

August 2025

Et energisikkert samfunn rustet mot angrep



Redaktører: Asgeir Tomasgard (NTNU), Nils Røkke (SINTEF), Gerd Kjølle (SINTEF), Gunhild Reigstad (SINTEF), Magnus Korpås (NTNU), Karoline Ski (SINTEF).

Bidragstere: Eirik Albrechtsen (NTNU), Bjørn Egil Asbjørnslett (NTNU), Tore Børvik (NTNU), Marta Bucelli (SINTEF), Oddbjørn Gjerde (SINTEF), Ingeborg Graabak (SINTEF), Tor Olav Grøtan (SINTEF), Martin Gilje Jaatun (SINTEF), Stefan Jaehnert (SINTEF), Tor Arne Johansen (NTNU), Nils Kalstad (NTNU), Erlend Sandø Kiel (SINTEF), Brage Knutsen (SINTEF), Hans Langva Skarsvåg (SINTEF), Martin Ludvigsen (NTNU), Svend Tollak Munkejord (SINTEF), Dag Eirik Nordgård (SINTEF), Arne Roar Nygård (NTNU), Nicola Paltrinieri (NTNU), Petter Røkke (SINTEF), Ingrid Snustad (SINTEF), Jørn Vatn (NTNU).



Denne rapporten er et samarbeid mellom NTNU, SINTEF og forskningssentrene over. Sentrene bidrar til å styrke samhandlingen mellom forskningsinstitusjoner, næringsliv og offentlige aktører, samtidig som de utdanner doktorgrads- og postdoktorstipendiater som vil bli energieksperter og forme fremtidens energisystem. Siden sentrene tar for seg forskningsutfordringer av internasjonal betydning, samarbeider de også tett med internasjonale forskningsmiljøer. FME-sentrene er finansiert av Energidepartementet gjennom Norges forskningsråd, og sine respektive partnere.

I arbeidet er det også gjennomført et stakeholdermøte med bred deltakelse fra næringsliv, forvaltning, industri, forskningsmiljøer og aktører fra både sivil og militær sektor. Møtet ga viktige innspill til aktuelle sårbarheter og risikoområder, og har bidratt til å nyansere vurderingene og styrke anbefalingene i rapporten.

Innhold

1. Innledning	6
2. Energisystemet og det nye trusselbildet	18
2.1 Energisystemets sektorovergripende rolle	18
2.2 Energisystemet og totalforsvaret	18
2.3 Norge og Europas energiforsyning	19
2.4 Hvilke trusler snakker vi om	19
2.5 Begrepsavklaringer	22
3. Motstandsdyktighet og beredskap i kraftsystemet	26
3.1 Aktuelle problemstillinger	26
3.2 Kunnskapsgap	27
3.3 Anbefalinger	28
4. Motstandsdyktighet og beredskap i energisystemet til havs	32
4.1 Aktuelle problemstillinger	32
4.2 Kunnskapsgap	37
4.3 Anbefalinger	39
5. Motstandsdyktighet og beredskap i det integrerte energisystemet	42
5.1 Aktuelle problemstillinger	42
5.2 Kunnskapsgap	45
5.3 Anbefalinger	47



Adobe Stock / MST (generert med AI)

INNLEDNING



Innledning

Krigen i Ukraina og økt stormaktsrivalisering har vist hvordan energi kan brukes som pressmiddel, hvordan kritisk infrastruktur angripes i hybride operasjoner, og hvor sårbare samfunn blir når energitilførselen svikter. Dette har gitt energiforsyning og energiforsyningskjedene en ny strategisk rolle som virkemiddel i internasjonal politikk og maktspill.

I nasjonalsangens siste vers står det skrevet «også vi når det blir krevet for dets^[1] fred slår leir». Dette er en frase som har vært debattert flittig, men hva betyr den? Den endrede geopolitiske situasjonen og usikkerheten den medfører fordrer at vi tar frem denne verselinjen og tenker gjennom hva det betyr for oss som borgere og for de samfunnskritiske funksjonene i landet.

Det nasjonale energisystemet spiller en sentral rolle både i det daglige liv og i totalforsvaret for eksempel gjennom vekselvirkninger med infrastruktur for veg, bane, luftfart, vannforsyning, kommunikasjon og med Norges gassforsyning til Europa.

Selv om oppmerksomheten nå rettes mot akutte og synlige trusler, må ikke klima og naturrisiko skyves i bakgrunnen. De utvikler seg parallelt og truer med å utløse eller forsterke humanitære, politiske og økonomiske kriser på tvers av regioner. Derfor er det viktigere enn noen gang å bygge integrerte og avkarboniserte energisystemer som reduserer utslipp og styrker vår motstandsdyktighet.

I denne rapporten retter vi oppmerksomheten mot energisikkerhet med spesiell vekt på beredskap, robusthet og motstandsdyktighet overfor handlinger som har som mål å skade eller ødelegge energisystemet og dermed sette store deler av vårt moderne samfunn ut av spill.

Tradisjonelt har energisystemet vært utviklet med fokus på kostnadseffektivitet, forsyningssikkerhet

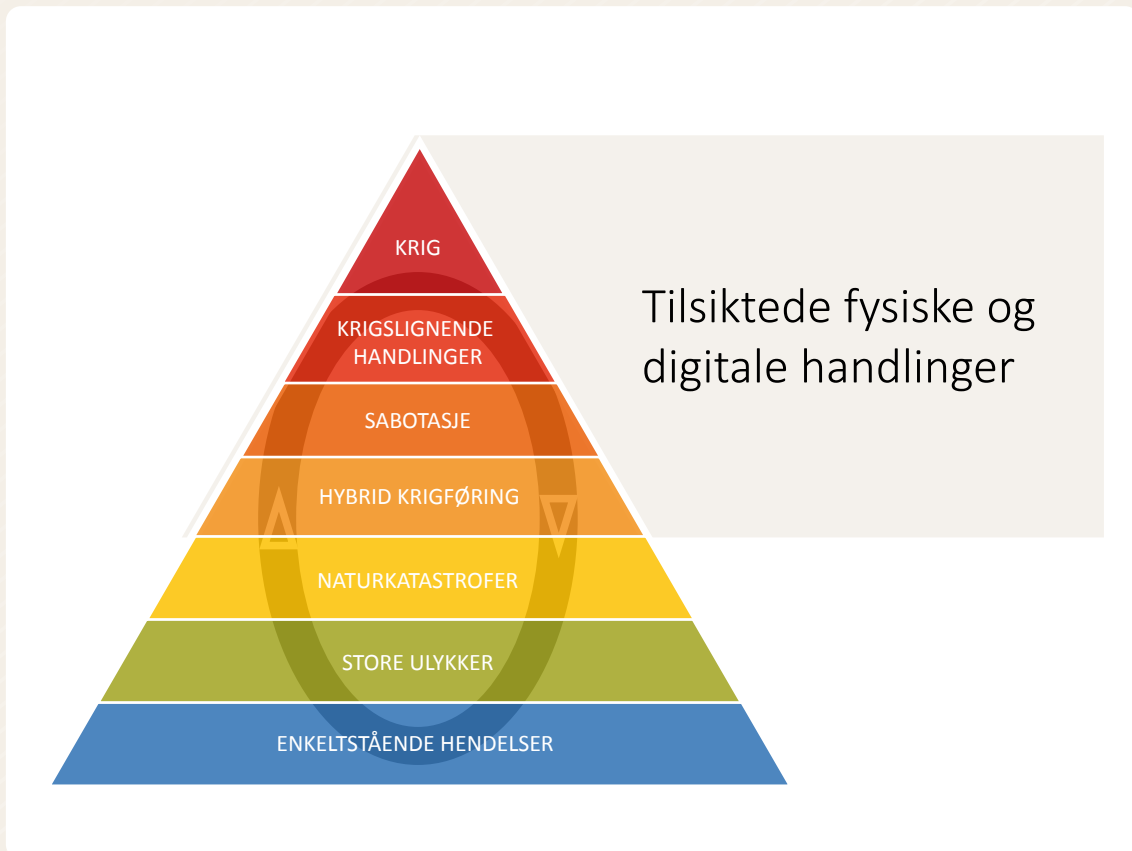
og i økende grad klima- og miljøhensyn. Når vi tidligere har snakket om robuste systemer, har vi gjerne tenkt på evnen til å håndtere menneskelige feil eller naturgitte komponentutfall. I dag må vi i tillegg forholde oss til bevisste angrep – og til at ulike hensyn kan være både sammenfallende og motstridende. For eksempel kan effektivisering av kraftnettet komme i konflikt med behovet for skjerming ved tilsiktede hendelser. Det er imidlertid ikke tilstrekkelig å bare beskytte energisystemet, vi må også sikre at det finnes kapasitet og planer for å raskt gjenopprette funksjonen etter et angrep. Reaksjonsevne og evne til å få systemet i drift igjen er avgjørende for å opprettholde samfunnskritiske funksjoner i en krisesituasjon.

Spørsmålet er hvordan vi kan finne løsninger som er Pareto-optimale der ingen faktorer kan bedres, uten at andre forringes.

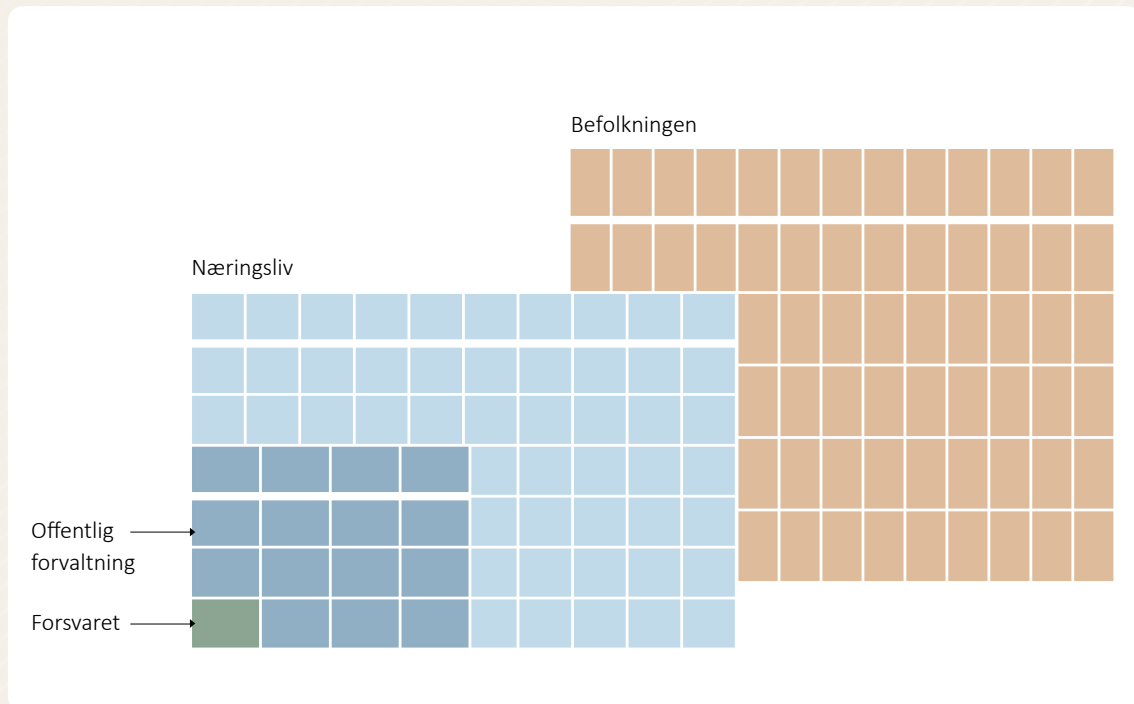
NTNU og SINTEF har en sentral rolle i å utvikle kunnskap, teknologi og løsninger som støtter et motstandsdyktig og fremtidsrettet energisystem. I møte med et skjerpet trusselbilde og økte krav til beredskap og kontinuitet, har vi et ansvar for å bidra til helhetlig innsikt, kapasitets- og kompetansebygging, og innovasjon.

I denne rapporten setter vi søkelys på hvordan trusler som hybride aksjoner, sabotasje, terror og i verste fall krig, bør påvirke design og drift av energisystemene. Dette krever ny kunnskap og en tilnærming som går utover tradisjonell sikkerhetstenkning.

Krisepyrampen viser ulike typer trusler rangert etter alvor og intensjonalitet. I denne rapporten avgrensner vi oss til tilsiktede fysiske og digitale handlinger – fra sabotasje og cyberangrep til hybrid krigføring og væpnet konflikt.



Figur 1: Krisepyramide som viser de ulike gradene av kriser og avgrensning for innholdet i rapporten.



Figur 2: Fra Totalberedskapskommisjonens utredning «Nå er det alvor»: Figuren er fremstilt av Försvarsmaktens Totalförsvarsavdelning i Sverige og viser Forsvarets avhengighet av næringslivet og totalforsvaret.

Mange av tiltakene som styrker energisystemet mot tilsiktede trusler, vil også bidra til økt robusthet mot utilsiktede hendelser som naturkatastrofer og ulykker. På denne måten forsterker innsatsen både sikkerhet i krise og stabilitet i fredstid.

Rapporten vil belyse

- **Vitenskapsbaserte råd** basert på dagens kunnskap.
- **Behovet for ny flerfaglig forskning for å fylle kunnskapshull**, særlig i samspillet mellom energi, digitalisering, samfunnssikkerhet og systemanalyse.
- **Anvendt teknologiutvikling:** Løsninger for fleksibel energiforsyning, cybersikkerhet, autonome energisystemer og overvåking.
- **Sivil-militært samarbeid:** Bidrag til felles forståelse og kunnskapsutvikling i grenseflaten mellom sivile energiløsninger og forsvarssektorens behov.

Vi legger i denne rapporten stor vekt på å identifisere kunnskapshull. Disse må adresseres i forskning som fremmer økt motstandsdyktighet i energisystemet som følge av det nye trusselbildet med mulighet for tilsiktede handlinger.

For å sikre kontinuitet i kritiske samfunnsfunksjoner må det etableres en godt koordinert sivil-militær beredskap som forebygger, håndterer og begrenser konsekvensene av uønskede hendelser. Det er et presserende behov for å tette kunnskapsgapene, og vi foreslår en ny senterordning for energisikkerhet og beredskap som et helhetlig svar på de komplekse utfordringene vi står overfor.

Figur 2 illustrerer hvordan ressurser og kapasiteter i totalforsvaret er fordelt på en rekke samfunnsområder. Forsvaret alene utgjør kun en liten del av totalberedskapen og er avhengig av at øvrige sektorer fungerer og samvirker effektivt.

For å møte dagens og fremtidens trusler er det avgjørende med økt investering i forskning på fysisk og digital energiinfrastruktur, autonome energisystemer og samspillet mellom sivile og militære behov. Norge har allerede viktig nasjonal forskningsinfrastruktur som kan tas i bruk for å adressere disse utfordringene, og som gir et solid grunnlag for videre utvikling.

En målrettet satsing kan frembringe tverrfaglige løsninger som styrker både nasjonal beredskap og energisikkerhet, samtidig som den bidrar til å opprettholde Norges rolle som en stabil energileverandør i en uforutsigbar verden.

En ny senterordning bør fremme åpen innovasjon der industri, forskningsmiljøer og myndigheter utvikler løsninger av felles interesse. Slik kombineres industriens behov for konkurransedyktige resultater med akademisk kompetanse, noe som legger grunnlaget for et robust og fleksibelt beredskapssystem, høy samfunnsøkonomisk avkastning og økt samfunnssikkerhet gjennom utdanning og kapasitetsbygging.

Ved å inkludere et bredt spekter av aktører er senterordningen særlig godt egnet til å utvikle løsninger som ivaretar både sivile og militære interesser. Gjennom forskningssentre for energiberedskap kan innovative løsninger raskere tas i bruk, og samfunnet vil stå bedre rustet til å møte et stadig mer krevende sikkerhetsbilde.



Råd til politikere og andre beslutningstagere for et energisikkert samfunn som vil styrke Norges evne til å håndtere både naturhendelser og målrettede angrep.

Basert på denne rapporten presenterer vi tre konkrete råd som kan bidra til å styrke energisystemet og ivareta en akseptabel forsyningssikkerhet.

Rådene, sammen med kunnskapshullene som identifiseres i rapporten, peker på behovet for målrettet forskning og utvikling. For å møte et mer komplekst og uforutsigbart trusselbilde anbefaler vi at det etableres flerfaglige forskningssentre som retter seg mot:

- fysisk og digital sikring av energiinfrastruktur
- samspill mellom sivile og militære behov
- videreutvikling av autonome og fleksible energisystemer

Disse sentrene vil bidra med ny kunnskap og løsninger som styrker samfunnets evne til å håndtere målrettede angrep, og vil gi innsikt som er relevant for beslutninger som må tas allerede i dag.

3 RÅD



1

Rust opp energisystemet for usikre tider

Forebygg strømbrudd og avbrudd i energi-infrastrukturer gjennom bedre samspill mellom energikilder og lokal produksjon og lagring.

Styrk beredskapen for kriser og angrep ved å utvikle metoder som fanger opp både tekniske feil og målrettede trusler som cyberangrep og sabotasje.

Bygg opp strategiske lagre og reservedeler for tilgang til kritiske komponenter.

Sikre tilgang på nødvendig kompetanse og effektiv logistikk på land og til havs.



2

Sats på energiløsninger som kombinerer energisikkerhet og bærekraft

Koble sammen ulike energikilder som strøm, varme, gass og hydrogen i integrerte systemer.

Kartlegg og forstå avhengigheter mellom ulike deler av energisystemet.

Identifiser hvordan problemer i én sektor kan spre seg til andre og hvordan effekten av dette kan forebygges og reduseres i kriser.

Bruk løsninger som gjør det raskt og enkelt å reparere og gjenopprette drift.

Utvikle metoder som også tar høyde for sammensatte og målrettede trusler.



3

Styrk samarbeidet med våre allierte for å sikre rimelig og sikker tilgang på energi

Videreutvikle Norges rolle som en stabil og pålitelig energileverandør til Europa.

Styrk det nordiske energisamarbeidet for bedre utnyttelse av felles ressurser og infrastruktur.

Sikre tilgang til leveranse- og verdikjeder og teknologiske ressurser både nasjonalt og gjennom strategiske partnerskap.

Kartlegg avhengigheter til utenlandske leverandører og vurder muligheter for nasjonal produksjon av kritisk utstyr.

SINTEF og NTNU tar felles initiativ til en ny senterordning for beredskap innen energi

Forslaget bygger på modellen for forskningssentre for miljøvennlig energi (FME), og innebærer en åpen utlysning av midler for å samle forskere, myndigheter og næringsliv, og legge til rette for samarbeid mellom sivile og militære aktører. Effekttstudiene fra 2018 og 2025 viser at denne ordningen gir høy samfunnsnytte, både når det gjelder kunnskapsutvikling, verdiskaping, og samarbeid mellom aktører.

En senterordning vil bidra til å utvikle kunnskap og løsninger som styrker samfunnets evne til å forebygge og håndtere kriser og sikre stabil energiforsyning.

Bakgrunn:

Forsyningssikkerheten i kritisk infrastruktur er truet

Koordinert sabotasje mot kritiske knutepunkter i strømnettet og gass eksportsystemet

Digitale angrep på drifts- og styringsverktøy

Hybride angrep som involverer digital- og fysisk sabotasje og desinformasjon

Avhengighet av sårbare verdikjeder for driftskritisk utstyr

Økende kompleksitet i energisystemet, med mange og nye avhengigheter

Forslag:

Forskningscentre for Beredskap innen Energi (FBE)

Et kraftfullt initiativ for å styrke Norges beredskap og forsvarsevne for energi i et komplekst sikkerhets- og trusselbilde.

Adressere identifiserte svakheter og utvikle forskningsbaserte løsninger som sikrer energi- og forsyningssikkerhet.

Svarer på krav til sivil og militær koordinering, tverrsektorielt samarbeid og rask implementering av løsninger.

En kraftfull satsing som gir rask effekt



Senterordningen finansieres etter sektorprinsippet, der ansvarlige fagdepartement kanaliserer én milliard kroner via Forskningsrådet. Midlene tildeles gjennom åpen konkurranse og vil utløse tilsvarende én milliard kroner i privat medfinansiering. Sentrene vil møte behov i både offentlig og privat sektor, og styrke næringslivets evne til å løse viktige og komplekse utfordringer. Bedrifter og forskningspartnere deltar som likeverdige aktører i sentrene.

I rapportens delkapitler finnes det flere anbefalinger basert på dagens kunnskap. I tillegg identifiserer vi kunnskapshull knyttet til disse. Samlet peker rapporten på et behov for å gjøre kraftsystemet på land og til havs mer robust og forberedt på ulike typer trusler. Energisystemet blir stadig mer sammensatt, med økende digitalisering og gjensidige avhengigheter mellom sektorer. På tvers av anbefalingene trer fem hovedområder for videre utvikling tydelig frem for å sikre et robust og motstandsdyktig energisystem:



1. Videreutvikling av risiko- og sårbarhetsanalyser

Det er behov for helhetlige analyser som fanger opp komplekse og sammensatte trusler, inkludert tilsiktede handlinger som cyberangrep og sabotasje. Dette krever nye metoder som integrerer tekniske, digitale og organisatoriske perspektiver, og som kan håndtere scenarioer med viljeshandlinger og kaskadeeffekter mellom ulike energibærere. Det er behov for tverrfaglig forskningsinnsats for å utvikle slike ROS-metoder og tilpasse dem både til landbaserte og havbaserte energisystemer.

2. Bedre forståelse av avhengigheter og kaskadeeffekter

Kraftsystemet er tett koblet til andre kritiske infrastrukturer som varme, gass, hydrogen og maritime systemer. Økt innsikt i hvordan problemer sprer seg mellom sektorer og energibærere er avgjørende for å forebygge og håndtere kriser. Dette krever utvikling av systemmodeller og simuleringverktøy som kan analysere samspill og sårbarhet i integrerte energisystemer, og som støtter både operativ beredskap og langsiktig planlegging.

3. Styrking av lokal og operativ beredskap

Mikronett, energisamfunn og lokal energiproduksjon kan spille en viktig rolle i krisehåndtering og gjenoppretting. Det er nødvendig med bedre forståelse av øydrift, prioritering av strømforsyning og tiltak for å sikre lokal energitilgang til kritiske funksjoner og befolkning. Det er samtidig behov for kunnskap om hvordan slike løsninger kan integreres i det overordnede kraftsystemet, og hvordan tekniske, regulatoriske og organisatoriske rammer kan støtte lokal robusthet i praksis.

4. Robusthet i verdikjeder og infrastruktur

Drift og utbygging av energiinfrastruktur krever kontroll over verdikjeder og kritiske komponenter. Det er også viktig å beskytte nøkkelkomponenter og noder i dagens kraftsystem, og investere i overvåking og beslutningsstøtte for rask respons ved hendelser. Dette forutsetter forskning på sårbarhet i globale leverandørkjeder, scenariobasert modellering av forsyningsrisiko, og utvikling av operative strategier for å beskytte kritisk infrastruktur både fysisk og digitalt. Samspill mellom aktører og roller må identifiseres og trenes på.

5. Energieffektivisering som beredskapstiltak

Redusert energiforbruk bidrar til å dempe belastningen på kraftsystemet i normalsituasjoner og gir økt handlingsrom i kriser. Energieffektivisering og fleksibelt forbruk kan styrke beredskapen ved å redusere behovet for nødstrøm og avlaste systemet i kriser. Industriaktører kan spille en særlig viktig rolle gjennom laststyring og bidrag til lokal energiforsyning. Det er behov for forskning på hvordan slike tiltak kan integreres i beredskapsplanlegging, og hvilke virkemidler og tiltak som er mest effektive.



2

ENERGISYSTEMET OG DET NYE TRUSSELBILDET



Foto: My Photo Buddy / iStock

Energisystemet og det nye trusselbildet

2.1 Energisystemets sektorovergripende rolle

Energisystemet er bygget opp av store, separate delsystemer som til sammen dekker behov for energi til ulike formål som varme, prosesser, apparater og transport. Det moderne energisystemet er og tett sammenvevd med andre infrastrukturer. Disse gjensidige avhengighetene styrker effektivitet og funksjonalitet i normal-situasjoner, men øker sårbarheten i krisesituasjoner. Et bortfall i én sektor kan få omfattende konsekvenser i andre. Dette stiller nye krav til hvordan vi forstår, planlegger og beskytter det samlede systemet.

Samfunnets avhengighet av elektrisitet gjør det viktig å sikre pålitelig og bærekraftig strømforsyning for å opprettholde kritiske samfunnsfunksjoner, livskvalitet og økonomisk stabilitet. Eksempler er:

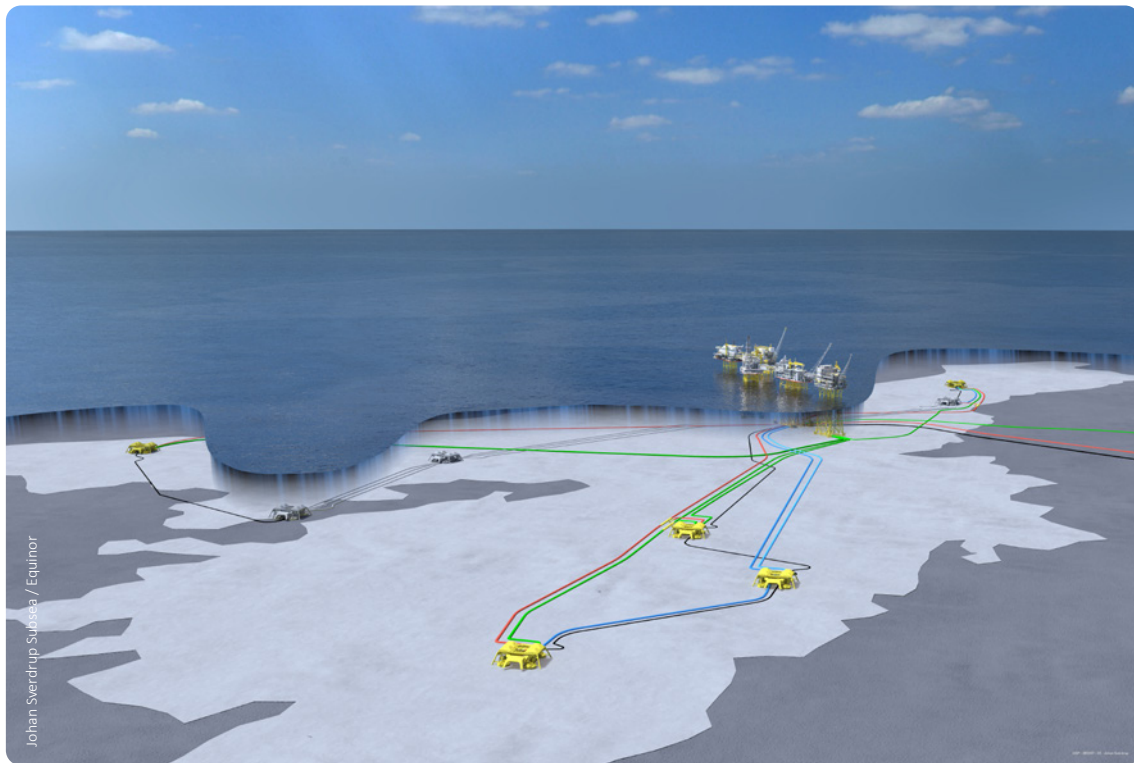
- **IKT:** Dagens kommunikasjonssystemer og digitaliserte samfunnsfunksjoner er avhengig av et fungerende kraftsystem. Samtidig er kraftsystemet avhengig av kontinuerlig digital styring og overvåking gjennom nettverk, sensorer og datasystemer.
- **Transport:** Elektrifisering av transportmidler og logistikksystemer gjør sektoren direkte avhengig av sikker strømforsyning. Det gjelder både veg, bane, i luften og delvis på sjøen.
- **Kaskadeeffekter:** Et strømutfall kan lamme digitale tjenester, stanse vannforsyning, og hindre drivstoffdistribusjon – som igjen påvirker helseberedskap, mobilitet og kommunikasjon. Samtidig er gjenoppretting av strømforsyning avhengig av transportsystemer, logistikk og kommunikasjon.

2.2 Energisystemet og totalforsvaret

De siste årene har Norge og Europa startet en gjennomgripende elektrifisering og avkarbonisering av samfunnet. Elektrifisering er en sentral drivkraft i overgangen til et lavutslippssamfunn. Samtidig endrer denne omstillingen strukturen i energisystemet og skaper nye sårbarheter. Når stadig flere samfunnsfunksjoner kobles til strømmettet, øker konsekvensene av strømbrydd, enten det skyldes naturkatastrofer, teknisk svikt eller målrettede angrep. Beredskapsløsninger som tidligere bygget på lagrede fossile energibærere, blir svekket i takt med at disse fases ut. Dette fører til endringer innenfor områder som

- **Systembelastning:** Økt krafttettspørsmål fra transport, industri og bygg forutsetter rask utbygging av nettkapasitet og fleksible løsninger.
- **Energiavhengighet:** Elektrisitet overtar funksjoner som tidligere ble dekket av diesel, gass og olje – særlig innen beredskap, oppvarming og transport.
- **Integrerte energisystem:** Nye energibærere som hydrogen og batterier introduserer egne krav til infrastruktur og forsyningssikkerhet. Samtidig vet vi at systemer som integrerer flere energibærere øker robusthet og fleksibilitet.

Et robust og velfungerende kraftsystem er en grunnpilar i totalforsvaret, og avgjørende for å opprettholde samfunnets motstandskraft i både fred, krise og krig.



2.3 Norge og Europas energiforsyning

Norge spiller en spesiell rolle i Europa sin energiforsyning. Aktiviteten på norsk sokkel innen olje- og gassproduksjon, gassrørledninger, strømkabler, havvind og utbygging av undersjøiske datakabler, gir området en stadig viktigere sikkerhetspolitisk rolle.

Norge alene står for rundt 30% av Europa sin gassforsyning når man regner med LNG-importen. Ser vi kun på gass i rør dekker Norge mer enn 50% av Europa sin forsyning med rundt 1100TWh energi i løpet av et år. Denne energien er sentral for Europa sin sikkerhet og velferd. Infrastruktur på havbunnen er utfordrende å overvåke og sikre effektivt, og er sårbar både for målrettet sabotasje og teknologiske angrep. Angrepene på Nord Stream-rørledningene illustrerte hvor utsatt kritisk undersjøisk infrastruktur er, og hvordan slike anlegg brukes som virkemiddel i sikkerhetspolitiske konflikter.

2.4 Hvilke trusler snakker vi om

I dagens endrede sikkerhetspolitiske landskap spiller energiforsyningen en stadig viktigere rolle. Infrastruktur som tidligere ble betraktet som rent sivil, er nå stadig oftere utsatt i konflikter. Grensene mellom fredstid og krise, og mellom sivile og militære mål, har også blitt langt mindre tydelige. Dette stiller helt nye krav til hvordan samfunnet planlegger, sikrer og beskytter kritiske systemer. Truslene mot energiforsyningen er komplekse og sammensatte. Det betyr at flere ulike typer virkemidler – som økonomiske tiltak, digitale angrep eller til og med militære virkemidler – kan brukes samtidig for å ramme eller svekke en motstander. Energi har også vist seg å være et effektivt pressmiddel i internasjonale konflikter, noe vi blant annet så med Russlands manipulering av gassleveranser før og under Ukraina-krisen.

Vi må derfor forvente at kraftforsyningen og andre deler av energisystemet kan bli utsatt for både dataangrep og angrep på fysisk infrastruktur.

Sårbarheter i energisystemene

Det er nødvendig å øke kunnskapen om sårbarheter i disse systemene og øke kunnskapen om hvordan disse sårbarhetene kan avhjelpes både i normal drift og i krisesituasjoner og som underlag for beredskap. NVEs rapport «Trusselbildet i kraftforsyningen» gir en overordnet beskrivelse av trusselbildet mot norsk kraftforsyning på kort og lang sikt. Ifølge rapporten må kraftforsyningen forvente å bli utsatt for etterretning, forsøk på økonomisk posisjonering, påvirkningsoperasjoner og muligens sabotasje, både i form av dataangrep og angrep på fysisk infrastruktur. I en krig vil kraftforsyningen være et prioritert mål, dette har vi sett i krigen i Ukraina hvor operasjonell kapasitet i kraftsystemet har gått fra 34 GW til 20 GW etter systematiske angrep på infrastrukturen.

Russland har utviklet en omfattende samling av metoder og virkemidler som ikke er direkte militær maktbruk, men inkluderer bruk av aktører som hackergrupper og kriminelle, samtidig som de fortsetter å videreutvikle evnen til militære angrep. Kina søker kontroll over forsyningskjeder, rekrutterer norske borgere for å få tilgang til sensitiv og gradert informasjon, og bruker aktører uten offisiell tilknytning til landet som virkemidler for etterretning og dataangrep.

Digitale angrep

Trusselaktører beveger seg sømløst mellom fysiske, digitale og økonomiske virkemidler, ofte med mål om å ramme sivil infrastruktur av strategisk betydning. For energisystemet betyr dette at risikovurderinger må utvides til å omfatte blant annet strategisk manipulering av markeder, cyberangrep på styringssystemer og målrettede forstyrrelser i verdikjeder.

Selv om digitaliseringen av energisystemene gir klare fordeler i form av økt effektivitet og fleksibilitet, skaper den også betydelig sårbarhet



Foto: Gaisco

mot digitale trusler. Avhengigheten av digitale og sammenvevde systemer betyr i praksis at en hendelse ett sted raskt kan få store konsekvenser andre steder – enten det gjelder strømforsyningen, styringssystemer eller informasjonsflyt.

Globale verdikjeder og reparasjonskapasitet

De globale verdikjedene som energisektoren er en del av, står under betydelig press. Avhengighet av teknologiske løsninger, spesialiserte komponenter og kritiske råvarer fra et fåtall leverandørland øker risikoen for at geopolitiske spenninger, handelsrestriksjoner eller forsyningsavbrudd raskt fører til



Norge forsyner Europa med over halvparten av gassen som leveres via rør, og spiller en nøkkelrolle i kontinentets energisikkerhet.

alvorlige problemer. Dette er spesielt aktuelt for viktige innsatsfaktorer som mineraler brukt i batteriproduksjon, elbiler og vind-/solkraft-anlegg. Globale forsyningskjeder påvirker leveringstid av reservedeler og komponenter som krafttransformatorer og spesialisert digitalt utstyr. Reparasjonskapasitet og beredskap vil spille en enda større rolle i en verden preget av usikkerhet.

Reparasjonskapasitet er vår evne til å bringe en komponent eller et system tilbake i operasjonell drift etter at det er satt ut av drift enten ved digitale eller fysiske angrep. Faktorer som

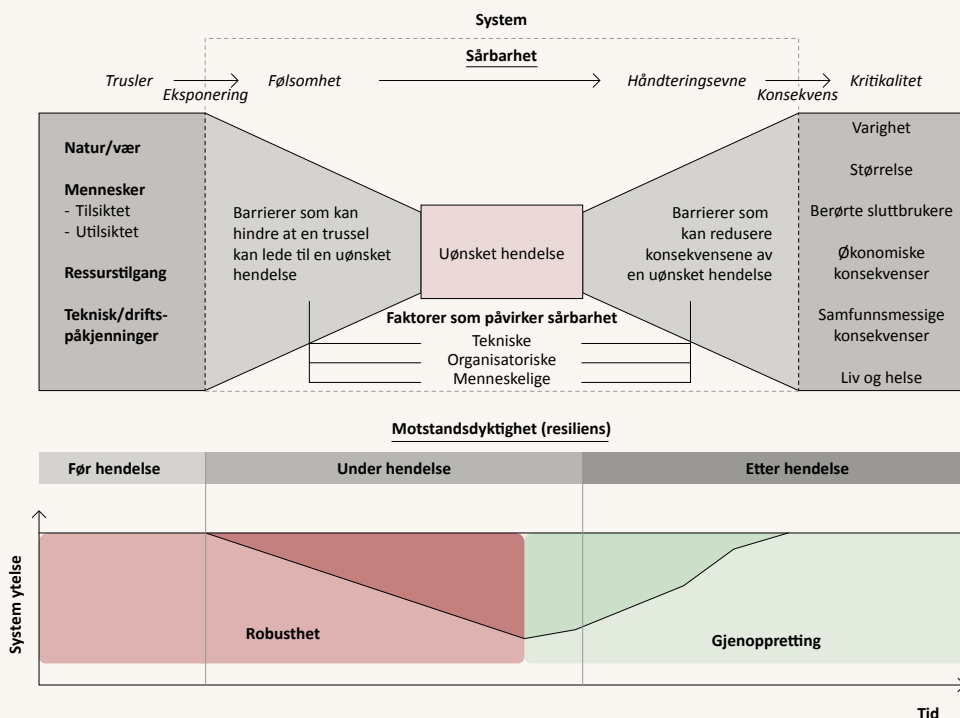
påvirker reparasjonskapasitet er tilgang på kritiske materialer, på komponenter og på verktøy, kapasiteter og kompetanse for å utføre reparasjon. Mange av disse faktorene påvirkes direkte av globale verdikjeder og leveringstid.

I møte med dette komplekse og uoversiktlige trusselbildet blir behovet for styrket nasjonal beredskap og kontroll over kritiske ressurser stadig tydeligere. Mange land svarer derfor med økte investeringer i beredskapslager, alternative forsyningsruter og mer fleksible infrastruktur-løsninger.

2.5 BEGREPSAVKLARINGER

For å styrke samfunnets motstandsdyktighet mot tilsiktede handlinger og generell usikkerhet, er det viktig å forstå sentrale begreper som risiko, sårbarhet, forsyningssikkerhet, energiberedskap, robusthet og motstandsdyktighet. Selv om disse ofte brukes om hverandre, dekker de ulike, men komplementære aspekter ved samfunnets evne til å møte og håndtere uønskede hendelser.

Vi definerer begrepene i lys av sløyfemodellen (Figur 3), som viser årsakssammenhenger mellom trusler, uønskede hendelser og deres konsekvenser. En uønsket hendelse kan for eksempel være energiknapphet eller utfall av komponenter, som følge av feil eller tilsiktet påvirkning. Modellen er et nyttig verktøy for å vurdere risiko og analysere barrierer og sårbarheter.



Figur 3: Sløyfemodell for risiko, sårbarhet og motstandsdyktighet, og relaterte begreper.

Risiko er en funksjon av sannsynligheten for og konsekvensen av en uønsket hendelse, og med risiko i denne rapporten mener vi risiko knyttet til forsyningssikkerhet for energi.

Sårbarhet^[2] er et uttrykk for de problemer et system vil få med å fungere når det utsettes for en uønsket hendelse, samt de problemer systemet får med å gjenoppta sin virksomhet etter at hendelsen har inntruffet. Følsomheten påvirkes av teknologi, arbeidsstyrke og organisasjon, mens håndteringsevnen handler om hvordan systemet og operatører begrenser skade og gjenoppretter drift. Både tekniske, menneskelige og organisatoriske faktorer spiller inn.

En **trussel** er en indikasjon, omstendighet eller hendelse med potensialer for å forstyrre eller ødelegge (en del av) et system. Trusler oppstår utenfor det sårbare systemet og kan deles inn i gruppene Natur, Mennesker, Tekniske-/driftspåkjenninger og Ressurstilgang^{3,[4]}. Barrierer kan hindre at en trussel leder til en uønsket hendelse.

Kritikalitet er et uttrykk for hvor kritiske konsekvensene er for samfunnet og brukere av energiforsyning. Hvor store eller kritiske konsekvensene blir, er typisk avhengig av størrelsen på området som er berørt av avbrudd i forsyningen, type sluttbrukere, økonomiske konsekvenser, konsekvenser for liv og helse, osv.

Beredskap refererer til planlagte og organiserte tiltak for å *forebygge, håndtere og begrense* uønskede hendelser. Dette kan omfatte preventive, korrektive og gjenopprettende tiltak^[6]. Reparasjonsberedskap, som omtales i denne rapporten, er en del av dette.

Motstandsdyktighet (resiliens) er en motsats til sårbarhet og er et uttrykk for evnen systemet har til å opprettholde sin funksjon hvis en trussel fører til en uønsket hendelse og systemets evne til å gjenoppta sin virksomhet etter at hendelsen har inntruffet^[5]. Motstandsdyktighet kan deles inn i to underdimensjoner:

Robusthet som er systemets evne til å motstå en trussel med hensyn til tap av funksjon.

Gjenoppretting omhandler systemets evne til gjenvinne funksjon etter en hendelse.

3

MOTSTANDS- DYKTIGHET OG BEREDSKAP I KRAFTSYSTEMET



Foto: Scharfsm86 / iStock



Motstandsdyktighet og beredskap i kraftsystemet

3.1 Aktuelle problemstillinger

Forsyningssikkerhet for elektrisk kraft

Dette handler om kraftsystemets evne til kontinuerlig å levere strøm av god kvalitet til sluttbrukere. Det omfatter energisikkerhet (tilgang på energi), effektsikkerhet (tilstrekkelig kapasitet for å dekke forbrukstopper), spenningskvalitet (jevn og stabil spenning), leveringspålitelighet (hyppighet og varighet av strømbrydd) og driftssikkerhet (systemets evne til å håndtere forstyrrelser uten å overskride tekniske grenser for frekvens, spenning og temperatur).

Sløyfemodellen for risiko og sårbarhet synliggjør hvordan trusler kan føre til uønskede hendelser og hvilke konsekvenser dette kan ha. Den danner et godt grunnlag for å vurdere både forsyningssikkerhet og beredskapsbehov.

Motstandsdyktige kraftnett og kraftforsyning

Kraftsystemet er i utgangspunktet designet for å være robust og å kunne motstå komponentfeil. I kraftforsyningen kan en trussel føre til en uønsket hendelse i form av energiknapphet, effektknapphet eller komponentutfall (f.eks. pga. feil/havari)^[7]. Både selve designet av nettet og bruken av styringssystemer gjør at det finnes reservemuligheter når hendelser oppstår. Komponentutfall og til dels effektknapphet kan videre føre til ekstraordinære hendelser som omfattende strømbrydd eller 'blackout'. Et eksempel på beredskap for å håndtere slike hendelser er øydrift i lokale energisystemer/mikronett som kobles fra resten av systemet for å isolere feil eller for å kjøre systemene uavhengig av hverandre.

Digitalisering og fleksibilitet i kraftsystemet

Automatisering av kraftnettet (cyber-fysiske system) gjør det mulig å ta i bruk fleksibilitetsressurser for å balansere kraftproduksjon og forbruk. Integrasjon av distribuerte fornybare energikilder og lokale energisamfunn/mikronett er en sentral del av dette.

Sårbarhet på nasjonalt nivå

Det finnes en sårbarhet på nasjonalt nivå som skyldes en skjev geografisk fordeling mellom kraftproduksjon og-forbruk. For eksempel har Østlandet et høyt forbruk av elektrisitet, men relativt lav egenproduksjon. I tillegg utgjør svak strømforsyning en risiko i områder med lav befolkningstetthet, men hvor det likevel er viktig med nasjonal tilstedeværelse, slik som i Finnmark.

Digital sikkerhet og risikohåndtering

En viktig del av motstandskraften til systemet ligger i digital sikkerhet og risikohåndtering. Dette krever sikkerhetsbevissthet i alle deler av organisasjonen.

Forskningen knyttet til forsyningssikkerhet for elektrisk kraft har til nå i hovedsak vært rettet mot «normale» situasjoner/fredstid, inklusive risiko og sårbarhet og noe forskning innen motstandsdyktighet. Eksempel er risiko- og sårbarhetsanalyse for kraftsystem og-komponenter, inkludert ekstraordinære hendelser (High Impact Low Probability (HILP)). Nye utfordringer som følge av økte påkjenninger pga. elektrifisering, økte vær- og påkjenninger, cyber trusler og økt kompleksitet og uforutsigbarhet, og dels samspill med andre energibærere, er temaer i FME SecurEL^[8] og andre forskningsprosjekter. Mens utfordringer knyttet til tilsiktede handlinger og det nye trusselbildet, i liten grad er berørt.

Beredskap og motstandsdyktighet i kraftforsyningen

Sikkerhet og beredskap i kraftforsyningen er regulert gjennom forskrift om sikkerhet og beredskap i kraftforsyningen (kraftberedskapsforskriften^[9]). Forskriften skal sikre at kraftforsyningen opprettholdes og at normal forsyning gjenopprettes på en effektiv og sikker måte i og etter ekstraordinære situasjoner for å redusere de samfunnsmessige konsekvensene.

Kraftberedskapsforskriften regulerer ansvar og organisering, risikovurdering, beredskapsplanlegging, ressurser og reparasjonsberedskap, fysiske, digitale og organisatoriske forebyggende sikringstiltak, informasjonssikkerhet og beskyttelse av driftskontrollsystem.

Teknologi, komponenter og systemforvaltning

Et moderne og robust kraftsystem krever god forvaltning av teknologi og infrastruktur. Vedlikehold og reinvestering må planlegges nøye for å sikre driftssikkerhet og lang levetid på utstyret. Samtidig utvikles nye og bedre komponenter, som brytere, kabler og transformatorer, for å møte nye behov. Kraftsystemet blir også stadig mer avhengig av teknologi og globale leverandørkjeder. Dette gjør det sårbart, og stiller krav til beredskap for både innkjøp og reservedeler. Digitalisering og automatisering gir mulighet for smartere styring av strømmettet. Det gjør det lettere å bruke fleksible ressurser og integrere lokale energikilder og mikronett. Samtidig øker kravene til sikkerhet, særlig innen cybersikkerhet og kontroll av komplekse systemer.

3.2 Kunnskapsgap

Pålitelighetsanalyser og forsyningssikkerhet

For å styrke motstandsdyktigheten til kraftforsyningen overfor nye trusler og tilsiktede handlinger, er det nødvendig å videreutvikle risiko- og sårbarhetsanalyser som grunnlag for å etablere innsikt og situasjonsforståelse og for å styrke beredskapen. Som en del av dette er det nødvendig å se på samspill og avhengigheter mellom kraftsystem og øvrige deler av energisystemet, og ressurstilgang (forsyningskjeder for reservedeler/store kraftkomponenter) som en trussel som kan hindre rask gjenoppretting etter ekstraordinære hendelser:

- Vurdering av tilsiktede handlinger i risiko- og sårbarhetsanalyser for kraftsystem.
- Identifisere avhengigheter mellom kraftsystem og øvrige deler av energisystemet og andre kritiske infrastrukturer
- Behov for metoder for analyse av kaskadering mellom kraftsystem og andre deler av energisystemet, som for eksempel eksportsystemet for gass.
- Håndtering av langvarige kriser og prioritering av kritiske funksjoner, i samspill med andre energisystemer.
- Nye metoder for High Impact Low Probability (HILP)-hendelser, særlig ved sammensatte trusler.
- Bruk av lokale løsninger som energisamfunn og mikronett (øydrikt) i gjenoppretting, og samspill mellom kraftsystem og andre energikilder

Nye designkriterier for kraft- og energiforsyning

Norge sitt kraftsystem har en innebygget fleksibilitet og robusthet gjennom vårt distribuerte system med 1000 vannkraftverk. Det er likevel noen sentrale deler av det norske energisystemet som gjør oss sårbare. Vi trenger ny kunnskap om hvordan disse kan sikres og hvordan systemet kan drives og gjenopprettes dersom uønskede hendelser skjer.

- Planlegging av strømforsyning i et sikkerhetsperspektiv der det legges vekt på samfunnsikkerhet kontra økonomiske optimaliseringer. F.eks. sikre strømforsyning til områder med lav befolkningstetthet, hvor det er viktig med tilstedeværelse.
- Situasjonsforståelse og håndteringsevne ved ekstraordinære hendelser.
- Forståelse av de samfunnsmessige konsekvensene av strømafbrytning, særlig ved kriser.
- Redundans og motstandsdyktighet i kraftsystemutbygging og infrastrukturutvikling.

3.3 Anbefalinger

1. Videreutvikle risiko- og sårbarhetsanalyser for komplekse og sammensatte trusler

Dagens analyser er i stor grad rettet mot tekniske feil og hendelser i fredstid. Derfor trenger vi:

- metoder som inkluderer tilsiktede handlinger som cyberangrep og sabotasje
- analyse av sammensatte trusler og HILP-hendelser
- vurdering av kaskadeeffekter mellom kraftsystemet og andre energibærere

Forskningsbehov: Utvikle tverrfaglige metoder og modeller for ROS-analyse som inkluderer både tekniske, digitale og organisatoriske dimensjoner.

2. Undersøk avhengigheter og samspill mellom kraftsystemet og andre kritiske infrastrukturer

Kraftsystemet er tett koblet til andre sektorer, både teknisk og organisatorisk. Det er behov for:

- kartlegging av avhengigheter mellom kraft, varme, gass og hydrogen
- analyser av hvordan problemer i én sektor kan forplante seg til andre

Forskningsbehov: Utvikle systemmodeller og simuleringsverktøy for å analysere kaskader og samspill i integrerte energisystemer.

3. Utforsk rollen til lokale energiløsninger i krisehåndtering og gjenoppretting

Mikronett og energisamfunn kan bidra til økt robusthet, men kunnskapsgrunnlaget er begrenset. Derfor må vi vite mer om:

- hvordan slike løsninger kan støtte øydrift og rask gjenoppretting
- samspill mellom sentralisert og desentralisert infrastruktur

Forskningsbehov: Det trengs kunnskap om hvordan lokale energiløsninger kan integreres i kraftsystemet og bidra til krisehåndtering innenfor tekniske, regulatoriske og samfunnsmessige rammer.



Foto: Unsplash

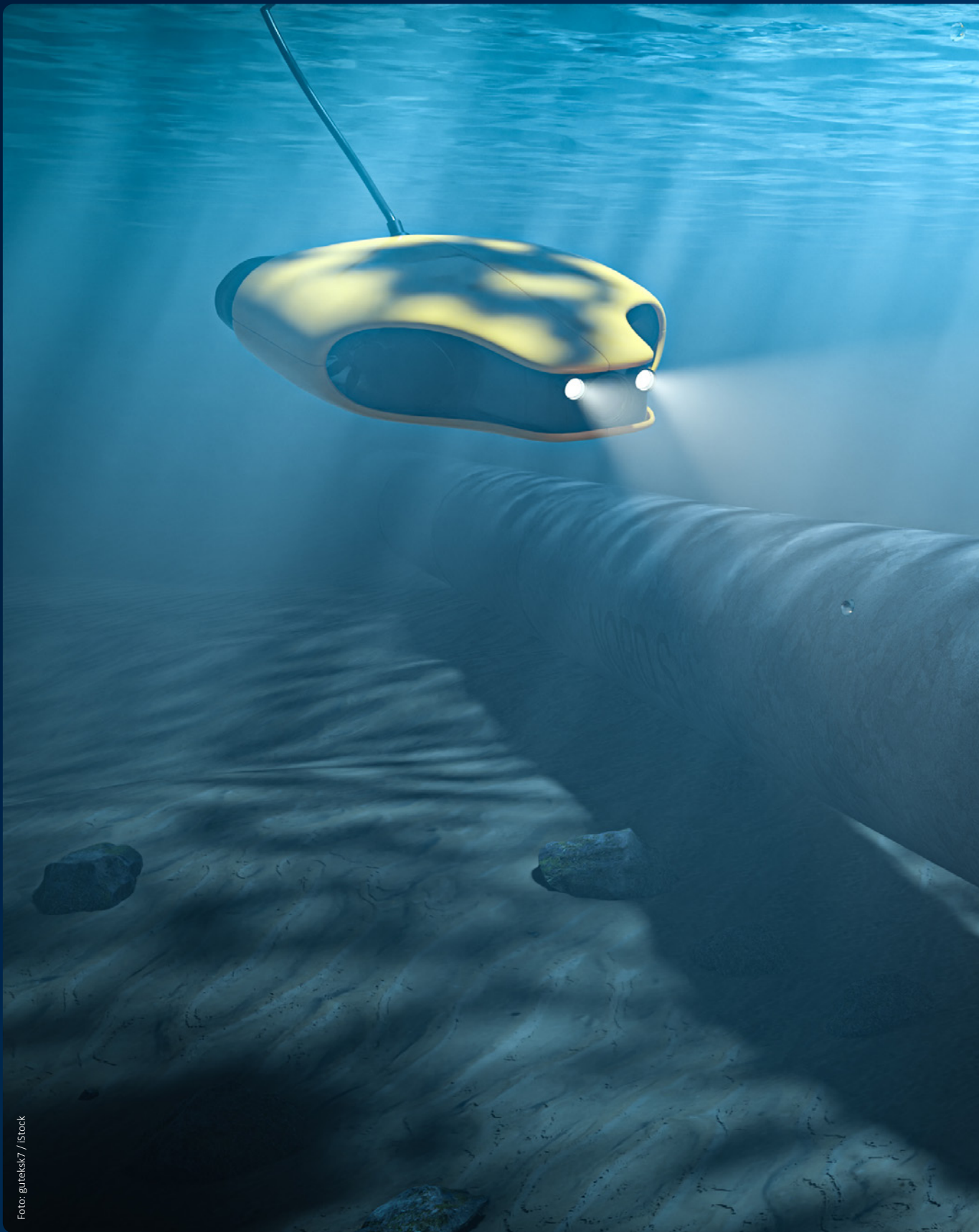


Foto: gutek7 / iStock



4

MOTSTANDS-
DYKTIGHET OG
BEREDSKAP I
ENERGISYSTEMET
TIL HAVS

Motstandsdyktighet og beredskap i energisystemet til havs

4.1 Aktuelle problemstillinger

Sikkerhet og risikostyring

Aktiviteter rettet mot sikkerhet og risikostyring offshore, fokuserer vanligvis på å identifisere, forhindre og håndtere hendelser som skyldes mennesker, natur eller teknologi. Også her er det et behov for å vektlegge hendelser som skyldes tilsiktede handlinger, inkludert digitale angrep.

Olje- og gassinstallasjoner

De faste installasjonene til havs samt tilhørende prosessanlegg også på land, utgjør kritiske knutepunkter i energisystemet. Disse anleggene er komplekse teknologiske strukturer med høy verdi, og kontinuerlig drift er avgjørende for både energiforsyning og nasjonal økonomi. De er i økende grad digitaliserte og fjernstyrte, noe som åpner for effektiv overvåking og styring, men som samtidig introduserer nye sårbarheter. Sikkerhetsarbeidet offshore har tradisjonelt vært rettet mot tekniske feil, ulykker og naturpåvirkning, men det er et økende behov for å styrke motstandsdyktigheten mot tilsiktede handlinger; både fysiske og digitale. Samspillet mellom installasjonene offshore og kritisk infrastruktur på land, som kraftforsyning og datasystemer, betyr at angrep eller svikt i én del kan få store ringvirkninger.

Rørinfrastruktur og prosessanlegg for gass eksport

Transport av naturgass fra norske gassfelt skjer i stor grad ved rørtransport. Det norske rørsystemet for gass eksport består av 8600 km med rør som er knyttet sammen i et komplekst nettverk som går fra produksjonsfeltene til importterminalene i Europa. Systemet omfatter og prosessanlegg på land og kompressorer. Avansert styring og optimalisering gir muligheter til å fleksibelt rute gass. I motsetning til strømnettet har gassrør en mulighet til å lagre energi i røret ved å øke trykket og derved ha et midlertidig lager som det kan tappes fra. Det gir mulighet til å noen dager hente





ut mer gass enn man tilfører og omvendt kan man andre dager tilføre mer gass enn man henter ut. Denne fleksibiliteten sammen med rutings-muligheter i rørsystemet fra ulike produksjonsfelt til ulike mottaksterminaler kan aktivt utnyttes for leveranse-sikkerhet eller for å skape merverdi. Beslutninger støttes av simuleringsmodeller og optimaliseringsmodeller.

På grunn av elektrifisering av petroleumssektoren ser vi allerede i dag en tett kobling mellom det norske eksportsystemet for naturgass og norsk kraftsektor. Dette gir lavere utslipp, men også en større sårbarhet med tanke på bortfall av strøm-leveranser til anleggene.

Nye verdikjeder - hydrogen, ammoniakk, CO₂

Forsyningssikkerhet for energibærere som hydrogen og ammoniakk omfatter både tilstrekkelig produksjons- og overføringskapasitet til sluttbruk, samt sikkerhetsrisiko for de ulike verdikjedene. Her må også CO₂ inkluderes siden avkarbonisering av det europeiske energisystemet er avhengig av transport og mellomlagring av store mengder CO₂, og norsk sokkel har stor kapasitet for permanent lagring i et Europeisk perspektiv. Med henblikk på europeiske ambisjoner for havvind, CO₂-fangst og -lagring, samt hydrogen vil vi potensielt se større sammenkobling mellom on- og offshore systemene i framtiden.

Nøkkelerisikoområder knyttet til hydrogeninfrastruktur kan identifiseres langs hele verdikjeden. Produksjon og lagring er utsatt for brann- og eksplosjonsfare, samt høyt trykk, lekkasjer og materialskjørhet. I tilfeller der hydrogen blir gjort flytende, er også kryogene farer relevante og kan utgjøre en potensiell trussel for operatører. Transport av hydrogen gjennom rørledninger innebærer lignende risikoer. Når det gjelder distribusjon og sluttbruk av hydrogen, kan menneskelige feil og feil håndtering bidra til økt risiko.

Hydrogen- og ammoniakk-infrastrukturer kan ha betydelig gjensidig avhengighet, spesielt ved produksjon av ammoniakk og bruk av ammoniakk som bærer av hydrogen. Samspillet mellom disse to kan føre til drifts- og sikkerhetsrisikoer, risikoer i forsyningskjeden og infrastruktur, samt miljømessige og regulatoriske utfordringer. Robuste og integrerte rammeverk for risikovurdering bør ta hensyn til:

- **Infrastruktursårbarhet:** En forstyrrelse i én infrastruktur kan føre til begrenset eller ingen tilgjengelighet av den andre;
- **Sikkerhetsrisikoer og farer:** Ammoniakk og hydrogen har ulike sikkerhetsutfordringer. Når de finnes i felles infrastruktur, kan nødhåndtering bli betydelig mer kompleks, og beredskapspersonell må kunne håndtere doble risikoer (brann/eksplosjon for hydrogen og kjemisk giftig eksponering for ammoniakk);

Strømkabler til havs

Strømkabler er en kritisk komponent i energisystemet til havs. De sørger for strømforsyning til offshore olje- og gassinstallasjoner og muliggjør kraftutveksling med andre land gjennom mellomlandsforbindelser. Mellomlandsforbindelsene består av høyspente likestrømskabler (HVDC) som kobler det norske kraftsystemet til andre europeiske land, og muliggjør både import og eksport av elektrisitet avhengig av markeds- og produksjonssituasjonen.

I tillegg til å være viktige for energisikkerheten, er disse kablene også sårbare. De er utsatt for slitasje, ytre påvirkninger som skipsaktivitet og ankerdragning, og i økende grad også villende handlinger. Det er derfor viktig å sikre robust design og god vedlikeholdsstrategi. Aktuelle forskningsområder omfatter:

- design, testing og validering av undervannsteknologi (materialer, kabler, koblinger m.m.)
- forlengelse av levetid for eksisterende undervannsinfrastruktur
- pålitelighet og overvåking av kabelsystemer i drift
- reparasjonsberedskap og tilgang på reservedeler ved feil

Offshore vindparker

Offshore vindkraft vokser raskt og krever omfattende infrastruktur både til havs og på land, inkludert transformatorstasjoner, kabler og digitale kontrollsystemer. Vindkraft er væravhengig og krever derfor smarte løsninger for integrasjon i kraftsystemet, inkludert lagring og fleksibilitet.

Med økende elektrifisering og energiutveksling over landegrenser blir offshore vind en viktig brikke i fremtidens energiforsyning, men også en mulig sårbarhet i krise- eller krigssituasjoner. Det er derfor behov for helhetlig planlegging av både fysisk og digital sikkerhet.

CO₂-infrastruktur

Utbygging av CO₂-infrastruktur for transport og lagring av karbon fra industrielle prosesser, er sentralt i arbeidet med utslippsreduksjon og grønn omstilling. Denne infrastrukturen omfatter rørledninger fra utslippskilder til lagringssteder, samt komprimeringsanlegg og havbunnsinstallasjoner.

Sikker og pålitelig drift av CO₂-transportsystemet er avgjørende for at fangst- og lagringsprosjekter skal være effektive og troverdige. Systemene må også sikres mot uønskede hendelser, både tekniske og tilsiktede.

Reparasjonskapasitet

Motstandsdyktighet krever evne til rask reparasjon og gjenoppretting. Dette forutsetter forståelse av feilmekanismer, tilgang på utstyr og reservedeler samt spesialisert kompetanse.

Et annet viktig aspekt er leverandørkjedesikkerhet. Energibransjen er i økende grad avhengig av komplekse forsyningskjeder, både fysiske og digitale, som må være robuste mot avbrudd og manipulasjon. For å redusere sårbarheten ved leveranseproblemer er det nødvendig med god planlegging og dimensjonering av beredskapslagre, slik at kritiske komponenter og reservedeler er tilgjengelige ved behov.

For å kunne håndtere både forventede og ekstraordinære hendelser kreves det god planlegging og optimalisering av beredskap. Dette inkluderer scenarioanalyse, simuleringer og prioritering av ressurser for rask gjenoppretting av drift.

Effektiv logistikk, både til sjøs og på land, er også en forutsetning for å kunne gjennomføre reparasjonsarbeid i tide og med nødvendig presisjon. Den norske maritime klyngen spiller en sentral rolle i dette arbeidet. Rederier, verft og utstyrsleverandører er viktige aktører i planlegging og gjennomføring av reparasjonsoperasjoner, og representerer en strategisk ressurs for vedlikehold og kriseberedskap i energisystemet offshore.

Maritim inspeksjon og overvåking

Sabotasje av kritisk infrastruktur og installasjoner på havbunnen knyttes vanligvis opp mot aktivitet fra undervannsfartøy eller overflatefartøy. Kontinuerlig overvåking, anomali-deteksjon og raske mottiltak er nødvendig.

Et viktig virkemiddel i dette arbeidet er bruk av autonome eller fjernstyrte droner, både i luft, på vannoverflaten og under vann. Design, fabrikasjon, vedlikehold og reparasjon av slike dronesystemer er en sentral del av beredskaps- og overvåkningskapasiteten offshore. For å sikre høy operasjonell robusthet forskes det også på metoder for selvorganisering i droneoperasjoner. Dette innebærer at dersom én eller flere droner faller



Foto: Danske Forsvarets NITB

Undersjøiske rørledninger og kabler er livsnerven i Europas energiforsyning, men også et svakt punkt. I en tid med økt geopolitisk spenning blir sikring av havbunnens nettverk stadig viktigere.

ut, kan resten av flåten automatisk reorganisere oppdraget slik at viktigst funksjoner opprettholdes og restnyttan maksimeres.

Plasseringen av overvåkingsressurser er også avgjørende. I noen tilfeller er det hensiktsmessig med statisk posisjonering for kontinuerlig overvåking av spesielt sårbare punkter, mens dynamisk posisjonering gir fleksibilitet til å tilpasse seg et skiftende trusselbilde.

En viktig ramme for dette arbeidet er det som gjerne omtales som **observasjonspyramiden**, et lagdelt og komplementært system av sensorer og

plattformer. Øverst finner vi sensorer i lufta som gir bred oversikt og tidligvarsling. Deretter følger overvåking fra fartøy og bøyer på havoverflaten, før vi nederst har undervannssensorer og autonome undervannsfarkoster som kan gjennomføre nærgående inspeksjoner og målinger. Dette gir en helhetlig dekning og mulighet for både deteksjon, verifikasjon og rask respons i møte med mistenkelig aktivitet på eller under havflaten.



Muligheter med eksisterende flåte

I tillegg til nye teknologiske løsninger er det viktig å vurdere hvordan eksisterende maritim infrastruktur og fartøyskapasitet kan bidra til økt robusthet i energisystemet til havs. Den norske flåten, med hundrevis av supplyskip og høyteknologiske fiskefartøy, representerer en betydelig ressurs som kan tas i bruk med relativt små grep. Flere av disse fartøyene er allerede utstyrt med avansert overvåkingsutstyr, og deres operasjonsområder overlapper ofte med områder der kritisk infrastruktur befinner seg. Dette gjør dem velegnet til å utføre overvåkingsoppgaver, spesielt i et mellomlangt tidsperspektiv hvor skalering av

droneteknologi fortsatt er under utvikling. Videre har slike fartøy kapasitet til både energileveranse og kjølelagring, noe som kan være avgjørende ved bortfall av strøm eller logistikkfunksjoner i kystnære områder. En helhetlig beredskapsstrategi bør derfor inkludere analyser av hvordan eksisterende flåte kan spille en aktiv rolle i sikring og støtte av energiinfrastruktur offshore.

4.2 Kunnskapsgap

Risiko- og sårbarhetsanalyser (ROS)

Dagens risiko- og sårbarhetsanalyser (ROS) er i hovedsak utviklet for å håndtere tekniske feil og naturhendelser. Det finnes et betydelig kompetansegap når det gjelder vurdering av komplekse og sammensatte trusler, inkludert tilsiktede handlinger som sabotasje, terror og hybrid krigføring, særlig i verdikjeder for naturgass, hydrogen, ammoniakk og CO₂-transport. For eksempel kan et avbrudd i hydrogenforsyningen, som følge av sabotasje eller naturkatastrofer, føre til full stans i ammoniakkproduksjon i integrerte verdikjeder.

Videre mangler det metodikk som fanger opp kaskadeeffekter mellom energibærere og kritisk infrastruktur i integrerte energisystemer. Det er behov for forskning som utvikler helhetlige risikoanalyser som kombinerer teknisk risiko, forsyningssikkerhet, tilsiktede handlinger og samfunnsmessige konsekvenser.

Et særskilt forskningsbehov er å videreutvikle og tilpasse eksisterende Natech-rammeverk (naturlige hendelser som utløser teknologiske ulykker) til scenarier der truslene er målrettede og bevisste.

Samspill mellom det norske kraftsystemet og gass-systemet

Ved bortfall i det norske kraftsystemet som følge av

sabotasje eller krig, er det avgjørende å ha modeller og verktøy som raskt kan støtte beslutninger om prioritering av sluttbrukere. Samspillet mellom kraftsystemet, petroleumsfeltene og det norske eksportsystemet for gass er særlig viktig. Det er behov for ny modell- og analysekapasitet som muliggjør samoptimalisering av kraft- og gassystemer på norsk sokkel og onshore. Slik kapasitet er sentral for å kunne prioritere samfunnskritiske funksjoner, inkludert gasseksport og offshore-aktivitet, ved redusert tilgjengelighet samtidig i flere deler av systemet.

Leveransekjeder

Utviklingen av den globale situasjonen gjør at forsyningssikkerheten i leveranse-verdikjedene må gis økt fokus. Utstrakt behov for sjeldne mineraler og dominans fra enkelt-aktører/-land gir utfordringer når det europeiske energisystemet skal avkarboniseres. Investerings- og driftsanalyser må derfor inkludere vurderinger av teknologivalg, sårbarhet i verdikjeder og tilgang på kritiske råmaterialer. Potensialet for gjenbruk og sirkulærøkonomi bør integreres i risiko- og ressursanalyser, og det er avgjørende å lykkes med gjenbruk av kritiske materialer for å redusere avhengighet og sårbarhet.

Sensorer og overvåking

Selv om dagens maritime inspeksjons- og overvåkingssystemer benytter sensorer i satellitter, fly, droner og på havbunnen, har hendelser som Nord Stream-sabotasjen og angrep på fiberkabler og gassrør vist behovet for mer avanserte og robuste løsninger.

Et motstandsdyktig energisystem krever kontinuerlig overvåking og oppdatert situasjonsforståelse, både av fysisk infrastruktur og digitale kontrollsystemer. Cybersikkerhet er tett knyttet til forsyningssikkerhet, og angrep på kontrollsystemer kan få alvorlige konsekvenser for energiforsyningen. Bruken av

sensorer muliggjør tilstandsbasert vedlikehold, fjernovervåking og tidlig avviksdeteksjon, og når de kombineres med autonome plattformer i luft, på land og under vann, kan overvåkingen gjennomføres kontinuerlig og risikoeffektivt.

For å omsette store datamengder til operativ innsikt, trengs avanserte, dynamiske risiko- og sårbarhetsmodeller som kontinuerlig oppdateres basert på sanntidsdata. Det er avgjørende at innsikten kommuniseres effektivt for å støtte rask og informert beslutningstaking. Utviklingen av helhetlige risiko- og sårbarhetskart for integrerte energisystemer der flere energibærere og infrastrukturer er koblet sammen, utgjør derfor et sentralt forskningsområde, og gir beslutningstakere nødvendig oversikt over sårbarheter og deres utvikling over tid.

Tillit til omstillingsprosesser

Avkarbonisering av det Europeiske energisystemet vil kreve en energiomstilling som mangler historiske paralleller. En vellykket omstilling er avhengig av bred tillit i samfunnet, både til at forsyningssikkerheten ivaretas og til at omstillingsprosessen skjer på en rettferdig måte. Derfor er det viktig å opprettholde forsyningssikkerheten gjennom investerings- og driftsanalyser av regionale og lokale energisystemer, basert på detaljerte teknologi-modeller, omfattende værdata og realistiske driftsforhold. Samtidig må fordelingsvirkninger forstås og håndteres, slik at ulike grupper ikke opplever urettferdig behandling. Et tett samarbeid mellom teknologiske, økonomiske og samfunnsfaglige forskningsmiljøer er derfor nødvendig for å utvikle løsninger som både er teknisk robuste og samfunnsmessig legitime.

Et robust og motstandsdyktig energisystem til havs forutsetter tverrfaglig forskning og samarbeid på tvers av sektorer og verdikjeder.

4.3 Anbefalinger

1. Utvikle helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyser for offshore energisystemer

Det er behov for bedre metodikk for å vurdere komplekse trusler mot havbasert infrastruktur, inkludert:

- sabotasje, cyberangrep og hybride trusler
- kaskadeeffekter mellom energibærere (f.eks. hydrogen og ammoniakk)
- samspill mellom kraftsystemet på land og offshore-installasjoner

Forskningsbehov: Videreutvikle integrerte ROS-analyser som kombinerer teknisk risiko, samfunnsmessige konsekvenser og viljeshandlinger. Tilpass eksisterende rammeverk, som Natech, til scenarier med bevisste trusler.

2. Invester i overvåking og beredskap for kritisk infrastruktur til havs

Offshore energisystemer er sårbare for skjulte og raske angrep. Det er behov for:

- kontinuerlig overvåking med autonome systemer, sensorer og droner
- dynamiske beslutningsverktøy for rask respons og ressursprioritering
- beredskapsplaner for rask respons ved hendelser, samarbeid med maritim sektor for vedlikehold og reparasjon

Forskningsbehov: Utvikle autonome overvåkingssystemer med høy operasjonell robusthet, samt beredskapsprogrammer som støtter beslutningstaking under usikkerhet.

3. Sikre robusthet og motstandsdyktighet i verdikjeder

Infrastruktur for naturgass, hydrogen, ammoniakk og CO₂ krever:

- kontroll over leverandørkjeder og kritiske komponenter
- standardisering av utstyr og prosedyrer, vurdering av geopolitiske risikoer og teknologisk avhengighet
- øke reparasjonsberedskap og kapasitet
- utvikle analysekapasitet for samtidig optimalisering og prioritering når koordinerte og tilsikta handlinger som rammer både kraftsystemet og naturgassverdikjeder

Forskningsbehov: Analyser sårbarhet i globale verdikjeder og utvikle scenariobaserte modeller for forsyningssikkerhet. Undersøk potensialet for sirkulærøkonomi og gjenbruk av kritiske materialer som del av risikoreduserende strategier.



Foto: metametworks / iStock



MOTSTANDS- DYKTIGHET OG BEREDSKAP I DET INTEGRERTE ENERGISYSTEMET

Motstandsdyktighet og beredskap i det integrerte energisystemet

5.1 Aktuelle problemstillinger

Et integrert energisystem kan defineres som «et kostnadseffektivt, bærekraftig og sikkert energisystem der fornybare energikilder, infrastruktur og anvendelser integreres og koordineres gjennom energitjenester, aktive brukere og muliggjørende teknologier». Målet er å oppnå robusthet mot ondsinnede handlinger gjennom integrasjon og koordinering av produksjon, overføring, distribusjon, sluttbruk og lagring.

Fremtidens system vil være mer robust, men også mer komplekst enn dagens sektorbaserte system, noe som kan gi nye kaskadeeffekter. For å sikre motstandsdyktighet må systemet oppfylle flere krav. For å nå klimamålene innen 2050 må energibruken avkarboniseres ved å erstatte fossile kilder med elektrisitet, hydrogen og andre «e-fuels» som erstatning for direkte bruk av naturgass og andre fossile kilder^[11]. Ved å ha flere sammenkoblede energibærere som kan erstatte hverandre ved behov, blir systemet mindre sårbart for forstyrrelser. Dette kan være spesielt viktig i tilfelle av naturkatastrofer, sabotasje eller andre uforutsette hendelser.

I denne sammenhengen spiller også energi-effektivisering en sentral rolle. Et mer effektivt energisystem reduserer samlet energibehov og belastning på infrastrukturen, noe som styrker beredskapen ved å gjøre systemet mindre sårbart for knapphet og forstyrrelser. Industrien kan være en viktig aktør i dette arbeidet, både gjennom teknologiske løsninger og fleksibel energibruk.

Design av energisystemet

Fremtidens energisystem vil være avhengig av at ulike energibærere kobles tettere sammen når det gjelder planlegging, infrastruktur, drift, marked og regulering. Tettere integrasjon av energibærere vil spille en viktig rolle på alle nivåer i energisystemet;

fra bygg og nabolag til byer og regioner, til nasjonalt og europeisk nivå^[12].

Motstandsdyktige systemer må:

- Tåle ekstreme hendelser og raskt komme seg etterpå.
- Må ha redundans eller funksjonelt mangfold (f.eks. høy grad av modularitet) for å håndtere ugunstige forhold (marked, politikk, miljø, mennesker, digitalt).
- Være designet for å være tilpasningsdyktig og fleksibelt fremfor billigst mulig.
- Fungere godt under varierende forhold (robusthet), for eksempel endringer i sluttbruker-atferd og behov.

Motstandsdyktighet i energisystemet må utvikles i ulike dimensjoner:

- Forhindre mulighet for ondsinnede handlinger: Identifisere og overvåke viktige komponenter, bygge underjordiske eller godt skjulte anlegg.
- Minimere konsekvenser av ondsinnet handling: Bygge redundans inn i systemet, nødaggregater og energireserver.
- Løsninger for situasjoner hvor ondsinnede handlinger har funnet sted og delvis ødelagt energisystemet: Prioritering av sluttbrukere, innfasing av nødkraftsystemer og energireserver.
- Løsninger for å klare seg helt uten ordinær energiforsyning: Godt isolerte hus, vedfyring, parafin samt manuelle og analoge nødløsninger.

Drift av energisystemet og fleksibilitetsløsninger

Bedre samspill mellom energibærere gir økt fleksibilitet og reduserer sårbarhet. For eksempel kan infrastruktur for el og varme veksle mellom å være fleksibilitetsleverandører for hverandre ved at man investerer i flere oppvarmings-teknologier basert på flere energibærere^[13]. Samme gjelder mellom el og hydrogen og mellom el og

transportsystemet. For sistnevnte integrasjonsmulighet, vil kraftsystemet i normaldrift være energileverandør til transportsystemet gjennom opplading av batterier brukt i ulike kjøretøy. Ved feil og sabotasje i nettet kan derimot rollene snus, ved at de tilkoblede kjøretøyene leverer effekt tilbake gjennom systemer for «Vehicle2Grid».

Fleksibilitet mellom bærere reduserer flaskehalser i strømnnett, fjernvarme og gass kan forbedre stabiliteten og påliteligheten til energisystemet også ved ekstremhendelser og sabotasje. Ved å ha muligheten til å raskt regulere teknologiene som «binder sammen» energibærerne (varmepumper, elektrolyser, brenselceller, energilagere), kan man bedre håndtere uforutsette hendelser og sikre kontinuerlig energiforsyning.

En vesentlig bestanddel av integrerte energisystemer er energilagringsteknologier som batterier, hydrogen og termiske lagre. Dette gjør det mulig å lagre overskuddsenergi som reserver og bruke den når det er kritisk behov, noe som øker forsyningssikkerheten^[14]. Dette krever imidlertid nye markedsløsninger og incentiver, da energilagring i normalsituasjonen vil utnyttes maksimalt for å oppnå inntjening i de løpende energimarkedene og for å dekke eget behov for balansering^[15].

Redusert energibruk

Energieffektivisering og sluttbrukerfleksibilitet spiller en rolle for energisikkerhet og beredskap. Ved å redusere energibruken i bygg så mye som mulig blir samfunnet mindre sårbart ved å frigi produksjon og overføring til andre formål^[16]. Norge bruker veldig mye energi på oppvarming av bygg, det vil si tiltak i byggesektor (varmepumper, isolasjon).

Alternativ for oppvarming av bygg

Robusthet når det gjelder oppvarming av bygg er sentralt gitt det norske klimaet. Robusthet denne sektoren må få økende fokus og det er naturlig å

spørre seg om man kan fortsette å velge løsninger der noen bygg kun har elektrisk oppvarming.

Samspill mellom energisikkerhet, miljøpåvirkning og energitransisjonen

Forskning hittil og nylig startet forskning som FME InterPlay fokuserer på avkarbonisering og bevaring av natur ved utvikling av energisystemet. Dette fokuset er nødvendig, og man bør søke å ivareta alle dimensjoner (minimere utslipp, sårbarhet og innvirkning på natur) ved utvikling av energisystemet. Når man hensyntar sårbarhetsperspektivet i stedet for bare minimering av utslipp og innvirkning på natur kan valg av løsning påvirkes. For eksempel vil det være spørsmål om kritiske nødsystemer og backup må være klimavennlig, og om all transport bør være avhengig av el. Hydrogen og andre «e-fuels» er aktuelle alternativer som kan øke robustheten ved å bygge tilstrekkelig buffer i form av lagringssystemer, men også ved at de kan produseres fra flere energikilder.

Samspill mellom onshore og offshore systemet:

Det er mulig å utnytte mer av våre lavkarbon energikilder i Nordsjøen og nordover som vind, flytende sol og naturgass (omgjort til blå hydrogen) gjennom utbygging av et koblet havnett for kraft- og hydrogenproduksjon og-distribusjon, sammenlignet med tradisjonell «prosjekt til prosjekt» utbygging^[17]. Dette gir økonomiske fordeler, men gjør også systemet mer komplekst både i forhold til planlegging av utbygginger under usikkerhet, og i forhold til sikker drift.

Storskala løsninger versus distribuerte løsninger

Store offshore parker basert på havvind og lange overføringslinjer, framstår i utgangspunktet som en økning av sårbarhet. Grunner til dette er at det er lett å skade både denne produksjonen og overføringen, og det vil være store produksjonsmengder som kan tas ut med «enkle grep» og dermed ramme mange. Motsatt kan småskala distribuert



Strømbruddet i Spania og Portugal i mai rammet millioner og lammet viktige samfunnsfunksjoner. Dette viser hvor sårbart energisystemet er og hvor viktig det er å styrke beredskapen.



produksjon øke sin relevans når sårbarhetsperspektivet inkluderes, fordi det vil være vanskelig å ta ut mange av små enheter på en gang. Kontroll over hele verdikjeden kan være nødvendig, dvs at PV-paneler og vindkraftverk produsert av en mulig fiendtlig stat kanskje ikke kan aksepteres.

Samspill mellom aktører

Både for kraftsystemet og for det integrerte energisystemet er det sentralt at samspillet mellom næringslivsaktører, myndigheter, teknologimiljøer og internasjonale partnere fungerer. Dette gjelder i normal drift, men er kritisk dersom hendelser oppstår som er rettet mot å skade energiforsyningen. Selskaper i energisektoren har Business Continuity Plans som trer i kraft etter hendelser og beskriver ansvarsforhold og roller de første timene etterpå. Like viktig er det å ha god kommunikasjon og avklarte roller arbeidet med å avdekke sårbarheter, i overvåking, i beredskap og i gjenoppbygging. Med tanke på tematikken i denne rapporten er også samspillet mellom de sivile og militære samfunn sentralt. Disse har en gjensidig nytte og et avhengighetsforhold når det gjelder beredskap og gjenoppbygging av system.

5.2 Kunnskapsgap

Pålitelighetsanalyser

Det er behov for å utvikle metoder som analyserer både robuste design og motstandsdyktighet i sektorkoblede energisystemer, inkludert scenarier med tilsiktede uønskede handlinger og sammensatte trusler: Sikkerhet, beredskap og sårbarhetsaspekter som i liten grad dekkes av dagens forskningssentre og-prosjekter på integrerte energisystemer og sektorkobling.

- De samme behovene for nye pålitelighetsanalyser og risikoanalyser gjelder for det integrerte energisystemet som de vi identifiserte for kraftsystemet.

- Det vil i tillegg være behov for modeller som kan gi svar på hvilke kritiske komponenter og infrastruktur i energisystemene som må styrkes for å forbedre motstanddyktigheten? Disse må inkludere nye usikkerheter og ekstremhendelser.
- Risiko- og sårbarhetsvurderinger for integrerte systemer bør derfor utvides til å omfatte samspill mellom tekniske systemer, forsyningskjeder og samfunnsmessige faktorer, inkludert offentlig aksept og risikokommunikasjon.
- Hvordan kan diversifisering av energikilder og -bærere øke energisystemets motstandskraft?
- Det er også nødvendig å se på hvilken rolle internasjonalt samarbeid spesielt innenfor rammene av NATO og i Norden, kan spille for å styrke energisikkerheten, spesielt i tilfeller av internasjonalt tett koblede energisystemer og kraftnett.
- Tett integrasjon mellom energibærere krever tett integrasjon mellom fagfolk i forskning, forvaltning, næring og samfunnet for øvrig.

Fleksibilitet

Ved å koble delene av energisystemet tettere sammen, kan også det totale energisystemet bli mer robust ettersom fleksibiliteten kan øke. Samtidig vil vi åpent opp for nye sårbarheter. Å forstå disse nye sårbarhetene og mulighetene krever sektorovergripende kompetanseløft for å være i stand til å besvare omfattende sektorovergripende spørsmål som:

- Hva er de optimale og mest robuste strategiene og politiske tiltakene for å diversifisere energikilder og -bærere for å styrke forsyningsikkerheten? Et eksempel kan være bruk av lokale løsninger som energisamfunn og mikronett i beredskapssituasjoner:
- Hvilke nye sårbarheter oppstår med et tettere energisamspill, og hva er tiltak for å motvirke disse?
- Hvilke politiske og regulatoriske rammeverk er nødvendige for å støtte utvikling og drift av integrerte energisystemer, med hensyn til tekniske, økonomiske og sosiale aspekter?
- Forskningen bør også inkludere hvordan fleksibilitet mellom energibærere kan benyttes som beredskapstiltak under forstyrrelser eller krisesituasjoner.
- Hvordan kan fleksibilitet brukes til å styrke det totale energisystemets motstanddyktighet?
- Hvilke incentiver er nødvendig for å sikre tilstrekkelig robusthet i drift av energisystemer, og tilstrekkelig investering i fleksibilitet mellom energibærere?
- Hva er de optimale planleggings- og driftsstrategiene for integrerte energisystemer som tar hensyn til synergier og interaksjoner mellom flere energibærere?

Modellanalyser

- Energisystemmodeller er viktig for å forstå sammenhenger og konsekvenser. Disse modellene fokuserer i liten grad på sårbarhet i dag. Denne funksjonaliteten må utvikles sammen med scenarier for energi- og geopolitikk som ser på langsiktig utvikling av energisystemet, men med økt fokus på energisikkerhet og robusthet. Her må det innføres ulike robusthetskrav som påvirker mulige baner for energitransisjonen.
- Her er det et behov for modeller som dekker flere geografiske nivåer. Hvilke tiltak kan gjøres på ulike geografiske nivåer (lokal, regional, nasjonal) for å øke robustheten i energisystemet?
- Hvordan kan vi utvikle et robust energisystem samtidig som vi oppfyller krav til reduksjon av utslipp av klimagasser og til bevaring av biodiversitet?

5.3 Anbefalinger

For å styrke motstandsdyktigheten i det integrerte energisystemet, foreslår vi følgende tiltak. Mange av disse tiltakene krever ikke ny teknologi, men vilje til koordinering, investering og handling.

1. Beskyttelse av kritisk infrastruktur

Et mer sammenkoblet energisystem øker behovet for å forstå og redusere sårbarheten i sentrale komponenter og knutepunkter. Det er behov for å:

- kartlegge hvilke deler av energiinfrastrukturen som er mest sårbare for fysiske og digitale trusler
- utvikle metoder for risikoreduserende tiltak i store overføringslinjer og systemkritiske noder
- undersøke hvordan overvåking og beredskapsplaner kan utformes for å beskytte både tekniske funksjoner og personell

Forskningsbehov: Utvikle verktøy og strategier for å redusere risiko og øke robustheten i nøkkelkomponenter i energisystemet.

2. Forbedret beredskap og gjenoppretting

Evnen til raskt å gjenopprette energiforsyning etter hendelser er avgjørende for samfunnets funksjon og sikkerhet. Derfor bør vi:

- vurdere hvilke komponenter og ressurser som bør lagres for å sikre rask reparasjon ved bortfall
- analysere kompetansebehov og organisering av beredskapsressurser i ulike deler av energisystemet
- utforske tekniske og regulatoriske forutsetninger for øydrift i deler av kraftsystemet
- sørge for at roller og arbeidsdeling mellom samfunnsaktører er klart definert på forhånd og at det er trent på samspillet mellom disse rollene

Forskningsbehov: Utvikling av operative løsninger og organisatoriske modeller som sikrer rask respons og systemstabilitet ved kriser.

3. Prioritering og energiforsyning i krise

Ved langvarige bortfall må energiforsyningen prioriteres og alternative løsninger vurderes for å opprettholde kritiske funksjoner. Det bør:

- utvikles kriterier og modeller for prioritering av strømforsyning til samfunnskritiske aktører
- undersøkes hvordan varmforsyningssystemer kan operere uavhengig av ekstern strømtilførsel inkludert utnyttelse av tilgjengelig overskuddsvarme
- vurderes hvordan ulike energibærere samspiller i kritesituasjoner, inkludert muligheter for lokal energiproduksjon

Forskningsbehov: Utvikle beslutningsstøtteverktøy og tekniske løsninger som sikrer forsyning til de mest kritiske funksjonene under langvarige bortfall.

4. Samfunnsberedskap og lokal håndtering

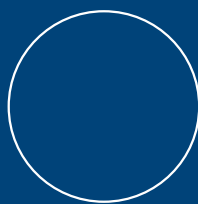
Lokal robusthet og befolkningens egenberedskap er viktige elementer i et motstandsdyktig energisystem. Vi bør:

- kartlegge behov og løsninger for etablering av lokaler som kan huse kriserammede og som har sikker energiforsyning
- undersøke hvordan husholdninger kan motiveres og støttes i å planlegge for lengre strømrbrudd
- vurdere hvordan private aktører med nødaggregater kan integreres i lokal og nasjonal beredskap

Forskningsbehov: Hvordan kan lokal håndtering bidra til å styrke samfunnets samlede beredskap gjennom økt forståelse av lokal motstandsdyktighet og samspill mellom offentlige og private aktører.

- [1] Dets = landet Norge
- [2] Sårbarhetsutvalget, NOU 2000: 24
Et sårbart samfunn
- [3] G. H. Kjølle, M. Hofmann, O. Gjerde, «Vulnerability and security in a changing power system», SINTEF Energi AS, Teknisk Rapport (TR A7278), 2013
- [4] Institutsatsing ved SINTEF Energi i 2025 innen forsyningssikkerhet for energi, interne notater.
- [5] I. B. Sperstad, G. H. Kjølle, O. Gjerde, «A comprehensive framework for vulnerability analysis of extraordinary events in power systems», Reliability Engineering & System Safety, Vol. 196, April 2020.
- [6] KSP RaPID/294754: Resilient and Probabilistic reliability management of the transmission grid, SINTEF Energi
- [7] NordSecurEL, Risk and Vulnerability Assessments for Contingency Planning and Training in the Nordic Electricity System, Energimyndigheten, Sverige, 2009
- [8] FME SecurEL, Secure, resilient and sustainable electricity distribution grids, securel.no
- [9] Forskrift om sikkerhet og beredskap i kraft-forsyningen (kraftberedskapsforskriften), Lovdata.no
- [10] S J Davis et al. ,Net-zero emissions energy systems. Science 360, eaas9793 (2018).
- [11] E Svendsmark, J Straus, P Crespo del Granado, Developing hydrogen energy hubs: The role of H2 prices, wind power and infrastructure investments in Northern Norway. Applied Energy, 376 Part A.
- [12] S Backe, S Zwickl-Bernhard, D Schwabeneder, H Auer, M Korpås, A Tomasgard, Impact of energy communities on the European electricity and heating system decarbonization pathway: Comparing local and global flexibility responses. Applied Energy, 323, 2022.
- [13] B H Bakken, H I Skjebred, O Wolfgang, eTransport: Investment planning in energy supply systems with multiple energy carriers, Energy 32(9), 2007.
- [14] T Levin et al. , Energy storage solutions to decarbonize electricity through enhanced capacity expansion modelling. Nature Energy 8, 2023.
- [15] M Korpås, Distributed energy systems with wind power and energy storage, Phd Thesis, NTNU, 2004.
- [16] Se for eksempel <https://fmezen.no/>
- [17] G Durakovic, P Crespo del Granado, A Tomagard, Powering Europe with North Sea offshore wind: The impact of hydrogen investments on grid infrastructure and power prices, Energy 263, Part A, 2023.

 NTNU



 SINTEF