overskuddsstrømmer kan utnyttes, eksempelvis til; kraftproduksjon fra CO-gass, varme til tørking av ulike produkter, varme til kuldeproduksjon, bruk av restmateriale til andre produkter, bruk av varme til matproduksjon. Gjennom slike tiltak økes energieffektiviteten for industriklyngen betraktelig sammenliknet med frittstående bedrifter.

Et viktig aspekt har også vært komponentutvikling som kan bidra til direkte energiutveksling. Eksempel er utvikling av en varmeveksler for effektiv innfangning av varme fra skitten avgass fra aluminium elektrolyse ved høyest mulig temperatur.

Arbeidet har ført til bedre utnyttelse av energi som ellers ville gått til spille, og gjenbruk av materialstrømmer som ellers ville måtte deponeres. Det gir økt total energieffektivitet i industriklyngen, og reduserte klimagassutslipp. Bedre utnyttelse av ressurser gir også økt verdiskaping i industriklyngen og grunnlag for nye industribedrifter og økt konkurransedyktighet for eksisterende.

10.4 Bruk av høytemperatur varmepumper i industrien

En stor andel av varmen som kreves i industrien er mellom 100 og 200°C. I dag dekkes dette behovet i stor grad av fossile brenslers som gir store utslipp av CO₂, eller med direkte bruk av elektrisitet som gir høyt kraftbehov. Høytemperatur varmepumper kan levere varmen som trengs og dermed bidra til avkarbonisering med et lavt kraftbehov.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Erstatning av fossile brenslers og tilsvarende reduksjon i klimagassutslipp
- Sterkt redusert kraftbehov, typisk over 50 prosent reduksjon sammenliknet med direkte bruk av elektrisitet
- Nasjonalt potensial for å spare 3,2 TWh/år med primær-energi og 121 kt/år CO₂-utslipp.*



Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, NTNU

Næringsaktører: Gassco, Glencore Nikkel, Mo Industripark, Equinor, Finnfjord, Orkla, Pelagia

*Høytemperatur varmepumpe ved Felleskjøpet i Trondheim som produserer damp ved ca. 120 °C.
Foto: Aneo Industry*

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓		✓		✓

Varmebehov i industrien dekkes i dag i stor grad med fossile brenslers, noe som ikke er en akseptabel løsning i et lavutslippssamfunn, eller ved direkte bruk av elektrisitet som medfører sterk økning av kraftbehovet. Høytemperatur varmepumper kan tilfredsstille varmebehov på en energieffektiv måte om temperaturbehovet er moderat, typisk i området 100–200°C, og når en har egnede varmekilder tilgjengelig. Ved å bruke naturlige kjølemedier unngås utslipp av fluor-baserte gasser, som er sterke drivhusgasser, og kan bidra til andre miljømessige konsekvenser.

Siden slike varmepumper krever drift ved betingelser langt ut over de en finner for mer ordinære varmepumper, har det vært behov for utvikling i alle ledd, fra komponenter, nye arbeidsmedier og til systemutvikling. I tillegg til teoretisk modellering og analyse har ulike konsepter blitt prøvd ut i laboratoriet HighEFFlab og i felt. Det har videre blitt gjennomført en rekke studier for ulike bedrifter og sektorer, som varierer i kapasitet, temperaturkrav og grensebetingelser generelt.

Potensialet fremstår størst i næringsmiddelindustrien; studiene estimerer 27 prosent redusert energibehov og 50 prosent redusert klimagassutslipp for produksjonsanlegg. Studier på elektrifiserte olje- og gass-anlegg estimerer reduksjon i kraftbehov og utslipp på 14 prosent på plattformer og 11 prosent på land. Smelteverksindustrien har begrenset oppvarmingsbehov, men der det finnes kan høytemperatur varmepumper redusere kraftbehovet med 7 prosent og utslippene med 3,5 prosent. For de undersøkte sektorene er det estimert et nasjonalt potensial for å spare 3,2 TWh/år med primær-energi og 121 kt/år CO₂-utslipp.* Det er stor forskjell på kraftbehov i de ulike sektorene, så lave prosentvise anslag vil kunne utgjøre et større anslag for spart energi.

Forutsetningene for dette anslaget avviker fra forutsetningene for dybdestudien i kapittel 3.5. Beregningsresultatene er derfor ikke direkte sammenlignbare.

10.5 Resirkulering av gass i metallproduksjon

Norges metallproduserende industri bidrar til en vesentlig andel av Norges landbaserte CO₂-utslipp. En viktig utfordring er at avgassen har relativt lav CO₂ konsentrasjon, men resirkulering av avgass for å oppnå økt CO₂ konsentrasjon kan bidra til effektiv fangst av CO₂ og redusert energibehov.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Mer enn 10 prosent reduksjon i energibehov til karbonfangst
- Gir mulighet for energigjenvinning ved høy temperatur og utnyttelse av avgassvarme i fangstprosess
- Redusert kraftbehov til karbonfangst kan reduseres med anslagsvis 350 GWh/år



Tapping av silisium fra pilot-ovn med resirkulering av avgass. Foto: Vegar Andersen

Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, NTNU

Næringsaktører: Elkem, Wacker, Finnfjord, Alcoa, Hydro

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Metallindustrien har i dag relativt lav avgasskonsentrasjon siden den fortynnes med luft for å redusere temperaturen og for temperaturkontroll i ovnene, typisk 3-5 prosent CO₂ for Si/FeSi, og rundt 1–2 prosent for Aluminium. For kostnads- og energieffektiv CO₂-fangst bør CO₂-konsentrasjonen i avgassen være høyest mulig. Ved å resirkulere deler av avgassen kan en oppnå betydelig høyere CO₂-konsentrasjon, typisk i området 15–20 prosent. Dette forenkler og effektiviserer fangst av CO₂ fra avgass, eksempelvis ved raskere reaksjonsrater, høyere CO₂-lasting av absorbent, behov for mindre mengder solvent og mer kompakte og mindre fangstanlegg.

Gjennom FME HighEFF er løsningen utviklet og testet i pilotskala i tett samarbeid med aktuelle sluttbrukere innen silisiumproduksjon. Det er utført utstrakt modellering og simulering for å legge grunnlag for design av prosesser med resirkulering av avgass. Det er gjort laboratorieskala testing ved NTNU-SINTEF, og pilot-skala testing av CO₂-fangst fra avgass ved Mo industripark.

Resirkulering av avgass kan muliggjøre effektiv CO₂-fangst, og gir mer enn 10 prosent reduksjon i energibehovet til karbonfangst uten resirkulering. Resirkulering gir også mulighet for energigjenvinning ved høy temperatur, og utnyttelse av avgassvarme i fangstprosessen.

For norsk Si/FeSi produksjon kan kraftbehovet for karbonfangst reduseres med 180 GWh/år. Dette er en aggregering på nasjonalt nivå gitt at varmepumpen har COP på 1,5 for leveranse av varmen og at denne løsningen implementeres på 2/3 av anleggene. For Al industrien vil tilsvarende reduksjon i kraftbehov bli 170 GWh/år, om konsentrasjonen kan økes fra 1,5 til 10 prosent. For Al vil en slik løsning riktignok ligge lengere fram i tid, og det forskes også inngående på karbonfrie produksjonsprosesser. Aggregering til Europeisk nivå er ikke gjort per d.d men kan gjøres på basis av produksjonskapasitet i Europa.

10.6 Termisk energilagring og fleksibilitet

Ved bruk av energilagring kan en produsere termisk energi når energiprisen er lav og bruke energien når prisen er høy, samt at en kan redusere behov for overført effekt i energisystemet. Termisk energilagring bidrar til redusert effektbehov og økt fleksibilitet i lokale industrielle energisystem.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Minst 10 prosent reduksjon i energiforbruk.
20 prosent reduserte strømkostnader, 30 prosent redusert spisslast
- 70-90 prosent redusert lagringsvolum sammenliknet med termisk lagring i varmtvannstanker
- Anslått behov i Europa 300 GWh lagringsbehov, som kan redusere utslipp med 330 MtCO₂e



Et av Cartesian sine demo-anlegg for lagring av kuldeenergi. Foto: Cartesian

Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Industri, SINTEF Ocean, NTNU

Næringsaktører: REMA 1000, Tine, Orkla

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Energisystemet påvirkes i større og større grad av ikke-regulerbare energikilder som vind og sol. I tillegg oppstår begrensninger i overføring av i strømnettet som følge av økt elektrifisering. Dette øker behovet for lagring av energi. Utnyttelse av termiske lagre, kulde- og varmelagre, kan bidra til å redusere effektuttak og redusere kostnader ved å utnytte ledig kapasitet når belastning og strømpriser er lave.

Termiske lagre kan utføres på en rekke ulike måter. En mulighet er å basere seg på bruk av faseendrings-materialer. Konseptene er utviklet blant annet som en del av forskningen i HighEFF og kommersialisert i spin-off selskapet Cartesian. Ved kuldelagring for klimatisering kan en benytte vann som fryser og smelter. For høyere temperaturer, eksempelvis til romoppvarming, benyttes andre materialer, eksempelvis voks, som har høyere fryse-/smeltetemperatur. Hovedfokus har vært på lagring i temperaturområde -20 til 120°C, men potensielt kan konseptene benyttes i hele temperaturskalaen, fra -250°C til flere hundre grader.

Cartesian har identifisert et totalt adresserbart marked av ca. 300 GWh-kapasitetsbehov i Europa for termisk energilagringstilsvarende Cartesian sin teknologi. Dette gjelder næringsbygg, supermarkeder og industriprosesser. Om alt av dette skulle løses med Cartesian sin teknologi er det potensiale til over 330 MtCO₂ lavere utslipp, med en løsning som reduserer energikostnader og energiforbruk for sluttbrukere og også reduserer behov for videre nettutbygging. HighEFF har bidratt til utvikling av det teoretiske grunnlaget for utvikling av ulike teknologikonsepter og modeller for termisk energilagring ved ulike temperaturnivå, samt kunnskap rundt dimensjonering og hvordan energilagrene kan integreres med andre teknologier. Videre er det gjennomført laboratorie-skala testing av nye design og reguleringskonsepter for ladning og utladning av lagrene. Konseptene prøves

11 Nullutslippstransport



11.1 Silisiumbaserte nanomaterialer for litium-ion-batterier

Batteriprodusenten Cenates mål er å redusere vekten, kostnaden, litiumforbruket og CO₂-fotavtrykket til Li-ion-batterier i elbiler. 1 kg av Cenates materiale kan erstatte 4-6 kg av grafitten som i dag brukes i batteriene.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Viktige potensielle effekter:

- Økt energitettheten i batteriene med inntil 30 prosent
- Reduserte kostnader (pr kWh) i batterifabrikkene
- 15-35 prosent reduserte CO₂-utslipp i batteriproduksjonen
- Redusert litium-forbruket sammenliknet med andre silisiumanoder

Forskningsaktører: IFE, SINTEF

Næringsaktører: Cenate A/S, Dynatec Engineering, Dynatec A/S



Cenate har i perioden 2017–2025 mottatt mellom 250-300 MNOK i støtte til forskning og utvikling, inkludert bygging av pilotfabrikken med produksjonsutstyr. Cenate flyttet i 2022 inn i egen pilotfabrikk på Holtskogen. Foto: Cenate

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓			✓

Silisium har mye større evne til å lagre litium enn grafitt, men anodematerialer med høy innblanding av silisium i grafitt er mye mindre stabile enn tradisjonelle materialer med lite eller ingen innblanding av silisium. Cenate har utviklet et nytt produkt med silisium-karbon-nanostrukturer som stabiliserer materialet, så det kan overleve godt nok for vanlig bruk i batterier for elbiler. Over de siste årene har Cenate tilpasset produktet til alle de ulike kravene som et batterimaterial må tilfredsstille, både i produksjonsprosesser og i sluttproduktet.

Cenate har utviklet en prosess der silangass og karbonholdig gass omdannes til partikler før disse deretter etterbehandles så de fungerer optimalt i batteriet. Hver ny endring i størrelse, sammensetning eller overflater blir så testet i små batterier i Cenates laboratorier. De mest lovende materialene blir testet hos eksterne kunder. Gjennom tett samarbeid med verdens beste batteriprodusenter har Cenate lært stadig mer om hvilke materialegenskaper som er viktige i et batteri. Pilot-kundene kan ikke dele proprietær informasjon hvordan de lager batterier, noe som har gjort Cenates utviklingsarbeid krevende. FME MoZEES har gitt Cenate en arena for å diskutere celleproduksjon og testbetingelser på en måte som har gitt raskere læring enn hva som ellers ville ha vært mulig. Forbedret testing har ført til en rask utvikling av produktet.

Cenate har nå et produkt som bør kunne passere kvalifikasjonsprosessene for bilbatterier. Cenate har også en prosesslinje som har tatt ut det meste av skaleringsrisikoen på vei mot masseproduksjon. Batterier med materialer fra Cenate bør kunne øke energitettheten i batteriene med inntil 30 prosent, redusere kostnader (pr kWh) i batterifabrikkene, redusere CO₂-utslipp i batteriproduksjonen med 15-35 prosent, og redusere litium-forbruket sammenliknet med andre silisiumanoder.

11.2 PEM vannelektrolyse for tungtransport og industri

Hystar har utviklet verdens mest effektive elektrolysør for PEM (proton exchange membrane), og startet opp produksjon i Norge. Dette kan gjøre hydrogen produsert med fornybar energi billigere og dermed mer tilgjengelig.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige potensielle effekter:

- Produksjon av hydrogen på en mer energieffektiv måte enn konvensjonell PEM-vannelektrolyseteknologi
- Produksjon av PEM-vannelektrolysestacker og -systemer tilsvarende tilsvarende 100 MW/år er etablert på Høvik utenfor Oslo
- Planer og medfinansiering fra EU Innovation fund på en oppskalering til 4,5 GW.



Forskningsaktører: SINTEF, IFE, NTNU

Næringsaktører: Hystar

Energiminister Terje Aasland deltok på åpningen av HyPilot-prosjektet i 2024, hvor Hystars patenterte teknologi skal demonstreres på Kårstø. Foto: Hystar

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓				✓	✓

Hydrogen vil bli en nøkkelteknologi i det grønne skiftet, særlig for sektorer der avkarbonisering er vanskelig, det være seg i industrien eller i deler av tungtransporten hvor batterier kan komme til kort. For å gjøre hydrogen konkurransedyktig må hydrogen produseres billigere og mer effektivt.

Hystars patenterte teknologi ble utviklet i SINTEF. Etter at idéen ble unnnfanget har teknologiutviklingen blitt utført via ulike prosjekter i virkemiddelapparatet: fra små interne prosjekter finansiert via SINTEFs grunnbevilgning for å forstå prinsippet, via NFR Forny-prosjekter for å validere potensialet for kommersialisering, og til slutt, etter at Hystar ble startet, ved hjelp av større innovasjonsprosjekter fra NFR og Enova med samarbeidspartnere fra instituttsektoren og industrien.

Den nye teknologien fra Hystar gjør det mulig å produsere hydrogen med et lavere energiforbruk og en lavere risiko. Hystar har endret måten PEM-elektrolysøren driftes på, slik at det er mulig å alltid holde seg innenfor trygge grenseverdier for hydrogenkonsentrasjon i oksygen. Hystars teknologi muliggjør bruk av tynnere membraner enn det som er vanlig i konvensjonell PEM-vannelektrolyseteknologi, noe som gir mindre ionisk motstand i membranen og lavere totalt energiforbruk. Bruk av tilsvarende tynne membraner i konvensjonelle PEM elektrolysører vil gi en mye høyere risiko for eksplosive blandinger av hydrogen i oksygen.

Økt produksjon av hydrogen via vannelektrolyse basert på fornybar kraft vil kunne redusere klimagassutslippene, spesielt i sektorer som er vanskelige å avkarbonisere. Mot slutten av 2024 er det i overkant av 65 ansatte i Hystar. Det er planlagt etablering av PEM-vannelektrolysesystemer tilsvarende ca. 100 MW på Høvik utenfor Oslo og med planer om oppskalering til en årlig produksjonskapasitet på 4,5 GW i 2027.

11.3 EIS-verktøy for levetidsstudier av brenselcelle

SINTEF og IFE har utviklet instrumentering og analysemetoder som muliggjør bedre overvåkning av brenselceller.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Viktige potensielle effekter:

- Reduksjon av drifts- og investeringskostnader pga. økt levetid på brenselcellene

Forskningsaktører: IFE, SINTEF

Næringsaktører: Nel Hydrogen, Johnson Matthey, Corvus Energy



*PEM-brenselcellesystemlaboratorium på IFE med mulighet for testing og avansert karakterisering av PEM cellepakker.
Foto: B. A. Ward*

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓	✓	

Hydrogendrevne PEM (Proton Exchange Membrane) brenselceller har et stort potensial innen tungtransport og maritime bruksområder, men for å oppnå kostnadseffektive systemer må levetiden på brenselcellene forlenges betydelig (Mål i MoZEES: fra 20 000 til 40 000 driftstimer). Det er derfor avgjørende å kunne overvåke ytelsen på brenselcellene under drift i kombinasjon med forståelse av brenselcellenes degraderingsmekanismer. Elektrokjemisk impedansspektroskopi (EIS) er et kraftig verktøy for å studere degradering av brenselceller. Denne teknikken kan også brukes under drift av brenselcellene. Metoden er å sende et elektrisk signal inn i brenselcellen og registrere responsen som kan si noe om brenselcellens tilstand. Problemet med EIS er at det er vanskelig og tidkrevende å både måle og analysere resultatene. I MoZEES har IFE og SINTEF utviklet to ulike teknikker basert på EIS for å kunne måle hva som skjer i brenselcellen raskt og effektivt.

De to teknikkene er basert på henholdsvis multisinus EIS og fordeling av relaksasjonstider (*distribution of relaxation times*). I den første metoden sendes signaler på flere frekvenser samtidig, som gir flere og raskere resultater. I den andre metoden benyttes en matematisk transformasjon på dataene, som gjør det enklere å skille bidrag fra de ulike prosessene og degraderingsmekanismene som foregår i brenselcellen.

Resultatene viser at disse metodene kan bli nyttige verktøy for å diagnostisere tilstanden til brenselcellene *in-situ*, som igjen kan benyttes til å optimalisere driften for lengst mulig levetid. Det gir reduksjon av drifts- og investeringskostnader pga. økt levetid på brenselcellene. Teknikkene er nå en standard del av industriprosjektene på IFE og SINTEF, og kan på sikt integreres i kommersielle produkter.

11.4 Laboratorium for batteri- og hydrogengasseksplosjonstester

Forskningsgrupper ved USN og FFI har bygget opp et eksperimentelt oppsett og kompetanse i Norge for studier av eksplosjoner av batteri- og hydrogengass. Kompetanse og erfaringer har blitt delt med nasjonale myndigheter, DNV og brannvesen gjennom MoZEES-sikkerhetsseminarer og oppfølgingsprosjekter.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Utvikling av eksperimentell kapasitet i Norge for å studere sikkerhetsproblematikk relatert til batteri- og hydrogenteknologi
- Økt nasjonalt fokus og generell kompetanse på batteri- og hydrogensikkerhet



Forskningsaktører: USN, FFI, IFE

Næringsaktører: DNV, Vysus Group, ZEM Energy, Corvus Energy

Testoppsett ved FFI med en 6 meter lang kanal. Bildet er fra en høyhastighetsfilm som viser deflagrasjon av en etan-hydrogen-blanding med en barriere/obstruksjon til stede. Foto: USN FFI

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
				✓		

Fremveksten av Li-ion batterier og forventet vekst i hydrogenmarkedet har ført til økt fokus på sikkerhet, f.eks. DNVs utvikling av regelverk for maritime batterier. Her er det et behov for å kunne studere nøyere hvordan ulykker og eksplosjoner kan skje og hvordan slike hendelser kan utvikle seg avhengig av størrelse på rom og barrierer til stede. Til tross for ulykker med relativt store hydrogenutslipp og inhomogene gasskyer finnes det få eksperimentelle studier på dette feltet, pga. sikkerhetstiltak iverksatt for å unngå nettopp dette.

I MoZEES har målet vært å studere spredning og eksplosjoner av inhomogene gasskyer i både liten og stor skala for bedre å kunne karakterisere og modellere slike hendelser. USN og FFI har i MoZEES utviklet kompetanse og eksperimentelle oppsett for studier av eksplosjon fra avgasser fra Li-ion-batterier og hydrogensystemer. På USN er det bygget opp et småskalaoppsett, mens FFI disponerer en 6 meter lang kontainer for det samme formålet på større skala. Både brukserfaringer og utstyr fra disse oppsettene kan brukes videre i studier av andre typer utslipp, f.eks. for spesifikke batterigass-blandinger. Arbeidet med numerisk modellering i åpen kildekode gir i tillegg mulighet for å sette eksperimentelle resultater i sammenheng med kunnskap om strømningsfeltet i de to oppsettene.

Batteri- og sikkerhetsarbeidet i MoZEES har hatt konkrete resultater. For det første har det vært utviklet eksperimentelle kapasiteter i Norge for å studere sikkerhet knyttet til batteri- og hydrogenteknologi. Dette har bidratt til et økt nasjonalt fokus og økt kompetanse gjennom åpne MoZEES sikkerhetsseminarer. Dessuten har arbeidet ført til etablering av både nasjonale og internasjonale prosjekter med fokus på sikkerhet, som H2KONSTABEL, SH2IFT-2, HyRESPONDER, HyTunnel-CS, og H2Maritime.

11.5 Verktøy for beregning av energi og utslipp i sjøtransport

TØI har utviklet en ny modell (AISEEM) som analyserer bevegelsene av fartøy, og funnet at det er teknisk mulig med nullutslippsframdrift på dagens hurtigbåtsamband. AISEEM-modellen fordeler energibruk til ulike havner for å vurdere behovet for lade- og fylleinfrastruktur.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)Ddd

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Resultater fra AISEEM viser at de fleste hurtigbåtsamband potensielt kan erstattes med batteri- eller hydrogen/brenselcelle-elektriske fartøy.
- AISEEM-modellen kan også brukes for å vurdere behov for lade-/fyllleinfrastruktur på land.



Forskningsaktører: TØI, IFE

Næringsaktører: Ocean Hyway Cluster, Kystverket, Brødrene Aa, Paradis Nautica, Bertel O. Steen, Corvus Energy, Hexagon Purus, Ruter, Norled, TECO2030

AISEEM er benyttet til å allokere daglig energiforbruk til havn, basert på lengste stopp i løpet av dagen Illustrasjon: Sundvor et al. TRPD: Transport and Environment 99, 103029, 2021

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓		✓		✓

AISEEM-verktøyet (Automatic Identification System Energy and Emission model) kan vise hvilke dagens fartøy som kan erstattes med fartøy med utslippsfri fremdriftsteknologi, og hvilken utslippsreduksjon det vil gi. I MoZEEs var den opprinnelige spesifikke problemstillingen knyttet til hvilke hurtigbåter i Norge som vil kunne konverteres/erstattes til enten å bruke kun batterier eller brenselceller og komprimert hydrogen. For å kunne analysere dette for alle hurtigbåtene utviklet TØI modellen AISEEM. I prosessen fikk en innspill og data fra både forskningspartnere og brukerpartnere i MoZEEs. Spesielt viktig var det å få data på dagens fartøy og motorene, samt informasjon om tekniske muligheter for ny fremdriftsteknologi.

AISEEM benytter posisjonsdata (AIS data) og informasjon om fartøyene (f.eks. motorstørrelse og servicefart). Modellen er modulær og analyserer bevegelsene til fartøyene, identifiserer hvor de stopper, estimerer drivstoff-/energiforbruk og beregner utslipp. Med vurderinger rundt effekter av ny fremdriftsteknologi og nye energibærere kan potensialet for slik teknologi kartlegges for et gitt segmentet. AISEEM har blitt benyttet i andre forskningsprosjekter og fartøysegment som f.eks. fiskefartøy.

For hurtigbåter viste analysene at de fleste samband potensielt kan erstattes med enten batteri- eller hydrogen/brenselcelle-elektriske fartøy. Analysene identifiserte at enkelte samband er mer utfordrende pga. kort liggetid til kai og at lading/fylling trenger mer tid enn dagens rutetabell tillater. Økt vekt for alternative energibærere og systemer tilsier at fartøyene også må bli større hvis passasjerkapasitet skal holdes uendret, noe som også øker energiforbruket. AISEEM-modellen kan også allokere energibruken til ulike havner for å vurdere behovet for lade-/fyllleinfrastruktur på land.

11.6 ZETruck-metode for integrert kostnads- og miljøanalyse av nullutslippslastebiler

I MoZEES har det blitt utviklet ett rammeverk for å studere kostnadseffekter og miljøeffekter av å erstatte diesellastebiler med nullutslippslastebiler.

Viktige effekter:

Bedre forståelse av konkurranseforholdet mellom ulike nullutslippsløsninger for ulike segmenter av lastebiltransport, og når disse kan forvente å konkurrere med konvensjonell dieselteknologi.



Forskningsaktører: TØI, SINTEF, IFE

Næringsaktører: Asko Midt-Norge, Unibuss, Statkraft

Mercedes eActros 600 el-lastebiler med 500 km rekkevidde lader på UNO-X hurtiglader på Biri i Innlandet som del av testing for markedsintroduksjonen. Foto: Erik Figenbaum (TØI).

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓		✓	

Det er usikkerhet rundt kostnadene og de globale miljøeffektene ved å erstatte diesellastebiler med lastebiler basert på batterier og/eller hydrogen og brenselcelleteknologi, samt konkurranseforholdet mellom disse alternativene.

ZETruck-caset i MoZEES har sett på hvilke nullutslippsteknologier som kan konkurrere mot diesellastebiler gjennom å beregne kostnader for bedrifters adopsjon (TCO – Total Cost of Ownership), kostnadsbildet i ett skattenøytralt scenario (uten skatter), samfunnsøkonomiske kostnader, samt miljøkostnader. Caset bygger også på intervjuer gjort med tidligbrukere av nullutslippslastebiler og andre.

Resultatene fra MoZEES ZETruck-modelleringen viser at nullutslippslastebiler fortsatt koster en god del mer i innkjøp enn diesellastebiler. Batterielektriske lastebiler har fallende innkjøpskostnader og får stadig lengre rekkevidde som følge av rask teknologiutvikling og forventes derfor å bli konkurransedyktige med diesellastebiler innen 2030, gitt dagens politikk. MoZEES-studiet viser også at hydrogendrevne brenselcellelastebiler basert på elektrolytisk produsert hydrogen ikke kan konkurrere mot batterielektriske langtransport lastebiler med mindre hydrogen kan selges til 45-60 NOK/kg. For kortere transporter vil ikke hydrogenlastebiler være konkurransedyktige. Klimamessig kommer de to alternativene (forutsatt norsk vannkraft) forholdsvis likt ut, da de har mye lavere livsløpsutslipp enn diesellastebiler. For andre miljøeffekter varierer resultatene.

12 Energisystemer



12.1 Metode for risikobasert nettdrift

Kraftnettet utfordres av økende integrasjon av variabel fornybar produksjon og økende kraftutveksling. Ved bruk av risikobaserte metoder kan vi oppnå hurtigere elektrifisering og store besparelser i investeringer.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Økt nettutnyttelse som muliggjør tilknytning av mer strømprduksjon og -forbruk
- Kostnadsbesparelser gjennom redusert eller utsatt bygging av kraftnett
- Anslått nåverdi på inntil 7,5 mrd. kr i perioden 2023–2032, antatt 5 prosent reduksjon i forventede investeringer i transmisjonsnettet i hele Norge



Flere nettoperatorer har tatt i bruk hele eller deler av metoden. Økt utnyttelse av kraftnettet muliggjør hurtigere elektrifisering av samfunnet. Foto: Pixabay.

Forskningsaktører: SINTEF Energi

Næringsaktører: Statnett

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓	✓	

Kraftnettet utfordres av raskere varierende driftstilstander på grunn av økende integrasjon av variabel fornybar produksjon, nytt forbruk og økende kraftutveksling mellom land. Dette håndteres tradisjonelt ved å bygge nytt nett, og sørge for at systemet tilfredsstiller det såkalte «N-1-kriteriet», som innebærer at nettet skal tåle utfall av alle enkeltkomponenter uten at det blir avbrudd i strømforsyningen. Nettbygging kan imidlertid ta lang tid og være svært kostbart. Med mer ekstremvær er heller ikke nødvendigvis «N-1-kriteriet» tilstrekkelig i alle situasjoner. Ved å beregne faktisk risiko kan nettutnyttelsen i mange tilfeller økes vesentlig, uten at det går på bekostning av forsynings sikkerheten

Denne utfordringen har synliggjort behovet for en risikobasert tilnærming til planlegging og drift av kraftnett. Målet med forskningen har vært å utvikle metodikk som gjør det mulig å raskt analysere et stort antall driftstilstander, for så å kunne velge strategier der kostnadseffektivitet balanseres mot forsynings sikkerhet. Det er utviklet konkrete modeller og verktøy som gjør oss i stand til å beregne og sammenligne samfunnsøkonomisk kostnad ved ulike driftsstrategier. Blant viktige resultater er 1) økt utnyttelse av kraftnettet muliggjør hurtig tilknytning av mer fornybar energi eller nytt forbruk og 2) metoden medfører at nettbygging kan utsettes eller gjøres mindre omfattende.

Modellene som er utviklet kvantifiserer kostnadselementer og tilbyr verdifull innsikt for systemoperatører. Videre er det arbeidet med å redusere beregningstiden blant annet gjennom bruk av effektive regneteknikker og kunstig intelligens. Flere nettoperatorer har tatt i bruk hele eller deler av metoden.

12.2 Transformatorforvaltning

Forskning på transformatorer har resultert i bedre materialer og lengre levetid. Resultatene vil medføre store reduksjoner i fremtidige investeringer.

Oppnådd TRL-nivå (modenhetsgrad av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Mulig dobling av transformatorenes levetid fra 40 til 80 år ved bruk av termisk oppgradert isolasjonspapir
- Reduksjon av fremtidige investeringer for nettselskapene med over 25 mrd. kroner i nåverdi som følge av levetidsforlengelse
- Økt bærekraft for nettkomponenter



Innvendig konstruksjon av en krafttransformator.

Foto: SINTEF

Forskningsaktører: SINTEF Energi

Næringsaktører: Statnett, Elvia, Statkraft, Hitachi

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓	✓	

Transformatorer er kostbare investeringer, og nøkkelkomponenter i kraftsystemet. Forskningsmålet har vært å øke levetiden og bevare driftssikkerheten for disse komponentene. Dersom levetiden på en transformator kan forlenges har det stor samfunns- og bedriftsøkonomisk verdi.

Materialer er studert og transformatorer er undersøkt i felt og det er laget digitale/ regnemodeller som har blitt validert mot faktiske transformatorer. Viktige forskningsaktiviteter har blant annet vært 1) Utvikling av internasjonalt anerkjente aldringsmodeller for transformatorisolasjon. 2) Utvikling av ny metode og tilhørende verktøy for estimering av tilstand, feilrate og restlevetid til krafttransformatorer. 3) Etablering av feilstatistikk og skrotingsdatabase for norske transformatorer i samarbeid med den norske Brukergruppen for Kraft- og Industritransformatorer.

En stor transformator koster opp mot 50 MNOK. Resultatene legger til rette for bedre spesifisering for nye transformatorer med bedre materialer, samt tilstandsbasert og kostnadseffektiv forvaltning med kontrollert og akseptabel risiko for havari. I Norge de siste 20 år er det anskaffet over 1100 krafttransformatorer med en samlet ytelse på over 100 000 MVA (megavoltampere) til nærmere 25 mrd. kroner i ekvivalent 2024 anskaffelsesverdi. Ved bruk av termisk oppgradert isolérpapir – som forskningen har vist er motstandsdyktig mot aldring – kan en anta en dobling av tidligere forventet levetid – fra 40 til 80 år. Dette vil gi en potensiell reduksjon av fremtidige nødvendige investeringer for nettselskapene på over 25 mrd. kroner (i nåverdi).

12.3 Feil- og avbruddshåndtering

Smartere feil- og avbruddshåndtering ved bruk av feilstrømindikatorer og selvhelende nett gir kortere varighet av avbrudd i strømforsyningen og reduserte avbruddskostnader.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Effektivisering av arbeidsprosesser og reduserte driftskostnader for nettoperatorene
- Økt forsyningssikkerhet gjennom redusert varighet av avbrudd
- 25–40 prosent reduksjon av samfunnsøkonomiske avbruddskostnader (KILE). Tilsvarende et potensial på ca. 125 mill. kr i redusert årlig KILE, tilsvarende ca. 1 mrd. Kr i nåverdi (10 år)



Kortslutningsindikator som indikerer lokalt med blinkende LED, og har batteri og modem for å sende informasjon via mobilnettet.

Forskningsaktører: SINTEF Energi

Næringsaktører: Lede, Elvia, Elinett

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
				✓	✓	✓

Avbrudd i strømforsyningen kan gi store samfunnsøkonomiske kostnader. Det er derfor viktig å detektere, lokalisere og isolere feil i nettet så raskt som mulig slik at strømforsyningen kan gjenopprettes til de friske delene av nettet. For å oppnå dette kan en ta i bruk feilstrømindikatorer og selvhelende nett som innebærer automatisk gjenoppretting. Utnyttelse av slik funksjonalitet gir potensial for reduksjon i både antall og varighet av avbrudd.

For at nettselskapene skal kunne ta ny teknologi i bruk, er det testet og demonstrert utstyr for å verifisere funksjonalitet og ønsket effekt for leveringspålideligheten. Demonstrasjon og uttesting av ulike feilindikatorer har foregått hos ulike nettselskap og i ulike nettområder, både luftnett og kabelnett. Det er blitt testet ulike typer kortslutnings- og retningsbestemte jordslutningsindikatorer, kombinert med fjernstyring og bruk av målinger til estimering av avstand til stedet der feilen har oppstått, og automatisk gjenoppretting (selvhelende nett).

Forskningsresultatene har ført til reduserte driftskostnader som følge av endringer i arbeidsprosesser knyttet til feil- og avbruddshåndtering. Forskningen har gitt bedre beslutningsgrunnlag og økt kompetanse med hensyn til løsninger for feil- og avbruddshåndtering, samt analyse av leveringspålidelighet der smartgridteknologi inngår. Videre har forskningen gitt verdifulle erfaringer knyttet til etablering av test/-demonstrasjonsinfrastruktur for feil- og avbruddshåndtering i distribusjonsnettet. Det er avdekket potensial for hurtigere feillokalisering, med reduksjon av både avbruddsvarighet og antall delavbrudd.

12.4 Dynamisk drift av kraftledninger

I mange regioner er det kø av forespørsler om tilknytning til nett. Lang ventetid, kombinert med at nettutbygging er tidkrevende og kostbart, gjør effektiv utnyttelse av eksisterende nett stadig viktigere. Forskning i FME CINELDI viser at bruk av Dynamic Line Rating (DLR) gir mulighet for økt kapasitet i strømmettet på om lag 20 prosent.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Bedre utnyttelse av eksisterende kraftnett
- Redusert investeringsbehov i nytt nett
- Ny produksjon og last kan tilknyttes raskere
- Muliggjør elektrifisering
- Utvikling av norsk teknologi og gode inntjeningsmuligheter for norske bedrifter



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU

Næringsaktører: Heimdall Power, BKK, Lede, Tensio, Fagne, Linja, Arva, Statnett

Neuron™ er sensorer som kan måle blant annet strøm i linja og gi informasjon om tilgjengelig kapasitet som er avhengig av spesielt vind og lufttemperatur. Foto: Heimdall Power

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓	✓	✓

I dag driftes de fleste kraftnett basert på statiske sikkerhetsgrenser og erfaringsbaserte modeller og prognoser, med relativt få kilder til sanntidsdata. Overføringskapasiteten i det norske strømmettet er presset, og med økt elektrifisering fremover vil det være behov for å øke kapasiteten. Bygging av nett tar tid, samtidig som søknader for nye tilknytninger har skutt i været de siste årene.

Det vil være et behov for å utnytte det eksisterende strømmettet bedre for å møte det store behovet for elektrifisering. For å få til dette må det digitaliseres slik at nettselskapene kan få sanntidsdata om tilstanden til nettet og drifte det tettere opp til kapasitetsgrensene. Et digitalisert nett vil også gi nettselskap mulighet til å drifte nettet mer dynamisk og med mer automatiserte prosesser, som vil være viktig i et fremtidig kraftsystem som blir mer og mer komplekst. Nettselskapene har installert sensorer og bidratt til å utvikle, teste og validere forskningen. Heimdall Power har levert sensorer, samt bidratt til å utvikle testscenario og programvare. Testingen har hatt fem hovedmålsetninger: (1) økt kapasitet, (2) økt forsynings-sikkerhet, (3) mer effektiv nettdrift og nettplanlegging, (4) økt innsikt i kraftsystemets behov og (5) bedre integrasjon og koordinering mellom systemoperatører (TSO, DSO).

Gjennom forskningen har det blitt kommersialisert et produkt for verdensmarkedet. Nettselskapene får verdifull oversikt og sanntidsdata fra sine nett som gjør at de kan drifte nettet mer dynamisk. Det vil si at strømmen i nettet kan tilpasses og justeres etter forholdene, som gjør at det er mulig å tilknytte flere kunder uten å bygge ut nett. Det er også utviklet en metode for å få data integrert i SCADA, som er viktig for daglig driftsformål. Som et eksempel kunne et nettselskap ta imot økt kapasitet i et vindkraftanlegg ved å instrumentere opp to kritiske linjer. Selskapet kunne gjennom dette spare investeringer på rundt 200 mill. kroner, og vindkraftprodusenten måtte ikke vente på økt nettkapasitet.

12.5 Økt overføringskapasitet på kraftkabler

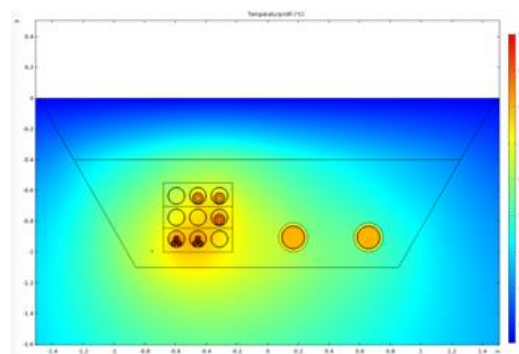
Nyskapende programvare for overføringskapasitet på kraftkabler har blitt utviklet av SINTEF og REN. Pilottesting har demonstrert over 20 prosent økning i overføringskapasitet, som vil bidra til redusert investeringsbehov og økt tempo i elektrifiseringen.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Bransjen har fått et – i verdenssammenheng – unikt verktøy for å beregne overføringskapasitet for kraftkabler.
- Mer nøyaktig beregning av overføringskapasitet vil gi bedre utnyttelse av eksisterende kabelnett og økt forsynings sikkerhet
- Ett case i en vindpark viste økt overføringskapasitet med 23 prosent i 4-5 timer og tillot overføring av flere titalls MWh ekstra under høy produksjon. Batterilagring for lik mengde energi ville kostet ca. 100 mill. kroner



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU
Næringsaktører: REN, Nexans, Elvia, Tensio, Glitre Nett, Lnett, Statnett, SafeBase

Utsnitt fra GrøftDesign som fremstiller varmeutviklingen og overføringskapasitet i en kabelinstallasjon. Illustrasjon: SINTEF/REN

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓	✓	✓

Elektrifisering krever mer overføringskapasitet i kraftnettet. Overføringskapasiteten til en kabelinstallasjon er så langt blitt bestemt av en tabellsamling fra 1975, unntatt kritiske installasjoner. Bruk av denne ble rigid og konservativ, siden mange vanlige installasjoner ikke var dekket, og kabelteknologi og forlegningsmetoder også har forandret seg siden 70-tallet. Det var derfor et behov for moderne digitale verktøy for å beregne overføringskapasitet, samt kunnskap for å lage effektive og økonomiske kabelinstallasjoner – spesielt de termiske egenskapene til alle jordsmonn, og byggematerialer i kabelinstallasjoner.

SINTEF Energi har utviklet og verifisert beregningseffektive numeriske modeller, som har blitt verifisert mot detaljerte modeller og eksperimentelt mot både skalerte laboratorieforsøk og fullskala kabelinstallasjoner. Det har også blitt utviklet metoder for å bestemme termiske egenskaper i kablenes omgivelser, som er svært viktig for å bestemme den sanne overføringskapasiteten.

REN har implementert dette som programvareløsning som selges til både norske og internasjonale aktører. Markedet for øvrig er basert på de gamle standardene, og modellen er derfor unik i verdenssammenheng. Programmet har fått navnet «Grøft Design» og er i dag i bruk i alle norske nettselskaper og store konsultentselskap. Det totale strømmnettets bokførte verdi er 160 mrd. kroner. En 5 prosent økning i kabelnettets kapasitet tilsvarer en verdi på ca. 4 mrd. kroner, antatt at kabelnettets utgjør 50 prosent av totalverdien.

12.6 Ladeinfrastruktur i kraftsystemet

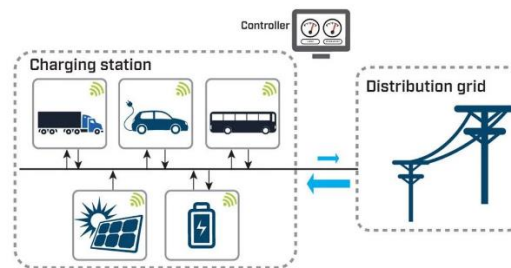
Smartere planlegging av strømmett med ladeinfrastruktur vil bidra til raskere og mer kostnadseffektiv elektrifisering av transportsektoren.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Raskere og mer kostnadseffektiv utbygging av ladeinfrastruktur
- Omsetningspotensial for norske aktører anslått til over 30 mrd. kr/år i 2030 og 100 mrd. kr/år i 2050, ref NHO rapporten «Grønne elektriske verdikjeder»
- Metodikken muliggjør tilknytning av flere ladestasjoner i kraftnettet



Forskningsaktører: SINTEF, NTNU

Næringsaktører: Statens vegvesen, Elvia, Lede, Elinett, Fangne, Glitre Nett, Ionity, Circle-K, Elywhere, Elbilforeningen, NVE

Smart samspill mellom ladeinfrastruktur og strømmett muliggjør rask og effektiv elektrifisering.

Illustrasjon: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
					✓	

Det er en utfordring å bygge ut ladestasjoner for veitransport på grunn av mangel på kapasitet i strømmettet. Å bygge ut den nødvendige lade-infrastrukturen er dyrt, tidkrevende, og delvis komplekst. Det er derfor viktig for samfunnet og elektrifiseringen å finne en effektiv måte å koble sammen transport- og kraftsystem. Sentrale aktører i denne verdikjeden er nettselskap og ladeoperatører.

Forskningsaktivitetene har omfattet blant annet:

- Ladeinfrastrukturens påvirkning på strømmettet
- Modellering av ladeprofiler og brukeradferd
- Design og drift av ladeinfrastruktur inkludert fleksibilitet i kraftsystemet
- Koordinert planlegging av strømmett og ladeinfrastruktur

Forskningen har bidratt til å utvikle metoder for å modellere ladebehovet og lastprofiler både for personbiler og tungtransport. Modellene har blitt tilgjengeliggjort for nettselskap og ladeoperatører, slik at de kan brukes til å gjøre bedre investeringsbeslutninger både i strømmett og i ladeinfrastruktur. Ladeprofilene som er utviklet er implementert og anvendt både blant næringsaktørene og i andre forskningsprosjekt. Forskningen har bidratt til å forstå hvordan ladestasjoner kan være en kilde til fleksibilitet ved å tilby støtte til strømmettet. Det er utviklet metoder for optimal drift av ladestasjoner med ulike typer fleksibilitetsressurser, slik som hurtigladdere, solceller og batterier.

12.7 Industriell fleksibilitet opp mot kraftsystemet

Industrifleksibilitet er et tiltak for bedre utnyttelse av kraftsystemet. Slik kan industrien bidra til å løse nettkøen, redusere strømregningen og styrke Norges forsyningsikkerhet på en naturvennlig måte.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Industrifleksibilitet gir stort potensial for å redusere last i kraftnettet i kortere perioder. Studier viser et potensiale for å senke topplast i kraftnettet med mellom 4 og 14 prosent
- Fleksibiliteten kan bidra til å løse nettutfordringer og håndtere perioder med lav variabel kraftproduksjon og gi raskere nettilknytning for nye aktører



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU

Næringsaktører: Tensio, Lede, Statnett, Tine, Yara, Eramet, Hydro, Reitangruppen

Tilgangen på strømnnett begrenser grønn omstilling for kraftkrevende industri som f.eks Herøya. Foto: Redigert foto av gunnsteinlye, Flickr

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
			✓	✓		

Norsk industri bruker 48 TWh elektrisitet årlig (2022), og totalt omtrent 75 TWh energi. Sektoren utgjør dermed en svært stor andel av norsk energibruk. Med stadig økende variabel fornybar kraftproduksjon vil ny fleksibilitet være nødvendig for å sikre balanse i kraftsystemet og håndtere nye og økende nettutfordringer. Tradisjonelt har regulerbar kraftproduksjon blitt benyttet til dette, mens det fremover typisk pekes på batterier og fleksibelt forbruk. Selv om industrien har størst andel nasjonal elektrisitetsbruk, og størst total energibruk, er det lite kunnskap om hvor fleksibel denne bruken kan være og om kostnadene ved å utnytte potensialet bedre.

Det er gjort studier på ulike industri typer – både små industrier og store kraft-krevende aktører – for å undersøke fleksibilitetspotensialet i deres prosesser. Sammen med aktørene er det sett på samspillet mellom industrien og kraftsystemet både i lokale energisamfunn og sett opp mot flaskehalshåndtering i transmisjonsnettet.

Utfordringen ligger i at selv om samfunnsnyttene er stor, så er denne typen fleksibilitet ikke nødvendigvis lønnsom for industrien. Likevel er kostnaden i samme størrelsesorden som å bygge nytt kraftnett og mye lavere enn å f.eks. installere batterier i nettet for å håndtere tilsvarende kapasitet. En videre utnyttelse av potensialet vil kreve endringer i insentiver og støtteordninger, noe som kan bidra til raskere omstilling av industrien.

12.8 Planlegging av kraftnett hensyntatt fleksibilitet

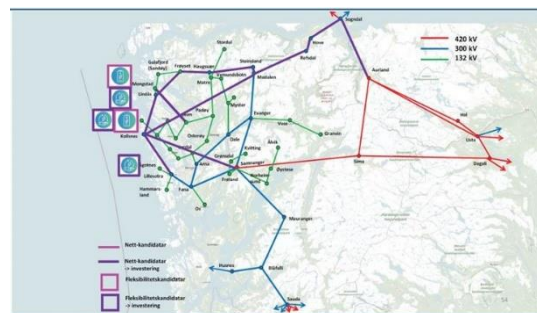
Bruk av fleksibilitet som supplement til nettutbygging kan brukes for raskt å kunne tilknytte nytt elektrisitetsforbruk og ny produksjon, samt gi bedre utnyttelse av nettet.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Hurtigere nettilknytning ved nytt elektrisitetsforbruk og produksjon
- Reduserte nettinvesteringer i enkelttilfelle på over 10 prosent, basert på potensielt reduserte og utsatte investeringer i kraftnett
- Størst effekt når det er stor usikkerhet rundt det fremtidige behovet for kapasitet i nettet



Forskningsaktører: SINTEF Energi

Næringsaktører: Statnett

FlexPlan-verktøyet anvendt på nettområdet til BKK. Verktøyet gir alternative planleggingstiltak i 2 grupper: Nett og bruk av fleksibilitet. Figur: SINTEF/Google maps

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
				✓	✓	

Målet med forskningsaktiviteten har vært å utvikle metodikk og verktøy for nettplanlegging som tar hensyn til fleksibilitetsressurser som et supplement til tradisjonell nettforsterkning/utvidelse. En hypotese er at bruk av fleksibilitet reduserer behovet for nettinvesteringer. Fleksibilitet er evne og vilje til modifisering av produksjons- og/eller forbruksmønster for å kunne tilby en tjeneste til kraftsystemet eller opprettholde stabil nettdrift. Fleksible ressurser er produksjons-, og/eller forbruksressurser, og/eller energilager, hvor injisert eller forbrukt effekt kan modifiseres etter avtale med nettselskapet og/eller en tredjepart (f.eks. en aggregator) slik at de inngår i og kan gjøre nytte i systemdriften.

Flexplan-verktøyet er et eksempel på en stor optimeringsmodell som er tatt fram og simulerer kraftflyten og samfunnsøkonomiske kostnader i hele det nordiske kraftsystemet. Modellen gis som input mulige tiltak (bygging av nett og bruk av fleksibilitet) å velge mellom, og modellen foreslår hvilken kombinasjon av tiltak som er samfunnsøkonomisk optimal. Metodikken kan brukes til å estimere investeringsbehov og den potensielle rollen til fleksibilitet i utviklingen av strømmettet.

En konklusjon fra arbeidet er at en ikke lenger snakker om fleksibilitet bare som et alternativ til nettutbygging; det er mer riktig å betrakte fleksibilitet som et supplement. Selv i de tilfellene der bruk av fleksibilitet ikke reduserer investeringskostnadene kan det ha stor nytteverdi fra et driftsperspektiv: Det kan være et tiltak for å håndtere driftsutfordringer i tiden det tar før nødvendige nettutbygginger kan gjennomføres. Fleksibilitet må tas i bruk for raskt å kunne tilknytte så mye forbruk og ny produksjon som mulig, og for bedre utnyttelse av nettet. Det må bygges mye nytt nett, men det skjer i mange tilfeller ikke fort nok. Fleksibilitet øker utnyttelsesgraden av det strømmettet vi allerede har, slik at strømmettet i mindre grad blir en bremsekloss for det grønne skiftet.

13 CO₂-håndtering



13.1 NCCS' bidrag for å muliggjøre fullskalaprojekt

Realisering av fullskala CCS-verdikjeder er avgjørende for å nå netto nullutslipp innen 2050. FME NCCS, med tilhørende prosjektportefølje i Forskningsrådet, Climit og EU, har gjennom forskning og innovasjon gitt viktige bidrag langs hele CCS-verdikjeden, og bidratt til kunnskapsbaserte beslutninger for realisering av Langskip-

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- NCCS har resultert i kunnskap og teknologi for realisering av sikre og effektive CCS kjeder, som solvent-teknologi for CO₂-fangst, design av rørledninger, CO₂ brønnintegritet, forståelse av geologien i undergrunnen, og CO₂ spesifikasjon.
- Langskip er starten på at Norge kan håndtere store mengder CO₂, og bidra til lagring av norske og europeiske utslipp.
- NCCS og en omfattende FoU prosjekt portefølje siden 2002 har dannet grunnlag for Langskip.



Northern Lights CO₂ terminal i Øygarden som er operativt fra sommeren 2025. CO₂ losses fra skip og injiseres gjennom rør til permanent lager. Foto: Northern Lights Joint Venture, juni 2023.

Forskningsaktører: [NCCS forskningspartnere](#).

Næringsaktører: [NCCS brukerpartnere](#).

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓		✓	✓

Sikker og kostnadseffektiv fangst, transport og lagring av CO₂ er en forutsetning for realisering av CCS i stor skala. Forskning og utvikling innen CCS innebærer å minimere risiko, redusere kostnad og muliggjøre oppskalering av hele CCS-kjeden inklusive CO₂-fangstprosesser, CO₂-transportinfrastruktur og tilgjengelig kapasitet for CO₂ lagring. En CCS-kjede er avhengig av samtidige beslutninger langs kjeden.

For å maksimere effekten av forskning og innovasjon langs CCS-verdikjeden er forskningen i NCCS fra starten i 2016 organisert rundt to «deployment case» for realisering av CCS i full skala. Deployment case 1 som beskriver et norsk CCS prosjekt med fangst fra norske industrikilder og ett offshore CO₂-lager, ligger nært opp til det som etter hvert ble det norske fullskalaprojektet Langskip/Northern Lights (NL). I første fase av prosjektet skal 1,5 Mtonn CO₂ lagres per år, deretter skal omfanget øke til 5 Mtonn CO₂ per år i fase 2. Deployment case 2 handler om CCS-kjeder hvor CO₂ er fanget fra industri i Europa med norsk sokkel som et sentrallager for mottak av flere hundre millioner tonn CO₂ per år. Gjennom deployment casene har NCCS adressert kritiske barrierer langs CCS-kjeden, og dermed bidratt til realisering av det norske fullskalaprojektet Langskip/NL, og fremtidige CCS prosjekter nasjonalt og internasjonalt. Store deler av partnerskapet i FME NCCS har på ulike vis hatt viktige roller for den samlede kompetansehevingen som har muliggjort Langskip.

NCCS har gitt konkrete bidrag for utvikling av fullskalaprojektet. Uten kunnskapen og teknologiene fra rekken av FME-er, ECCSEL forsknings-infrastruktur, og prosjektporteføljen rundt, ville ikke fullskalaprojektet Langskip blitt realisert. Langskip er starten på at Norge kan håndtere store mengder CO₂, og bidra til lagring av Europas CO₂ i tillegg til norske utslipp. Dette er starten på utrulling av CCS nasjonalt og i Europa, og har derfor betydning langt utover mengden CO₂ som skal lagres i fase 1.

13.2 CO₂-fangst fra skip

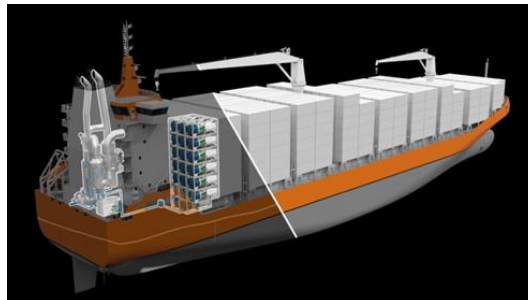
Internasjonal skipsfart er ansvarlig for 2 prosent av de globale klimagassutslippene. NCCS har gjennom prosjektet CCShip utviklet kostnadseffektive løsninger for CO₂-fangst ombord i skip, noe som kan muliggjøre betydelig maritim CO₂-utslippsreduksjon.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- CCS ombord på skip vil samlet kunne redusere CO₂-utslipp fra skipsfart med opp mot 95 prosent.
- CCS kan potensielt være billigere enn alternative løsninger for utslippsreduksjon for skip, som for eksempel biodrivstoff.
- Økende modenhet av teknologien har gjort at selskaper som Wärtsilä nå begynner å tilby denne teknologien for skip.



Forskningsaktører: SINTEF Energi, SINTEF Ocean, NTNU, UiO, Seoul National University.

Wärtsilä's system for CO₂-fangst system ombord på containerskip. Illustrasjon: Wärtsilä

Næringsaktører: Wärtsilä Moss, Klaveness Ship Management, Calix Europe Ltd og [NCCS-partnere](#).

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓			✓	✓

Skipsfartsektoren står for en betydelig del av de globale utslippene. For å kunne ta ned utslippene skipsfarten vil en være avhengig av ulike teknologiske løsninger, samt implementering i den eksisterende flåten. Det har vært en økende interesse rundt CCS fra skip de siste årene, men ved prosjektets oppstart var det uklart om CCS på skip er teknologisk gjennomførbart og lønnsomt.

CCShip-prosjektet har fokusert på å forstå potensialet for CO₂-fangst fra skip, både med tanke på teknologier, systemintegrasjon og ytelser. I prosjektet LINCCS er en av de vurderte teknologiene solventbasert fangst fra skipsmotor, demonstrert ved Wärtsilä's testsenter i Moss. I CCShip har en utført screening av teknologier, detaljerte gjennomførbarhets- og integrasjonsstudier samt teknoøkonomiske analyser. Videre har en undersøkt de faktiske ytelsene (energi- og fangstnivå) til solventteknologi for fangst på skip vist.

Arbeidet som er utført i CCShip viser at det er mulig å integrere marin CO₂-fangst ved ettermontering og implementering i nye skip. Teknisk-økonomisk evaluering indikerer at kostnadene knyttet til reduksjon av utslipp er 18 prosent lavere enn via overgang til biodrivstoff. Innvirkningen på kostnad for frakt av varer er marginal. For eksempel viser analysene at CO₂-fangst kun bidro til en 2 prosent kostnadsøkning for skipstransport av containere. CCS ombord på skip vil øke energiforbruket noe, men samlet sett kan det bidra til å redusere CO₂-utslipp fra skipsfart med opp mot 95 prosent. Konseptet gjør det mulig å sikre at konvensjonelle fossile brenslere kan brukes til skipsfart samtidig, men med minimal innvirkning på klimaet. Kombinert med høy kostnadseffektivitet kan med andre ord CO₂-fangst om bord på skip kan bli et viktig tiltak for å avkarbonisere sjøtransport. Økende modenhet av teknologien har gjort at selskaper som Wärtsilä nå begynner å tilby denne teknologien for skip.

13.3 Fiskale målinger for flytende CO₂

Presise fiskale målinger av CO₂ er en forutsetning for nøyaktige økonomiske oppgjør mellom ulike aktører i en CCS-verdikjede. For å møte dette kravet har en i NCCS analysert CO₂-strømmer og videreutviklet måleteknologier i tett samarbeid med industrien.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Mer presise måleteknologier av CO₂-strømmer reduserer risikoen for feil økonomisk oppgjør mellom aktørene og fremmer dermed vekst i markedet for CO₂-håndtering.
- En prototype av utstyr for primær strømningsreferanse er nå under produksjon



Laboratorieoppsett for testing av fiskale målinger.

Foto: SINTEF

Forskningsaktører: SINTEF Energi.

Næringsaktører: KROHNE, Panametrics, Equinor, Total Energies.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓				✓

Presise strømningsmålinger av CO₂ er avgjørende for korrekt oppgjør mellom aktører og for å oppfylle regulatoriske krav. Målinger av CO₂ må baseres på nøyaktige referansemålinger for å sikre sporbarhet. Fiskale målinger er essensielle for CCS ettersom unøyaktige data fører til økonomisk risiko ved eierskapsoverføring av CO₂ i en verdikjede, både innenlands og over landegrenser. Mer presise måleteknologier reduserer risikoen og fremmer dermed vekst i markedet for CO₂-håndtering. For aller første gang er det demonstrert måleløsninger og validert fiskale måleinstrumenter for komprimerte CO₂-væsker under relevante forhold. Arbeidet har fokusert på tre hovedområder: identifisere nøkkelutfordringer og finne de best egnede måleløsningene, utarbeide forskningsplaner for å imøtekomme de viktigste behovene, og utnytte tilgjengelige ressurser og tette identifiserte kunnskapshull. Tett samarbeid med industrien vært avgjørende for å løse disse utfordringene.

Gjennom dette arbeidet er det oppnådd betydelige fremskritt innen (1) laboratorietesting av fiskale måleinstrumenter (ultralydmålere, Coriolis-målere, gamma-densitometere), (2) innsamling av eksperimentelle data, og (3) utvikling av et konseptdesign for en primær strømningsreferanse. En prototype av utstyr for primær strømningsreferanse er nå under produksjon i samarbeid med en industriell partner.

Resultatene fra NCCS vil bidra til validering av måleinstrumenter slik at det er mulig å sertifisere at usikkerhet knyttet til lagret CO₂ er mindre enn kravet i ETS (Emission Trade System) på 2,5 prosent og sikre at oppgjøret mellom aktørene i CCS kjeden blir korrekt. Det norske fullskalaprojektet skal på sikt lagre 5 mill. tonn CO₂. En forbedring i nøyaktighet på 1 prosent vil sikre korrekt oppgjør for 50 MNOK per år, dersom CO₂ prisen antas å være 1000 NOK/tonn (2024).

13.4 Kostnadseffektive metoder for overvåking av CO₂-lagring i undergrunnen

Storskala lagring av CO₂ offshore forutsetter pålitelig og effektiv overvåking. NCCS har utviklet og testet flere metoder som utnytter tilgjengelige data mer optimalt og forbedrer nøyaktigheten til geofysiske målinger.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

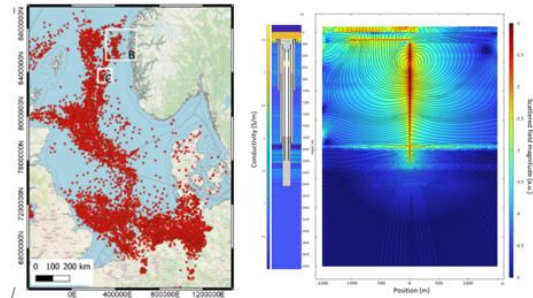
1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Bedre metoder for overvåking av CO₂ lagret på sokkelen minimerer lekkasjerisiko og reduserer behov for kostbare skipsoperasjoner.
- Reduserte kostnader for overvåking i størrelsesorden 30 prosent.

Forskningsaktører: SINTEF Industri, SINTEF Digital, NGI, BGS, NTNU.

Næringsaktører: Equinor, AkerBP, Vår Energi, WintershallDEA, TotalEnergies, Allton og Quad Geometrics.



(v) Kartlegging av brønner og potensielle lekkasjeveier i Nordsjøen. (h) Gjennom å bruke en brønn som antenne kan det elektriske feltet rundt brønnen avdekke forandringer eller problemer med brønnens integritet. Bilder: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓		✓	✓

Lagring av CO₂ på sokkelen stiller strenge krav til operasjonell sikkerhet. Kontinuerlig overvåking av CO₂ i reservoaret samt mulige uønskede migrasjonsveier er nødvendig. Geofysiske metoder anvendes for å kartlegge og overvåke undergrunnen, men dagens metoder er kostbare. Utfordringen er å utvikle metoder med tilstrekkelig nøyaktighet for å sikre riktige operasjonelle beslutninger, og at injeksjonen går som ønsket.

NCCS har utviklet og testet metoder som forbedrer nøyaktigheten og reduserer behovet for geofysiske måledata gjennom optimal bruk av innsamlet informasjon. En strategi for å beregne kost-nytte av overvåkingsmetoder har blitt etablert. Prosjektet har også utviklet nye metoder for kartlegging og overvåking av brønnintegritet og lekkasje uten behov for å åpne brønner.

De viktigste resultatene er metoder for: 1) kvantitativ overvåking; for eksempel estimering av CO₂-mengde og trykk, istedenfor kun hvor CO₂ befinner seg, 2) integrasjon av datatyper som aktiv/passiv seismikk, gravitasjons- og elektromagnetiske data, 3) beregning av kostnad og verdi av informasjon for planlegging av målinger, 4) kartlegging og overvåking av brønnintegritet uten intervensjon.

Forbedrede metoder for overvåking av CO₂-lager og spesielt brønnintegritet er sentralt for trygg CO₂-lagring. CO₂-overvåking er både den mest kostnadsdrivende delen av lagringsoperasjonen og, samtidig den som har størst effekt når det gjelder å minske operasjonell usikkerhet og risiko for uønskede hendelser. Bedre overvåkingsmetoder reduserer behov for kostbare og energikrevende skipsbaserte operasjoner for datainnsamling fordi antall seismiske undersøkelser kan reduseres og kampanjene kan være enklere og mer målrettet. Samlet kan en se for seg en kostnadsreduksjon på 30 prosent. Kostnad for en seismisk undersøkelse er i størrelsesorden 100 MNOK.

13.5 Lavtrykks skipstransport av CO₂

Skipstransport av CO₂ er en attraktiv teknologi for tidlig implementering av CCS. NCCS har bidratt til ny forståelse av lavtrykks skipstransport som en kostnadseffektiv måte for å frakte CO₂ til offshore-lagre.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Redusert drivstofforbruk og utslipp, samt mindre materialbehov til skipsbygging per tonn last.
- Dette kan potensielt senke transportkostnadene med over 30 prosent og gjøre transport av CO₂ fra Europa til lagring på norsk kontinentalsokkel mer økonomisk.

Forskningsaktører: SINTEF Energi og SINTEF Industri.

Næringsaktører: Equinor, TotalEnergies, SLB Capturi (tidligere Aker Carbon Capture), Gassco.



Labanlegg for separasjon og flytendegjøring av CO₂. Foto: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓		✓	✓

Transport av CO₂ på skip har mange fordeler, som kostnadseffektiv transport av små volumer over lange avstander, lav kapitalinvestering, fleksibilitet og samutnyttelse av infrastruktur. Selv om 15 bar(g) brukes i kommersiell CO₂-transport og i den norske fullskala CCS-kjeden, kan transport ved lavere trykk bli en mer kostnadseffektiv løsning i fremtiden. Dette forutsetter at teknologien blir kvalifisert. NCCS har derfor gjort tekno-økonomiske analyser av lavtrykkstransport, samt eksperimentell validering av flytendegjøring ved lavere trykk.

NCCS har utviklet en ny systematisk metodikk for å identifisere optimale transportbetingelser for CO₂-frakt. Metodikken har kvantifisert potensialet for kostnadsreduksjoner i tilfeller der lavtrykkstransport kan erstatte dagens løsning (mellomtrykk). Eksperimentelle forsøk har blitt utført for å avdekke: 1) Laveste trykk der tilnærmet ren, dehydrert CO₂ kan flytendegjøres uten tørrisdannelse, 2) Laveste trykk der CO₂ fra et aminanlegg kan flytendegjøres uten faststoffdannelse ved ulike vanninnhold, 3) Laveste trykk og temperatur for å flytendegjøre CO₂ fra dehydrerte syntesegassblandinger i forbindelse med produksjon av blått hydrogen.

Forsøkene i NCCS viste ingen faststoffdannelse for 5,2–5,9 bar trykk når vanninnholdet var under 50 ppm. Også med 100 ppm vann kan CO₂ flytendegjøres ned til 5,2 bar uten faststoffdannelse. Ved 200 ppm vann ble faststoff påvist ved 6,7 bar. Resultatene viser at reduksjon av transporttrykket til 7 bar(g) kan være mulig. Dette gir potensial for betydelig kostnadsreduksjon for et bredt spekter av transportvolumer og avstander. Flytendegjøring ved lavere trykk krever mer energi, men gir betydelige skalafordeler, som bruk av større skip.

13.6 Lavutslipp hydrogenproduksjon basert på membranteknologi

Hydrogenproduksjon fra naturgass med fangst av CO₂ bidrar til at hydrogen kan brukes som utslippsfritt brensel i fremtidens energisystemer. NCCS har utviklet en metode for lavtemperaturseparasjon av CO₂, som kan produsere hydrogen og CO₂ klar for transport og lagring.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Denne nye metoden for å produsere hydrogen fra naturgass uten utslipp kan bidra til ren energi og fangst av CO₂ i stor skala.
- Potensiell kostnadsreduksjon sammenlignet med H₂ fra dampreforming er 17 prosent.

Forskningsaktører: SINTEF Industri, SINTEF Energi, NTNU.



Næringsaktører: CoorsTek Membrane Sciences AS.

Irene Yuste-Tirados fra CoorsTek Membrane Sciences med membranrøret hun har vært med på å utvikle. Foto: Daniel Clark/CoorsTek Membrane Sciences

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓			✓	✓

Prosjektet MACH-2 i NCCS har hatt som mål å utvikle en ny hybridprosess for hydrogenproduksjon fra naturgass med effektiv fangst av CO₂. Prosjektet kombinerer H₂-produksjon fra naturgass med protonledende membranteknologi, med påfølgende CO₂-fangst ved lav temperatur i en integrert prosess. Ved å utnytte fordelene ved begge teknologier forventes det kostnads- og effektivitetsgevinster.

Prosjektet var tredelt: 1) Optimalisert design av hybridprosessen som kombinerer membranreformatoren og lav-temperatur CO₂ flytendegjøring. 2) Elektrokjemisk testing av ytelse og degradering av membranen under relevante. 3) Demonstrasjon av lavtemperatur CO₂-separasjon. Evaluering av hybridkonseptet viste at det er mulig å fange 99 prosent av CO₂-utslippene som dannes i forbindelse med hydrogenproduksjon ved dampreforming av metan, og at det er mulig å oppnå over 81 prosent virkningsgrad (LHV). Dette er høyere enn for sammenlignbare prosesser. CO₂-fangst ved lavtemperatur flytendegjøring ble demonstrert med en CO₂-renhet på 99,9 prosent (TRL4). Celler for membranreforming ble testet, og teknologien er videreutviklet og demonstrert i prosjektet PROTONIC (TRL 5-6). Konseptet er utviklet sammen med CoorsTek Membrane Sciences, som arbeider med å oppskalere prosessen i et nytt EU prosjekt (CARMA-H2) og demonstrere konseptet ved TRL 7.

For CoorsTek er det hovedsakelig som leverandør av ny teknologi potensialet ligger, noe som vil medføre økt produksjon og på sikt økt sysselsetting. For sluttbrukere i olje- og gassindustrien representerer teknologien et næringslivspotensial for de som ønsker å produsere og distribuere utslippsfri hydrogen i stedet for naturgass. I tillegg kan hydrogen være en utslippsfri energikilde i driften. I prosessindustri kan hydrogen erstatte kull eller naturgass som innsatsfaktor og i transportsektoren kan hydrogen erstatte fossile brenslere.

13.7 Redusert tap av solventer ved fangst av CO₂

CO₂-fangst ved hjelp av solventer er den mest modne teknologien for å fange CO₂ fra industrielle punktutslipp. NCCS har utviklet analysemetoder, modeller og teknologier som bidrar til at solvent-prosessen blir billigere, mer energieffektiv og mer miljøvennlig, og dermed kan øke implementering av CCS.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Mindre behov for å tilføre aminsolvent, noe som fører til mer effektiv drift og kostnadsreduksjon.
- Metoder for å overvåke mer enn 50 komponenter sikrer trygg drift og forhindrer uønskede utslipp.



Forskningsaktører: SINTEF Industri, NTNU, TNO

Næringsaktører: SLB Capturi (tidligere Aker Carbon Capture), Baker Hughes, Elkem, Fortum, TotalE, Shell, EGE, AkerBP (tidligere Lundin).

Etanolamin (MEA) som har vært gjennom en stabilitetsstudie med (nederst), og uten (øverst) tilsatt oksidasjonsinhibitor KI, testet i NCCS. Bilder: SINTEF

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
	✓	✓	✓		✓	✓

Degradering av aminsolventer under CO₂-fangst kan gi avbrudd i operasjon, økt energibehov og i verste fall skadelige utslipp til miljøet. Målet i NCCS har vært å bedre forstå hvilke faktorer som påvirker degradering og å finne metoder for å unngå, eller bremse degraderingsprosessene.

SINTEF har sammen med NTNU, TNO, teknologileverandører og sluttbrukere etablert avanserte analytiske metoder for å forstå solventkjemien. Videre er det utviklet modeller for å simulere solventdegradering og gjennom eksperimenter utviklet teknologi for å øke solventlevetiden. Samarbeid med teknologileverandører som SLB Capturi og sluttbrukere som Heidelberg Cement i Brevik har styrket forskning og videreutvikling av solventteknologien.

NCCS har utviklet analysemetoder for å overvåke solventhelse, utslipp, CO₂-produkt og miljø. Innsikt i degraderingsmekanismer har resultert i en modell som forutsier når og hvor i fangstprosessen degradering oppstår. Flere teknologier for å bremse solventdegradering ble testet og videreutviklet i prosjektet. Relevante eksempler er fjerning av oksygen ved hjelp av en membrankontaktor (DORA), som nå testes i pilotskala.

Basert på arbeidet i NCCS kan over 50 komponenter følges, noe som sikrer trygg drift uten uønskede utslipp. Solventdegradering kan overvåkes og kontrolleres bedre. Dette reduserer utslipp av kjemikalier. Redusert behov for tilsats av aminsolvent gir videre mer effektiv drift og reduserte kostnader: For eksempel viser beregninger at CO₂-fangstanlegg som til sammen fanger 2 Mt CO₂ per år kan spare opptil 40 MNOK i året ved 50 prosent reduksjon av degraderingsrate (antatt solventpris 20 NOK/kg, og degraderingsrate på 2 kg solvent/tonn CO₂). Resultatene fra forskningsarbeidet i NCCS kan støtte solventprodusenter og leverandører av fangstteknologi med økt lønnsomhet og nye tjenester.

13.8 Ren og effektiv forbrenning av hydrogen i gassturbiner

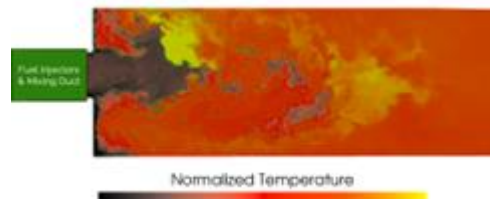
Hydrogenfyrte gassturbiner kan muliggjøre avkarbonisert, fleksibel og væruavhengig storskala kraftproduksjon. Forskningsarbeidet som her presenteres har gitt ny kunnskap om hvordan en kan brenne hydrogen og ammoniakk i gassturbiner på en ren, sikker, stabil og effektiv måte, noe som legger til rette for videre skalering.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Teknologi for produksjon av nullutslippsenergi i form av elektrisitet og varme
- Lav kostnad per kW installert kapasitet
- Robust forbrenningsteknologi som håndterer brenslers med urenheter
- Stort verdiskapingspotensial for Ansaldo Energia og andre gassturbin-produsenter.



Forskningsaktører: SINTEF Energi, NTNU.

Næringsaktører: Ansaldo Energia.

Large Eddy Simulation (LES) av en forblendet hydrogenflamme stabilisert i det andre (sekvensielle) stadiet av Ansaldo's GT36 H-klasse gassturbin. Bilde: SINTEF/NTNU.

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓			✓	✓

For å nå netto null CO₂-utslipp må kraftproduksjonen avkarboniseres. Hydrogen eller ammoniakk produsert med fornybar kraft eller reformering av naturgass med CO₂-fangst kan erstatte naturgass i eksisterende gassturbiner. Utfordringen ligger i at moderne gassturbiner med tradisjonelle forbrenningssystemer basert på ett forbrenningstrinn sliter med å stabilisere hydrogen- og ammoniakkflammer. Dette kan gi høye NO_x-utslipp.

I prosjektet er teoretiske studier gjennomført av SINTEF Energi ved hjelp av detaljerte numeriske simuleringer og utstrakt bruk av tungregning finansiert av Sigma2. Eksperimenter er gjennomført av NTNU på lab-skala brennere for kartlegging av ustabiliteter i hydrogenflammer. Ansaldo Energia testet en fullskala gassturbinbrennkammer ved DLR/Køln testsenter.

Arbeidet har gitt ny forståelse av kritiske problemstillinger for å oppnå stabil forbrenning av hydrogen. Blant annet er det vist at et gassturbinbrennkammer med to forbrenningsstadier er optimalt for en robust stabilisering av både hydrogen-, ammoniakk- og naturgass-forblandet flammer. Ved å benytte denne teknologien kan hydrogen- eller ammoniakkfyrte gassturbiner produsere elektrisitet uten CO₂ utslipp og med lave NO_x utslipp.

Viktige effekter er: 1) Nullutslipp elektrisitet og lavtemperatur varme, produsert med høy virkningsgrad (~64 prosent). 2) Tillater håndtering av brenslers med urenheter i store kvanta. 3) Lav kostnad pr kW installert kapasitet (~ 200 USD/kW for store H-klasse maskiner). 4) Kostnadsreduksjon ved drift fordi "fortynning" av brenselet med nitrogen eller vanninnsprøyting ikke er nødvendige. Redusert brenselkostnad for 750 MWe gassturbin er i størrelsesorden 40 M€/år. 5) Næringslivspotensialet er relativt stort. Teknologien eies av Ansaldo, men kan adopteres av andre gassturbinprodusenter.

13.9 Økt lagringskapasitet og redusert risiko gjennom forkastningsanalyser

Prosjektet har bidratt til å redusere risiko knyttet til injeksjon og lagring av CO₂ på den norske kontinentalsokkelen. Videre legger forskningen til rette for å øke tilgjengelige volumer for CO₂-lagring gjennom økt forståelse av geologien, med et spesielt fokus på forkastninger i undergrunnen.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Mer effektive beslutningsprosesser og reduserte kostnader knyttet til CO₂-lagring.
- Tidsbesparelser i søknadsprosessen for lisenser og injeksjonstillatelser.
- Fremtidig verdiskaping knyttet til utbygging og operasjon av CO₂-lagre på norsk sokkel.



Forskningsaktører: NGI, Universitet i Oslo.

Næringsaktører: Equinor, TotalEnergies.

Observasjon av forkastning i felt hvor bevegelsen til forkastningen er tegnet inn (hvite piler), plan for bevegelsen markert i rødt og blå pil illustrerer væsker som beveger seg langs forkastningen. Foto: NGI

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓			✓	✓

Forkastninger utgjør en viktig del av strukturene vi finner i sedimentære bassenger på den norske kontinentalsokkelen. Forsegkende forkastninger utgjør gode feller for lagring av CO₂. Manglende verktøy for forkastningsanalyse samt mangel på en hensiktsmessig industriell arbeidsflyt for risikovurdering av stabilitet og lekkasje har imidlertid vært en sentral barriere for anvendelse.

Forskere i NCCS har sammen med forskere fra industrien bidratt til økt forståelse av forkastninger og utviklet nye metoder og verktøy. Forkastninger er kartlagt ved hjelp av seismikk, materialegenskaper er studert i laboratoriet og det er brukt feltanalogier for å øke forståelsen. Nye modellverktøy er testet for stabilitetsvurderinger, forseglingsanalyser og lekkasjeberegninger. Fokus har vært kvantifisering av usikkerheter og implementering av sannsynlighetsberegninger som et nyttig hjelpemiddel for risikovurdering.

Forskningen har modnet forståelsen av geologien i Nordsjøen gjennom å gi industrien mer kunnskap, metoder og verktøy for å vurdere risiko rundt forkastninger. Ved å redusere risiko gjennom bedre forkastningsanalyse kan beslutningsprosessene knyttet til CO₂-lagring bli mer effektive og flere områder kan kvalifiseres for CO₂ lagring. Videre kan kostnadene reduseres gjennom godt datagrunnlag og riktig risikovurdering. Dersom en gjennom bedre forkastningsmodeller kan øke sikker lagringskapasitet med 10 prosent representerer det lagring av 20 Mtonn CO₂ mer per år over 20 år, til sammen 400 Mtonn CO₂. Prosjektet har bidratt til at flere operatører har fått lisens for utvikling av CO₂ lagring i Nordsjøen, og Aurora-feltet til Northern Lights har fått tillatelse for injeksjon. God forståelse av geologi og forkastninger gir også tidsbesparelser i søknadsprosessen for lisenser og injeksjonstillatelser.

13.10 Modell for beregning av løpende brudd i CO₂-rørledninger

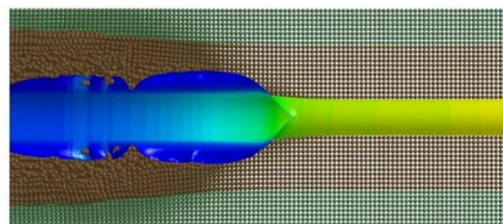
SINTEFs modell for beregning av brudd som forplanter seg langs en rørledning for transport av CO₂ legger grunnlag for sikker og effektiv design av CO₂-transportsystemer. Modellen bidrar til å redusere risiko og kostnader knyttet til storskala rørtransport av CO₂.

Oppnådd TRL-nivå (modenhet av teknologi)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Viktige effekter:

- Reduserte kostnader knyttet til produksjon og legging av rør
- Muliggjør gjenbruk av eksisterende rør
- Redusert risiko for hendelser som medfører utslipp og kostnader
- Framtidig kommersialisering av verktøyet representerer et potensial for verdiskaping



Forskningsaktører: SINTEF Energi og Industri.

Næringsaktører: Aker BP, SLB Capturi, Equinor, Gassco, Larvik Shipping, TotalEnergies, Vår Energi, Harbour Energy

*Datasimulering av løpende brudd i rør.
Bilde: SINTEF.*

Økt fornybar energi	Energi-effektivisering	Reduserte klimagassutslipp	Redusert miljøpåvirkning	Økt forsynings-sikkerhet	Reduserte kostnader	Næringslivs-potensial
		✓	✓		✓	✓

CO₂-fangst og -lagring i stor skala kan bli viktig for å redusere de samlede utslippene av CO₂. Ved transport av store mengder CO₂ vil rørtransport være nødvendig. Rørledninger som transporterer CO₂ under trykk må designes slik at en eventuell sprekk ikke forplanter seg videre og i verste fall ødelegger røret. SINTEFs modell for simulering av løpende rørbrudd kan bidra til sikker design av rørsystemene, og tar høyde for at CO₂ forutsetter andre stålqualiteter enn for eksempel naturgass.

SINTEF har, basert på unik kombinasjon av termo-fluidodynamikk og strukturmekanikk, utviklet en modell for beregning av løpende rørbrudd som bidrar til optimal design og rekvalifisering av rør for transport av CO₂. Modellen beskriver prosessen for løpende rørbrudd og tar hensyn til de viktigste fysiske effektene. Den inkluderer blant annet forbedret beskrivelse av stål- og sprekkforplantning, bedre kalibrering av material-parametre, raskere beregninger, og kopling med nøyaktige tilstandslikninger for CO₂ med urenheter. Modellen for prediksjon av løpende rørbrudd er brukt for å støtte industriens rørdesign i flere prosjekter, inklusive Northern Lights som er CO₂ transport- og lagringsinfrastruktur i det norske fullskalaprojektet.

Resultatene muliggjør trygg gjenbruk av rør, og bruk av rimeligere stålqualiteter ved bygging av nye rørsystemer. Viktigste effekter er mindre CO₂-utslipp, reduserte kostnader knyttet til produksjon og legging av rør, samt redusert risiko for hendelser som medfører utslipp og kostnader. Potensiell besparelse ved gjenbruk av naturgassrør for transport av CO₂ er i størrelsesorden 12 MNOK/km. Unngått CO₂-utslipp knyttet til produksjon av rør og installering av rørledning er estimert til 460 tonn CO₂/km. Forskningsgruppen utvikler nå et fysikkbasert verktøy som kan brukes av industrien for design av CO₂-transportrør. Framtidig kommersialisering av verktøyet gir et potensial for verdiskaping.

Vedlegg

A Generelt om beregninger i effektanalyser av utvalgte forskningscase

I denne studien søker vi å anslå *nettoeffekter* av innovasjonene (addisjonelle effekter). Dette er endringer som ellers ikke hadde funnet sted i en verden uten innovasjonene. Dette er en krevende øvelse, siden det er usikkert både hva som ville skjedd uten innovasjonen, og hvordan grunnlaget for å utnytte innovasjonene framover vil utvikle seg. Beregningene må dermed leses som usikre anslag og tolkes i lys av forutsetningene vi har lagt til grunn.

Vi skiller mellom totale effekter av innovasjonen globalt, og effekter for det norske samfunnet. I beregningen av prissatte effekter legges samfunnsøkonomiske prinsipper til grunn. Samfunnsøkonomiske effekter omfatter bare effekter som oppstår i Norge, eller effekter i utlandet som tilfaller norsk økonomi, for eksempel gjennom eksportinntekter eller gjennom norske selskapers tilstedeværelse i utlandet.

Sentrale forutsetninger i effektberegningene:

- Strømpris, regulerbar kraft: 50 øre/KWh for forbruk av strøm og produksjon av regulerbar kraft (vannkraft) i beregning av samfunnsøkonomisk gevinst.
- Strømpris, uregulerbar kraft: 40 øre/KWh for produksjon av uregulerbar kraft (solkraft) i beregning av samfunnsøkonomisk gevinst. Forventet pris er lavere enn for regulerbar kraft, siden produksjonen ikke kan tilpasses etterspørselen.
- Klimagasser: [Regjeringens karbonprisbaner](#) benyttes i verdsetting av utslippskutt i beregning av samfunnsøkonomisk gevinst. Bane for kvotepliktig eller ikke-kvotepliktig sektor, avhengig av hvilken sektor vi antar utslippene skjer.
- Diskonteringsrente: 4 prosent i beregninger av nåverdi av kostnader og andre framtidige effekter i beregning av samfunnsøkonomisk gevinst. Dette er renten som brukes i lønnsomhetsvurderinger av statlige investeringer, og anbefalt rente i samfunnsøkonomiske analyser opp til 40 år, se [rundskriv R-109](#).

Videre gjøres en rekke forutsetninger som er spesifikke for de enkelte forskningscasene. Kilder til direkte resultater av forskningen (reduksjon i risiko for havari, reduksjon i kostnader, prosent økt ytelse, prosent økt kapasitet, osv.) stammer hovedsakelig fra forskningsmiljøene og næringsaktørene som står bak innovasjonen. Vi har kryss-sjekket og vurdert realisme i påståtte resultater. Videre har vi gjort spesifikke antagelser om utbredelse av innovasjonen i fremtiden, ut fra størrelse på relevant marked for innovasjonen, og et antatt spenn på hvor stor del av markedet vi tror innovasjonen kan dekke. De spesifikke forutsetningene er oppgitt i beskrivelsen av hver forskningscase.

Det er stor usikkerhet i antatt *levetid* for innovasjonene, altså hvor lenge innovasjonen gir effekter for samfunnet. Levetiden skal reflektere tiden det tar før nettoeffektene av innovasjonen er null, enten fordi innovasjonen er utdatert, eller fordi det vil eksistere konkurrerende teknologier eller løsninger med minst like stor effekt. Levetiden kan variere mellom innovasjoner. Etter vår kjennskap finnes ingen etablerte regler for hvilken levetid som skal brukes for å beregne effekter for ulike typer innovasjoner. Vi velger å bruke ulike levetider for de ulike innovasjonene basert på følgende kjennetegn ved innovasjonen:

- Type innovasjon: radikale innovasjoner kan ha lengre levetid siden de fører til betydelige endringer i markedet. Inkrementelle innovasjoner kan ha kortere levetid.

- Tempo på teknologisk utvikling i markedet: rask teknologisk utvikling kan redusere levetiden til en innovasjon da nyere teknologi raskere erstatter eller forbedrer den eksisterende. Vi forventer generelt lavere innovasjonstempo der utbygging av teknologi er forbundet med høye kostnader.
- Nivå på konkurranse i markedet: i markeder med høy konkurranse vil levetiden være kortere, da konkurrenter raskt kan introdusere lignende eller bedre produkter.

For de fleste innovasjonene innebærer ovennevnte punkter at vi setter levetiden til ti-tjue år. Etter utgått levetid anser vi at sannsynligheten for at andre innovasjoner med minst like høye effekter er høy. For innovasjonen innen avansert drift av solparker har vi satt levetiden til seks år, fordi solkraft er et område med mye teknologitvikling, og software typisk fort blir utdatert. For vannkraft setter vi levetiden til 40 år, fordi dette er et område med tregere utskifting av teknologi.

B Forutsetninger i effektanalyser av utvalgte forskningscase

I tillegg til de generelle forutsetningene beskrevet i vedlegg A, har vi gjort spesifikke forutsetninger for hvert case, oppsummert under.

Økt energiproduksjon med avanserte metoder for drift av solparker

Forutsetningene basert på opplysninger fra litteratur, SuSolTech, Scatec, TGS og ekspertvurderinger:

- Global solkraftproduksjon i 2024: 2120 TWh ([IEA](#), 2024)
- Global solkraftproduksjon i 2030: 9212 TWh ([IEA](#), 2024)
- Relevant andel der teknologien kan anvendes: 50 prosent
- Realisert kraftproduksjon der teknologien anvendes: 5 TWh
- Norsk solkraftproduksjon i 2024: 517 GWh ([NVE](#), 2025)
- Norsk relevant produksjon i 2024: 205 GWh
- Norsk solkraftproduksjon 2030: 4 TWh ([Statnett](#), 2024)
- Andel av global produksjon som implementerer teknologien (usikkerhetsspenn): 10–50 prosent
- Vekst av Scatecs portefølje som andel av global produksjon (usikkerhetsspenn): -50 %–50 %

Utslippskutt med CO₂-kjøling av dagligvarebutikker

Forutsetninger basert på opplysninger fra HighEFF og ekspertvurderinger:

- Økt energieffektivitet sammenlignet med HFK-gasser: 30 %, tilsvarer 0,06 GWh per butikk.
- Antall dagligvarebutikker med installert anlegg globalt: 1 i år 2000, 18 000 i år 2018, og 115 000 i år 2024. Antatt lineær vekst mellom årene
- Antall dagligvarebutikker med installert anlegg nasjonalt: 1 i år 2000, 2800 i 2018, 3400 i år 2024. Antatt lineær vekst mellom årene
- Årlig utslippskutt for nye anlegg per dagligvarebutikk sammenlignet med HFK-gasser: 216 tonn CO₂e
- Utslipp av unngåtte HFK-utslipp er prissatt med avgiften på HFK-gasser
- Antatt gjennomsnittlig størrelse på dagligvarebutikk: 735 m²
- Antatt andel av nye kjøleanlegg der propan er et alternativ til HFK-gasser: lineær utvikling fra 0 prosent i 2005, til usikkerhetsintervall mellom 50 prosent og 100 prosent i 2020.

Økt kapasitet i kraftnettet med dynamisk drift av kraftledninger

Forutsetninger basert på opplysninger fra CINELDI og ekspertvurderinger:

- Økt kapasitet i nettet ved bruk av DLR: 20 % av effektbehovet
- Diskonteringsrente: 4 %
- Kostnader ved DLR: 10 000 kr/km/år
- Lengde på utsatte investeringer: 5 år
- Kostnad per km for utbygging av nett: 2,4 mill. kr
- Effektbehov i regionalnettet i Norge i 2025: 27 265 MW
- Effektbehov i regionalnettet i Norge i 2030: 32 980 MW
- Effektbehov i regionalnettet i Norge i 2030: 34 350 MW
- Kostnad av nettoppgradering per MW: 2,4 mill. kr
- Potensielle effekter: Det antas at teknologien utnyttes i et spenn på 10 %–50 % av regionalnett nasjonalt og i 1 %–25 % i verden
- Sensorer per km ledning: 0,33
- Størrelse på Europeisk nett: antar 20 ganger tilsvarende regionalnett i Norge, totalt 380 000 km.
- Spesialreguleringskostnader i Norge: 132 mill. kr (Gj.snitt 2019–2023)
- Reduserte spesialreguleringskostnader: 50 %

Billigere transport av CO₂ på skip ved bruk av lavtrykksteknologi

Forutsetninger basert på opplysninger fra NCCS og ekspertvurderinger:

- Gjennomsnittlig lengde på transport: 1000 km
- Kostnadsreduksjon ved 1000 km transport: 113 kr/10 € per tCO₂
- Antall tonn som fraktes fra Norge: 400 000 fram til 2029, deretter 750 000
- Andel tonn som fraktes med teknologien i Norge optimistisk: 100 %
- Andel tonn som fraktes med teknologien i Norge konservativt: 0 %
- Antall tonn som lagres i Europa i 2030: 50 000 000
- Antall tonn som lagres i Europa i 2040: 280 000 000
- Andel tonn som fraktes med teknologien i Europa optimistisk: 15 %
- Andel tonn som fraktes med teknologien i Europa konservativt: 5 %
- Vekst fra 2025–2030 er tilpasset til gradvis økende lagring per år
- Vekst i frakt fra 2030–2040 er tilnærmet lineær
- Effektene er i sammenligning med alternativet mellomtrykks skipstransport.

Utslippskutt og lavere energibruk med høytemperatur varmepumper

Forutsetninger basert på opplysninger fra HighEFF, ekspertvurderinger og [studie](#) av markedspotensial i Europa:

- Antatt ekstra installasjonskostnad knyttet til varmepumpe: 13 800 kr per kW.
- Total kapasitet installert varmepumpe i Norge: 300 GWh/år (installert gradvis fra 2018).
- Antatt redusert energibruk: 66 prosent.
- Antatt potensiell global markedsandel: 0,25 prosentpoeng (konservativ) og 1 prosentpoeng (optimistisk) årlig.
- Antatt potensiell nasjonal markedsandel: 1 prosentpoeng (konservativ) og 5 prosentpoeng (optimistisk) årlig.
- Effektiv driftstid per år: 6570 (75 % oppetid).
- Antatt levetid: 20 år for alle varmeforsyningsteknologier.

Redusert fare for havari i vannturbiner

Forutsetninger basert på opplysninger fra HydroCen og ekspertvurderinger:

- Redusert risiko for havari: fra 10 % til 5 %
- Reparasjonskostnader: 25 mill. kroner per havari
- Levetid per turbin: 40 år (turbiner byttes ut hvert førtiende år)
- Tappt produksjon per havari: 248 GWh (basert på 4000 timer tappt produksjonstid, og gjsn. størrelse turbin på 62 Gw).
- 285 turbiner i eksisterende kraftverk nasjonalt, 1 ny turbin hvert år knyttet til effektutvidelse. Med førti års levetid gir det 8 nye turbiner nasjonalt per år.
- 3185 turbiner i eksisterende kraftverk totalt i verden, 10 nye turbiner hvert år knyttet til effektutvidelse og nye kraftverk. Med førti års levetid gir det totalt 90 nye turbiner internasjonalt per år.
- For 2019 fram til i dag antar vi maksimal utnyttelse av resultatene, for alle nye turbiner. Det gir 0,4 unngåtte havari nasjonalt og 4,5 unngåtte havari i resten av verden.
- Potensielle effekter: Det antas at resultatene utnyttes i et spenn på 70 %–100 % av turbiner nasjonalt, og 30 %–90 % av turbiner i resten av verden.
- Vi antar at effektene oppstår i turbinenes første leveår, etter hvert som turbiner skiftes ut, ved effektutvidelse i eksisterende kraftverk, og ved utbygging av nye kraftverk.

C Om addisjonalitetsgrad knyttet til finansiering fra Forskningsrådet

Til hvilken grad finansieringen fra Forskningsrådet *utløser* forskningen i caset kaller vi for *addisjonalitetsgrad*. Høy addisjonalitetsgrad tilsvarer at forskningen ikke ville skjedd uten finansiering fra Forskningsrådet, og omvendt. Addisjonalitetsgrad kan dermed tolkes som anslått andel av nasjonale og globale effekter per case som kan tilskrives Forskningsrådets finansiering.

Ettersom det er krevende å anslå nøyaktig addisjonalitetsgrad, har vi benyttet spenn mellom verdiene 0, 25, 50, 75 og 100 prosent.



Menon
Economics

Menon Economics

Sørkedalsveien 10 B, 0369 Oslo

+47 909 90 102

post@menon.no

ISBN 978-82-12-04214-8 (PDF)
ISBN 978-82-12-04215-5 (trykt)

menon.no