



Planlegging av mikronett

Mariell Hermansen

Master of Science in Electric Power Engineering

Innlevert: august 2017

Hovedveileder: Kjell Sand, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for elkraftteknikk

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2017 på masterstudiet Electric Power Engineering ved NTNU. Oppgaven vektlegges 30 studiepoeng av totalt 120 studiepoeng som er kravet for en mastergrad.

Oppgaven har vært å utarbeide en planmetodikk for mikronett og å benytte denne til planlegging av et praktisk mikronett. Det praktiske mikronettet har vært planlagt for øyen Givær utenfor Bodø. Oppgaven har vært lærerik og jeg har sett hvordan et godt planlagt mikronett kan løse utfordringer som integrering av fornybar energi i kraftsystemet og i isolerte mikronett.

Jeg vil takke veileder Kjell Sand ved institutt for elkraftteknikk for god hjelp og veiledning i arbeidet, og Nordlandsnett for en interessant caseoppgave. Jeg vil også takke medstudent Mari Pedersen for verdifulle innspill gjennom hele semesteret.

August 2017

Mariell Hermansen

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven studerer planlegging av mikronett og har som målsetning å belyse hvordan et mikronett kan planlegges på en best mulig måte. Oppgaven er delt i to deler, hvor den første delen er et litteraturstudium og den andre delen er praktisk planlegging av et mikronett.

Mikronett deles i tilkoblede mikronett og isolerte mikronett. Det tilkoblede mikronettet er tilkoblet kraftsystemet, mens det isolerte mikronettet forsyner avsidesliggende områder som ikke er tilkoblet kraftsystemet. I Norge er det mange øyer og andre avsidesliggende områder hvor mikronett kan være fordelaktig over utbygging/forsterking av kraftnett eller lokal forsyning basert på dieselaggregat. Mikronett kan også bygges for å integrere mer distribuert energi i kraftnettet som ellers er krevende å integrere.

I oppgaven er det utarbeidet en systematikk for å planlegge et mikronett som er basert på SINTEF sin planleggingsbok for kraftnett og retningslinjer for planlegging av mikronett utarbeidet av IEC. Planleggings-systematikken er delt i fire faser. Første fase er forhåndsstudier hvor bruksområde til mikronettet defineres og data for last og ressurser innhentes/beregnes. I andre fase fastlegges det flere alternative løsninger for distribuerte generatorer og mikronettets oppbygging. I tredje fase kontrolleres det at tekniske krav i mikronettet er oppfylt og løsninger som ikke oppfyller kravene blir forkastet eller endret. I fjerde og avsluttende fase vurderes planleggingen og den beste løsningen blir valgt.

Det er krevende å planlegge et mikronett med en stor andel varierende fornybare energikilder på grunn av usikkerhet tilknyttet elproduksjonen, og at de til en grad må korrespondere med lasten i mikronettet. Spesielt isolerte nett er avhengig av en god energibalanse siden de ikke er støttet av kraftnettet. Litteraturstudiet inkluderer relevant teori for distribuerte generatorer, energilagringssystemer og laststyring.

I den praktiske delen ble et mikronett for øyen Givær planlagt i planleggingsverktøyet Homer Energy. Dagens elforsyning på Givær er basert på dieselaggregat og netteier ønsker en mer fornybar energiforsyning som også reduserer kostnadene tilknyttet elforsyningen. I planleggingen av mikronett for Givær ble tre alternative løsninger vurdert, og den beste løsningen var den som best utnytter energiressursene. I løsningen leveres det mest energi fra et kombinert varme- og kraftverk, mens sol og vind supplerer forsyningen. Det leveres både elektrisitet og termisk energi, og løsningen viser at det beste resultatet kan oppnås når energiforsyningen blir planlagt som en helhet. Løsningen krever mye samarbeid med kundene siden de må bygge om byggene sine for å utnytte termisk energi. Bruken av planleggingsverktøy, slik som Homer Energy forenkler planleggingen, men muligheten til å simulere fleksible laster er mangelfull.

ABSTRACT

This thesis studies planning of microgrids and its goal is to illustrate how a microgrid can be planned for the best possible result. The thesis is split in two parts, the first part is a literature study and the second part is planning of a practical microgrid case.

Microgrids are split into connected microgrids and isolated microgrids. Isolated microgrids are built to supply energy to remote locations which are not connected to the grid. There are many remote locations in Norway such as islands which can benefit from a microgrid compared to a local supply based on diesel generators. Microgrids can also be built to integrate more renewable energy which otherwise can be challenging to integrate.

In this thesis, a systematics to plan microgrids have been developed. It is based on SINTEF's *planleggingsbok for kraftnett* and guidelines for microgrid planning prepared by IEC. The planning is divided into four steps. The first step includes preliminary studies where the purpose of the microgrid is defined and necessary data such as load forecast and resources is obtained. In the second step, several alternative solutions for distributed generators and microgrid structure is developed. In the third step, the technical requirements of the microgrid is controlled and solutions which are not approved are changed or discarded. In the fourth and last step, the planning is evaluated and the best solution is selected.

It is challenging to plan a microgrid with a high share of renewable energy due to the uncertainty of production, and that the production profile should mostly correspond to the load profile of the microgrid. Especially isolated microgrids are dependent on maintaining the energy balance since they are not supported by the grid. The literature study includes relevant theory about distributed generators, energy storage technologies, and load management.

The practical part includes planning of a microgrid for the island Givær using the planning tool Homer Energy. Three alternative solutions were drafted and the cheapest solution exploits the energy resources the best. The solution includes solar PV, wind turbines, and a combined heat and power plant which delivers electricity and thermal energy. This microgrid shows that the best result is achieved by considering the entire energy needs of the customers. This solution will demand cooperation with the customers since they have to rebuild their houses to use the thermal energy. The usage of planning tools such as Homer Energy simplifies the planning, but its possibilities to simulate flexible loads are insufficient.

INNHALDSFORTEGNELSE

1 Introduksjon	1
1.1 <i>Motivasjon</i>	1
1.2 <i>Problemstilling og målsetning</i>	2
1.3 <i>Metoder og verktøy</i>	2
1.4 <i>Avgrensninger</i>	2
2 Kraftsystemet i Norge	3
2.1 <i>Kraftnettet</i>	3
2.2 <i>Smarte nett</i>	4
2.3 <i>Fleksibel last og laststyring</i>	4
3 Mikronett	7
3.1 <i>Hva er et mikronett</i>	7
3.2 <i>Typer mikronett</i>	9
3.2.1 <i>Tilkoblet mikronett</i>	9
3.2.2 <i>Isolert mikronett</i>	9
3.2.3 <i>Virtuelle mikronett</i>	9
3.3 <i>Drift av mikronett</i>	10
3.3.1 <i>Overvåking og målesystemer</i>	10
3.3.2 <i>Kontroll</i>	10
3.3.3 <i>Modellering</i>	12
3.3.4 <i>Stabilitet</i>	13
3.3.5 <i>Optimalisering</i>	13
3.4 <i>Systemdesign</i>	14
3.4.1 <i>Arkitektur</i>	14
3.4.2 <i>Vern</i>	17
4 Energikilder og energilagring i mikronett	19
4.1 <i>Energikilder</i>	19
4.1.1 <i>Solenergi og solceller</i>	21
4.1.2 <i>Vind og vindturbiner</i>	22
4.1.3 <i>Vannkraft</i>	25
4.1.4 <i>Bølgeenergi</i>	26
4.1.5 <i>Tidevann</i>	28
4.1.6 <i>Bioenergi</i>	29
4.1.7 <i>Hydrogen</i>	32
4.2 <i>Energilagring</i>	33
4.2.1 <i>Mekanisk lagring</i>	34
4.2.2 <i>Elektromagnetisk energilagring</i>	35
4.2.3 <i>Elektrokjemisk lagring</i>	36
4.2.4 <i>Kjemisk lagring og hydrogen</i>	38
4.2.5 <i>Termisk energilagring</i>	39
4.2.6 <i>Oversikt over energilagringsteknologiene</i>	40

5. Planlegging av mikronett	41
5.1 Planleggingssystematikk.....	41
5.2 Fase 1 - forhåndstudier	43
5.2.1 Bruksområde til mikronett	43
5.2.2 Lastprognose.....	43
5.2.3 Ressursanalyse.....	44
5.2.4 Datainnsamling for å beregne energiproduksjon og energilagring	44
5.3 Fase 2 – DG planlegging og mikronett planlegging	46
5.3.1 Fastlegging av alternativer.....	46
5.3.2 Mikronett kraftsystem planlegging	47
5.4 Fase 3 - Tekniske krav.....	48
5.4.1 Tekniske krav for DG i mikronett	48
5.4.2 Tekniske krav for distribusjonslinjer i mikronett	49
5.4.3 Tekniske krav for mikronett-tilkoblingen til distribusjonsnettet.....	49
5.4.4 Tekniske krav for vern, kontroll og kommunikasjonssystemer	49
5.5 Fase 4 - Evaluering	50
5.5.1 Generelt	50
5.5.2 Økonomi	50
5.5.3 Samlet vurdering og rangering av alternative løsninger	50
6 Planlegging av et praktisk mikronett	51
6.1 Bakgrunn og målsetning	51
6.2 Metode.....	51
6.3 Planlegging fase 1 - forhåndstudier	52
6.3.1 Bruksområde til mikronett	52
6.3.2 Lastprognose.....	52
6.3.3 Ressursanalyse.....	54
6.3.4 Informasjon om generatorer og energilagring	55
6.4 Fase 2 – DER planlegging og mikronett planlegging	57
6.4.1 Etablering av alternative løsninger	57
6.4.2 Mikronett kraftsystem planlegging	67
6.4.3 Mikronett nærvarmeanlegg planlegging	67
6.5 Fase 3 – Tekniske krav.....	68
6.6 Fase 4 – Evaluering av mikronettprosjektet.....	68
6.6.1 Valg av løsning	68
6.6.2 Kvalitetsvurdering og videre arbeid.....	69
7 Konklusjon	71
8 Videre arbeid	73
9 Bibliografi	75
Vedlegg	80

FIGURLISTE

FIGUR 1: (A) MIKRONETT FOR EN TRAFOKRETS; (B) MIKRONETT FOR EN MATEKABEL; (C) MIKRONETT FOR ET BYGG [2]	8
FIGUR 2: STRUKTUR FOR OVERVÅKINGSSYSTEM I MIKRONETT [20]	10
FIGUR 3: GENERELL ARKITEKTUR FOR KONTROLL AV MIKRONETT [21]	11
FIGUR 4: DROOP KARAKTERISTIKK FOR DISTRIBUTUERT PRODUKSJON [22]	12
FIGUR 5: AC-MIKRONETT ARKITEKTUR [24]	14
FIGUR 6: DC MIKRONETT ARKITEKTUR [25]	15
FIGUR 7: HYBRID AC-DC MIKRONETT [25]	16
FIGUR 8: SOLID STATE TRANSFORMER BASERT MIKRONETT [25]	16
FIGUR 9: INSTALLERT SOLCELLEKAPASITET I NORGE [28]	21
FIGUR 10: VINDKART FOR NORGE [32]	23
FIGUR 11: PRINSIPPSKISSE FOR VINDTURBIN [33]	23
FIGUR 12: PRINSIPPSKISSE FOR VANNKRAFTVERK [36]	25
FIGUR 13: BØLGEKRAFTRESSURSER I EUROPA [39]	27
FIGUR 14: TIDEVANNSSRESSURSER I EUROPA [39]	28
FIGUR 15: FORVENTET UTVIKLING I KUMULATIVT INSTALLERT HAVENERGI I VERDEN (FRA 2012) [42]	29
FIGUR 16: ENERGITETTHET I FORSKJELLIGE ENERGILAGRINGSKJEMIKALIER OG BATTERITEKNOLOGIER [45]	30
FIGUR 17: ENERGIKOSTNAD OVER LEVETIDEN (LCOE) I NOK/KWH FOR BLOKKTURBIN. ENERGIKOSTNADENE ER FORDELT PÅ BIDRAG FRA INVESTERINGSKOSTNADER, DRIFT OG VEDLIKEHOLD SAMT BRENSLEKOSTNADER [46]	31
FIGUR 18: ULIKE TEKNOLOGIER FOR ENERGILAGRING [52]	33
FIGUR 19: FORSKJELLIGE TEKNOLOGIER FOR ENERGILAGRING OG DERES BRUKSOMRÅDER [52]	34
FIGUR 20: ENERGILAGRING FRA FORNYBAR ENERGI I KJEMIKALIER VIA ELEKTROLYSE OG BIOMASSE GASSIFISERING [45]	38
FIGUR 21: UTSIRA VIND OG HYDROGEN DEMONSTRASJONSANLEGG [53]	39
FIGUR 22: SYSTEMATIKK VED PLANLEGGING AV MIKRONETT	42
FIGUR 23: GIVÆR. FOTO: BODØ KOMMUNE [59]	51
FIGUR 24: HISTORISKE DATA FOR ELPRODUKSJON I 2016 FRA AGGREGAT I GIVÆR	52
FIGUR 25: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 1	58
FIGUR 26: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY	58
FIGUR 27: ENERGIKOSTNAD OG FORNYBARPROSENT FOR ALLE TILFREDSTILLENDE SIMULERTE LØSNINGER	59
FIGUR 28: GJENNOMSNITTLIG MÅNEDLIG ENERGIPRODUKSJON FRA PV, AGGREGAT (GEN) OG VIND (G10)	59
FIGUR 29: PRODUSERT EFFEKT GJENNOM ÅRET FRA SOLCELLER (ØVERST), VIND OG DIESEL-AGGREGAT (NEDERST)	60
FIGUR 30: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 2	62
FIGUR 31: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY	62
FIGUR 32: ENERGIKOSTNAD OG FORNYBARPROSENT FOR ALLE SIMULERTE ALTERNATIV	63
FIGUR 33: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 3	64
FIGUR 34: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY	65
FIGUR 35: GJENNOMSNITTLIG MÅNEDLIG EL-PRODUKSJON FRA PV, GASSTURBIN (CHPGEN) OG VIND (G10)	65
FIGUR 36: GJENNOMSNITTLIG MÅNEDLIG TERMISK ENERGIPRODUKSJON FRA GASSTURBIN (CHPGEN) OG OLJEFYR (BOILER)	65
FIGUR 37: SOLRESSURS	81
FIGUR 38: VINDRESSURS	81
FIGUR 39: TEMPERATUR	82
FIGUR 40: DATA FOR VINDTURBIN	82
FIGUR 41: DATA FOR SOLCELLEPANEL	83
FIGUR 42: DATA FOR KONVERTER	83

FIGUR 43: DATA FOR DIESELGENERATOR	84
FIGUR 44: DATA FOR GASSTURBIN	84
FIGUR 45: DATA FOR OLJEFYR	85
FIGUR 46: DATA FOR BATTERI	85
FIGUR 47: DATA FOR TERMISK LASTKONTROLLER	86
FIGUR 48: ØKONOMISKE PARAMETER BRUKT I SIMULERINGENE	86
FIGUR 49: SYSTEMRESTRIKSJONER FOR SIMULERINGER	86

TABELLISTE

TABELL 1: LASTKLASSER OG DERES KARAKTERISTIKK.....	5
TABELL 2 ELEKTRISITETSFORBRUK FOR NOEN HUSHOLDNINGSAPPARAT [15]	5
TABELL 3: ENERGIFORBRUKET I EN BOLIG OG MULIGHETER FOR REDUKSJON AV EL-FORBRUK [18]	6
TABELL 4: MODELLER FOR AC MIKRONETT [21]	12
TABELL 5: VANLIGE STABILITETSPROBLEMER I AC MIKRONETT MED ÅRSÅK OG MULIGE LØSNINGER [21]	13
TABELL 6: ØKONOMISKE FORSKJELLER MELLOM AC OG DC MIKRONETT [21]	14
TABELL 7: EKSEMPLER FOR VERN-STRATEGI FOR AC OG DC MIKRONETT [21].....	17
TABELL 8: MAIN TECHNOLOGIES FOR NON-RENEWABLE DGS [21]	19
TABELL 9: MAIN TECHNOLOGIES FOR RENEWABLE DG [21].....	20
TABELL 10: SOLINNSTRÅLING OG FORVENTET PRODUSERT ENERGI MED SOLCELLER ORIENTERT MOT SØR AVHENGIG AV HELNINGSVINKEL FOR FEM BYER I NORGE [30]	21
TABELL 11: OVERSIKT OVER ENERGILAGRINGSTEKNOLOGIENE [21]	40
TABELL 12: EGENSKAPER TIL DRIVSTOFF	55
TABELL 13: ALTERNATIVE LØSNINGER FOR ENERGIFORSYNING AV GIVÆR	57
TABELL 14: OPPSUMMERING AV ENERGIPRODUKSJON, GENERATORSTØRREELSE OG ENERGIKOSTNAD	59
TABELL 15: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS 25-ÅRS LEVETID I USD	61
TABELL 16: UTSLIPP FRA MIKRONETTET	61
TABELL 17: OPPSUMMERING AV ENERGIPRODUKSJON, GENERATORSTØRREELSE OG ENERGIKOSTNAD	63
TABELL 18: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS 25-ÅRS LEVETID I USD	63
TABELL 19: UTSLIPP	64
TABELL 20: ÅRLIG ELEKTRISK OG TERMISK PRODUKSJON.....	65
TABELL 21: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS LEVETID I USD	66
TABELL 22: UTSLIPP	66
TABELL 23: INSTALLERT EFFEKT FOR DG OG ES FOR ALTERNATIVENE.....	68
TABELL 24: EVALUERING AV DE ALTERNATIVE LØSNINGENE	68
TABELL 25: ENERGIFORBRUK PER BRUKER TILKOBLET KRAFTFORSYNINGEN PÅ GIVÆR.....	80

FORKORTELSER

AMS: Avanserte måle- og styringssystemer

DER: Distribuerte energiresurser

DG: Distribuerte generatorer

DNO: Nettselskap (distribution network operator)

DSM: Lastkontroll (demand side management)

ES: Energilagring (energy storage)

LC: Lokal last kontroller (local load controller)

MGCC: Mikronettkontroller (microgrid central controller)

NOK: Norske kroner

POC: koblingspunkt der mikronett er tilkoblet distribusjonsnett (point of common coupling)

PV: Solceller (photovoltaics)

RES: Fornybare energiresurser (Renewable energy sources)

USD: Amerikanske dollar

1 INTRODUKSJON

1.1 MOTIVASJON

Det moderne samfunnet er avhengig av en sikker energiforsyning med god leveringskvalitet. Infrastrukturen er aldrende og kraftsystemet sin struktur er i endring, dette gir utfordringer med endret kraftfylt, kapasitetsbegrensninger og kostbare reinvesteringer. Tradisjonelt har kraftsystemet bestått av store og regulerbare produksjonsenheter som forsyner distribuerte laster. Nå blir stadig mer fornybar og varierende produksjon inkludert i kraftsystemet, også distribuerte energikilder.

Digitalisering gir mulighet til å i større grad overvåke kraftsystemet og kontrollerbare laster. Kraftsystemet har lenge vært "smarte" på høye spenningsnivåer, men nå blir også distribusjonsnettene smartere for å kunne

- integrere en stor andel distribuerte produksjonsenheter basert på fornybare energikilder
- muliggjøre lokal energistyring som samhandler med sluttbrukerne gjennom smarte energimålere (AMS)
- dra nytte av teknologier som allerede er anvendt for høyere spenningsnivåer, slik som dynamisk kontrolltekniker som også gir bedre leveringssikkerhet

Distribusjonsnettene går fra å være passive til aktive nettverk. I aktive nettverk er det lettere å integrere DG, RES, DSM og ES-systemer. Den viktigste funksjonen til aktive distribusjonsnett er å effektivt knytte produksjon til slutt-forbruk i sanntid på en måte som tar hensyn til kraftfylt, spenningskontroll og vern. Dette krever ny teknologi hvor kommunikasjonssystemer med informasjon og kommunikasjons-teknologi spiller en viktig rolle.

Realisering av aktive distribusjonsnett krever implementasjon av nye systemkonsepter. Mikronett har kontrollmuligheter over nettverksoperasjonen ved å anvende DG i kombinasjon med ES og DSM. Disse kontrollmulighetene gir mikronettet muligheter til å operere isolert fra distribusjonsnettet ved en feilsituasjon, og dermed økes leveringssikkerheten. Kontrollmulighetene i mikronett er den essensielle forskjellen mellom mikronett og DG tilkoblet distribusjonsnettet.

De siste årene er det mange eksempel på at mikronett har fortsatt å levere energi i krisesituasjoner der resten av nettet har vært nede. Dette sammen med de andre fordelene til mikronett har gjort mikronett mer populært over hele verden. I USA og Japan er den største driveren bak mikronett å øke forsyningsikkerheten. I Kina planlegges det å bygge mikronett med en total kapasitet på 4 GW de neste 5 årene, noe som tilsvarer 1/3 av kapasiteten i verden. I Kina bygges mikronett for å integrere mer distribuert produksjon med målet om å kutte klimautslipp [1]. Mikronett bygges også til å gi strømforsyning til rurale områder som det ikke er rasjonelt å tilkoble kraftnettet.

Mikronett kan levere både elektrisitet og termisk energi, og i tillegg øke lokal leveringssikkerhet og spenningskvalitet ved å redusere spenningsdipper og støtte spenningsnivået. For kraftsystemets operatører kan mikronettet betraktes som en kontrollerbar node som kan opereres som en enkelt last eller en generator, og om mikronettet er gitt attraktive fordeler kan det også tilby tilleggstjenester som støtter nettet. Slik kombinerer mikronett ressursene på forsynings- og forbrukssiden i distribusjonsnettet. Integrering av DG reduserer forbruket av elektrisitet som blir transportert over

lange avstander. Dette reduserer tap og det kan også redusere behovet for oppgraderinger av distribusjon og transmisjonsnett.

Mikronett kan tilby en rekke fordeler (økonomiske, tekniske, miljø og sosiale fordeler) ved å utnytte samspillet mellom lokale laster og lokal energiforsyning. Ved å ha generasjon nærme forbrukere kan spillvarmen fra kombinerte varme og kraftverk utnyttes. Det har vært betydelige fremskritt i utviklingen av små (kW-skala) kombinerte varme og kraftverk (CHP), og det forventes at disse vil spille en signifikant rolle i mikronett i kalde klimaer. På den andre siden faller prisene for PV-systemer slik at disse blir stadig mer aktuelle, selv i Norge [2].

1.2 PROBLEMSTILLING OG MÅLSETNING

Målsetningen med oppgaven er å belyse hvordan et mikronett generelt kan planlegges og designes på en best mulig måte.

Dette er oppnådd med følgende delmål:

- Demonstrere formål og bruksområde for mikronett
- Demonstrere energistyring i mikronett med energikilder, energilagring og fleksibelt forbruk
- Utrede hvilke forstudier som er nødvendig for planlegging av mikronett
- Planlegge et mikronett for praktisk tilfelle og velge en optimal løsning for mikronettet
- Tekniske krav til mikronett som må spesifiseres i planleggingssteget

1.3 METODER OG VERKTØY

Opgaven er todelt med et litteraturstudium og en praktisk del. Litteraturstudiet er basert på kilder fra REN (Sintef sin planleggingsbok for kraftverk), BIBSYS (IEEE rapporter), relevante nettsider og noen bøker. I den praktiske delen er planleggingsverktøyet Homer Energy brukt til å planlegge et isolert mikronett for øya Givær.

1.4 AVGRENSNINGER

I planleggingen av det praktiske mikronettet er det i stor grad sett bort fra tekniske problemstillinger på grunn av begrensinger i planleggingsverktøyet som ble brukt.

2 KRAFTSYSTEMET I NORGE

2.1 KRAFTNETTET

Kraftnettets sin oppgave er å transportere strøm fra produsent til forbruker. Det er delt opp i sentralnett, regionalnett og distribusjonsnett. Sentralnettet driftes med 300 eller 420 kV spenning, og forbinder produsenter og forbrukere i ulike landsdeler med hverandre, i tillegg til forbindelse med utlandet. Regionalnettet driftes hovedsakelig med 66 kV eller/og 132 kV, og fungerer som bindeledd mellom sentralnettet og distribusjonsnettene, i tillegg til at mange kraftverk er tilkoblet på dette nettet. Distribusjonsnettet sørger for distribusjon av kraft til sluttbrukerne som for eksempel er husholdninger, tjenesteyting og industri. Distribusjonsnettene har normalt spenning opp til 22 kV der spenningen transformeres ned til 230 V for levering til vanlige strømbrukere. I distribusjonsnettet bygger og drifter netteier som er områdekonsesjoner i området innenfor rammen av en områdekonsesjon [3].

Tradisjonelt har kraftsystemet hatt sentralisert generasjon med store kraftverk plassert langt fra forbrukerne. I Norge har dette typisk vært store vannkraftverk med magasiner, internasjonalt har dette vært kullkraftverk, atomkraftverk osv. Den tradisjonelle strukturen for kraftsystemet er nå i endring ved at flere distribuerte generatorer basert på fornybare og varierende energikilder blir tilkoblet.

LEVERINGSPLIKT

Nettselskap med områdekonsesjon har plikt til å forsyne alle kundene i sitt konsesjonsområde med elektrisk energi. Plikten innebærer at netteier, med noen unntak, må bygge ut kraftnett til alle nye kunder som ønsker å bli tilkoblet. Ved behov for reinvestering i nettanlegg for etablerte kunder må netteier ta hele kostnaden og mikronett kan være et alternativ til kostbare reinvesteringer. I noen områder er det svært dyrt å bygge ut kraftnett, og for disse kan netteier opprette en lokal elforsyning [4].

Nettselskap kan i noen tilfeller også få disposisjon fra å opprette en lokal elforsyning, dette gjelder hovedsakelig for levering til fritidsboliger. Det er da opp til kundene å opprette elforsyning selv [5].

LEVERINGSKVALITET

Leveringskvalitet er et samlebegrep som omfatter leveringspålitelighet og spenningskvalitet. Leveringspålitelighet sier noe om hvor ofte man har tilgang til elektrisk energi, mens spenningskvalitet sier noe om anvendeligheten av den elektriske energien. Spenningen må ha en viss kvalitet for at den skal kunne benyttes og ikke ødelegge elektriske apparater. Konsekvenser av for dårlig spenning kan være havari på elektrisk utstyr, forkortet levetid på utstyr og blinking i lyset [6]. Leveringspåliteligheten nasjonalt var i 2016 på 99,987 %. Fra 1996 til 2010 så man en jevn reduksjon av mengde ikke-levert energi, men denne tendensen ser ikke ut til å gjelde i like stor grad de senere årene [7].

Elektrisitet blir produsert, transportert og brukt samtidig. Alle som er knyttet til det norske kraftsystemet påvirker i større eller mindre grad kvaliteten på elektrisiteten som blir levert fra kraftsystemet. Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet skal sikre at alle som bruker elektrisk kraft i Norge skal få en tilfredsstillende leveringskvalitet uavhengig av hvor i landet man bor [8].

2.2 SMARTE NETT

Smarte nett introduserer bedre overvåkings- og kontrollmuligheter i kraftnettet ved å benytte digital teknologi. Dette gir mulighet til å bedre utnytte eksisterende nett og redusere kostnader ved å tilrettelegge for kommunikasjon med sluttbrukere, integrering av distribuert energiproduksjon osv.

En del av utbyggingen av smarte nett er innføring av smarte måle- og styresystemer. AMS består av en smart måler som skal installeres for alle strømkunder i Norge innen 1. januar 2019. Disse målerne har toveiskommunikasjon mellom måler og nettselskap, og de måler og registrerer strømforbruket på timebasis og sender automatisk informasjon om forbruket til nettselskapet [9]. Til kunde gir de løpende informasjon om eget forbruk og øyeblikksprisene for kraft og nettleie. De smarte målerne kan kobles til et styresystem i huset som kan kontrollere de fleksible og flyttbare lastene til å best utnytte kapasitet i nettet. AMS utløser et større handlingsrom for sluttbrukere i kraftmarkedet og ny teknologi kan gi forbrukere grunnlag for en mer aktiv deltakelse i eget forbruk [10].

Distribuert produksjon er småskala elektrisitetsproduksjon, det kan for eksempel være fra solceller eller vind. Mer om dette i kapittel 4.1. En plusskunde er en sluttbruker med forbruk og produksjon bak tilknytningspunkt, hvor innmatet effekt i tilknytningspunktet ikke på noe tidspunkt overstiger 100 kW. En plusskunde kan ikke ha konsesjonspliktig anlegg bak eget tilknytningspunkt eller omsetning bak tilknytningspunktet som krever omsetningskonsesjon.

Plusskundeordningen og de nye smarte målerne legger til rette for at alle som er tilkoblet kraftnettet kan selge og levere overskuddsstrøm til nettet. Typiske plusskunder vil være folk som bor i boliger med solcellepanel på taket, eller andre boliger eller virksomheter som genererer kraft i begrenset omfang [11].

Plusskunder og distribuert produksjon medfører at nettselskapene må ta hensyn til hvordan dette påvirker leveringskvaliteten lokalt i distribusjonsnettet. For eksempel kan det føre til ubalanse mellom fasene i nettet siden produksjonen ofte er tilkoblet bare to faser, eller det kan føre til at spenninger overstiger godkjent verdi. Ved tilkobling av produksjonsanlegg til lavspenningsnettet settes det krav til blant annet spenningskvalitet, vern, inverter og innkobling [12]. Mikronett kan integrere distribuerte generatorer uten å betydelig redusere leveringskvaliteten lokalt i distribusjonsnettet.

2.3 FLEKSIBEL LAST OG LASTSTYRING

Fleksibel last er en last der energibruken er flyttbar til et annet tidspunkt. Fleksible laster kan hjelpe energibalansen i kraftsystemet ved at energiforbruket kan tilpasses tilgjengeligheten av energi. Fleksibel og kontrollerbar last er spesielt viktig for mikronett da det er større lastvariabilitet i små nett med få kunder enn i store nett for mange kunder. Kombinasjonen av energilagring og lastkontroll er verdifull i driften av mikronett [13].

Fleksible laster kan deles opp inn i tre kategorier basert på forbrukskarakteristikkene: ikke fleksibel last, flyttbar last og fleksibel last. Energiforbruket til en last kan bare flyttes når det er slack i lastens energiforbruk. Slack måler potensialet for at energiforbruket til en last kan endres eller flyttes uten at det påvirker funksjonen til lasten i vesentlig grad. En oppsummering av disse lastene er gitt i tabell 1.

TABELL 1: LASTKLASSER OG DERES KARAKTERISTIKK

Last type	Krav til energitilgjengelighet (slack karakteristikk)	Eksempler
Ikke fleksibel last	Må være tilgjengelig	Lys, underholdning
Flyttbar last	Utnytter mulighet for tidsforsinkelse	Oppvaskmaskin, vaskemaskin, tørketrommel
Fleksibel last	Utnytter potensialet i energilagring	Elektriske biler, kjøleskap, oppvarming

Ikke fleksible laster er ofte laster som er direkte koblet med forbruker sine handlinger og må forsynes når forespurt, slik som lys, og har ingen slack. Flyttbare laster kan planlegges til et gunstig tidspunkt uten at det har en ekstra kostnad eller ulempe, men når de først har startet må de gjennomføres. Fleksible laster elastisitet i energiforbruket innenfor noen restriksjoner som ofte er assosiert med fysiske begrensinger for prosessen. Alle tre klassene av laster er tilstede i kraftsystemet, og i utviklingen til et kraftsystem med mer informasjonsteknologi er det mulig å utnytte slack karakteristikkene i både flyttbare og fleksible laster.

Det er utført forskning på flyttbare laster som viser at energiforbruket til flere husholdningsapparat kan flyttes til mer gunstige tidspunkt og dette gir en bedre utnyttelse av kraftnettet. Forsking på fleksible last er har vist potensial i å utnytte slack til å planlegge oppvarming/kjøling av boliger, varmtvann, kjøleskap, osv. I termodynamiske laster, slik som oppvarming og nedkjøling, utnyttes det at materialene kan varmes/kjøles innenfor et temperaturområde, der det kreves forholdsvis mye energi for å endre temperaturen med 1 grad. Temperaturen kan da økes til øvre grense i temperaturområdet ved tilgang på mye energi og senkes til nedre grense ved tilgang på lite energi. Ofte forekommer forbrukstoppene i repeterende mønster, og styring av fleksible og flyttbare laster gjør det mulig å redusere forbrukstoppene [14].

Det er et stort potensial for fleksible og flyttbare laster. Tabell 2 viser elektrisitetsforbruket til noen husholdningsapparat. Av disse apparatene utgjør flyttbare laster 7 %, fleksible laster 76 % og ikke fleksible laster 17 % av totalt forbruk.

TABELL 2 ELEKTRISITETSFORBRUK FOR NOEN HUSHOLDNINGSAPPARAT [15]

Husholdningsapparat	Effektbruk (W):	Forbruk (kWh/år):	Type last
Kjøkken			
Komfyr	2200	800	Ikke fleksibel
Kaffetrakter	1 500	270	Ikke fleksibel
Ventilator	75	10	Ikke fleksibel
Oppvaskmaskin	2 000	730	Flyttbar
Kjøleskap	160	470	Fleksibel
Fryseboks	175	640	Fleksibel
Brødrister	1000	10	Ikke fleksibel
Vaskerom			
Vaskemaskin	2 500	520	Flyttbar
Tørketrommel	3 000	470	Flyttbar
Stue			
TV	100	110	Ikke fleksibel
Stere oanlegg	25	40	Ikke fleksibel

Hele boligen			
Støvsuger	1 000	50	Ikke fleksibel
Oppvarming	3 300	14 400	Fleksibel
Vannoppvarming	1 000	3 600	Fleksibel
Lys	1 080	2 800	Ikke fleksibel
Sum husholdning		25 000	
Lading av elbil, 230 V/16 A 1-fase	<3 600		Fleksibel
Lading av elbil, 400 V/32 A 3-fase	<22 000		Fleksibel

Elbiler er også inkludert i tabellen over og de utgjør en relativt stor fleksibel last. Ved årlig kjørelengde på 8000 km bruker en vanlig elbil i overkant av 1 000 kWh [16]. I tillegg nevnes det at enkelte elektriske apparat er gir utfordringer i nettet på grunn av at de har hurtige av og påslag, trekker en stor startstrøm eller trekker en strøm med harmoniske forstyrrelser. Eksempler er varmepumpe, gjennomstrømningsvannvarmer og induksjonsovn [17], apparater som blir stadig mer vanlige.

REDUKSJON AV ELEKTRISITETSFORBRUK

I tilfeller hvor elektrisitet er svært kostbart å produsere kan det være gunstig å redusere elektrisitetsforbruket ved å benytte mer energieffektive apparater og bytte energikilde hvor det er mulig. Eksempler på tilfeller hvor dette er nyttig er for områder forsynt av dieselaggregat, typisk øyer. Tabell 3 viser hvordan elektrisitetsforbruket kan reduseres fra 20 000 kWh til ca. 3 000 kWh i en alminnelig husholdning [18]. Tabellen er fra 1999 og det er på noen områder ytterligere forbedringer i energieffektivitet i dag.

TABELL 3: ENERGI-FORBRUKET I EN BOLIG OG MULIGHETER FOR REDUKSJON AV EL-FORBRUK [18]

Energiformål	Energiforbruk [kWh]	Tiltak	Nødvendig elforbruk [kWh]
Romoppvarming	15 000	Installere parafin/ved/propangass-ovn	0
Varmt vann	3 000	Propanfyrt varmtvannsbereder	0
Matlaging	900	Gassfyrt ovn	0
Kjøling/frysing	1 200	lavenergi kjøle/fryseskap	400
Belysning	2 000	lavenergipærer	1000
Vask	400		400
Div. elutstyr	900		900
Totalt	23 400		2 700

3 MIKRONETT

3.1 HVA ER ET MIKRONETT

Et mikronett er definert av CIGRE som (oversatt fra engelsk):

Mikronett er elektriske distribusjonsnett som inkluderer laster og distribuerte energikilder (slik som distribuerte generatorer, energilagring eller kontrollerbare laster), som kan opereres på en kontrollert og koordinert måte, enten mens mikronettet er driftet tilkoblet eller frakoblet kraftnettet [19].

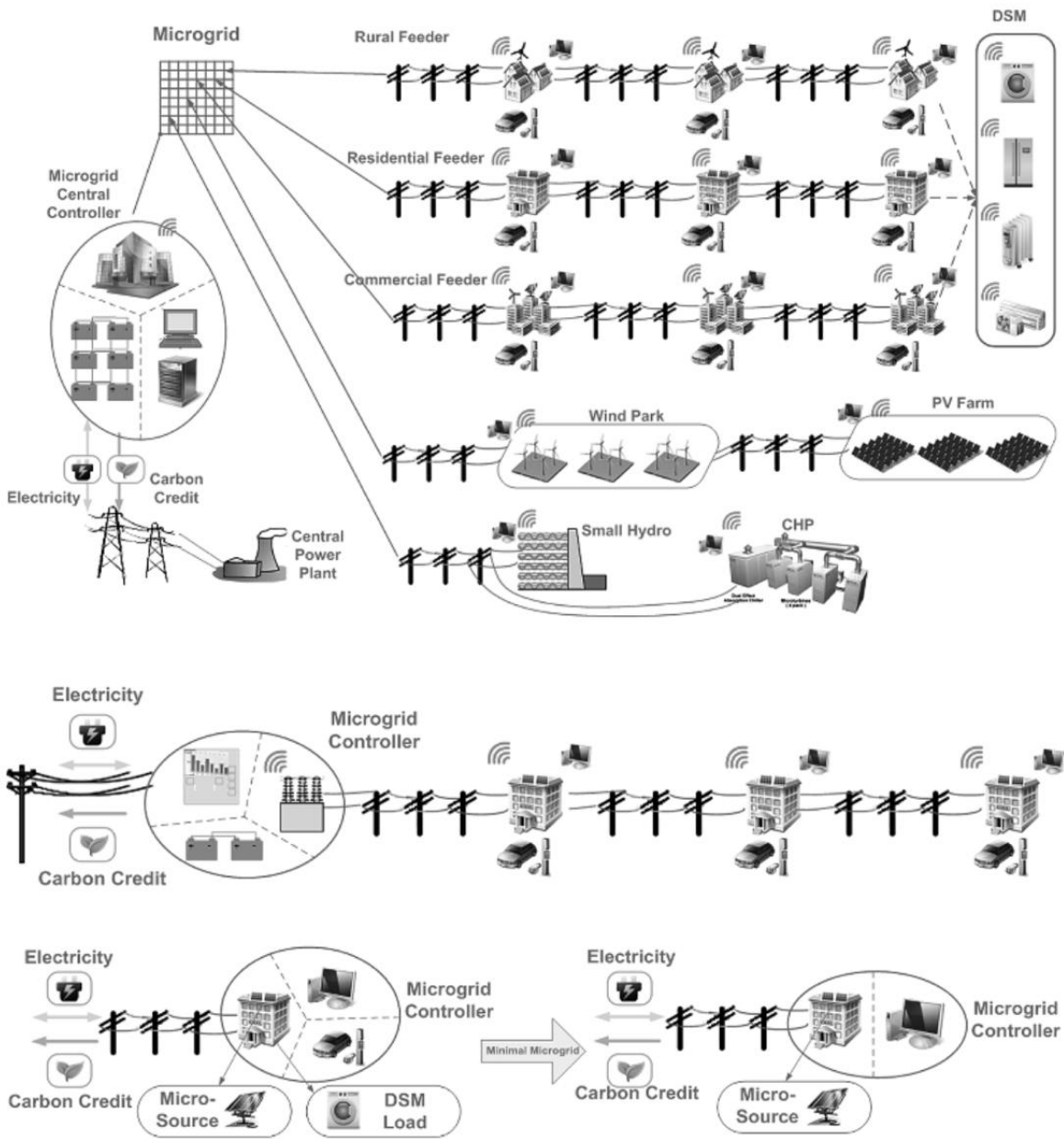
Dette betyr at:

- Mikronett er en plattform for å integrere distribuerte generatorer, energilagringssystemer og laststyring i et lokalt distribusjonsnett. I mikronettkonseptet er det fokus på lokal energiforsyning til lokale laster. Et mikronett er typisk plassert i lavspenningsnettet.
- Mikronett skal kunne håndtere både tilkoblet drift og isolert drift (i nødsituasjoner). Mikronettet vil i mesteparten av tiden være driftet tilkoblet kraftsystemet, slik at hovedfordelene ved mikronettkonseptet gis i tilkoblet (normal) driftstilstand. Unntaket her er de mikronettene som aldri er tilkoblet kraftnettet.
- Forskjellen mellom et mikronett og et passivt nett med distribuerte generatorer ligger i kontroll og koordinasjon av tilgjengelige ressurser. Driften av mikronett innebærer mer enn bare drift av små generatorer, kontroll av laster og distribusjon av elektrisitet; mikronettet utfører alle disse funksjonene og jobber mot flere økonomiske og tekniske mål, samt klima- og utslippsmål.

Definisjonen sier ingenting om hvor lenge mikronettet skal kunne driftes i øydrift. For å oppnå en glatt overgang til øydrift kreves det kostbare energilagringssystemer eller generasjonsreserver. Dermed vil sannsynligvis mikronettet prioritere viktige laster i øydrift avhengig av tilgjengelig energiressurser.

Definisjonen sier heller ingenting om størrelsen til mikronettene. Størrelsen til mikronett kan variere mye, de kan dekke alt fra et hus til en hel trafokrets. Eksempler er vist i Figur 1. Generelt sett er maksimal kapasitet for et mikronett begrenset til noen få MW i Europeisk skala. Ved høyere spenningsnivåer brukes konseptet "multi-microgrids", som koordinerer flere sammenkoblede, men ellers separate mikronett [2].

Mikronett kan være AC eller DC basert, det vil si hvilken spenning som er på mikronettet sine distribusjonslinjer.



FIGUR 1: (A) MIKRONETT FOR EN TRAFOKRETS; (B) MIKRONETT FOR EN MATEKABEL; (C) MIKRONETT FOR ET BYGG [2]

3.2 TYPER MIKRONETT

Det skilles mellom mikronett som er tilkoblet kraftsystemet og mikronett som ikke er tilkoblet kraftnettet. I denne rapporten brukes følgende begrep for disse mikronettene: tilkoblede mikronett og isolerte mikronett.

3.2.1 TILKOBLET MIKRONETT

Det tilkoblede mikronettet følger definisjonen gitt og er tilkoblet kraftsystemet via en hovedbryter, POC = Point of Coupling. Det driftes normalt tilkoblet kraftnettet, men ved en feilsituasjon kan mikronettet frakobles kraftsystemet og driftes i øydrift. Mikronettet bør alltid gi kritiske laster energi med en god leveringskvalitet. For å gjøre dette må det tilkoblede mikronettet ha mulighet til å overføre fra et operasjonsmodus til et annet sømløst uten avbrudd.

Det tilkoblede mikronettet vektlegger å dimensjonere lokale energiresurser med tilstrekkelig energilagring til å forsyne kritiske laster i isolert drift for en fastsatt tid. Utover dette avgjør økonomisk lønnsomhet dimensjoneringen av energiresursene. Mikronettet bør også ha mulighet til å overvåke operasjonskostnader knytt til lokal energiproduksjon og importert energi fra kraftnettet slik at operasjonskostandene kan optimeres.

Tilkoblede mikronett kan være kundeeide mikronett eller kraftselskapeide mikronett. Teknisk sett er det liten forskjell på disse, men de følger forskjellige reguleringer. De kundeeide mikronettene passer godt inn i dagens reguleringer og det ventes derfor at denne typen tilkoblede mikronett blir utbygd først.

3.2.2 ISOLERT MIKRONETT

Et isolert mikronett er ikke tilkoblet kraftnettet og det er alltid driftet i øydrift. Dette mikronettet er ikke ansett som et fullverdig mikronett i følge definisjonen for mikronett da det ikke er tilkoblet kraftsystemet. Det isolerte mikronettet sikter på å tilby kontinuerlig og pålitelig energiforsyning. Derfor bør et slikt mikronett inneholde tilstrekkelig energilagring og regulerbare distribuerte generatorer.

Et isolert mikronett er ofte bygd for å gi strøm til landlige områder eller i utviklingsland der det ikke er utbygd et kraftnett som kan tilkobles. Historisk sett har frakoblede mikronett hatt stort innslag av fossile energikilder som diesel, men ny teknologi og kostnadsreduksjon for fornybare energikilder gjør at det blir stadig større andel fornybar energi i mikronett. Kontrollerbare laster er viktig i mikronett på grunn av størrelsen på kraftsystemet da variabiliteten på lastene er høyere.

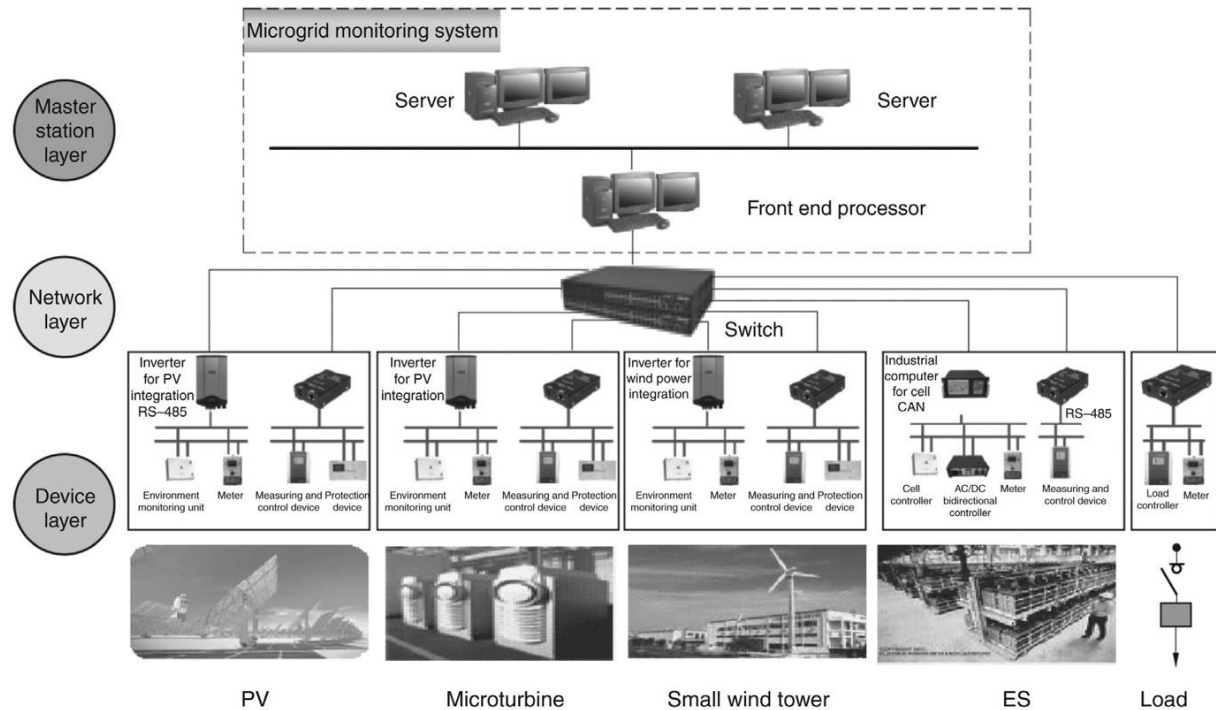
3.2.3 VIRTUELLE MIKRONETT

Til slutt nevnes virtuelle mikronett som styrer distribuerte energiresurser på flere lokasjoner som er koordinert på en slik måte at de kan presenteres til kraftsystemet som en enkelt node. Det finnes få demonstrasjoner på virtuelle mikronett, men de er presentert i litteraturen. Det er usannsynlig at dette systemet kan kontrolleres som et øydriftet nett og derfor følger ikke virtuelle mikronett prinsipielt definisjonen for mikronett [19].

3.3 DRIFT AV MIKRONETT

3.3.1 OVERVÅKING OG MÅLESYSTEMER

Overvåkingsystemet koordineres sammen med lokal kontroll, vern og fjernstyring av generatorer med formål om en sikker og stabil drift av mikronettet. Figur 2 viser strukturen til et overvåkingsystem.



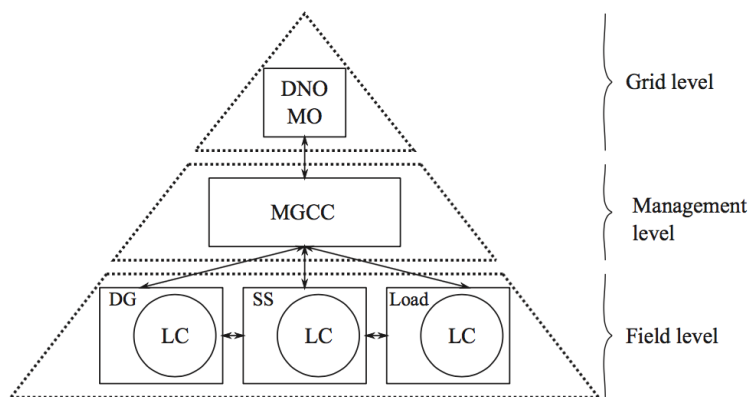
FIGUR 2: STRUKTUR FOR OVERVÅKINGSSYSTEM I MIKRONETT [20]

Overvåkingsystemet samler inn informasjon slik som spenninger, strømmer og effekt for generatorer, linjer, distribusjonsnettet (PCC) og laster i sanntid, og det kan utføre tjenester som fjernkontroll og modifikasjoner i systemkonfigurasjoner. Det er flere tilgjengelige overvåkingsystemer tilgjengelig for mikronett [21].

3.3.2 KONTROLL

KONTROLL

Kontroll av isolerte mikronett er komplisert og inkluderer transient, dynamisk og "steady state" kontroll. Tilkoblede mikronett inkluderer ofte bare "steady state" kontroll [20]. For å garantere korrekt operasjon av mikronett kreves det at forskjellige kontrolloppgaver blir utført. Figur 3 viser hierarkisk kontroll som utfører disse oppgavene.



FIGUR 3: GENERELL ARKITEKTUR FOR KONTROLL AV MIKRONETT [21]

GRID LEVEL

I dette nivået har distribusjonsnettsoperatøren mulighet til å utnytte flere kontrollvariabler slik som kontroll av aktiv og reaktiv effektflyt mellom mikronettet og distribusjonsnettet. Markedsfunksjoner hører også til i dette nivået hvor økonomiske faktorer påvirker optimal drift av mikronettet.

MANAGEMENT LEVEL

En mikronettkontroller utfører oppgaver relatert til kontroll av mikronettet. Dens hovedfunksjoner er å opprettholde

- frekvens (kun aktuelt i AC baserte mikronett)
- spenning
- synkronisering mellom mikronett og distribusjonsnett (kun aktuelt i AC baserte mikronett)
- laststyring
- optimal produksjon i mikronettet

I tillegg kontrollerer mikronettkontrolleren tilkobling og frakobling av mikronettet til distribusjonsnettet.

FIELD LEVEL

En lokal kontroller er plassert i hvert element av mikronettet: Generatorer, energilagringssystemer og laster. Lastkontrolleren utfører de nødvendige oppgavene for hver type element:

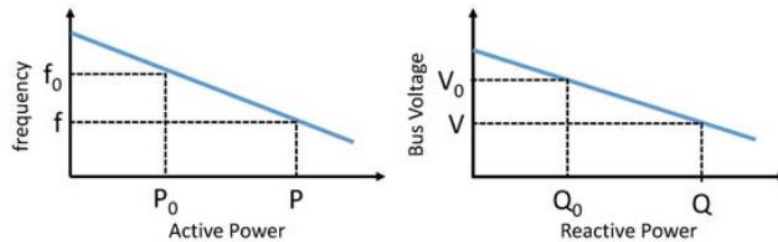
- Lokal kontroller for DG gir flest muligheter for regulerbare distribuerte generatorer og vanligvis er basert på *droop control*. Denne kontrollmetoden gir høy pålitelighet og krever ikke kommunikasjon mellom generatorene. For uregulerbare DG slik som vind og PV kan nonlinear droop control og hybrid droop control med maksimum power point tracking (MPPT) brukes.
- Lokal kontroller for energilagringssystemet for å kontrollere opplading og utlading. Flere ladestrategier er utviklet for optimal operasjon av de forskjellige typene energilagringssystemer.
- Lokal kontroller for laster. Lasten kan kontrolleres og reduseres ved behov av mikronettkontrolleren.

Det er i dette kontrollnivået at isolering av mikronettet er detektert, og DG og energilagringssystemet sørger for korrekt operasjon både i tilkoblet og isolert modus. Det er flere teknologier for deteksjon av

isolering i AC nett som er basert på å måle spenningsamplitude, frekvens, fase og/eller harmoniske strømmer AC nett. I DC systemer kan bare spenningen måles, så nye teknologier må utvikles [21].

DROOP KONTROLL

Droop kontroll er kontroll av frekvensen til en generator basert på lasten. Denne metoden muliggjør effektiv lastdeling mellom generatorer slik at hver generator er likt belastet i forhold til merkeeffekt. Sammenhengen mellom roteringshastighet/frekvens og produsert effekt er vist i Figur 4.



FIGUR 4: DROOP KARAKTERISTIKK FOR DISTRIBUTUERT PRODUKSJON [22]

3.3.3 MODELLERING

Modellering av mikronett er viktig for å oppnå akseptabel kontroll. Tabell 4 summerer modeller for AC mikronett og det vises at de fleste modellene benytter droop kontroll, antar konstant last og analyserer mikronettet både tilkoblet og frakoblet distribusjonsnett. Noen få av modellene inkluderer energilagring, studerer detaljerte dynamiske forhold og mulige situasjoner i et mikronett. Av programvareverktøy for modellering av mikronett, har HOMER Energy vært det mest omfattende energimodelleringsverktøyet. Andre verktøy egnet for mikronett modellering er EADER, DER-CAM, Matlab-Simulink og PSCAD / EMTDC [21].

TABELL 4: MODELLER FOR AC MIKRONETT [21]

Model	Distribution	DG	SS	Loads	Mode	Control
Admittance matrix	Three-phase	Constant power	No	Constant power	Both	Droop
DC source with non-linear equations that are linearised	Single-phase	First order transfer functions	No	RLC circuit	Both	Droop
DC source with equations in state-space	Single-phase	DC source and VSC	No	RLC circuit	Island	Droop
State space in a common reference frame and linearisation	Single-phase	DC source and VSC	No	Constant power	Both	Droop
State space in a common reference frame and linearisation	Single-phase	Synchronous generator based DG and power	No	Constant power	Both	Droop
Small signal analysis	Single-phase	Non-linear equations	First order transfer functions	Constant power	Island	^a
Multilevel type control and management scheme supported by a communication infrastructure	Single-phase	Dynamic model based on the characteristics of each type of generator	Constant DC voltage sources coupled by power electronics devices	Two types: constant impedance and motor loads	Both	Droop
Electrical equations in admittance form	Three-phase	Coupled by inverter droop	Coupled by inverter droop	Coupled by inverter droop	Both	Droop
System matrices based on four defined complex vectors	Single-phase	Coupled by power electronics and two types: active and reactive power regulated and voltage-frequency regulated	No	No	Both	Droop
Based on hub model	Single-phase	Energy hub model	Energy hub model	Constant power	Island	^a

^a No control considered.

3.3.4 STABILITET

Stabilitet er en kritisk utfordring i mikronett når mikronettet er driftet isolert og de distribuerte generatorene er kontrollert av lokale forhold. Stabiliteten i AC mikronett er spesielt avhengig av operasjonsmodusen (tilkoblet eller øydrift), kontrollstrategi, type DG og nettverksparameter [21]. For en stabil operasjon av et mikronett i øydrift må minst en av nettet sine distribuerte energiresurser være ansvarlig for stabiliteten i nettet. Vanligvis har energilagringssystemet dette ansvaret ved at det kompenserer for ubalansen mellom generasjon og forbruk, men energilagringen mister denne evnen til å kompensere når de når maksimums- og minimumsgrense for lagring. Hvis dette skjer må reguleringen av mikronettet styres av enten en annen produksjonseenhet i nettet eller ved å endre produksjon/last i nettet slik kraftbalansen blir ivaretatt [23].

Flere studier for stabilitet i AC mikronett viser at stabiliteten hovedsakelig er påvirket av frekvensfalleffekten og er vanligvis forbedret med god design av droop-koeffisienter og droop-control med justerbar dynamisk adferd.

TABELL 5: VANLIGE STABILITETSPROBLEMER I AC MIKRONETT MED ÅRSAK OG MULIGE LØSNINGER [21]

Issues	Reasons	Improvement methods
Small signal stability	Feedback controller Small load change System damping Power limit for DGs	Supplementary control loops Coordinated control of DGs Stabilizers for DGs Energy management system (EMS)
Transient stability	Islanding Loss of DG Large load step Fault	Control of storage Load shedding methods Protection device setting Control of power electronics
Voltage stability	Reactive power limit/current limiters Load dynamics (induction motors) Under voltage load shedding Tap changers and voltage regulations	Reactive compensation Load shedding Modified current limiter for microsources Voltage regulations with DGs

I DC mikronett er stabiliteten relatert til behovet for kraftelektronikkgrensesnitt for å integrere distribuerte generatorer og energilagringseenheter [21].

3.3.5 OPTIMALISERING

Det er mye forskning innen optimalisering av mikronett, hvor den mest vanlige objektive funksjonen er å minimere operasjonskostnaden. Løsningene kan inkludere et vidt spekter variabler og restriksjoner. Viktige punkter er

- økonomi
- produksjon fra lokale generatorer og kraftutveksling
- drivstofforbruk
- prioritert og fleksibel last
- miljøaspekter

Noen av løsningene inkluderer også termisk generasjon i tillegg til elektrisk generasjon [21].

3.4 SYSTEMDESIGN

3.4.1 ARKITEKTUR

Valg av arkitektur til mikronett har store økonomiske virkninger, og bør derfor vurderes nøye. Det er viktig å ta hensyn til lastenes karakteristikk, eksisterende infrastruktur, eksisterende og planlagte distribuerte generatorer. Og i tillegg praktiske hensyn som tilgjengelig areal til energilagring og linjer.

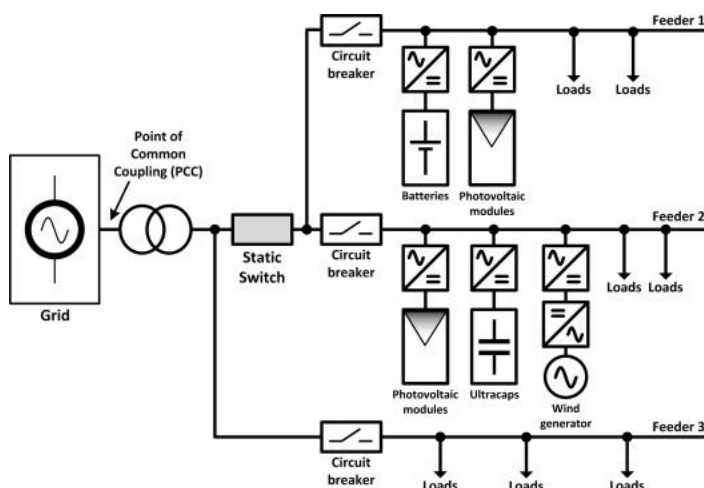
Mikronett kan klassifiseres i fire hovedgrupper, avhengig av måten AC og DC bussene er sammenkoblet. AC-mikronett er en mer moden teknologi enn DC-mikronett, men DC-mikronett har flere fordeler på grunn av at det ikke er reaktiv effekt, slik som reduksjon av elektriske tap og lavere spenningsfall. Derfor er planlegging, implementasjon og operasjon av DC-mikronett lettere og billigere enn for AC-mikronett, se Tabell 6 [21]. Det er vanligvis billigst å velge et AC-mikronett der det allerede er AC infrastruktur og laster siden det da bare trengs noen modifikasjoner i de eksisterende installasjonene.

TABELL 6: ØKONOMISKE FORSKJELLER MELLOM AC OG DC MIKRONETT [21]

Device	Localisation	AC	DC	Reasons
Protections in PCC	Fig. 2 - ②	Lower	Higher	Technology more mature and lower power ratings in AC systems
Distribution	Fig. 2 - ③	Higher	Lower	Due to skin effect, reactive power etc. higher losses in AC systems
LV protections	Fig. 2 - ④	Lower	Higher	Lower power ratings and more mature technology in AC systems
Metering	Fig. 2 - ⑤	Higher	Lower	More variables to be monitored in AC systems
Communication	Fig. 2 - ⑥	Similar	Similar	Depending to the control technique used
Power converters	Fig. 2 - ⑦	Higher	Lower	Lower efficiencies and more components in AC systems
MCC	Fig. 2 - ⑧	Higher	Lower	More tasks (synchronism, reactive power control, etc.) in AC systems
LC	Fig. 2 - ⑨	Higher	Lower	More tasks (synchronism, reactive power control, etc.) in AC systems
Load controller	Fig. 2 - ⑩	Similar	Similar	Similar tasks in AC and DC systems.

AC-MIKRONETT

Et eksempel på et AC-mikronett arkitektur er vist i Figur 5. I et AC-mikronett er distribusjonslinjene i AC og noen av de distribuerte generatorene krever DC til AC invertere for å tilkobles. Mikronettet er tilkoblet kraftnettet ved PCC.



FIGUR 5: AC-MIKRONETT ARKITEKTUR [24]

Mikronettet vist i Figur 5 har tre AC feedere, der feeder 1 og 2 inneholder distribuerte generatorer og kritiske laster, mens ikke-kritiske laster er tilkoblet feeder 3. Den statiske bryteren kan koble mikronettet fra distribusjonsnettet ved dårlig spenningskvalitet slik at mikronettet blir driftet isolert.

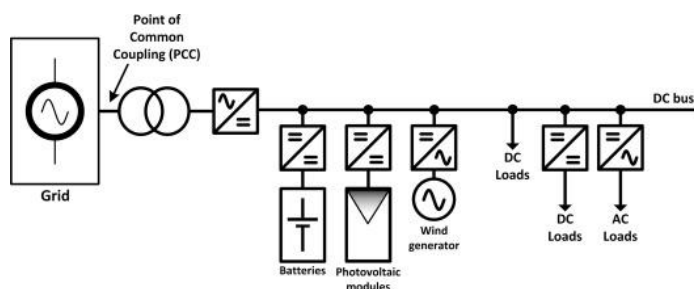
Ved en feil blir feeder 3 med de ikke-kritiske lastene frakoblet, mens de kritiske lastene i feeder 1 og 2 blir forsynt fra de distribuerte energikildene og energien lagret i batteri ol.

Det er ingen konvertere mellom mikronettet og distribusjonsnettet, noe som gir denne arkitekturen en høyere pålitelighet siden kraftelektronikk erfaringsvis har gitt lavere pålitelighet. Når AC-mikronettet er operert tilkoblet har feederne i mikronettet samme spenning og frekvens som kraftnettet, på godt og vondt.

AC-mikronett er spesielt godt egnet for integrasjon av mikronettkonseptet i eksisterende installasjoner.

DC-MIKRONETT

Et eksempel på DC-mikronett arkitektur er vist i Figur 6. Det er tilkoblet kraftnettet gjennom en AC/DC-konverter som må være bi-directional hvis mikronettet skal eksportere overskuddsenergi. De fleste distribuerte generatorer blir tilkoblet via DC/DC- eller DC/AC-konvertere for å tilpasses DC-buss spenningen. DC-laster kan i noen tilfeller tilkobles direkte avhengig av spenningsnivå. Ved en feilsituasjon i distribusjonsnettet må mikronettet selv regulere DC-buss spenningen uten AC/DC konverteren.



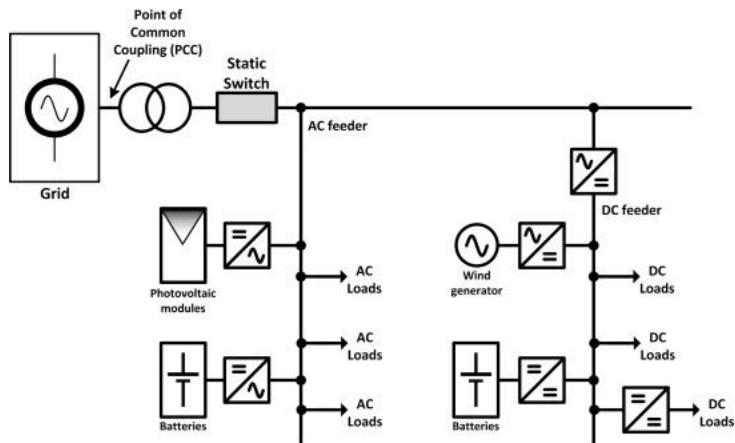
FIGUR 6: DC MIKRONETT ARKITEKTUR [25]

DC-mikronett har noen fordeler og ulemper sammenlignet med AC-mikronett:

- + Justerbar spenning på DC-bussen med høy kvalitet, selv ved tilkobling til et svakt nett
- All kraftflyt til og fra distribusjonsnettet går igjennom AC/DC konverteren og dette reduserer påliteligheten
- Eksisterende AC-installasjoner (kabler osv) kan ikke brukes
- AC-laster kan ikke tilkobles direkte til mikronettet

HYBRID AC-DC MIKRONETT

Hybrid AC-DC mikronett arkitekturen består av et AC mikronett med et DC-subnett, sammenkoblet av en bi-directional AC/DC konverter, vist i Figur 7. Distribuerte generatorer kan kobles til AC- eller DC-feeders. AC-laster er tilkoblet AC-feeder, mens DC laster er tilkoblet DC-feeder gjennom en DC/DC konverter om nødvendig for å endre spenning. DC-subnettet kan handle som en generator eller som en last, avhengig av kraftbalansen i DC-subnettet.



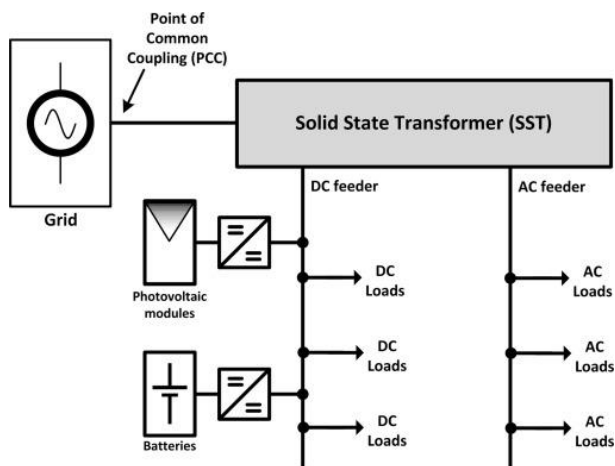
FIGUR 7: HYBRID AC-DC MIKRONETT [25]

Denne mikronett arkitekturen kombinerer fordelene ved AC- og DC-mikronett.

- + Den har direkte tilknytning til distribusjonsnettet som gir høy pålitelighet.
- + AC-feederen tillater bruk av eksisterende infrastruktur og AC-laster kan tilkobles direkte.
- + DC-feederen gir færre og enklere konvertere, og noen DC-laster kan tilkobles direkte.
- + Arkitekturen er egnet for kritiske laster på DC-feederen i kombinasjon med robuste laster på AC-feederen.

SOLID STATE TRANSFORMER BASERT MIKRONETT

Et solid state transformer (SST) basert mikronett er vist i Figur 8. I denne typen arkitektur er det en DC- og en AC-feeder. SSTen håndterer kraftflyten mellom feederne og distribusjonsnettet.



FIGUR 8: SOLID STATE TRANSFORMER BASERT MIKRONETT [25]

SSTen er en singel-inngang dobbel-utgang konverter som konverterer fra AC til DC, til AC igjen. Spenningskvaliteten i et SST basert mikronett er svært høy. Mikronettet har ellers de samme fordelene som hybrid AC-DC mikronett. Ulempene er at SSTen er bygd av seriekoblede konvertere som reduserer påliteligheten og virkningsgraden til systemet. Noe av tapene kan kompenseres ved et lavere antall konvertere i systemet ellers [25].

3.4.2 VERN

Vern av AC og DC mikronett er utfordrende på grunn av mange parameter, slik som dynamisk struktur av mikronettet. Vernene må designes basert på følgende parameter: sensitivitet, selektivitet, utløsetid og sikkerhetsnivå.

Flere systemer for vern av AC mikronett er utviklet, og de kan klassifiseres som sentraliserte eller desentraliserte systemer. I de desentraliserte systemene er hver DG beskyttet av et vern, dette er en effektiv måte å hindre fase-jord og fase-fase feil, men det gir derimot dårlig beskyttelse mot feil med lav impedans. De sentraliserte systemene er basert på spenningsbeskyttelse og krever en sentral styringsenhet.

Vern av DC mikronett mangler praktisk erfaring, samt modenhet i standarder og veiledere. En vanlig innvending mot å benytte DC i kraftsystemer er mangel på "zero-crossing", noe som gjør kortslutningsstrømmer vanskeligere å bryte enn i AC systemer. Det er flere systemer for vern av lavspenning DC systemer tilgjengelig.

TABELL 7: EKSEMPLER FOR VERN-STRATEGI FOR AC OG DC MIKRONETT [21]

Type	Protection strategy	Operation	Communication link
AC	Adaptive	Both	Yes
	Based on communication-assisted digital relays	Both	Yes
	Voltage	Islanded	Yes
	Harmonic content	Islanded	Yes
	Current travelling waves	Grid-connected	No
	Distance	Both	No
DC	Based on commercial DC protections	Both	No
	Optimal unit and non-unit protection	Both	Yes

4 ENERGIKILDER OG ENERGILAGRING I MIKRONETT

4.1 ENERGIKILDER

Et mikronett inkluderer distribuerte energikilder, og de kan være fornybare eller fossile. Tabellene 8 og 9 oppsummerer de fossile og fornybare energiressursene og teknologiene som er aktuelle i mikronett.

Av de fossile energiressursene er diesellaggregat brukt mye til strømforsyning på øyer som ikke er tilkoblet kraftnettet. Teknologier som gasturbin, mikroturbin og brenselcelle kan også brukes med miljøvennlige drivstoff basert på bioenergi eller hydrogen. Elproduksjon fra fossile energikilder har typisk lavere kapitalkostnad og høyere drift- og vedlikeholdskostnader enn fornybar energi. Energikostnaden er i tillegg svært avhengig av drivstoffprisen. De fossile energikildene blir ikke videre omtalt i denne oppgaven.

Av de fornybare ressursene er vind, sol, vann og bioenergi i dag godt utviklede teknologier. Disse blir beskrevet videre i dette kapitlet, og i tillegg blir bølge- og tidevannskraft beskrevet da disse har et stort potensial i Norge når teknologien blir bedre utviklet.

TABELL 8: MAIN TECHNOLOGIES FOR NON-RENEWABLE DGS [21]

Energy based technology type	Primary energy	Output type	Module power (kW)	Electrical efficiency (%)	Overall efficiency (%)	Advantages	Disadvantages
Reciprocating engines	Diesel or gas	AC	3–6000	30–43	~80–85	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Low cost ✓ High efficiency ✓ Ability to use various inputs 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Environmentally unfriendly emissions
Gas turbine	Diesel or gas	AC	0.5–30,000	21–40	~80–90	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High efficiencies when using with CHP ✓ Environmentally friendly ✓ Cost effective 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Too big for small consumers
Micro-turbine	Bio-gas, propane or natural gas	AC	30–1000	14–30	~80–85	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Small size and light weight ✓ Easy start-up and shut-down ✓ Low maintenance costs 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Expensive technology ✗ Cost-effectiveness sensitive to the price of fuel ✗ Environmentally unfriendly emissions
Fuel cell	Ethenol, H ₂ , N ₂ , natural gas, PEM, phosphoric acid or propane	DC	1–20,000	05–55	~80–90	<ul style="list-style-type: none"> ✓ One of the most environmentally friendly generator ✓ Extremely quiet ✓ Useful for combined heat and electricity applications 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Extracting hydrogen is expensive ✗ Expensive infrastructure for hydrogen

TABELL 9: MAIN TECHNOLOGIES FOR RENEWABLE DG [21]

Energy based technology type	Primary energy	Output type	Module power (kW)	Electrical efficiency (%)	Overall efficiency (%)	Advantages	Disadvantages
Wind	Wind	AC	0.2–3000	– ^a	~50–80	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Day and night power generation ✓ One of the most developed renewable energy technology 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Still expensive ✗ Storage mechanisms required
Photovoltaic systems	Sun	DC	0.02–1000	– ^a	~40–45	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emission free ✓ Useful in a variety of applications 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Storage mechanisms required ✗ High up-front cost
Biomass gasification	Biomass	AC	100–20,000	15–25	~60–75	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Minimal environmental impact ✓ Available throughout the world ✓ Alcohols and other fuels produced by biomass are efficient, viable, and relatively clean burning 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Still expensive ✗ A net loss of energy in small scale
Small hydro power	Water	AC	5–100,000	– ^a	~90–98	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Economic and environmentally friendly ✓ Relatively low up-front investment costs and maintenance ✓ Useful for providing peak power and spinning reserves 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Suitable site characteristics required ✗ Difficult energy expansion ✗ Environmental impact
Geothermal	Hot water	AC	5000–100,000	10–32	~35–50	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Extremely environmentally friendly ✓ Low running costs 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Non-availability of geothermal spots in the land of interest
Ocean energy	Ocean wave	AC	10–1000	– ^a	– ^a	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High power density ✓ More predictable than solar or wind 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Lack of commercial projects ✗ Unknown operations and maintenance costs
Solar thermal	Sun and water	AC	1000–80,000	30–40	~50–75	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simple, low maintenance ✓ Operating costs nearly zero ✓ Mature technology 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Unknown operations and maintenance costs ✗ Low energy density ✗ Limited scalability

^a No data available.

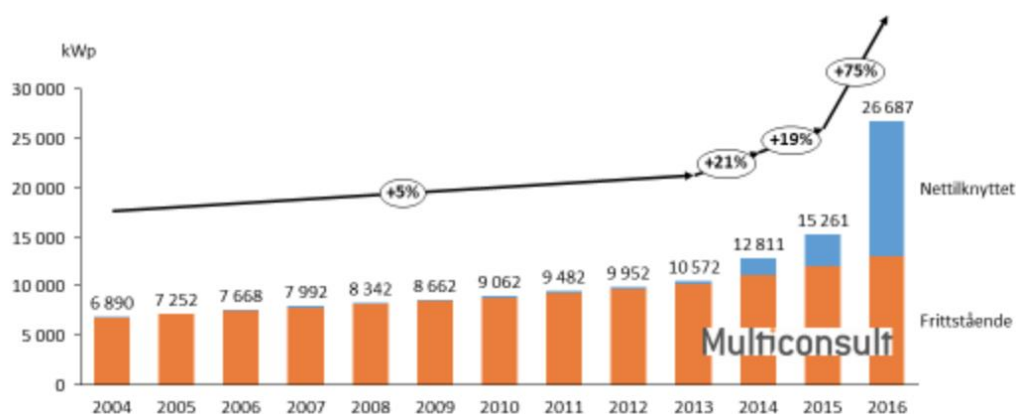
4.1.1 SOLENERGI OG SOLCELLER

Globalt har solenergi potensial til å bli den viktigste fornybare energikilden i fremtiden. I Norge er potensialet fra 700 kWh/m² i nord opp til 1000 kWh/m² i sør. Solinnstrålings intensitet avhenger mest av breddegrad og noe fra faktorer som lokale værforhold (temperatur, vind, snø, skyer, etc). Hvor mye energi som produseres fra solenergianleggene påvirkes hovedsakelig av hvilken type teknologi (solfanger eller solceller) som brukes og anleggsspesifikke faktorer som helningsvinkel, himmelretning og skygge fra bygg og lignende.

TABELL 10: SOLINNSTRÅLING OG FORVENTET PRODUSERT ENERGI MED SOLCELLER ORIENTERT MOT SØR AVHENGIG AV HELNINGSVINKEL FOR FEM BYER I NORGE [26]

Sted	Solinnstråling mot horisontalplanet [kWh/m ² år]	Produsert energi med solceller [kWh/m ² år]	
		skrå vinkel, ca 30	90 vinkel
Oslo	875	140	110
Kristiansand	965	150	115
Bergen	790	110	80
Trondheim	800	130	100
Tromsø	700	110	80

Tabell 10 viser årlig solinnstråling og forventet produsert energi med solceller for fem byer i Norge. Markedet for solenergi i Europa har endret seg mye de siste årene; prisene er redusert og installasjonstakten har økt. Dette har ført til økende interesse for solenergi også i Norge. I tillegg til fallende kostnader har også faktorer som økt fokus på klima og miljø, skjerpede TEK-krav og et marked som etterspør miljøvennlige bygg bidratt til utviklingen [26]. Figur 9 viser installert solcellekapasitet i Norge frem til 2016, delt på nett-tilknyttet og frittstående. Markedet for nett-tilknyttet solcelleanlegg har vokst raskt de siste 2-3 årene og Enova har siden 1. Januar 2015 hatt støtteordning for installasjon av fornybar el-produksjon opp til 15 kW for boligeiere [27].



FIGUR 9: INSTALLERT SOLCELLEKAPASITET I NORGE [28]

Solenergi blir omdannet til elektrisitet i solceller ved hjelp av den fotoelektriske effekten, som kort fortalt innebærer at elektroner forflytter seg fra et stoff til et annet når de belyses (her med sollys) og absorberer energi fra fotoner. Virkningsgrad på solceller ligger i området 10-20 % målt ved standard testforhold. Reell produksjon avhenger av faktiske værforhold (innstråling og temperatur) og

skyggeforhold. Virkningsgraden synker etter flere års drift, og for en silisiumcelle må man regne med at ytelsen er redusert med 10 % etter 25 år. Et solcellesystem består av solcellemoduler, konverter, koblingsutstyr og eventuelt et batterilagringssystem. Nett-tilknytte solcellesystem har også en energimåler [29].

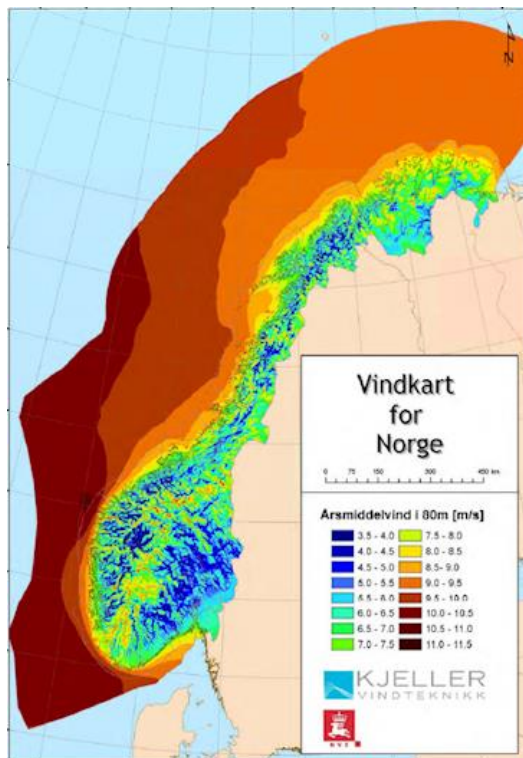
Utnyttelse av solenergi har beskjedne miljø- og brukerpåvirkninger:

- I produksjonen av solceller benyttes aggressive kjemikalier, og enkelte teknologier bruker stoffer (kadmium og tellur) som er svært giftige. I de ferdige produktene er disse stoffene stabile og solcelleproduksjonen foregår i kontrollerte miljøer slik at problemet synes overkommelig.
- Produksjonen har et høyt energiforbruk. Tilbakebetalingstiden for energien som er gått med i produksjon er normalt 1-2 år.
- Arealbehovet til solcelleanlegg kan føre til brukerkonflikter.
- Solcelleanlegg som opererer på høye spenninger medfører en fare for elektrisk sjokk.
- Solcelleanlegg representerer en brannfare [30].

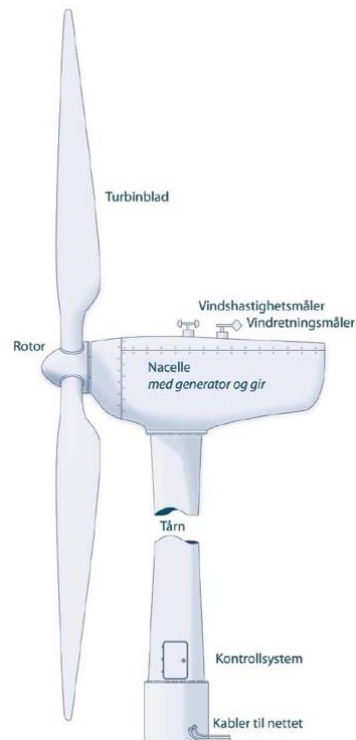
4.1.2 VIND OG VINDTURBINER

Vind er en gunstig energikilde i Nord-Europa da det blåser mer i vinterhalvåret enn i sommerhalvåret, noe som samsvarer godt med elektrisitetsforbruket. Vinden er en uregulerbar energikilde, og kan dermed ikke reguleres slik som vannkraft med magasiner. Derfor kan vindkraft bare dekke en viss del av kraftforsyningen eller må kombineres med energilagringssystemer i kraftforsyningen. Langs kysten er det mange øyer som ikke er tilkoblet kraftnettet som kan dra stor nytte av vindkraft til el-produksjon for en miljøvennlig elforsyning.

Gode og stabile vindforhold er nødvendig for vindkraftproduksjon. Når det ikke blåser, eller det blåser så mye at turbinen må kobles fra, produserer ikke vindturbinen elektrisitet. Ising og komplekst terreng kan også påvirke produksjonen. Norge har meget gode vindressurser, og gjennomsnittlig vindhastighet over året for store deler av kysten og flere steder i innlandet kan være 7-9 m/s ved 80 meter høyde over bakken. I Norge finner vi de høyeste vindhastighetene rett utenfor Stad med årsmiddelvinder på over 10,5 m/s ved 80 meters høyde, som er en vanlig turbinhøyde. Analysene viser imidlertid at stormhyppigheten er stor her og at man derfor risikerer å måtte stoppe produksjonen oftere enn andre steder. Ved bruk av moderne vindturbiner har også skogsområdene på Østlandet vindressurser som er godt egnet for vindkraft [31]. Vindressursene i Norge er vist i kartet på neste side.



FIGUR 10: VINDKART FOR NORGE [32]



FIGUR 11: PRINSIPPSKISSE FOR VINDTURBIN [33]

En vindturbin omdanner bevegelsesenergien i vinden til elektrisk energi. Prinsippskisse for en vindturbin er vist i figur 11. Hovedkomponentene i en moderne vindturbin består av en rotor med tre blad som driver en generator som leverer elektrisitet. De tre bladene er festet til et nav som til sammen utgjør rotoren. Rotoren er festet til nacellen via hovedakslingen som er koblet, med eller uten gir, til generatoren. Nacellen er plassert på toppen av tårnet som er festet til et solid fundament på bakken. For optimal utnyttelse av vindressursene blir nacellen og rotorbladene kontinuerlig regulert gjennom et avansert kontrollsystem som overvåker hastigheten og retningen på vinden. Systemet dreier vindturbinen og vrir bladene slik at vinden utnyttes optimalt.

Andelen energi som hentes ut av turbinen kan forklares som forskjellen i vindhastigheten før og etter vinden har passert rotorbladene. Ved omforming av bevegelsesenergien i vinden til mekanisk energi og videre til elektrisk energi vil tap oppstå. En vindturbin settes typisk i drift ved 2-3 m/s ved at generatoren brukes som motor for å sette rotorene i bevegelse. Leveranse av elektrisk energi skjer først ved lett bris, det vil si ved 3-4 m/s. I vindspekteret ca. 3- 10 m/s vrir bladene til optimal vinkel av styringssystemet for optimal utnyttelse av vindressursen. Ved sterkere vind enn liten kuling, ca. 11-14 m/s, blir påkjenningen så stor at bladene vrir i mindre og mindre optimal vinkel etter hvert som vinden øker. Dette innebærer at effekten til turbinen er tilnærmet konstant i vindspekteret 11/14-25 m/s. Ved vindstyrke over 25 m/s, noe som tilsvarer full storm, stoppes turbinen. Årsaken til produksjonsstopp ved full storm er de enorme kreftene og påkjenningene man ønsker å beskytte komponentene mot. Effektkurven for en vindturbin angir ved hvilke vindhastigheter den henholdsvis starter å produsere, når maks effekt og slutter å produsere på grunn av for høy vind. Ulikt design gir forskjellige effektkurver, og vindturbinen som velges må være den som er mest egnet for forholdene.

Valg av vindturbin velges ut fra vindforholdene med mål om lavest mulig pris per produsert energi. Den internasjonale standarden (IEC) definerer tre vindturbinklasser, klasse I, II og III. Klassen refererer til vindforholdene turbinen er designet for å produsere i samt ekstremvind. Høy klasse refererer til lave vindhastigheter og ekstremvinder. Klasse II turbiner har normalt lengre blader enn klasse I turbiner. Det gjør at de fanger mer vind, når maksimal effekt tidligere, men tåler mindre ekstremvind. I klassene finnes også A og B klasser. En klasse IIA er designet for mer turbulens enn B.

Vindturbinene kan ikke plasseres for tett innpå hverandre for å unngå for mye vaketap, med vaketap menes tap som skyldes at vinden som har passert rotorbladene har lavere hastighet og er mer turbulent. Påvirkning fra andre turbiner må ikke unngås for enhver pris, den optimale løsningen er den som gir best økonomi i prosjektet. I praksis plasseres turbinen med en avstand på minimum 5-6 ganger rotordiameter i fremtredende vindretning og 3-4 ganger på tvers av vinden. I tillegg til vindressurs er avstandene også avhengig av topografi og vegetasjon. Det er fordelaktig å plassere turbinene innenfor samme område for å dra nytte av stordriftsfordeler i form av kjøp og installasjon av turbiner, veibygging, nettilknytning, bygningmasse samt drift og vedlikehold.

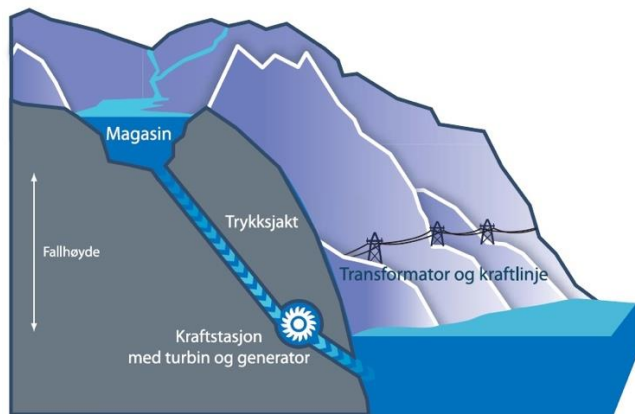
Normalt leverer en turbin elektrisk energi i ca. 6000 av årets 8760 timer. Produksjonen fra et vindkraftverk angis vanligvis som brukstid. Brukstid sier hvor mange timer turbinen må gå med full effekt for å produsere den totale årlige produksjonen. For norske forhold er brukstiden normalt i størrelsesorden 2500-3000 timer.

En vindturbin varierer stort i størrelse, og de siste årene har størrelsen på vindturbinene økt kraftig. Selv om utviklingen har gått mot større turbiner, dominerte de mindre vindturbinene tidlig i utviklingen. Små vindturbiner rangerer fra 0,2 kW opp til 100 kW og en vindturbin kan møte elektrisitetsbehovet til små samfunn eller individuelle boliger/bedrifter. Kostnaden for små vindturbiner er vesentlig mye høyere per kW enn for større vindturbiner, og den varierer mye basert på konkurransesituasjonen i markedet og faktorer relatert til installasjon. IRENA oppgir i en rapport fra 2012 at kostnaden for en vindturbin med en gunstig plassering ligger mellom 3000 – 6000 USD/kW, der USA og Canada ligger i øvre prissjikt mens Kina er i nedre prissjikt. Den samme rapporten oppgir en forventet kostnadsreduksjon på 15 % fra 2011 til 2020 for små vindturbiner på land [34]. Høyden til mindre vindturbiner er mye lavere enn for de store, og det er viktig å være oppmerksom på at vindhastigheten er lavere nærmere bakken slik at man må ta hensyn til dette i planleggingen. Det er derfor bedre med en stor vindturbin enn flere små [33].

I likhet med alle andre energikilder påvirker også utbygging av vindkraft miljøet. Virkningene vil variere med omfanget av utbyggingen og måten den skjer på, samt verdien og sårbarheten til blant annet naturmangfoldet som berøres. Tema som ofte får mest fokus er: beslagleggelse av areal, støy, visuelle virkninger og virkninger for fauna [35].

4.1.3 VANNKRAFT

I et vannkraftverk utnyttes den potensielle stillingsenergien i vannet og en prinsippsskisse for et vannkraftverk er vist i Figur 12. Vannkraft har flere fordeler sammenlignet med andre kilder til elektrisk energi, fordi den i større grad er regulerbar og i liten grad bidrar til luftforurensning eller klimagasser. Teknologien er i tillegg moden.



FIGUR 12: PRINSIPPSKISSE FOR VANNKRAFTVERK [36]

Ved inngangen av 2017 var midlere årlig produksjon i det utbygde vannkraftsytetmet i Norge beregnet til 133,4 TWh, hvorav små kraftverk utgjør 9,9 TWh [37]. De fleste store vannkraftverk som kan bygges ut er blitt bygget ut, og mange av resterende vassdrag er vernet, dyrere å bygge ut og/eller med større miljømessige konsekvenser. Dermed er en stor del av det gjenværende potensialet for ny vannkraft er fra relativt små kraftverk. For å øke utbyggingsinteressen har myndighetene blant annet forenklet konsesjonsbehandlingen sammenlignet med kravet for store kraftverk (større enn 10 MW).

Vannkraft kan utifra trykkehøyde deles inn i to hovedtyper: lavtrykkskraftverk og høytrykkskraftverk. Lavtrykkskraftverk utnytter ofte en stor vannmengde med forholdsvis liten fallhøyde, for eksempel i et elvekraftverk. Vannføringen kan vanskelig reguleres, og vannet blir gjennomgående utnyttet når det kommer. De fleste elvekraftverkene i Norge ligger i lavlandet, særlig på Østlandet, Sørlandet og i Trøndelag. Høytrykkskraftverk utnytter store fallhøyder og mindre vannmengder enn elvekraftverk. Mange slike kraftverk lagrer vann i magasiner, og kalles også magasinkraftverk.

Vannkraftverk med magasin kan bygges som pumpekraftverk hvor det er mulig å utnytte perioder med overskuddskraft til å pumpe vann opp tilbake i magasinet. På denne måten kan energien lagres og utnyttes i perioder med underskudd på kraft og kraftproduksjonen kan kombineres med for eksempel uregulerbar vindproduksjon. Pumpekraftverk er ikke utbredt i Norge og de få som finnes brukes til sesonglagring av energi fra sommer til vinter, samt utnyttelse av store nedbørsmengder. I resten av verden benyttes pumpekraftverk til døgnregulering som innebærer at vannet pumpes opp om natten og produserer kraft om dagen.

I mikronett er små vannkraftverk mest aktuelle, og disse kan bygges i størrelsesorden fra noen kW og opp. Småkraftverk er delt inn i følgende underkategorier:

- mikrokraftverk (installert effekt under 0,1 MW)
- minikraftverk (installert effekt fra 0,1 MW til 1 MW)
- småkraftverk (installert effekt fra 1 MW til 10 MW)

Generelt sett etableres ofte små vannkraftverk i bekker og mindre elver uten reguleringsmagasiner. Uten magasiner produserer kraftverkene bare når det uregulerte tilsiget er stort nok til at turbinene kan kjøres. Kraftverk uten magasiner gir mindre konsekvenser for natur og miljø. I et mikronett kan et vannkraftverk med magasin og regulerbarhet være en essensiell del av kraftforsyningen.

Små kraftverk inkluderer sjelden det aller siste innen vannkraftteknologi. Utfordringen er snarere å designe og bygge kraftverk som egner seg best til utbyggerens vannressurs. For små kraftverk er utfordringen ofte å finne turbiner som har god virkningsgrad ved varierende vannføringer. Dette kan telle mer enn en høy toppvirkningsgrad. Dette har ført til noe bruk av turbintyper som tverrstrømturbinen i uregulerte små kraftverk. En tverrstrømturbin (Crossflowturbin) overlapper delvis bruksområdet til Kaplan-, Francis- og Peltonturbinene, men har lavere virkningsgrad. Den håndterer stor variasjon i vannmengde og en fallhøyde på 2–100 meter. Det er også utviklet en såkalt plateturbin for kraftverk under 4 MW. Denne turbintypen dekker et fallhøydeområde på mellom 50 og 240 meter.

Livsykluskostnadene for små vannkraftverk er relativt lave sammenlignet med annen fornybar energi, og det er god tilgang på nye prosjekter. Energikostnaden for små vannkraftverk ligger typisk på 30-50 øre/kWh, avhengig av hvor kostbar utbyggingen er og hvor høy produksjon man kan opprettholde [36].

Utbygging av vannkraft påvirker miljøet og virkningene vil variere etter

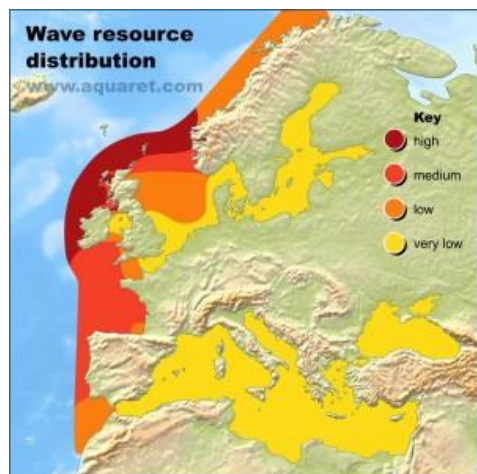
- omfanget av utbyggingen
- måten utbyggingen skjer på
- verdien av og sårbarheten til det biologiske mangfoldet som berøres
- hvor sterke brukerinteresser som er knyttet til vassdraget

Ofte får tema som fisk/ferskvannsbibliologi, landskap og friluftsliv mest fokus [38].

4.1.4 BØLGEENERGI

Havbølger er en ren og fornybar energikilde, skapt ved omforming av vindenergi når vinden blåser langs havoverflaten. Bølgekraften har høy energitetthet og ute på åpent hav kan energitettheten komme opp i 100 kW per meter. De beste bølgeressursene er i områder hvor sterke vinder har reist over lange avstander, på grunn av dette oppstår de beste bølgeressursene i Europa langs vestkysten. Nær land avtar energitettheten siden bølgene blir hindret av øyer og fastland.

Figur 13 viser bølgeressurser i Europa. I følge NOU 1998:11 «Energi- og kraftbalansen mot 2020» utgjør bølgeenergien i gjennomsnitt 30–40 kW per meter bølgefront i havet utenfor norskekysten mellom Stad og Lofoten. Lenger sør og nord er det 20–30 kW per meter, men mindre innover i Skagerrak. Midlere bølgeenergi er minst dobbelt så stor om vinteren som om sommeren. Bølgeressursene er et stykke på vei kartlagt, men er avhengig av en rekke usikre og ustabile parametere, blant annet meteorologiske forhold.



FIGUR 13: BØLGEKRAFTRESSURSER I EUROPA [39]

I flere tiår er det lagt ned mye arbeid i å utvikle ulike konsepter for utnyttelse av bølgekraft, og de første kommersielle anleggene begynner nå å komme på plass. Bølgeenergi overføres til energi i et svingesystem som vekselvirker med bølgene, der energien konverteres til nyttig mekanisk energi ved hjelp av turbiner eller andre hydrauliske eller pneumatiske motorer (“power takeoff”-system). Til slutt konverteres energien til elektrisitet ved hjelp av en generator. De ulike løsningene kan stort sett klassifiseres under følgende hovedtyper:

- Svingende vannsøyle
- Linjeabsorbator
- Bølgepumpe
- Oversylningsanlegg

Bølgekraftanlegg har stor variasjon i teknologi og det er vanskelig å gi noen gode generelle anslag over kostnadene. Dette er parametere som må beregnes for hvert enkelt prosjekt da de avhenger av bølgeressursene, teknologiens levetid og nettilknytningen. Av disse punktene er levetiden det mest usikre punktet.

Selv om bølgekraft fremdeles på et tidlig stadium, kan det være konkurransedyktig uten offentlig støtte innen enkelte bruksområder, for eksempel kraftforsyning til isolerte kystsamfunn der kun kostbar elektrisitet fra dieselaggregater er tilgjengelig [40].

Det første bølgekraftverket i Norge som leverer strøm til kraftnettet ble satt i drift 2. Juni 2017. Det har en effekt på 100 kW og strømprisen på anlegget er cirka 3,5 kroner per kWh. Selskapet Power4waves bak kraftverket venter at prisen kan gå ned til 1,75-2 kroner per kWh i neste runde ved kommersialisering [41].

4.1.5 TIDEVANN

Tidevannsforskjeller skyldes at gravitasjonskreftene fra solen og månen fører til en endring av havnivået både på den delen av jorda som vender mot og fra månen. Det dannes da lange havbølger med bølgehøyde mindre enn 1 meter og med periode på 12 timer og 25 minutter, det vil si tiden mellom flo og fjære. Solen og månen i fellesskap resulterer i 14 dagers perioder med maksimum og minimum i tidevannsforskjeller. Topografiske forhold fører til at lokale tidevannsforskjeller kan bli betydelig større eller mindre enn havbølgen på 1 meter. I tillegg kan variasjoner av høytrykk og lavtrykk sammen med innvirkning av vindretning føre til betydelige avvik i tidevannsforskjellen. På spesielt gunstige steder i streder og sund kan store vannmasser skyte fart og gi en energitetthet i området 500–1 000 W/m².

Tidevannsforskjellen i Norge varierer mellom 0,3 meter (Oslo) og 2,1 meter (Kirkenes). Dette er i praksis for lite til å utnytte tidevannets potensielle energi. I stedet satser en i Norge på å utnytte tidevannets bevegelsesenergi da den norske kystlinjen består av mange trange og dype fjorder der tidevannsstrømmen kan bli sterk. Det utnyttbare potensialet i Norge er antatt å være 1- 2 TWh per år. Figur 14 viser tidevannsressurser i Europa, hvor Lofoten er det eneste stedet i Norge som er merket.



FIGUR 14: TIDEVANNSRESSURSER I EUROPA [39]

En fordel med tidevannskraft er at tidevannsstrømmene er forutsigbare, noe som innebærer at de øker og avtar helt jevnt, og i kjente sykluser. Dette gjør det enkelt å dimensjonere anlegget, samtidig som man på forhånd vet hvilke krefter utstyret kommer til å bli utsatt for. Etersom energitettheten i vann er mye høyere enn i luft, kan tidevannsturbinene også være vesentlige mindre, men fortsatt ha tilsvarende effekt som en mye større vindturbin. En tidevannsturbin har helt andre begrensninger enn en vindturbin både når det gjelder fysisk størrelse og installert effekt. En annen ulempe er at strømvirvler fra havstrømmer kan føre til at større turbiner ødelegges ved at vingene utsettes for ulike krefter. På grunn av de store kreftene i vannmassene må rotorene i tidevannsturbinene også tåle mye større belastninger enn vindturbiner.

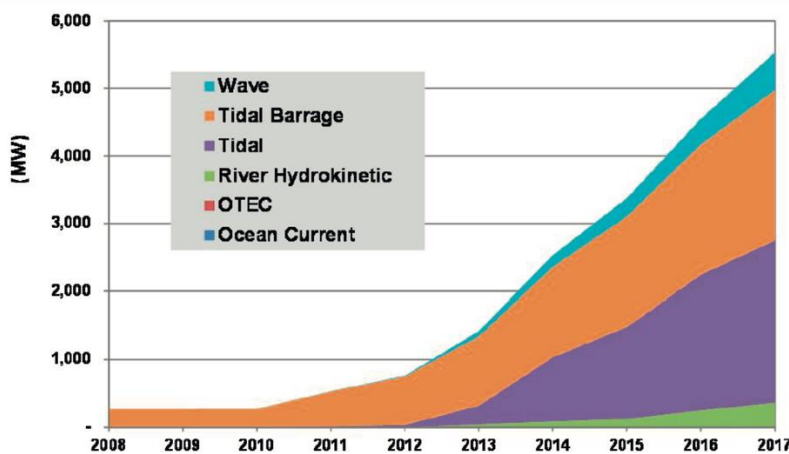
Effekten på en tidevannsturbin avhenger både av kraften i tidevannsstrømmen og dypet i sundet den er plassert. Turbinen må også lokaliseres dypt nok til at den ikke kommer i kontakt med trafikken på overflaten.

Det finnes to ulike konsepter for å produsere elektrisitet fra tidevann:

1. Tidevannsdemninger som utnytter tidevannets stillingsenergi som følger av nivåforskjeller på flo og fjære. Her vil tidevannet som kommer mot land stenges ute av en demning, og slippes gjennom en vannturbin når passende nivåforskjell er oppnådd. Når tidevannet snur vil vannet gå gjennom turbinene i motsatt retning.
2. Tidevannsturbiner som utnytter bevegelsesenergien i vannstrømmen mellom flo og fjære. Her plasseres turbiner under vann, forankret på havbunnen, og drives direkte av tidevannsstrømmen. Turbinene kan i utforming kan minne om vindturbiner, og har normalt et vingespenn på rundt 15-20 meter.

Tidevann er foreløpig en lite benyttet energikilde på verdensbasis i dag, men det finnes en del mindre testanlegg samt noen større anlegg. Det finnes få eller ingen større kommersielle anlegg av kraftproduksjon fra tidevannsstrømmer internasjonalt. Figur 15 viser forventet utvikling i installert havenergi hvor tidevannsenergi utgjør den største andelen.

Chart 1.1 Cumulative MHK Installed Capacity by Technology, World Markets: 2008-2017



(Source: Pike Research)

FIGUR 15: FORVENTET UTVIKLING I KUMULATIVT INSTALLERT HAVENERGI I VERDEN (FRA 2012) [42]

Eksisterende kostnadsunderlag er basert på prototyper og testanlegg, og er derfor sprikende og utilstrekkelig. Bloomberg New Energy Finance (2013) anslår investeringskostnadene (CAPEX) for tidevannskraft til å være mellom 6,7-16 MUSD/MW, og levetidskostnadene (LCOE) til å være mellom 263-1 049 USD/MWh [43].

4.1.6 BIOENERGI

RESSURS

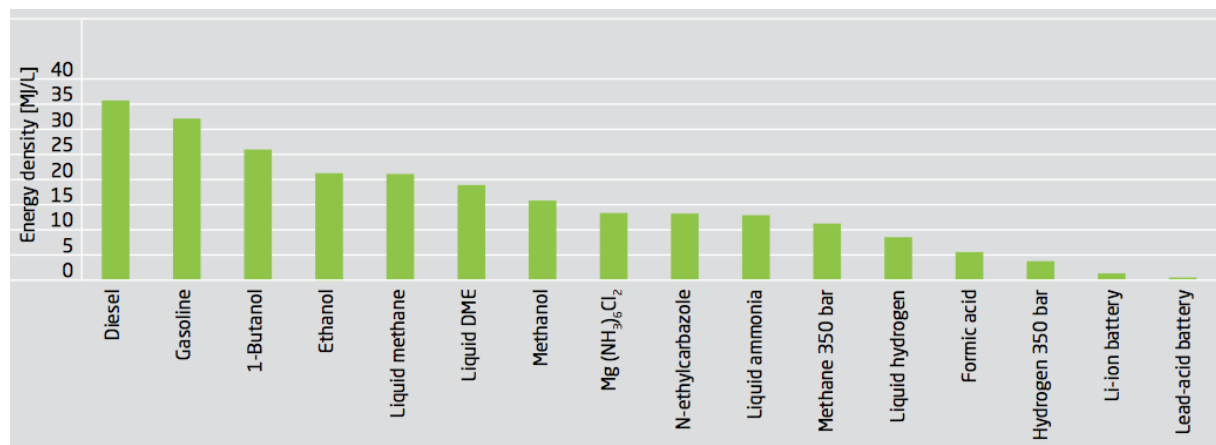
Bioenergi er et samlebegrep for utnyttelse av biomasse til energiformål. Biomasse er organisk materiale, slik som plantemateriale fra skog, landbruk og alle grønne planter til havs (akvatisk biomasse). Avfallsprodukter som er laget av biomasse, som for eksempel trematerialer, papir og papp, kan også betegnes som bioenergi når de gjenvinnes og omdannes til varme og strøm i forbrenningsanlegg.

Bruk av biomasse til energiformål er CO₂-nøytralt i den forstand at CO₂ som frigjøres ved forbrenning av et tre tilsvarer den CO₂-mengden treet har hentet fra omgivelsene og bundet opp i vekstfasen. For at bruken av bioenergi skal være bærekraftig er det viktig at uttaket av biomasse ikke overskrider tilveksten.

Biobrensler kan deles opp i faste og flytende brensel. Faste biobrensler er for eksempel ved, bark og brikketer. Flytende biobrensler produseres med utgangspunkt i ulike råstoffer og har ulike forbrenningstekniske egenskaper. De viktigste er alkoholer, prosesserte vegetabiliske/animalske oljer, pyrolyseoljer og ulike syntetiske brensler produsert av gassifisert biomasse. Forskjellige typer flytende biobrensler er

- første generasjons etanol
- første generasjons biodisel
- biofyringsolje
- cellulosebasert biodrivstoff (andregenerasjons biodrivstoff)
- etanol fra cellulose
- biodisel fra cellulose (syntetisk biodisel)
- produksjon av pyrolyseolje

Miljømessige virkninger og kostnader kan variere kraftig mellom de ulike alternativene. Faste biobrensel og biodrivstoff har lavere energitetthet enn fossile brennstoff som vist i Figur 16, og biodrivstoff krever derfor større lagringsplass og høyere transportkostnader enn ved bruk av fyringsolje eller naturgass [44].



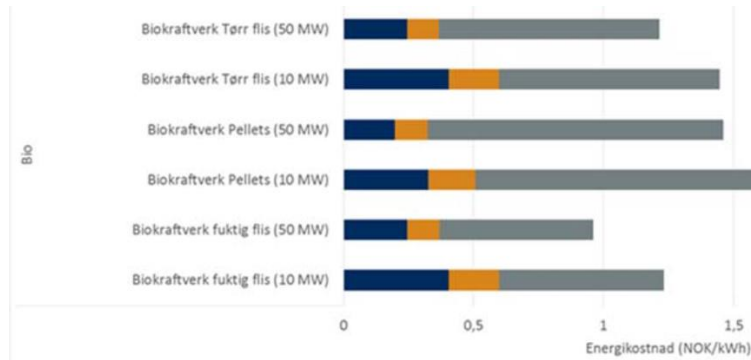
FIGUR 16: ENERGITETTHET I FORSKJELLIGE ENERGILAGRINGSKJEMIKALIER OG BATTERITEKNOLOGIER [45]

TEKNOLOGI

Det vanligste bruksområdet for bioenergi er oppvarming. Fordelen ved å bruke bioenergi til oppvarming er at lite energi går tapt, mesteparten av energiinnholdet i biomassen kan forbrennes og omgjøres direkte til varme. Bioenergi kan brukes også til kraftproduksjon, enten alene eller i kombinert kraft- og varmeproduksjon. De fleste biokraftverkene er basert på direkte forbrenning i et varmekraftverk. Energien som frigjøres i form av varme brukes til produksjon av høytrykksdamp, som produserer kraft i en konvensjonell dampturbin [46]. I Norge er bioenergi hovedsakelig utnyttet i kraftproduksjon tilknyttet trefordelingsindustrien og avfallshåndteringsanlegg. Grunnen til dette er at lønnsomheten er avhengig av prisen på biobrenselet [47].

PRIS

Energikostnad for biokraftproduksjon ved bruk av ulike typer brensel er vist i figuren nedenfor. De blå, oransje og grå delene av søylene representerer henholdsvis investeringskostnader, drifts- og vedlikeholdskostnader og brensel- og utslippkostnader.



FIGUR 17: ENERGIKOSTNAD OVER LEVETIDEN (LCOE) I NOK/KWH FOR BIOKRAFTVERK. ENERGIKOSTNADENE ER FORDELT PÅ BIDRAG FRA INVESTERINGSKOSTNADER, DRIFT OG VEDLIKEHOLD SAMT BRENSLSKOSTNADER [46]

Kraftkostnadene fra biokraftverk (og fossile teknologier) skiller seg ut ved å være svært avhengige av brenselkostnadene, noe som raskt kan endre konkurranseforholdet mellom disse og andre teknologier i et kostnadsperspektiv. For gass- og biokraftverk har de store kraftverkene betydelig lavere energikostnader enn de små [46].

Økonomien i et biokraftverk er avhengig av tilgang til billig biobrensler i lang tid fremover. Prisen avhenger av tilgang på biobrensler og hvor langt brenslene må transporteres, og ved lang transport kan prisen øke betraktelig. IRENA (2012) oppgir at prisen varierer fra 10 USD/tonn til 160 USD/tonn på pellets som er handlet internasjonalt. Energiprisen (LCOE) for biokraftverk varierer fra 0,06 USD/kWh til 0,29 USD/kWh avhengig av kapitalkostnad og drivstoffkostnad. Selv i områder hvor biodrivstoff er dyrt oppgir IRENA biokraftverk som et konkurransedyktig alternativ til diesel for rural elforsyning [48].

MILJØ OG BÆREKRAFT

Miljøkonsekvensene er mer sammensatte enn for andre fornybare energikilder. De kan skje ved produksjon og uttak av biomassen, ved transport og ved forbrenning. Uttak og produksjon av biomasse kan ha omfattende brukerkonflikter, for eksempel i forhold til matproduksjon og vern av naturressurser.

EU kommisjonen vedtok 10. juni 2010 et system for bærekraftsrapportering for biodrivstoff. For å sikre at biodrivstoff er et miljøvennlig alternativ til fossilt drivstoff, krever EU at man skal kunne dokumentere bærekraftige produksjonsforhold og klimanytten ved biodrivstoff [49]. Bærekraftskriteriene består av to deler:

- Krav om reduksjon i klimagassutslipp: Det må dokumenteres at biodrivstoffet gjennom livsløpet reduserer de totale klimagassutslippene med minst 35 prosent, sammenliknet med utslippene fra bensin og diesel. Fra 1. januar 2018 øker kravet til 50 prosent. Nye produksjonsanlegg for biodrivstoff, må oppfylle et krav om 60 prosent reduksjon i klimagassutslippene. EU kommisjonen har foreslått å skjerpe kravet ytterligere etter 2020.

- Arealkrav: Arealkravene skal sikre at råstoffet til biodrivstoffet ikke er dyrket på arealer som har høy biodiversitet eller et høyt karboninnhold. Man må altså kunne dokumentere, ved hjelp av flyfoto eller data fra offisielle databaser, at man for eksempel ikke har hogget regnskog eller drenert myr for å skaffe areal til råstoffproduksjonen [50].

Forbrenning av biomasse fører til dannelse av uønskede utslipp til luft. Dette handler først og fremst om uforbrente gasser og partikler (CO, PAH, TOC), NO_x, SO₂, støv, tungmetaller og dioksiner. Moderne forbrenningsteknologi og metoder samt gode renseløsninger gjør det som regel mulig å redusere utslippene til akseptable nivåer, ofte med god margin til grenseverdiene som myndigheten setter. Bioenergi regnes som nøytral med hensyn på klimagasser. Det karbondioksidet som dannes ved forbrenning er tidligere tatt opp av planten, og representerer derfor ikke noe nettutslipp så lenge de stående bioenergiresser ikke utarmes [49].

4.1.7 HYDROGEN

Hydrogen er en energibærer som kan produseres fra alle energikilder, fossile så vel som fornybare. Hydrogen kan brukes til kraftproduksjon i en brenselcelle eller gassturbin, begge med en virkningsgrad på ca. 50-55 %. Ved bruk i brenselceller gir hydrogen hverken utslipp av klimagasser eller lokale miljøutslipp, da restproduktet er rent vann. Ved forbrenning av hydrogen i forbrenningsmotorer eller gassturbiner, kan det imidlertid dannes termisk NO_x [45]. Hydrogen kan produseres fra elektrisitet og lagres, dette er videre omtalt i delkapittel 4.2.4.

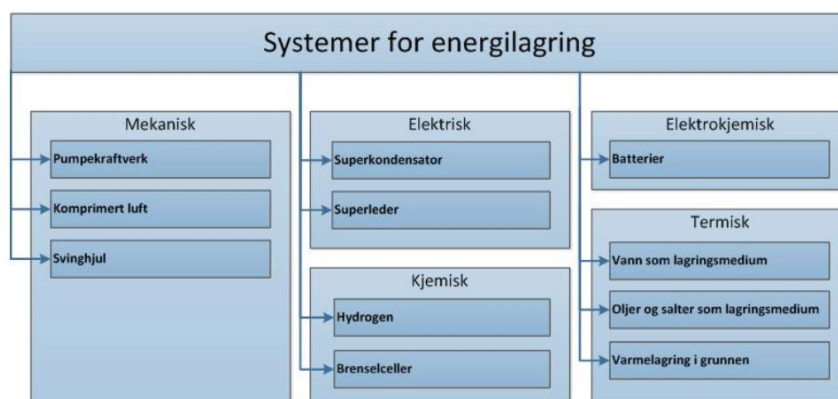
4.2 ENERGILAGRING

Energilagring spiller en sentral rolle i mikronett med fornybare energikilder siden energilagring løser problem med variabilitet og usikkerhet i produksjon og last. Energilagring er derfor spesielt viktig når mikronettet er driftet i øydrift, siden kraftnettet da ikke kan kompensere ved for mye eller for lite energi tilgjengelig. Energilagring er også nyttig i et mikronett der overføringskapasiteten mot kraftnettet er liten. For mikronett med god tilkobling til kraftnettet kan energilagring gi økonomiske fordeler ved at det muliggjør å bruke en større andel egenprodusert energi internt på gunstige tidspunkt og effektleddet kan minskes.

Energilagring gir mulighet for funksjoner som black-start, og forbedring av spenningskvalitet, kontroll og stabilitet. Energilagringssystem varierer i størrelse, kostand og hvilken rolle det skal tjene i et energisystem. Riktig dimensjonering av energilagringssystem er viktig for øydrift av mikronett, men er mindre viktig for et tilkoblede mikronett. For et tilkoblede mikronett må en vurdere hvor lenge nettet skal kunne driftes frakoblede i tillegg til økonomiske hensyn i dimensjoneringen.

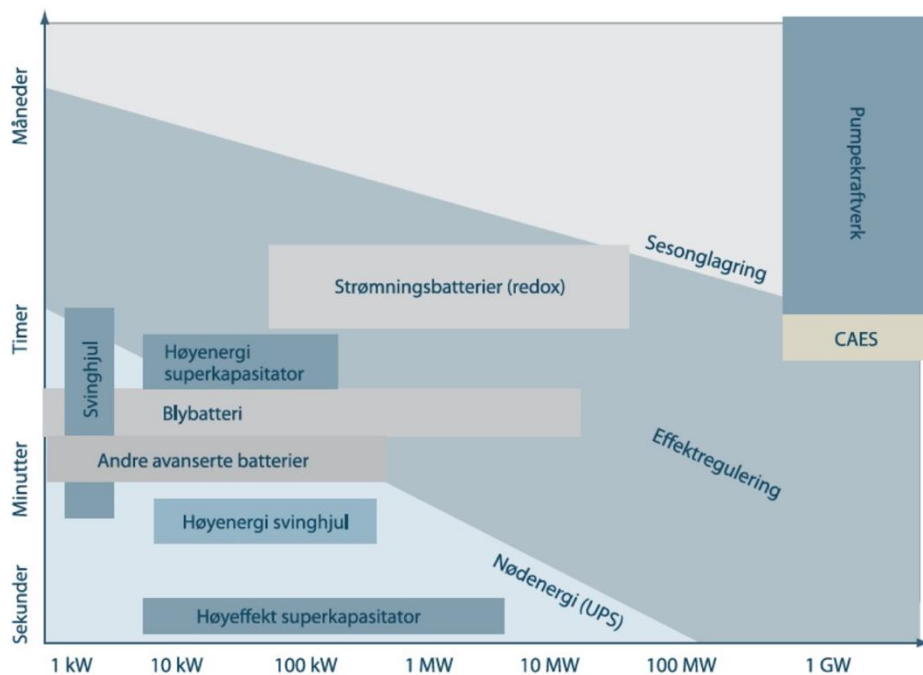
Energilagringssystem i et typisk diesel-basert øydrift mikronett kan være kosteffektivt selv ved fravær av fornybare energikilder. Med energilagring kan dieselgeneratoren dimensjoneres lavere siden lagringssystemet kan ta unna toppforbruket. Dieselgeneratoren har høyest effektivitet på en høy last, og med energilagring kan generatoren operere på en høyere effektivitet slik at dieselforbruket går ned. En kombinasjon av fornybare energikilder, energilagring og diesel generator kan gi den billigste løsningen siden energilagringen da ikke må dimensjoneres for å møte laster ved lengre perioder med lite fornybarproduksjon [51].

Det finnes ulike teknologier for lagring av energi. Disse kan deles inn i følgende hovedkategorier: Mekanisk lagring, elektrisk lagring, elektrokjemisk lagring, kjemisk lagring og lagring av termisk energi. De ulike alternativene er illustrert i figuren under.



FIGUR 18: ULIKE TEKNOLOGIER FOR ENERGILAGRING [52]

Hvilken teknologi som er mest aktuelt å benytte avhenger av blant annet hvor stor mengde energi man ønsker å lagre, over hvor lang tid energien ønskes lagret, tap og kostnader knyttet til lagringsmetoden samt hvor sikker metoden er. Figuren under viser hvilke lagringmuligheter som er aktuelle i forskjellige tidsskalaer. F. eks er pumpekraftverk et godt alternativ for langtidslagring av store mengder energi (i vannmagasin), mens for variasjoner over kortere perioder er batterier og svinghjul gode alternativer. Mange teknologier er enda ikke utprøvd slik at man ikke vet hva man kan forvente på sikt av levetid, tap av ytelse (virkningsgrad) og vedlikeholdsbehov.



FIGUR 19: FORSKJELLIGE TEKNOLOGIER FOR ENERGILAGRING OG DERES BRUKSOMRÅDER [52]

4.2.1 MEKANISK LAGRING

PUMPEKRAFTVERK

Pumpekraftverk er en moden teknologi med høy virkningsgrad på mer enn 80 %. Pumpekraftverk er også den teknologien som er i stand til å lagre den største energimengden og samtidig ha den største effekten. På verdensbasis står pumpekraftverk for nesten all lagringskapasiteten.

Et pumpekraftverk består i hovedsak av to vannmagasiner på forskjellig høyde. Ved det nederste magasinet plasseres en turbin som kan kjøres begge veier, eventuelt en pumpe og turbin montert på samme generator. Generatoren fungerer som motor ved pumping. Når man lagrer energi, pumpes vann opp til det høyeste magasinet. Energien hentes ut ved å la vannet renne tilbake gjennom turbinen. Energimengden som kan lagres er avhengig av høydeforskjellen mellom magasinene og magasinestørrelsen, mens effekten bestemmes av størrelsen på pumpeturbinen.

I Norge finnes bare noen få pumpekraftverk i drift. Det største er Saurdal i Rogaland. Effekten er 640 MW og det er 500 høydemeter mellom magasinene. Det øverste magasinet, Blåsjø, er Norges største magasin målt i energi. Som for de fleste andre pumpekraftverkene i Norge er formålet med Saurdal sesonglagring av energi fra sommer til vinter, i tillegg til utnyttelse av nedbør. Andre steder i verden benyttes pumpekraftverkene i hovedsak til døgnregulering, det vil si at vannet pumpes opp om natten mens det om dagen produserer strøm.

KOMPRIMERT LUFT

Komprimert luft (engelsk: "Compressed Air Energy Storage" - CAES) er en lagringsteknologi som har vært i bruk siden 70-tallet og har en virkningsgrad på 70-80 %. Det er en forholdsvis kostbar teknologi. For at det skal være lønnsomt å bygge, bør tiden mellom lagring og produksjon være kort. De få anleggene som finnes kjøres ofte for døgnregulering.

Konseptet går ut på at elektrisitet blir brukt til å komprimere luft og lagre den enten i underjordiske strukturer (huler, akvifer formasjoner, nedlagte gruver etc.) eller i et system ledninger og trykktanker over bakken. Når det er bruk for energien igjen, blandes luften med naturgass, brennes og benyttes i en modifisert gassturbin. En gassturbin består av en kompressor, et forbrenningskammer, en turbin og en generator. Kompressoren og turbinen sitter på samme aksling. Forbrenningskammerets hensikt er oppvarming av den komprimerte luften. Turbinen driver både kompressoren og generatoren. Gassturbiner som brukes i energilagring med komprimert luft skiller seg fra vanlige gassturbiner ved at kompressor og turbin settes på forskjellige akslinger, slik at de kan kjøres uavhengig av hverandre. I forhold til en vanlig gassturbin, bruker dette systemet 40 prosent mindre energi til kompresjonen, ettersom det er elektrisk energi som driver kompressoren [52].

Compressed air energy storage (CAES) og pumpekraftverk er generelt passende for store elektrisitetssystem (500 MW+) og er derfor ikke særlig godt egnet for mikronett [51].

SVINGHJUL

Prinsippet for energilagring med svinghjul (engelsk: Flywheel) har vært kjent og brukt siden man begynte å konstruere maskiner. Likevel har det de senere årene blitt utviklet en ny type svinghjul som består av komposittmaterialer som tåler svært høye rotasjonshastigheter. Et moderne svinghjul har svært lave tap og en virkningsgrad på ca. 90 %. Levetiden til et svinghjul er ca. 20 år og det tåler flere titalls tusen ladesykluser. Teknologien er forholdsvis moden og det finnes flere kommersielle produkter på markedet.

Bruk av svinghjul for lagring av energi er en teknologi som innebærer at energi blir lagret i en roterende skive. Skivens hastighet, masse og radius bestemmer hvor mye energi som kan lagres. Den roterende skiven er tilkoblet en elektrisk motor som også fungerer som generator. Energi tilføres ved å øke rotasjonshastigheten med motoren, mens energien hentes ut ved at motoren anvendes som generator. Tilførsel og uthenting av energi skjer svært raskt. Derfor har svinghjul ofte samme bruksområde som superkondensatorene.

4.2.2 ELEKTROMAGNETISK ENERGILAGRING

SUPERKONDENSATORER

I en kondensator lagres energi i form av et elektrisk felt, i motsetning til batterier der lagringen skjer via elektrokjemiske reaksjoner. Det elektriske feltet skapes ved at to elektrisk ledende overflater, atskilt av et tynt isolerende materiale, tilføres likestrøm. Kondensatorer har svært høy virkningsgrad fordi det ikke inngår faseoverganger eller kjemiske reaksjoner i denne prosessen. De tåler flere ladesykluser enn batterier (opptil en million sykluser, mot noen tusen sykluser for batterier). Kondensatorene både lades og utlades svært raskt. Andre fordeler er høy pålitelighet, ingen vedlikehold, lang levetid og virkeområde i et stort temperaturspekter. En superkondensator kan ha lagringskapasiteter på opp til 3 Wh/kg med en effekt på 30 kW/kg.

På grunn av høye kostnader er superkondensatorer lite brukt til energilagring. Det er først og fremst i nødstrømsforsyning og i elektriske biler at superkondensatorene har blitt brukt. Men det forsøkes mye på både produktforbedring og kostnadsreduksjon, slik at superkondensatorene etter hvert kan bli tilgjengelige for flere anvendelser.

SUPERLEDERE (SMES)

Superledere (Superconducting magnetic energy storage – SMES) kan også benyttes til lagring av energi. Dette gjøres ved at superlederen brukes til å skape et sterkt magnetfelt som man senere kan omdanne til elektrisitet gjennom utladning av superlederen. Fordelene med bruk av superledere til energilagring er høy responstid og pålitelighet. De fleste kjente superledere krever svært lave temperaturer. Dette medfører at de trenger kjøleaggregater som krever energi og dermed senker den totale virkningsgraden. Den totale virkningsgraden kan, avhengig av kjølesystemet, likevel bli høy (85-90 %).

Per i dag finnes det flere mindre SMES systemer som er kommersielt tilgjengelig. Disse brukes i hovedsak til kontroll av kvaliteten til elektrisiteten i fabrikken som behøver høy kvalitet på kraften, som for eksempel produksjon av mikroelektronikk (edb). Større SMES systemer (>10 MW) brukes i hovedsak i energikrevende partikkel detektorer som brukes i fysikk eksperimenter og kjernefusjoner.

4.2.3 ELEKTROKJEMISK LAGRING

Batteri er en elektrokjemisk energilagringsform og det er mange forskjellige batteriteknologier. Et batteri kan omdanne kjemisk energi direkte til elektrisk energi via en elektrokjemisk oksidasjon-reduksjon (redoks) reaksjon. Denne typen reaksjoner innebærer overføring av elektroner fra et materiale til et annet, og i batteriet sørges det for at denne elektronstrømmen går gjennom en ytre krets slik at vi kan utnytte den. Den drivende kraften i prosessen er graden av edelhet til stoffene som er kapslet inn i batteriet. Et batteri består vanligvis av en anode på den ene siden, en katode på den andre og en elektrolytt i midten. I vanlige batterier er de nødvendige kjemikalierne (reaktantene) fysisk festet til elektrodematerialet.

Litium er et eksempel på et veldig lite edelt stoff som vil reagere elektrokjemisk med et edlere stoff som sølv. Folk flest kjenner til batterier for småelektronikk som mobiltelefoner, lommelykter og musikkavspillere. Mange av disse batteriene har veldig god lagringskapasitet, som for eksempel litium-ion og nikkell-metallhydrid batterier.

Batterier deles vanligvis inn i to typer: Oppladbare batterier og strømningbatterier.

BLYBATTERI

Blybatteriet (engelsk: lead acid) er den eldste og mest kjente batteritypen. Blybatteriet baserer seg på en reaksjon mellom bly og svovelsyre. Blybatterier har lav kostnad, moden teknologi og høy pålitelighet. De har blitt brukt mye i kraftsystemer, men de har kort levetid (3-10 år) og produksjonen av de er lite miljøvennlig [51]. De er ofte brukt innen nødstrømsforsyning og anvendelser med lite behov for mellomlagring. For lagring av store mengder energi har blybatteriene for lav holdbarhet. Likevel har det blitt bygd anlegg på opp til 40 MWh.

NIKKEL-KADMIUM (NICD) OG NIKKEL-METALL HYBRID (NIMH) BATTERIER

Nikkel-kadmium batterier har vært kommersielt tilgjengelig siden rundt 1915. Sammenliknet med blybatterier har nikkel baserte batterier en høyere energitetthet og muligheter for flere ladesykluser. Disse batteriene er også de eneste som fungerer bra ved lave temperaturer (-20 til -40 grader). På grunn av giftigheten til kadmium har bruk av nikkel-kadmium batterier vært forbudt hos forbrukerne siden 2006.

Nikkel-metall batterier har blitt utviklet for å erstatte nikkel-kadmium batteriene, og har vært på markedet siden ca. 1995. Nikkel-metall batteriene har stort sett de samme positive egenskapene som

nikkel-kadmium med unntak av lagringskapasiteten som er rundt ti ganger lavere. Samtidig har nikkellmetall batteriene mye høyere energitetthet.

LITIUMIONBATTERI (LI-ION)

Litiumionbatterier har gjennomgått en enorm utvikling de siste årene, og man begynner derfor å gå bort fra nikkellholdige batterier. Litiumionbatterier har rundt to til tre ganger så høy energitetthet som nikkell-kadmium og fire ganger så høy energitetthet som blybatterier. Batteriene har forholdsvis lav vekt, høy levetid, lave vedlikeholdskostnader og høy lagringskapasitet [51], dette er sentrale egenskaper for batterier og de nye litiumionbatteriene har blant annet vært en forutsetning for utviklingen av dagens el-biler. Litiumbatterier har fremdeles en høy kostnad, men også et stort utviklingspotensial [52].

Litiumionbatterier er ventet å bli bredt brukt i distribuert produksjon og i mikronett på grunn av forbedring av teknologi og kostnadsreduksjon [20].

METALL-LUFT (ME-AIR) BATTERI

Noen stoffer er i stand til å reagere elektrokjemisk med oksygenet i luften, og batterier av denne typen kalles ofte for batteri-hybrider. Et metall-luft-batteri bruker et metall, som litium eller sink, som anoden, og oksygen som katoden – mens elektrolytten pleier å være noe flytende. Foreløpig er det kun sink-luft batterier som er teknisk tilgjengelige.

Et metall-luft batteri er relativt lite, veldig lett og kan lagre store mengder energi. Levetiden til batteriene er derimot kort, energieffektiviteten er forholdsvis lav, og produksjonskostnaden er fremdeles høy.

NATRIUM-SVOVELBATTERI (NAS)

Natrium-svovelbatteriet (engelsk: Sodium sulfur battery - NaS), er et høytemperatur-batteri. I dette batteriet består elektrodene av flytende natrium og svovel, mens elektrolytten i fast form og består av et natriumionledende keramisk materiale. Den høye driftstemperaturen som er nødvendig for å muliggjøre prosessen krever at batteriet er godt isolert. Batteriet har lav responstid og høy energitetthet [52].

På grunn av batteriets størrelse (bare 1/5 av et blybatteri) og høye virkningsgrad (opp til 80 %) er batteriet lett å transportere og å installere. Batteriet er godt egnet til nettstasjoner og spesielle laster. Det er en lovende energilagringsteknologi for distribuert produksjon og for mikronett [20].

4.3.3 STRØMNINGSBATTERIER (FLOW BATTERIES)

I vanlige batterier er de nødvendige kjemikalierne fysisk festet til elektrodematerialet. Strømningsbatterier skiller seg fra vanlige batterier på dette punktet. Batteriet er bygd opp av to lagertanker for flytende elektrolytt (redusert/oksidert) og en regenerativ brenselcelle (se også delkapittel 2.4.2). Fordelen med strømningsbatteriet er at reaktantene ikke lagres i kontakt med elektrodene, slik at selvutladningen blir svært lav. På grunn av tap i den elektrokjemiske prosessen og pumpearbeid er ikke systemvirkningsgraden høyere enn 60–85 prosent. Vanadium, polysulfid/bromid og sink/bromid er eksempler på elektrolytter som egner seg til strømningsbatterier.

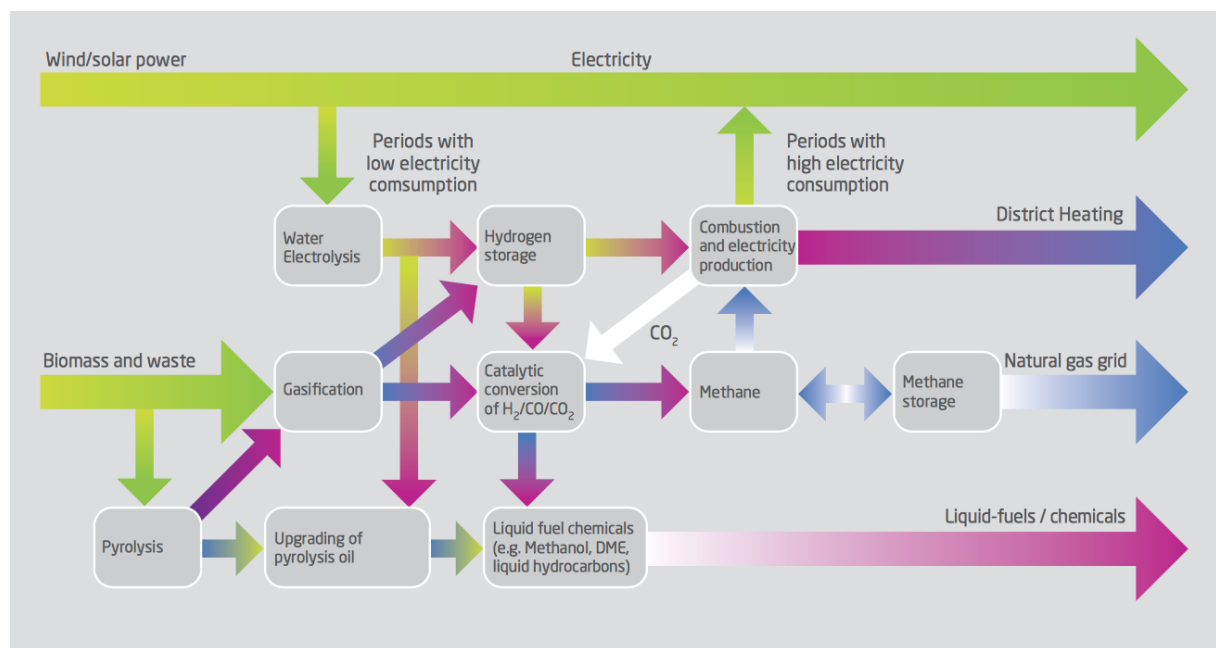
Et eksempel på et strømningsbatteri er vanadiumbatteriet. Denne batteritypen baserer seg på vanadiumspesier, dvs. at vanadiumet er oppløst i svovelsyre. Vanadium er et grunnstoff i gruppen

overgangsmetaller, og det forekommer rikelig i naturen. Vanadiumbatteriene har en modulær oppbygging og finnes i enheter med mellom 5 og 50 kW ytelse. Har man behov for større effekt kan flere moduler kobles sammen, og for større lagringsbehov kan mengden elektrolytt økes. Fordeler med vanadiumbatteriet er at opplading og utlading går like fort. Vanadiumbatterier kan fungere godt sammen med variabel kraftproduksjon som for eksempel vindkraft, og i Østerrike, Japan og USA finnes det slike systemer. Generelt er strømningsbatterier mest lønnsomme på steder hvor prisene varierer gjennom døgnet, men de brukes også som alternativ til oppgradering av nettkapasitet [52].

Strømningsbatterier er en lovende teknologi for distribuert produksjon og mikronett for å forbedre systemstabiliteten, flytte last og for å opprettholde kraftforsyningen i en nødsituasjon. Lagringsformen kan også tilpasses for lokasjonen.

4.2.4 KJEMISK LAGRING OG HYDROGEN

Energi kan lagres med en mye høyere energitetthet i kjemiske stoffer enn for batteri som vist i Figur 16. Elektrisitet kan brukes til å produsere flere typer kjemikalier, se Figur 20. De produserte kjemikaliene er ikke bare nyttig for senere elektrisitetsproduksjon, de kan også brukes som drivstoff i transportsektoren og som råmaterial i kjemiindustrien som en erstatning for fossile brensel. De kan gi mulighet for bedre utnyttelse av fornybare energiresurser i områder som ikke tilkoblet kraftnettet eller har lav overføringskapasitet.

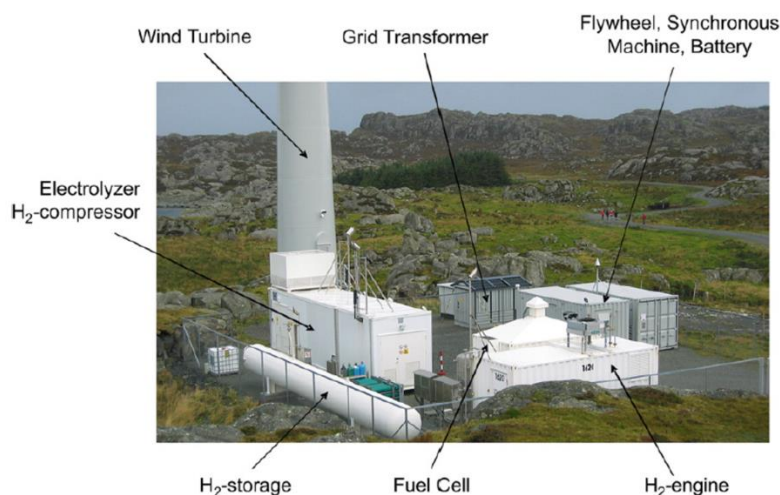


FIGUR 20: ENERGI LAGRING FRA FORNYBAR ENERGI I KJEMIKALIER VIA ELEKTROLYSE OG BIOMASSE GASSIFISERING [45]

Elektrisk energi kan gjøres om til hydrogen ved vann-elektrolyse. Vann-elektrolyse er en fleksibel last ved at produksjonen av hydrogen kan reguleres opp i perioder med overskudd av elektrisitet og reduseres/slås av i perioder med underskudd. Vann-elektrolyse er en etablert teknologi, men den er kostbar og derfor er bare ca. 4 % av verdens hydrogenproduksjon fra vann-elektrolyse. Lagring av hydrogen er en stor utfordring på grunn av hydrogen sin lave energitetthet og det er derfor nødvendig å komprimere hydrogenet til 350-700 bar for å ta mindre plass, noe som krever energi og gjør hydrogenet vanskeligere å transportere. Hydrogen kan gjøres om til elektrisitet i en brenselcelle eller

gassturbin, begge med en virkningsgrad på ca. 50-55 %. Hydrogen gir totalt sett en dårlig virkningsgrad, men det er mye forskning på området og hydrogen gir mulighet for langtidslagring [45].

I 2004 ble øyen Utsira utenfor Haugesund forsynt fra vind i kombinasjon med hydrogen i et pilotprosjekt for å gi kraftforsyning til 10 husstander. Systemet er vist i Figur 21. Overskuddskraft blir brukt til å produsere hydrogen som lagres i trykktanker. Når det er vindstille eller vinden blåser så kraftig at vindturbinene må stoppe; produseres elektrisitet i en brenselcelle eller en hydrogenbasert generator. Erfaringer fra Utsira viser en dårlig systemvirkningsgrad og tekniske problemer med å integrere brenselcellen i systemet. Utsira prosjektet demonstrerer at det er mulig å kombinere fornybar energi og hydrogen i grågrendte strøk [53].



FIGUR 21 UTSIRA VIND OG HYDROGEN DEMONSTRASJONSANLEGG [53]

4.2.5 TERMISK ENERGILAGRING

Termisk energi, eller varme, kan lagres i nært sagt alle typer materialer. Dette gjøres i praksis gjennom å varme opp eller kjøle ned et lagringsmedium slik at energien kan benyttes på et senere tidspunkt enten for oppvarming/kjøling eller elektrisitetsproduksjon. Systemer for lagring av termisk energi brukes spesielt i bygg og industrielle prosesser.

For kommersielle anvendelser ser man gjerne etter materialer med høy varmekapasitet sammenliknet med volum og kostnader. Tykkelsen på isolasjonen rundt lagringsmediet eller volumet av lageret avgjør hvor lenge energien kan lagres [52].

En bolig har flere former for termisk energilagring. Bygningen i seg selv er oppvarmet og vann i varmtvannstanken er oppvarmet. Bygningsmaterialene i boligen avgjør hvor lang tid det tar før temperaturen i boligen synker når varmekilden blir skrudd av, for eksempel holder betongbygg lengre på varmen enn trebygg. Denne tregheten kan utnyttes i driften av mikronett ved det er en fleksibel last. Fleksible laster var diskutert i delkapittel 2.3.

4.2.6 OVERSIKT OVER ENERGILAGRINGSTEKNOLOGIENE

TABELL 11: OVERSIKT OVER ENERGILAGRINGSTEKNOLOGIENE [21]

Main technologies of SSS.

Technology	Efficiency (%)	Capacity (MW)	Energy density (Wh/kg)	Capital (€/kW)	Lifetime (years)	Maturity	Environmental impact	Examples
TES ^a	30–60	0–300	80–250	140–220	5–40	Developed	Small	Solar two Central Receiver Solar Power Plant, California (USA)
PHS ^b	75–85	100–5.000	0.5–1.5	400–1500	40–60	Mature	Negative	Rocky River PHS plant, Hartford (USA)
CAES ^c	50–89	3–400	30–60	250–1500	20–60	Developed	Negative	Huntorf (Germany) and McIntosh, Alabama (USA)
Flywheel	93–95	0–25	10–30	250	~15	Demonstration	Almost	Commercially supplied by AFS-Trinity (USA), Beacon Power (USA), Piller (USA), etc.
Pbacid battery ^d	70–90	0–40	30–50	200	5–15	Mature	Negative	BEWAG Plant, Berlin (Germany)
NiCd battery ^e	60–65	0–40	50–75	350–1.100	10–20	Commercial	Negative	Golden Valley, Alaska USA
NaS battery ^f	80–90	0.05–8	150–240	700–2.100	10–15	Commercial	Negative	Tokyo Electric Power Company, Japan
Li-ion battery ^g	85–90	0–1	75–200	3.000	5–15	Demonstration	Negative	Kyushu Electric Power and Mitsubishi Heavy Industries (Japan)
Fuel cells	20–50	0–50	800–10.000	350–1.100	5–15	Developing	Small	Topsoe Fuel Cell, Lyngby, (Denmark)
Flow battery	75–85	0.3–15	10–50	400–1.100	5–15	Developing	Negative	Innogys Little Barford Power Station, (UK)
Capacitors	60–65	0–0.05	0.05–5	250	~5	Developed	Small	Commercially supplied by SAFT (France), NESS (Korea), ESMA (Russia) etc.
Supercapacitors	90–95	0–0.3	2.5–15	200	> 20	Developed	Small	PowerCache (Maxwell, USA), ELIT (Russia), PowerSystem Co. (Japan), Chubu Electric Power (Japan), etc.
SMES ^h	95–98	0.1–10	0.5–5	200	> 20	Demonstration	Positive	Wisconsin Public Service Corporation (USA)

^a TES: Thermal Energy Storage.

^b PHS: Pumped Hydro Storage.

^c CAES: Compressed Air Energy Storage.

^d Pb-acid battery: Lead-acid battery.

^e Ni-Cd battery: Nickel-Cadmium battery.

^f Na-S battery: Sodium-sulfur battery.

^g Li-ion battery: Lithium-ion battery.

^h SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage.

5. PLANLEGGING AV MIKRONETT

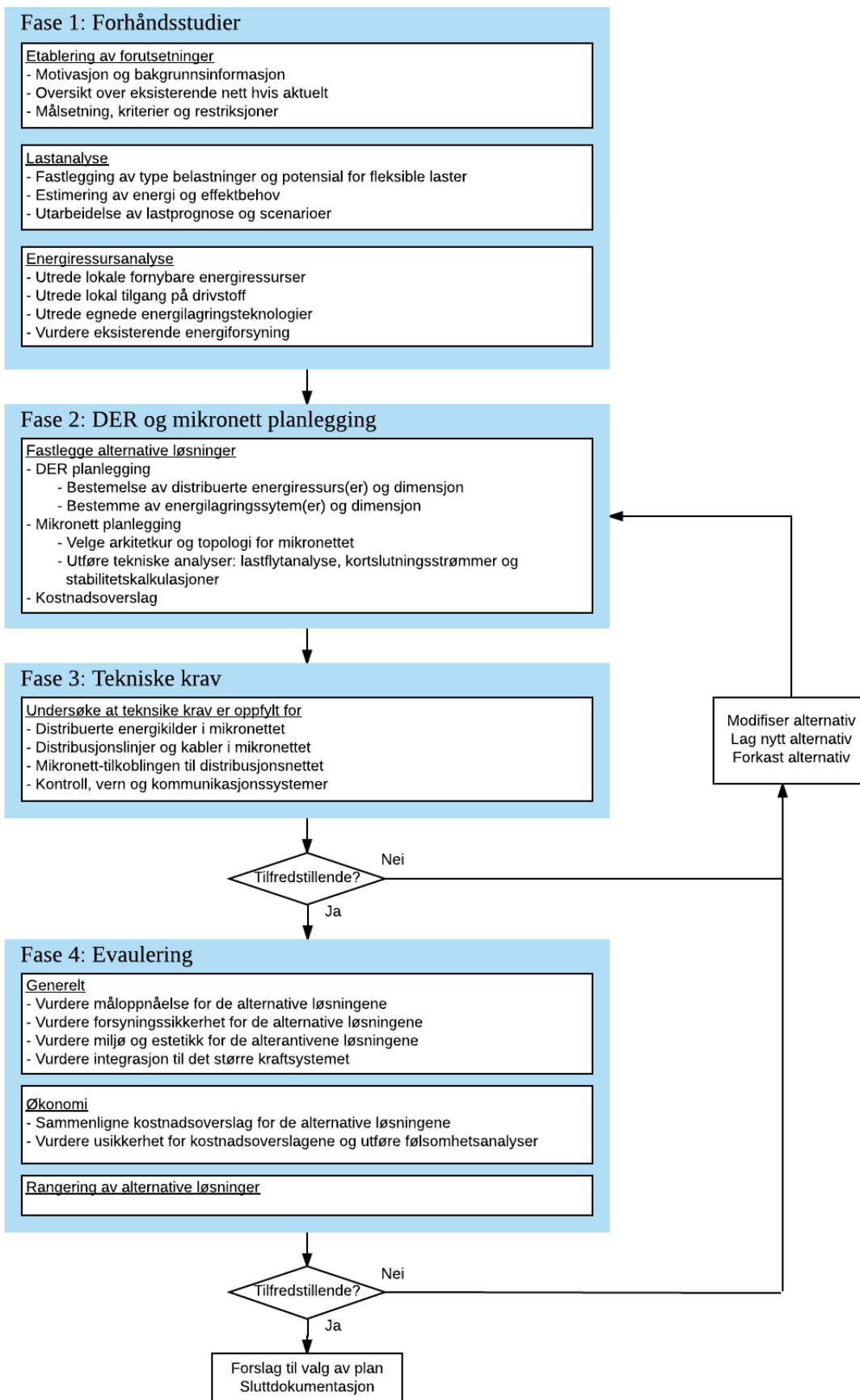
5.1 PLANLEGGINGSSYSTEMATIKK

Mikronett og kraftnett generelt må bygges, driftes og vedlikeholdes for å tilfredsstille kundebehov og rammevilkår. En forutsetning for en effektiv nettbygging og drift er gode planleggings- og beslutningsprosesser.

Planleggingssystematikken for mikronett er basert på SINTEF sin planleggingsbok for kraftnett og IEC/TS retningslinjer for planlegging av mikronett [54, 55, 56]. Planleggingssystematikk er ment å være generell og inkluderer punkt som ikke er aktuelle for alle mikronett da det er forskjell på planlegging av tilkoblede mikronett sammenlignet med isolerte mikronett. Planleggingssystematikken er vist i Figur 22 og prosessen er strukturert i fire faser:

1. Forhåndsstudier
2. DER og mikronett planlegging
3. Tekniske krav
4. Evaluering

Planleggingen avsluttes med å anbefale en løsning og utarbeide nødvendig dokumentasjon. Dokumentasjonen blir senere brukt til å prosjektere det valgte alternativet. De enkelte elementene i figuren er kort forklart i de etterfølgende kapitler.



FIGUR 22: SYSTEMATIKK VED PLANLEGGING AV MIKRONETT

5.2 FASE 1 - FORHÅNDSTUDIER

Første steg i å planlegge et mikronett er å kartlegge hvilke behov mikronettet skal innfri. I tillegg blir ressurser, produksjon og last analysert slik at mikronettet senere kan planlegges på en god måte.

5.2.1 BRUKSOMRÅDE TIL MIKRONETT

Som beskrevet i kapittel 3 kan mikronett tjene flere typer behov, for eksempel bedre leveringskvalitet og pålitelighet eller av økonomiske hensyn. De mest aktuelle bruksområdene til mikronett er:

- Mikronett som skal forbedre pålitelighet, og sikre energiforsyning for hele eller deler av lasten ved å gå over til øydriftet nett.
- Mikronett forsyner energi til rurale områder som for eksempel isolerte mikronett på øyer.
- Mikronett som skal redusere energikostnader ved å optimalisere ressurser (slik som energilagring, fleksible laster og generatorer) i mikronett som driftet tilkoblet kraftnettet.
- Mikronett som skal sikre energiforsyning i krisesituasjoner ved å optimalisere ressurser (slik som energilagring, fleksible laster og generatorer). Denne typen mikronett er bygd i områder som er spesielt utsatt for naturkatastrofer og/eller for å sikre forsyning til kritiske laster.

I dette planleggingsstadiet klassifiseres mikronettet som et isolert mikronett eller som et tilkoblet mikronett, avhengig av om det er muligheter for å koble mikronettet til kraftsystemet og hvor mye lokale energiresurser som er tilgjengelig i forhold til energibruk. I noen tilfeller kan det være mulig å tilkoble mikronettet, men ikke økonomisk forsvarlig. Andre avgjørende faktorer er krav til miljøvennlighet, spenningskvalitet, pålitelighet og økonomi i mikronettet. Klassifiseringen er et essensielt steg i planleggingsprosessen siden et isolert mikronett har andre krav og formål enn et tilkoblet mikronett.

5.2.2 LASTPROGNOSE

Det må utarbeides en lastprognose for fremtidig energiforbruk og effektforbruk. Dette legger fundamentet for planlegging av mikronettet og energiplanleggingsaktiviteter, slik som valg av energikilder og energilagring. Et tilkoblet mikronett kan kjøpe og selge energi når det er tilkoblet kraftnettet, og last og produksjonsprognosene er av noe mindre betydning. Men mikronettet må likevel dimensjoneres for å forsyne kritiske laster ved avbrudd.

DATAGRUNNLAG

Lastprognosen kan baseres på historiske lastdata hvor dette er tilgjengelig, eller på erfaringsdata for tilsvarende steder med relativt like værforhold i tillegg til sosiale og økonomiske faktorer.

Nødvendig data for lastprognosen er

- Demografiske og geografiske data
- Informasjon om elektrisk energi og energibalansering
- Typisk daglig lastkurve og topplast
- Historisk energiforbruk
- Type kunder og deres forbruk (husholdning, næring, industri)
- Fremtidige prosjekt i området
- Potensial for lastkontroll
- Analyse av endringer i lastkarakteristikk og innvirkningen av DER integrasjon på lastprognosen

LASTANALYSE

I lastanalysen blir det gitt prioritet til laster basert på om de er kritiske eller kan kobles ut uten vesentlig ulempe for forbruker. Ved å koble fra laster med lav prioritet i driftsituasjoner med lite tilgjengelig energi vil de kritiske lastene beholde sin forsyning. Laststyring kan spille en viktig rolle i å opprettholde energibalansen i mikronett med en høy andel varierende DER produksjon.

KLASSIFISERING AV LASTPROGNOSE

Lastprognoser er delt inn i langsiktige, mellomlangsigte og kortsiktige prognoser. Langsiktige prognoser har varighet på 1 år og lenger. Mellomlangsigte har varighet mellom 1 mnd og 1 år. Kortsiktige prognoser dekker timer, dager og ukentlige prognoser.

Langsiktige prognoser er nyttige til kapasitetsplanlegging og økonomiske beregninger og vurderinger. Spesielt viktige faktorer for god ressursplanlegging (DER produksjon og energilagring) er langsiktige energipriser, og total energi og effektbehov prognoser.

Kortsiktige prognoser inneholder informasjon om daglig topplast, verdier for lasten hver time eller halvtime av systemlasten, daglig og ukentlig systemlast. De kortsiktige prognoser brukes i hovedsak til å planlegge energibalansen i mikronettet på en optimal måte med tanke på operasjonsrestriksjoner og andre begrensninger.

KVALITETSSIKRING

Prognosen kan sammenlignes med prognoser fra andre lignende prosjekt for å for å forbedre presisjonen. Prognosen bør i tillegg ha høy nok margin til å tilrettelegge for fremtidige utvidelser.

Det er anbefalt å utarbeide flere lastprognoser ved bruk av forskjellige metoder og sammenligne resultatene. Det kan lages prognoser med høy, middels eller lav last. Basert på dette anbefales en prognose for bruk i planleggingen av mikronettet.

5.2.3 RESSURSANALYSE

Potensial til fornybar energiproduksjon og andre lokale energiresurser bør kartlegges. De vanligste energiresursene var beskrevet i kapittel 4. I ressursanalysen bør varierende fornybare ressurser kartlegges først, etterfulgt av kontrollerbare ressurser. I dette planleggingsstadiet bør informasjon om historiske meteorologiske data, geografiske forutsetninger og tilgjengeligheten på plass samles inn for å finne ressurspotensialet.

Valg av energiresurs bør tas basert på lokale energikilder, geografiske forhold, tilgjengelig teknologi og driftspålitelighet. I planleggingen av disse bør det vurderes

- tilgjengelighet på råmaterial
- driftskostnader, for eksempel kostnader til drivstoff og transport
- miljøpåvirkning

5.2.4 DATAINNSAMLING FOR Å BEREGNE ENERGIPRODUKSJON OG ENERGILAGRING

For å beregne energiproduksjonen og lage en prognose for energiproduksjonen kreves det historiske meteorologiske data og generatordata. Det bør innsamles data for flere typer generatorer med merkeeffekt, fysisk størrelse, karakteristikk-kurver og levetid. I tillegg bør det samles inn teknisk informasjon om aktuelle energilagringssystemer.

Hvis mikronettet er tilkoblet kraftsystemet og det er fastsatt type og størrelse på DER kan produksjonsprognoser utarbeides i denne fasen. For isolerte mikronett anbefales dette gjort i fase 2. Nøyaktig valg av generatorer og energilagringstas tas ved prosjektering av mikronettet.

5.3 FASE 2 – DG PLANLEGGING OG MIKRONETT PLANLEGGING

5.3.1 FASTLEGGING AV ALTERNATIVER

Basert på hvilke energikilder som er tilgjengelig kan det utarbeides et eller flere alternativer for mikronettet. Hvilke fornybare energikilder som er aktuelle i mikronettet bestemmes på ressursgrunnlaget som ble utarbeidet i fase 1. Andelen av fornybar energi i mikronettet er avhengig av hensikten til mikronettet, tilgjengeligheten på lokale fornybare energikilder, konstruksjonstilstand, investerings- og kostnadshensyn [56].

I arbeidet med å fastlegge alternativer for mikronett kan planleggingsverktøy brukes. Det mest brukte planleggingsverktøyet for Mikronett er Homer Energy, dette er et grundig planleggingsverktøy som tar hensyn til de fleste faktorer i planlegging av mikronett for å oppnå et godt og realistisk resultat.

Det finnes ofte mange alternative løsninger på et nettproblem. Som flytskjemaet indikerer vil antall alternativ som vurderes være dynamisk basert på den læring som finner sted gjennom planleggingsprosessen. Resultater fra ulike analyser og evalueringer vil gi ideer til nye alternativ og til å forkaste alternativ som ikke holder mål [54].

BESTEMMELSE AV DER KILDER

Bestemmelsen av type og størrelse av DG er avhengig av type mikronett. For et isolert mikronett må mikronettet være selvforsynt og valg av energikilder og dimensjon er dermed svært viktig. For tilkoblede mikronett er ikke dette like viktig og energikilder kan velges basert på pris og krav til selvforsyning ved feilsituasjoner.

ENERGILAGRING

Mikronett kan installere energilagring for å balansere varierende energiproduksjon og varierende last. Energilagring er spesielt viktig for isolerte mikronett og tilkoblede mikronett driftet i øydrift. Det finnes flere typer energilagring med forskjellige bruksområder basert på hvor lenge energien skal lagres, som beskrevet i delkapittel 4.2. Hvilken type energilagring, kapasitet og effekt bør bestemmes på grunnlag av krav til pålitelighet, spenningskvalitet og økonomiske hensyn. En analyse av energiprofilene for last og produksjon er nyttig for å bestemme kravene til energilagringssystemet.

BALANSERING AV ENERGIPRODUKSJON OG ENERGIBRUK

For isolerte mikronett må mikronettplanleggerne forsikre seg om at balansen mellom generasjon og forbruk er tilfredsstillende for alle forventede scenarier. For tilkoblede mikronett er ikke energibalansen like viktig siden overskudd/underskudd kan dekkes av kraftnettet. Likevel må energiproduksjonen og energilagring være så stor at den kan dekke kritiske laster over en bestemt tid.

Energibalansen bør først og fremst løses ved å bruke lastprognoser og finne maksimum kapasitet av fornybar energi. Deretter kan regulerbare energikilder bestemmes, dette er ofte biodrivstoff eller fossile energikilder som diesel eller naturgass. Kriterier for å velge regulerbare energikilder er pålitelighet, kostnadseffektivitet, tilgjengelighet på lokasjonen og transportkostnader, i tillegg til kontrollerbarhet og kapasitet. De regulerbare energikildene bestemmes av hensyn til usikkerheten til fornybare energikilder der målet er å maksimere pålitelighet og økonomi [56].

Optimeringsmetoder kan benyttes for å bestemme størrelse på energilagring og energiproduksjon for å minimere investeringskostnad med tanke på kapitalkostnad, operasjon, vedlikeholdskostnader og

reduksjon av drivstoffkostnader og klimautslipp (som følge av utbytting av fossile energikilder der det er relevant). Dette kan løses ved et lineærprogrammeringsproblem og energiproduksjonsstørrelse kan optimeres for henholdsvis sol og vind ved hjelp av historiske data [22].

Etter mikronettet er bygd bør energibalansen periodisk gjennomgås og analyseres der influensen av fornybar energi, elbiler, energilagring og annet vurderes.

5.3.2 MIKRONETT KRAFTSYSTEM PLANLEGGING

SPENNINGSNIVÅ

Valg av spenningsnivå innad i mikronettet skal bestemmes i henhold til IEC 60038.

Et tilkoblet mikronett bør designes slik at spenningsnivået gir en optimal energiutveksling med distribusjonsnettet med tanke på potensielt maksimum energiutveksling i hver retning. Grensen for lastflyt i POC må spesifiseres av netteier.

VALG AV ARKITEKTUR OG TOPOLOGI

Valg av arkitektur og topologi for mikronettet avhenger av flere forhold. De forskjellige arkitekturene var beskrevet i delkapittel 3.4.1.

KALKULASJONER AV ELEKTRISKE PARAMETER

Følgende kalkulasjoner/simuleringer bør utføres:

- Lastflytanalyse: Lastflyt for typiske operasjonsmoduser og beregning av spenninger
- Kortslutningsstrømmer
- Stabilitetskalkulasjoner

5.4 FASE 3 - TEKNISKE KRAV

5.4.1 TEKNISKE KRAV FOR DG I MIKRONETT

GENERELT

Dette avsnittet skal gi informasjon om grunnleggende tekniske krav for DG i mikronett. Prinsipp og tekniske krav for DG tilkoblet distribusjonsnett er spesifisert i IEC/TS 62786, og innholdet i denne er gjeldene for DG i mikronett når mikronettet er tilkoblet distribusjonsnett. Generelle spesifikke DG krav for alle driftsmodus for mikronett er gitt i IEC/TS 62898-2, men forskjellige land kan ha lokale eller nasjonale krav for DG.

DG i mikronett kan være synkrongeneratorer, asynkrongeneratorer eller konverterbaserte generatorer. Synkrongeneratorer kan kobles direkte til AC-mikronett og de opererer vanligvis i droop-mode. Vanlige kontrollmetoder for konverterbaserte generatorer er kontroll av injisert aktiv og reaktiv effekt og kontroll av spenning og frekvens i droop-mode (P-f, Q-V).

I henhold til IEC/TS 62786 er vanlige funksjoner for DG kontroll:

- Spenning- og frekvenskontroll muligheter
- Aktiv og reaktiv effekt regulering
- Frakopling og gjeninnkobling til mikronettet
- Immunitet mot frekvensforandringer
- Fault ride through capability

DG i mikronett skal tilpasse seg strenge operasjonsforhold i isolerte mikronett, i øydrift og i transaksjonen mellom operasjonsmodusene.

TEKNISKE KRAV FOR DG I TILKOBLEDE MIKRONETT

Når mikronettet er tilkoblet distribusjonsnett kan mikronettets frekvens og spenning være regulert av det tilkoblede distribusjonsnett. DG må oppfylle lokale og nasjonale krav, i tillegg til tekniske krav i IEC/TS 62786.

TEKNISKE KRAV FOR DG I ISOLERTE MIKRONETT OG I TILKOBLEDE MIKRONETT DRIFTET I ØYDRIFT

I disse operasjonsmodusene skal mikronettet være selvforsynt enten i begrenset tidsperiode eller permanent. Laster i mikronettet er dermed forsynt bare av DG og energilagring, og størrelsen på DG bør være stor nok til å sørge for normal operasjon av forhåndsbestemte laster, for noen mikronett bare kritiske laster. I disse operasjonsmodusene skal det være minst en (eller en gruppe av) regulerbare DG som kontrollerer frekvens og spenning.

I normalt tilkoblede mikronett kan spenningskvaliteten reduseres i øydrift siden mikronettet ikke lenger er støttet av distribusjonsnett. I disse tilfellene kan innstillinger for vern av DG kan reduseres slik at mikronettet kan fortsette å levere energi til kritiske laster. Mikronettet skal overvåke spenning, frekvens og fasevinkel for distribusjonsnett slik at mikronettet kan kobles til distribusjonsnett igjen når disse er tilbake til normalen.

5.4.2 TEKNISKE KRAV FOR DISTRIBUTJONSLINJER I MIKRONETT

Hvilke lover mikronettet sine distribusjonslinjer følger er avhengig av eierformen og spenningsnivå til mikronettet. For mikronett som ikke er eid av nettselskap og for eksempel dekker borettslag, sykehus eller universitet følger mikronettet *forskrift om lavspenningsanlegg*.

5.4.3 TEKNISKE KRAV FOR MIKRONETT-TILKOBLINGEN TIL DISTRIBUTJONSNETTET

Dette avsnittet gjelder tilkoblede mikronett. Tilkoblingen av mikronettet til distribusjonsnett skal ikke skade leveringskvaliteten og stabiliteten til operasjonen av distribusjonsnett. Etter mikronettet er tilkoblet skal spenningskvaliteten ved POC møte spesifiserte krav av IEC standarder.

Bryteren ved POC skal kunne opereres manuelt eller automatisk. Brytekapasiteten bestemmes av den største av de to verdiene: maksimum kortslutningsstrøm ved POC når mikronettet er driftet isolert eller maksimum kortslutningsstrøm fra distribusjonsnett ved POC.

Mikronettet sin jording skal være kompatibel med jordingssystemet til distribusjonsnett. Valg av jording til mikronettet påvirker påliteligheten og sikkerheten i mikronettet. Mikronettet må drives på en sikker måte i tilkoblet og isolert modus, og ved overføring mellom modusene.

Ved tilkobling til distribusjonsnett må mikronettet tilfredsstille krav til fault-ride-through-kurve slik som produksjon tilkoblet distribusjonsnett etter gjeldene lovverk og krav fra det aktuelle nettselskapet som mikronettet skal tilkobles [57].

5.4.4 TEKNISKE KRAV FOR VERN, KONTROLL OG KOMMUNIKASJONSSYSTEMER

VERN

Vern av mikronett kan være forskjellig fra tradisjonelle distribusjonsnett siden feilstrømmene er forskjellige. I mikronett hvor DG bare er av konverterbasert type og ikke synkronmaskiner må kortslutningsstrømmer kalkuleres for å avgjøre om vernene vil løse ut eller ikke.

I tilkoblede mikronett vil feilstrømmen være forskjellig mellom operasjonsmodusene. I tilkoblet modus vil kortslutningsstrømmen være større siden både distribusjonsnett og DG i mikronettet bidrar. I isolert modus vil bare DG bidra til feilstrømmer. For konverterbaserte DG er feilstrømmen 1,5-2 ganger merkestrøm og feilstrømmen er derfor mye mindre. De to modusene bør ha forskjellige verninnstillinger.

KONTROLL

Kontrollsystemet i mikronett ble beskrevet i delkapittel 3.3.2. Kontrollsystemet skal sørge for kontinuerlig og økonomisk drift av mikronettet. Tilkoblede mikronett skal kunne sømløst gå fra tilkoblet til isolert modus. Det skal også kunne utveksle informasjon med distribusjonsnett som det er tilkoblet.

KOMMUNIKASJON

Mikronettet er avhengig av kommunikasjon mellom DG og mikronettkontrolleren. I tillegg til kommunikasjon med distribusjonsnett. Kommunikasjonsprotokoller for mikronett bør følge IEC 61850. Kommunikasjon mellom mikronettets mikronettkontroller og distribusjonsnett bør følge kravene i IEC 61968 og IEC 61970 [56].

5.5 FASE 4 - EVALUERING

5.5.1 GENERELT

FORSYNINGSSIKKERHET

En evaluering av forsyningssikkerheten bør utføres. Den forventede forsyningssikkerheten kan finnes ved å studere mulige feil og konsekvenser av disse i mikronettet. Feil kan være relatert til distribusjonsnett, kommunikasjon og IT systemer.

MILJØ OG ESTETIKK

Miljøkonsekvensene til utbyggingen av mikronettet bør vurderes mot nytteverdien til mikronettet. Hvor store miljøkonsekvenser kan godtas for å bygge ut mikronettet avhenger av lokale forhold og nytteverdien til mikronettet.

FREMTIDIGE UTVIDELSER

Det bør vurderes hvor lett det er å gjøre fremtidige utvidelser av mikronettet.

INTEGRASJON TIL DET STØRRE KRAFTSYSTEM

I planleggingen av isolerte mikronett bør det vurderes om mikronettet kan bli tilkoblet kraftsystemet i fremtiden [56].

5.5.2 ØKONOMI

Lønnsomheten til prosjektet kan evalueres ved å kalkulere kostnader og fordeler. I en teknisk-økonomisk analyse spiller de økonomiske egenskapene til de ulike alternativene en sentral rolle. I planleggingsprosessen ble det derfor etablert nødvendig kostnadsgrunnlag for de ulike alternativene. Usikkerhet i kostnadsgrunnlaget til de forskjellige alternativene bør vurderes og det bør vurderes å utføre en følsomhetsanalyse for å se innflytelsen til endrede variabler (for eksempel drivstoffkostnad) på totalkostnaden. Prosjektet bør også sees fra et samfunnsøkonomisk perspektiv.

5.5.3 SAMLET VURDERING OG RANGERING AV ALTERNATIVE LØSNINGER

De alternative løsningene bør rangeres basert på hvilken løsning som er billigst, men det må også tas hensyn til:

- Usikkerhet i underlagsdata og hvor fleksible de ulike planene er med tanke på usikkerheten.
- Forhold som ikke er direkte representert i den økonomiske modellen, slik som for eksempel miljøkonsekvenser eller teknisk innovasjon.

Resultatet fra denne vurderingen vil være et forslag til valg av plan, og sluttdokumentasjon for planen bør utarbeides [54].

6 PLANLEGGING AV ET PRAKTISK MIKRONETT

6.1 BAKGRUNN OG MÅLSETNING

Givær er en øy tre mil utenfor Bodø som ikke er tilkoblet kraftnettet. Givær har rundt 18 fastboende, hvorav de fleste er bosatt på Husøya. Hovednæringen er fiske, og øygruppa har daglig hurtigbåtforbindelse til Bodø [58]. Nordlandsnett har ansvar for elforsyningen på øyen, og den er basert på dieselaggregat. Dette er en kostbar løsning for Nordlandsnett og den er lite miljøvennlig.

Målsetningen for prosjektet er å planlegge en mer fornybar energiforsyning for øygruppen Givær i Bodø kommune som reduserer kostnader og miljøpåvirkning av el-forsyningen. Analyseperioden settes til 25 år siden investeringer i produksjonsenheter og nett generelt har lang levetid.



FIGUR 23: GIVÆR. FOTO: BODØ KOMMUNE [59]

6.2 METODE

Mikronettet blir planlagt ved hjelp av programvaren Homer Energy som brukes til å finne optimale løsninger i planleggingsfasen. Homer Energy er den ledende programvaren globalt for optimalisering av mikronett. Det kombinerer tradisjonelle- og fornybare energikilder, energilagring og laststyring for å planlegge et kosteffektivt og pålitelig mikronett. I tillegg til elektrisitetsforsyning kan Homer modellere termiske laster og energikilder. Programmet tar hensyn til restriksjoner som er satt og lasten som skal forsynes.

Det er mulig å utføre simuleringer for isolerte mikronett og tilkoblede mikronett. Det er i tillegg mulighet til å vurdere lønnsomheten i å koble mikronettet til kraftnettet basert på investeringskostnad dette utgjør og energiprisen på markedet.

6.3 PLANLEGGING FASE 1 - FORHÅNDSTUDIER

6.3.1 BRUKSOMRÅDE TIL MIKRONETT

Siden øyen Givær ikke er tilkoblet kraftnettet blir mikronettet på Givær planlagt som et isolert mikronett. Det isolerte mikronettet sikter på å tilby en kontinuerlig og pålitelig energiforsyning.

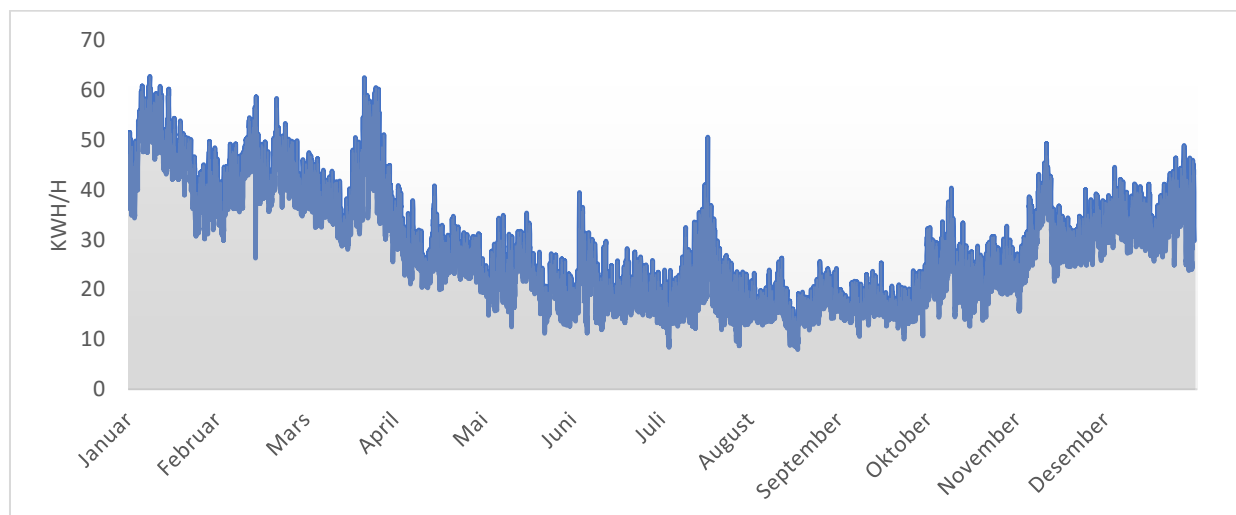
6.3.2 LASTPROGNOSE

Det utarbeides en lastprognose for fremtidig energiforbruk og effektforbruk. Dette legger fundamentet for planlegging av mikronettet og energiplanleggingsaktiviteter, slik som valg av energikilder og energilagring.

DATAGRUNNLAG

Lastprognosen for Givær er basert på historiske lastdata. På Givær finnes det 6 hytter og fritidsboliger, 11 boliger, et offentlig bygg og to næringsforbrukere. Boligene utgjør den største delen av lasten. Siden dette prosjektet har fokus på planmetodikken, gjøres det en forenkling og det antas ingen fremtidige prosjekter i områder og at energiforbruket holdes konstant. Før et eventuelt mikronett blir bygd bør det utarbeides en mer nøyaktig lastprognose for Givær, gjerne inkludert spørreundersøkelser hos forbrukerne om deres fremtidige planer; ønsker de for eksempel bytte fra vedfyring, oljekjel, ol. til varmepumpe eller andre elektriske energikilder vil dette ha betydning.

Lasten i mikronettet er beregnet lik elproduksjonen fra aggregat fra 2016 i simuleringene. Dataene har timesoppløsning og gir informasjon om effekttopper og månedlige forskjeller. Årlig energiforbruk i 2016 var 250 000 kWh og høyeste toppverdi var 63 kW.



FIGUR 24: HISTORISKE DATA FOR ELPRODUKSJON I 2016 FRA AGGREGAT I GIVÆR

I tillegg er det oppgitt data for årlig energiforbruk fra kundene som er tilkoblet nettet som vist i Tabell 25 i vedlegg.

LASTANALYSE

Lasten på Givær består hovedsakelig av boliger og fritidsboliger. Det er stort sprik på hvor mye energi hver bolig bruker (fra 6000 kWh til 21000 kWh). Trolig bruker boligene med lavest energiforbruk andre energikilder enn elektrisitet til oppvarming. Hvilken energikilde som brukes til oppvarming er viktig for potensialet for fleksible laster, hvor potensialet for fleksible laster er størst for boliger som bare benytter elektrisitet til oppvarming. Det bør i tillegg vurderes om boligene vil beholde sine oppvarmingsmetoder eller om flere/færre forbrukere ønsker å bruke elektrisk oppvarming, siden dette har stor innvirkning på totalforbruket. De boligene som har flere oppvarmingsmuligheter kan utgjøre en stor ressurs i mikronettet siden de kan bytte energikilde ved lite tilgjengelig energi. Det er en mulighet å bygge ut et nærvarmeanlegg til oppvarmingsformål, der for eksempel restvarme fra en kombinert varme og kraftverk kan utnyttes.

Givær består av få kunder og variabiliteten i energiforbruket er derfor stor. Det kan vurderes hva kundene mener er akseptabelt av energiunderskudd og endring av vaner. Er det for eksempel greit at de bare vasker klær på dager med mye tilgjengelig energi? Hvis man samarbeider med kundene vil det gi de beste løsningene siden mye fleksibilitet kan utnyttes. Avhengig av omfang av utnyttelse av fleksibilitet kreves det styringssystemer (smarte hus), økt forbrukerbevissthet og oppgraderinger av de elektriske installasjonene. Laststyring kan spille en viktig rolle i å opprettholde energibalansen i mikronett med en høy andel varierende DER produksjon.

Det er ikke gitt prioritert til kritiske laster i denne lastanalysen for Givær. Dette er utelukket da dette anses som mest aktuelt for tilkoblede mikronett siden det da er for kostbart i forhold til nytteverdi og dimensjonere et mikronett til å være helt selvforsynt.

LASTSCENARIOER

I planleggingen videre blir tre forskjellige scenarioer for last vurdert:

- Scenario 1 benytter 100 % ikke-fleksibel last som er basert på historiske data fra 2016.
- Scenario 2 benytter 60 % ikke-fleksibel last og 40 % fleksibel last (dvs at den ikke må forsynes på et gitt tidspunkt og kan vente til energi er tilgjengelig i løpet av dagen). Dette er gjort ved at dataene for lastforbruk blir skalert ned fra gjennomsnittlig 677 kWh/dag til 400 kWh/dag, og det er lagt inn en fleksibel last med gjennomsnittlig 277 kWh/dag slik at det totale energiforbruket forblir likt. Homer gir bare mulighet for å legge inn fleksibel last per måned, og anser energiforbruket konstant for hver dag igjennom hver måned. Det er derfor lagt inn et elektrisitetsforbruk som tilsvarer 40 % av gjennomsnittlig daglig elektrisitetsforbruk for hver måned. Dermed varierer elektrisitetsforbruket gjennom året, men nøyaktigheten er redusert noe og variasjonen i elektrisitetsforbruk er mindre fra dag til dag.
- Scenario 3 benytter 60 % ikke-fleksibel last og implementerer en termisk last som er skalert til 44 % av historisk elforbruk. I dette alternativet utnyttes restvarme fra kraftproduksjon i et biokraftverk for å varme opp boliger. Det var i tillegg ønsket å utnytte fleksibilitet i varmelagring, men dette er ikke mulig i dagens versjon av Homer Energy.

KVALITETSVURDERING

Lastscenariene er i hovedsak laget for å illustrere metodikk og for å utarbeide flere forskjellige alternativer for energiforsyning av Givær. Lastscenariene har betydelige forenklinger og usikkerhetsmoment, men selv om lastscenariene er mangelfulle gir de verdifull informasjon når resultatene sammenlignes.

Størst usikkerhet er knyttet til alternativ 3 hvor termisk energi er benyttet til oppvarming i stedet for elektrisitet. Det er ikke kartlagt hvor stort oppvarmingsbehovet er for boligene eller hvor stor kostnaden for å bygge ut infrastruktur til et nærvarmeanlegg er. I tillegg var det heller ikke mulig å utnytte fleksibiliteten i varmelagring i Homer, noe som kunne hatt stor betydning for mikronettet. For alternativ 2 er det ikke undersøkt hvor stor andel fleksibel last er praktisk gjennomførbart, likevel ansees 40 % som et beskjedent anslag.

6.3.3 RESSURSANALYSE

I dette planleggingsstadiet kartlegges lokale energiresurser. Homer Energy henter månedlige gjennomsnittsdataba for vind, sol og temperatur fra *NASA surface meteorology and solar energy database*. Disse dataene er kvalitetssikret ved å sammenligne med andre kilder.

SOL

Givær har en gjennomsnittlig solinnstråling på 2,34 kWh/m² per dag. Det er veldig lite solinnstråling om vinteren siden Givær ligger langt nord. Utenom lav solinnstråling har Givær gode forhold for solceller siden solceller har høyere virkningsgrad i kaldt vær. Figur 37 i vedlegg viser solressursen for Givær. Dataene er hentet fra *NASA Surface Meteorology and Solar Energy database* og er basert på gjennomsnittsverdier over en 22 årsperiode fra juli 1983 til juni 2005.

VIND

Givær har gode vindressurser, vist i Figur 38 i vedlegg. Det er mer mest vind om vinteren og minst om sommeren. NASA oppgir en årlig gjennomsnittlig vind på 7,36 m/s ved 50 m høyde og fra NVE sitt vindkart ligger Givær i en sone med årlig middelvind på 8.0-8.5 m/s ved 80 m høyde [60].

TEMPERATUR

Temperatur er ingen ressurs i seg selv, men produksjon fra energikilder og energilagring i batterier er avhengig av temperatur, og temperatur er derfor med i ressursgrunnet. Givær har en gjennomsnittlig temperatur på 3,82 grader, og temperaturvariasjonen gjennom året er vist i Figur 39 i vedlegg.

VANNKRAFT

Givær ikke har vannkraftressurser.

BØLGEKRAFT

Figur 13 i delkapittel 4.1.4 om bølgekraft viser at Givær ligger i en sone med lave bølgeenergiressurser. Bølgeenergi er en dyr teknologi, selv for steder med gode bølgeenergiressurser, så det antas at det ikke er lønnsomt på Givær uten videre undersøkelser.

TIDEVANN

Givær ligger sør for et område med store tidevannsressurser som vist i Figur 14 i kapittelet om tidevannsenergi. Det er mulig at Givær også har tidevannsressurser, men det er usannsynlig at disse

er økonomiske å bygge ut. Spesielt gunstige steder for tidevann er sund hvor store vannmasser kan skyte fart, dette finnes i liten grad på Givær.

DRIVSTOFF

Drivstoffene som benyttes i dette prosjektet er diesel og biodiesel. Egenskaper og pris for disse drivstoffene er listet i Tabell 12. Prisen er satt høyere enn markedspris siden drivstoffene må transporteres til Givær og dette utgjør en kostnad. Det er også en miljøpåvirkning relatert til transport av drivstoffet.

TABELL 12: EGENSKAPER TIL DRIVSTOFF

	Lower heating value (MJ/kg)	Density (kg/m ³)	Carbon content (%)	Sulfur content (%)	Feul price (\$/l)
Diesel	43.2	820	88	0.4	3
Biodiesel	38.5	880	0	0	3

4.3.4 INFORMASJON OM GENERATORER OG ENERGILAGRING

VINDTURBIN

Basert på vinddata og energiforbruk for Givær velges det å ta utgangspunkt i å bruke en "generic" 10 kW vindturbin. Når Homer Energy har optimert antall vindturbiner kan det eventuelt byttes til færre turbiner med større effekt for å redusere kostnader. Vindturbinen på 10 kW har en anslått kostnad på 50 000 \$, noe som ligger innenfor prissjiktet IRENA gir for små vindturbiner [34]. Data for den valgte vindturbin er vist i Figur 40 i vedlegg.

SOLCELLER

Det blir brukt en "generic" type solceller der størrelse på anlegget blir optimert med 1 kW intervaller. Data for solcellene er vist i Figur 41 i vedlegg. Prisen på solcelleanlegg har gått mye ned de siste årene drevet av prisfall på komponentene og økt konkurranse. Tall fra NREL viser at kommersielt solcellenalegg på 200 kW kostet 2,13 \$/W i første kvartal 2016 [61]. Solcelleanlegg for boliger kostet på samme tid 2,93 \$/W. Siden solcellemarkedet er mindre i Norge enn i USA er trolig kostnaden høyere her, og en pris på 3 \$/W er brukt i simuleringene.

KONVERTER

Konverteren kobler AC og DC bussen sammen. Størrelsen til konverteren blir optimert av Homer til å passe systemet generelt. Data for konverteren er vist i Figur 42 i vedlegg.

DIESELGENERATOR

Størrelsen på dieselgeneratoren blir automatisk satt av Homer Energy til å passe systemet. Data for dieselgeneratoren med karakteristikk er vist i Figur 43 i vedlegg.

GASSTURBIN MED VARMEGJENVINNING

Til alternativ 3 brukes en gassturbin med varmegjenvinning som er fyrt av biodiesel. Størrelsene 25 og 50 kW vurderes. Spesifikasjonene til gassturbinen er vist i Figur 44 i vedlegg.

OLJEFYR DRIFTET AV BIODRIVSTOFF

En oljefyr benytter et drivstoff (i dette prosjektet et biodrivstoff) til å produsere varme. Homer prioriterer å forsyne elektriske laster og nedprioriterer termiske laster, og programmet gjenvinner bare varme fra generatorer som ellers produserer elektrisitet. På grunn av denne prioriteringen kreves det en oljefyr til å forsyne den termiske lasten når andre generatorer ikke gjør det. Med andre ord behandler Homer oljefyren som en backup-kilde som forsyner når andre kilder ikke gjør det [62]. Spesifikasjonene til oljefyren er vist i Figur 45 i vedlegg og den benytter biodiesel som drivstoff.

HYDROGEN SOM ENERGIKILDE OG ENERGILAGRING

Hydrogen ble også vurdert inkludert i mikronettet på Givær, hvor Hydrogen kan benyttes enten ved å transportere hydrogenet til Givær eller ved å benytte overskuddskraft til å produsere det på øyen. Å transportere hydrogen til Givær er en dårlig løsning da hydrogen som er produsert på en miljøvennlig måte er kostbar og hydrogen er krevende å transportere. Å benytte overskuddskraft til å produsere energi på øyen kan være en grei løsning, men dette er en løsning som er på forskningsstadiet og Givær er ikke ideelt til et forskningsprosjekt på dette siden Givær har stabilt mye vind gjennom hele året og behovet for langtidslagring av energi er lavt. Denne løsningen har også lav systemvirkningsgrad og er kostbar. Av disse grunnene ble hydrogen utelukket videre i planleggingen av mikronett for Givær.

ELEKTRISK ENERGILAGRING

Mikronettet på Givær sin størrelse gjør at batteri er den energilagringsteknologien som er mest egnet, og batteri av typen Li-Ion er valgt. Sammenlignet med andre typer batterier har Li-Ion batteriene har gode egenskaper som lav vekt, høy levetid og høy lagringskapasitet. Data for batteriet er vist i Figur 46 i vedlegg. I 2015 var markedsprisen for Li-Ion batterier mellom 300-500 \$/kWh [63]. Prisen for batteriene er derfor antatt å være 400 \$/kWh i planleggingen.

TERMISK ENERGILAGRING

En termisk lastkontroller gjør om elektrisk til overskuddsproduksjon til termisk energi slik at energien kan brukes til å forsyne termiske laster [64]. Homer Energy gir ikke mulighet til å utnytte termisk lagring av energi. Data for denne er vist i Figur 47 i vedlegg.

6.4 FASE 2 – DER PLANLEGGING OG MIKRONETT PLANLEGGING

6.4.1 ETABLERING AV ALTERNATIVE LØSNINGER

Mikronettet på Givær er driftet av dieselgeneratorer, men det ønskes en mer fornybar løsning. På Givær er aktuelle fornybare energiresurser sol og vind. Med variable energikilder slik som sol og vind trengs det energilagring og en dispatchable energikilde for å oppnå energibalanse. Det utarbeides flere alternative løsninger for å forsyne Givær som vist i Tabell 13. Alle løsningene vurderer om det er lønnsomt med sol og vind siden dette er fornybare energikilder med få negative sider. Batterilagring er også vurdert brukt i alle løsningene. Som tidligere nevnt var også hydrogen vurdert som energilagring, men dette alternativet er ikke videre utredet. I alternativ 3 benyttes en gassturbin med varmegjenvinning og deler av lasten er termisk.

TABELL 13: ALTERNATIVE LØSNINGER FOR ENERGIFORSYNING AV GIVÆR

	Energikilder				Energilagring	Type last	
	Sol	Vind	Diesel- aggregat	Gassturbin Med CHP	Batteri Li-Ion	Fleksibel last	Termisk Last
Alternativ 1	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja	Nei	Nei
Alternativ 2	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja	Ja	Nei
Alternativ 3	Ja	Ja	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja

I de forskjellige alternativene blir programmet HOMER Energy brukt til å optimalisere størrelse på DER generatorer og energilagring i mikronettet for å få den billigste løsningen med satte restriksjoner. De viktigste restriksjonene er

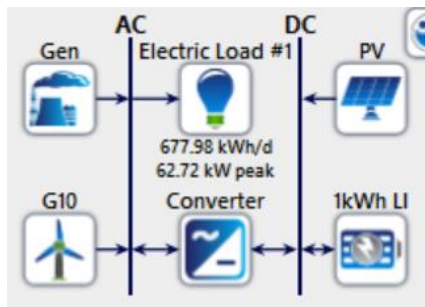
- energiforbruket som skal møtes
- investerings-, O&M- og drivstoffkostnader
- lokale energiresurser og karakteristikk til generatorer

Økonomiske parameter er vist i Figur 48 og systemrestriksjoner er vist i Figur 49, begge figurer finnes i vedlegget.

ALTERNATIV 1

SYSTEMDESIGN

Dette alternativet inkluderer energi fra sol, vind og dieselaggregat. Til energilagring ble flywheel og batteri vurdert, hvor batteri var den beste løsningen på grunn av økonomi og muligheter for langtidslagring. Dieselaggregatet velges som regulerbar energikilde av økonomiske og praktiske årsaker, hovedsakelig på grunn av at det allerede er dieselaggregat på Givær. Dieselaggregat er også lett å implementere i Homer Energy og det er en optimeringsfunksjon som finner riktig dimensjon for dieselaggregatet for å oppnå drift ved høyest mulig virkningsgrad. Diesel har også fordelen av å ha høy energitetthet, og er dermed lettere å transportere til Givær enn andre drivstoff. Dieselaggregatet kan enkelt byttes ut med en annen regulerbar generator med fornybar energikilde basert på resultatet av planleggingen.



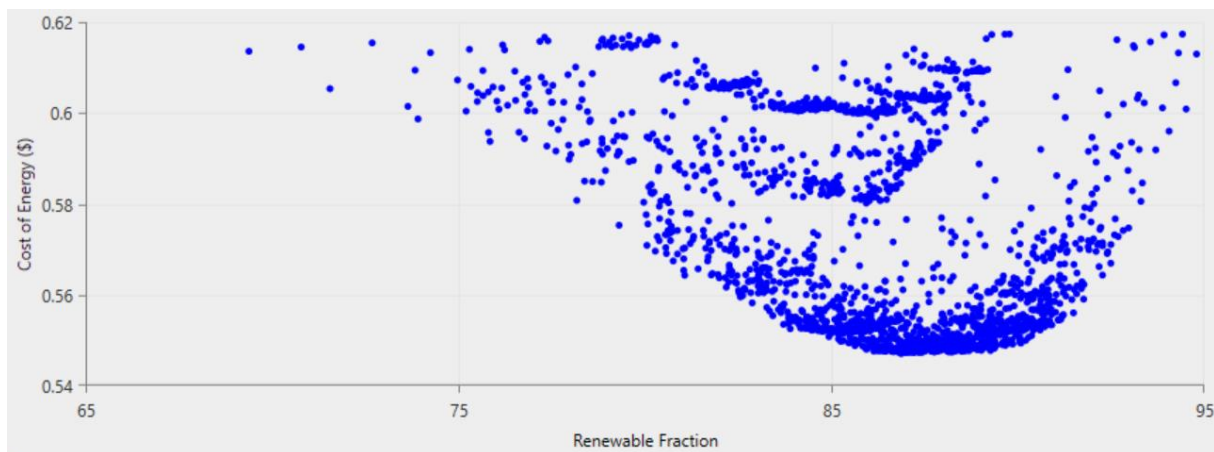
FIGUR 25: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 1

Figur 26 viser resultatet fra optimeringssimuleringen som inkluderer de valgte energiressursene og energilagringsteknologiene. Den billigste løsningen er 87 % fornybart med energikostnad på 0,547 \$/kWh, og denne løsningen blir valgt som alternativ 1. Løsningen har 72,8 kW PV, 100 kW vindturbiner og 69 kW dieselaggregat, samt 517 kWh batteri. Energiforbruken for løsningene som er 100 % fornybare er 1,11 \$/kWh eller 1,55 \$/kWh.

Optimization Results														
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.														
Architecture										Cost				System
			PV (kW)	G10	Gen (kW)	1kWh LI	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	
			72.8	10	69.0	517	58.1	LF	\$0.547	\$1.75M	\$59,787	\$977,164	87	
				14	69.0	616	85.2	LF	\$0.600	\$1.92M	\$70,573	\$1.01M	86	
			262		69.0	607	56.9	LF	\$0.940	\$3.01M	\$148,933	\$1.08M	50	
			92.9	13	69.0		36.6	CC	\$0.999	\$3.19M	\$171,779	\$974,099	50	
				21	69.0			CC	\$1.06	\$3.40M	\$179,015	\$1.08M	50	
			197	38		678	94.6	CC	\$1.11	\$3.52M	\$56,183	\$2.79M	100	
				70		677	93.8	CC	\$1.55	\$4.93M	\$87,405	\$3.80M	100	

FIGUR 26: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY

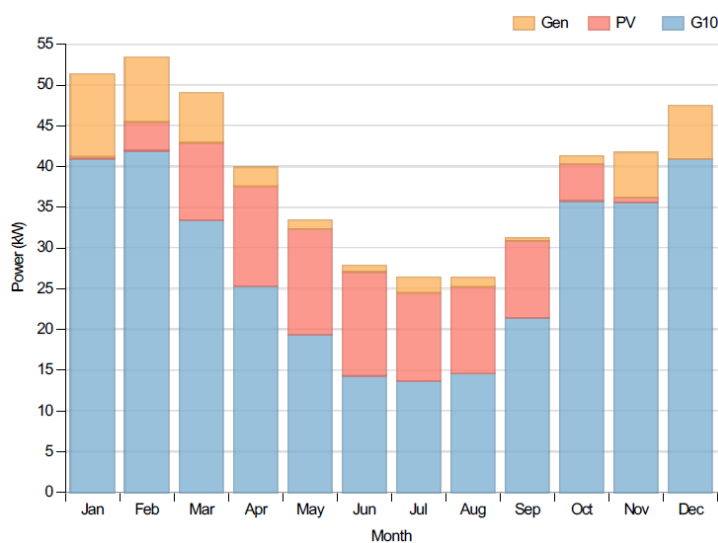
Figur 27 er et optimaliseringsplot som viser energikostnad og fornybarprosent for alle simulerte alternativ. Den billigste løsningen er 87 % fornybar, men energikostnaden øker lite opp til cirka 90 %. Dermed kan det gjøres en vurdering om det er ønskelig å øke fornybarprosenten ytterligere mot en liten kostnadsøkning.



FIGUR 27: ENERGIKOSTNAD OG FORNYBARPROSENT FOR ALLE TILFREDSTILLENDE SIMULERTE LØSNINGER

ENERGIPRODUKSJON

Energiproduksjonen fra de forskjellige energikildene hver måned er vist i Figur 28. Det produseres mest energi fra vind, noe som er naturlig siden Givær har gode vindressurser. PV produserer cirka 10 000 kWh/mnd fra april til august, og dette passer godt overens med at det er lite vind om sommeren. Diesellaggregatet produserer energi når det ikke er nok energi fra sol, vind og energilagring. Det produserer mest energi på dager med lite vind om vinteren.



FIGUR 28: GJENNOMSNIITLIG MÅNEDLIG ENERGIPRODUKSJON FRA PV, AGGREGAT (GEN) OG VIND (G10)

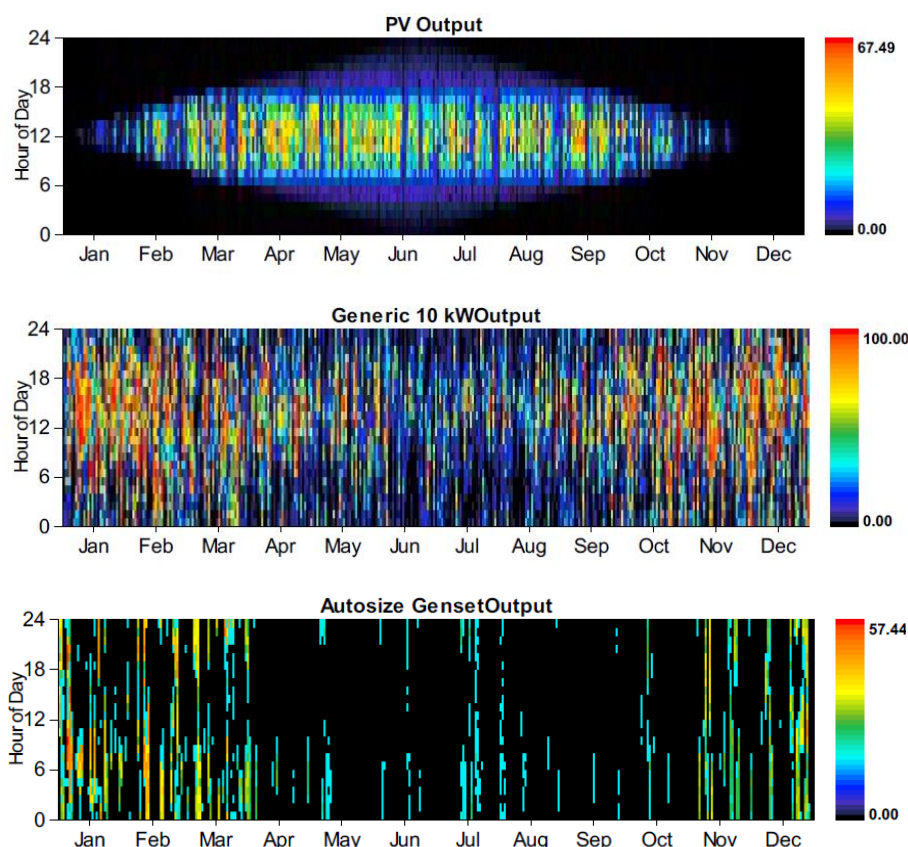
Tabell 14 viser størrelsen til de forskjellige generatorene med kapasitetsfaktor, total produksjon og energikostnad. Totalt blir det produsert 377 MWh per år, hvorav 250 MWh er årlig energiforbruk, 83 MWh er overskuddsproduksjon og resten er tap. Energiforbruket for generatorene i mikronettet er vesentlig høyere enn energiprisen generelt for kraftnett. De fornybare energikildene er billigst i mikronettet.

TABELL 14: OPPSUMERING AV ENERGIPRODUKSJON, GENERATORSTØRRELSE OG ENERGIKOSTNAD

	Solceller	Vindgeneratorer	Dieslgenerator
Merkekapasitet	73 kW	100 kW	57 kW
Capacity factor	10 %	28 %	

Operasjonstimer	4371 timer	7495 timer	1261 timer
Total produksjon	63 857 kWh	245 545 kWh	32 493 kWh
Energikostnad (LCOE)	0,276 \$/kWh	0,200 \$/kWh	0,75 \$/kWh

Energiproduksjonen for vindgeneratorene, solcellene og dieselgeneratoren gjennom året er vist i Figur 29. At energiproduksjonen fra PV og vindgeneratorer varierer gjennom døgnet og året vises også i Tabell 14 ved at kapasitetsfaktoren er relativt lav for både solcellene og vindgeneratorene, mens antall operasjonstimer er noe høyere. Kapasitetsfaktoren er ratioen av faktisk produsert energi mot teoretisk maksimal produksjon over samme tidsrom. Dieselaggregatet produserer energi når det er liten energiproduksjon fra PV og vindturbiner.



FIGUR 29: PRODUSERT EFFEKT GJENNOM ÅRET FRA SOLCELLER (ØVERST), VIND OG DIESELAGGREGAT (NEDERST)

ENERGILAGRING

Siden mikronettet har mye fornybar energi er det avhengig av energilagring. Batterier av typen Li-Ion er valgt og Homer har kalkulert at lagringskapasitet på 517 kWh er optimalt. Li-Ion batterier har en energitetthet på 100-250 W/kg [63], og ved 517 kWh kapasitet betyr dette at batteriene veier mellom 2068-5170 kg. Dermed er størrelsen på batteriene betydelig og det kan potensielt være et problem å finne tilgjengelig areal til dem.

KOSTNADER

Kostnadene for hver komponent gjennom prosjektets økonomiske levetid er vist i Tabell 15. De fornybare energikildene har høy kapitalkostnad mens driftskostnaden er høyest for dieselgeneratoren. Noen av komponentene har lavere levetid enn 25 år og må dermed byttes ut i løpet av den økonomiske

levetiden. Tabellen viser også at fornybar energi produsert på Givær fra sol og vind er dyrere enn for tilsvarende energi produsert til det åpne markedet, men de er likevel betydelig billigere enn diesel. På grunn av kostnader relatert til lagring, tap og overproduksjon av energi blir sluttsummen på energi i mikronettet nesten like kostbar som dieselprodusert energi.

TABELL 15: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS 25-ÅRS LEVETID I USD

Komponent	Kapital	Erstatning	O&M	Drivstoff	Restverdi	Totalt
Solceller	218 434	0	9 413	0	0	227 847
Vindturbiner	500 000	159 404	64 638	0	-89 834	634 207
Dieselgenerator	34 500	26 500	33 744	432 565	-7 424	519 721
Li-Ion batteri	206 800	87 740	66 835	0	-16 514	344 862
Systemkonverter	17 430	7 395	0	0	-1 392	23 433
System	977 164	280 875	174 630	432 565	-115 164	1 750 070

MILJØ

Det er utslipp fra dieselgeneratoren som er vist i Tabell 16 og det brukes 11 154 liter diesel per år, da er ikke utslipp knytt til transport av diesel medregnet. Utslippene kan reduseres ved å benytte en generator med et annet drivstoff enn diesel, slik som biomasse. Biomasse vil fremdeles ha lokale utslipp, men er ansett miljønøytralt som beskrevet i delkapittel 4.1.6.

TABELL 16: UTSLIPP FRA MIKRONETTET

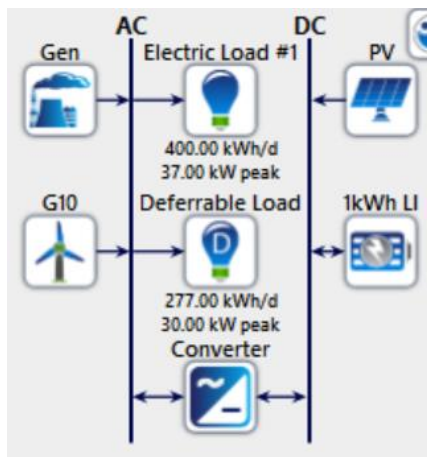
	Emissions [kg/yr]
Carbon dioxide	29 196
Carbon Monoxide	184
Unburned hydrocarbons	8
Particle matter	1
Sulfur dioxide	71
Nitrogen oxide	173

I tillegg til utslipp knyttet til dieselgeneratoren er det miljøkonsekvenser fra produksjon av komponenter til mikronettet og installasjon av disse.

ALTERNATIV 2

SYSTEMDESIGN

I alternativ 2 benyttes samme energikilder som i alternativ 1, men det tas her utgangspunkt i at deler av lasten er fleksibel. Dette er gjort ved at dataene for lastforbruk blir skalert ned fra gjennomsnittlig 677 kWh/dag til 400 kWh/dag, og det er lagt inn en fleksibel last med gjennomsnittlig 277 kWh/dag slik at det totale energiforbruket forblir likt. Den fleksible lasten utgjør 40 % av totalt forbruk og den varierer gjennom året (basert på historisk lastforbruk). Figur 30 viser systemdesign for alternativ 2.



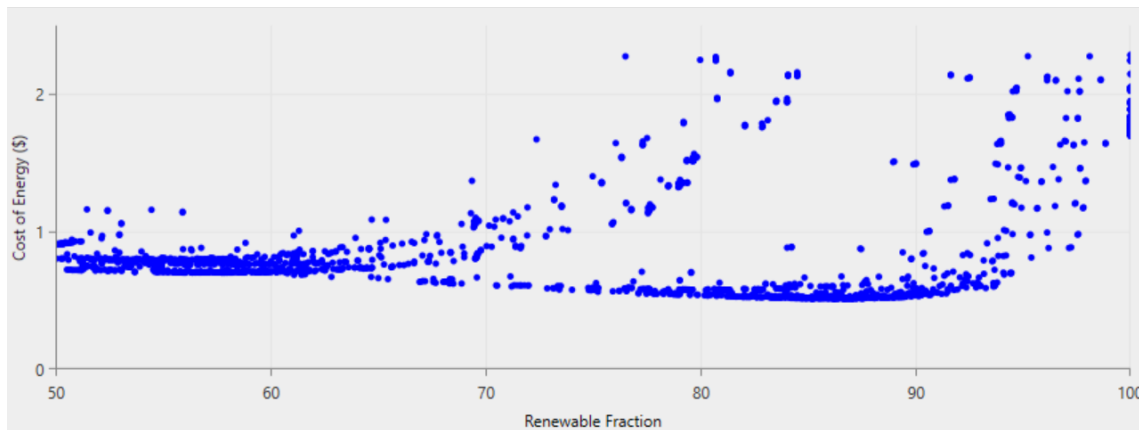
FIGUR 30: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 2

Figur 31 viser resultatet fra optimeringssimuleringen for alternativ 2. Det billigste alternativet er 87 % fornybart med en energikostnad på 0,514 \$/kWh. Løsningen har 72,8 kW PV og 100 kW vindturbiner, noe som er identisk med alternativ 1. Størrelsen til dieselgeneratoren er redusert fra 69 kW til 55 kW og batterikapasiteten redusert fra 517 kWh til 397 kWh sammenlignet med alternativ 1.

Architecture										Cost			System
			PV (kW)	G10	Gen (kW)	1kWh LI	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)
			72.7	10	55.0	397	57.1	LF	\$0.514	\$1.64M	\$55,552	\$921,664	87
				13	55.0	400	65.8	LF	\$0.577	\$1.84M	\$76,140	\$857,233	81
			55.2	9	55.0		32.3	LF	\$0.762	\$2.43M	\$137,527	\$652,724	58
				10	55.0			LF	\$0.794	\$2.53M	\$155,155	\$527,500	52
			294		55.0	400	99.1	LF	\$0.907	\$2.89M	\$138,944	\$1.10M	50
			266	67		400	62.3	CC	\$1.70	\$5.37M	\$80,973	\$4.33M	100

FIGUR 31: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY

Optimaliseringsplotten i Figur 32 viser at fornybarprosenten kan økes til i overkant av 90 % uten at kostnaden øker betydelig. Dette er en noe høyere fornybarprosent enn for alternativ 1.



FIGUR 32: ENERGIKOSTNAD OG FORNYBARPROSENT FOR ALLE SIMULERTE ALTERNATIV

ENERGIPRODUKSJON

Energiproduksjonen er svært lik som for Alternativ 1. De største forskjellene er at dieselgeneratoren har 4 kW lavere merkekapasitet, produserer 1 % mindre elektrisitet og opererer på en høyere virkningsgrad slik at dieselforbruket går ned med 4 %. Overskuddsproduksjonen blir redusert fra 83 MW til 80,8 MW.

TABELL 17: OPPSUMMERING AV ENERGIPRODUKSJON, GENERATORSTØRRELSE OG ENERGIKOSTNAD

	Solceller	Vindturbin	Dieselgenerator
Merkekapasitet	73 kW	100 kW	55 kW
Kapasitetsfaktor	10 %	28 %	
Operasjonstimer	4371 timer	7495 timer	1339 timer
Total produksjon	63 795 kWh	245 545 kWh	32 176 kWh
Energi kostnad (LCOE)	0,276 \$/kWh	0,200 \$/kWh	0,75 \$/kWh (marginal)

ENERGILAGRING

Batterikapasiteten er 397 kWh og vekten anslåes til å ligge mellom 1576-3970 kg.

KOSTNADER

Kostnadene for hver komponent gjennom prosjektets økonomiske levetid er vist i Tabell 18. Den største forskjellen fra alternativ 1 er at kostnaden til batterier redusert med 24 %. Det er ikke tatt hensyn til at det kreves avanserte styresystemer for å utnytte fleksibiliteten i lasten, så dette vil dra kostnaden noe opp.

TABELL 18: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS 25-ÅRS LEVETID I USD

Komponent	Kapital	Erstatning	O&M	Drivstoff	Restverdi	Totalt
Solceller	218 223	0	9 404	0	0	227 626
Vindturbiner	500 000	159 404	64 638	0	-89 834	634 207
Dieselgenerator	27 500	22 137	28 561	416 988	-5 062	490 125
Li-Ion batteri	158 800	67 375	51 322	0	-12 618	264 816
Systemkonverter	17 141	7 273	0	0	-1 369	23 045
System	921 644	256 188	153 925	416 988	-108 945	1 639 820

MILJØ

Miljøet er påvirket i tilnærmet samme grad som for alternativ 1, men utslippene er noe lavere som vist i Tabell 19. Diesellaggregatet bruker 10 752 liter per år, en reduksjon på 402 liter årlig sammenlignet med alternativ 1. I tillegg kreves det vesentlig mindre installert batterikapasitet.

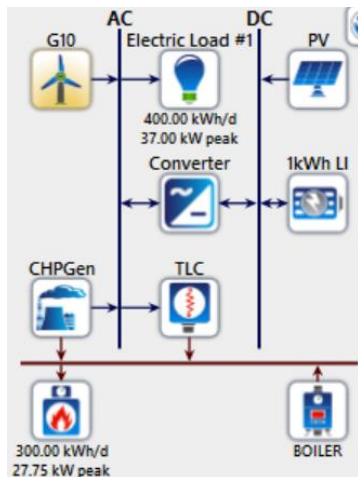
TABELL 19: UTSLIPP

	Emissions [kg/yr]
Carbon dioxide	28 144
Carbon Monoxide	177
Unburned hydrocarbons	8
Particle matter	1
Sulfur dioxide	69
Nitrogen oxide	167

ALTERNATIV 3

I alternativ 3 forsynes en elektrisk last og en termisk last. Den elektriske lasten er ikke fleksibel og den tilsvarer 60 % av historisk forbruk. Den termiske lasten som er skalert til 44 % av historisk elforbruk og den er tenkt brukt til oppvarming av boliger i et nærvarmeanlegg. Størrelsen på den termiske lasten er satt så stor at restvarme fra gassturbinen og overskuddselektrisitet i stor grad kan utnyttes, og om det bygges ut et nærvarmeanlegg kan det vurderes hvor mange boliger det er lønnsomt å tilknytte.

Systemdesignet er vist i Figur 33. Det inkluderer solceller, vind, batteri, termisk last kontroller, oljefyr, gassturbin med varmegjenvinning og en elektrisk og termisk last. Gassturbinen og oljefyren er fyrt av biodiesel. Den termiske last kontrolleren konverterer overskuddselektrisitet om til varme.



FIGUR 33: SYSTEMDESIGN FOR ALTERNATIV 3

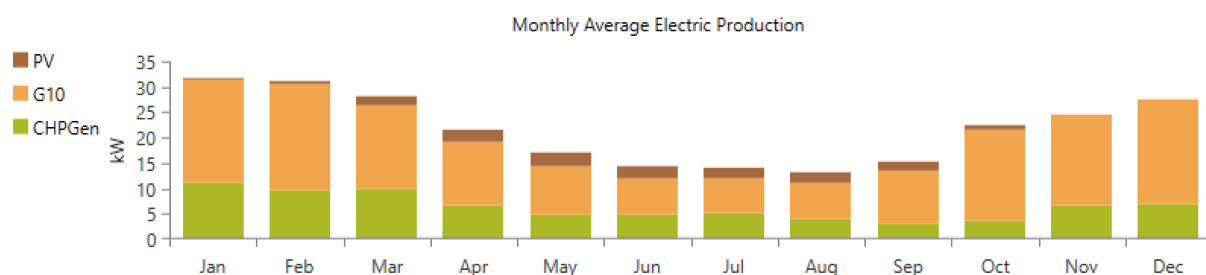
Figur 34 viser resultatet fra optimeringssimuleringen, og den billigste løsningen inkluderer alle energikildene med 14,1 kW solceller, 50 kW vindturbiner og 50 kW gassturbin. Energiprisen er 0,367 \$/kWh.

Optimization Results														
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.														
Architecture											Cost			System
	PV (kW)	G10	CHPGen (kW)	1kWh LI	TLC (kW)	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)		
	14.1	5	50.0	84	50.0	9.52	LF	\$0.367	\$1.22M	\$68,478	\$339,162	42		
		5	50.0	10	50.0	13.0	CC	\$0.385	\$1.26M	\$76,518	\$268,399	35		
	12.9	4	50.0		50.0	5.21	CC	\$0.411	\$1.31M	\$81,640	\$250,771	29		
	74.3		50.0	154	50.0	21.6	LF	\$0.568	\$1.60M	\$100,705	\$301,571	10		
	536		50.0		50.0	40.1	CC	\$1.28	\$2.95M	\$102,176	\$1.63M	10		

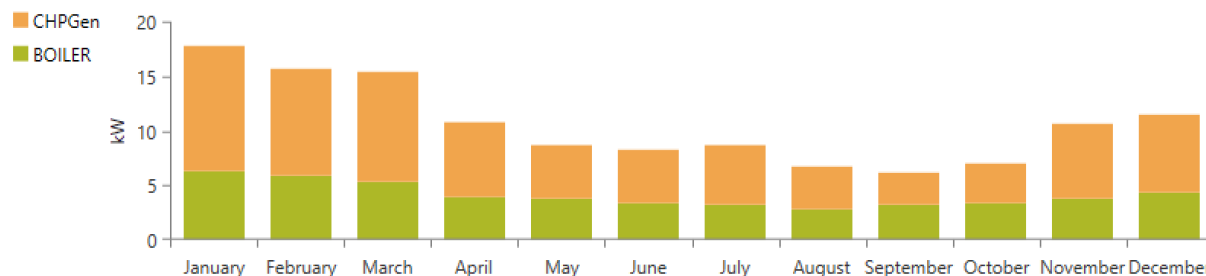
FIGUR 34: RESULTAT AV OPTIMERINGSSIMULERING I HOMER ENERGY

ENERGIPRODUKSJON

Elektrisitetsproduksjonen fra de forskjellige generatorene er vist i Figur 35. I Figur 36 viser termisk energi produksjon fra gassturbinen og oljekjelen, mens termisk energi produsert fra overskuddselektrisitet er ikke vist.



FIGUR 35: GJENNOMSNTLIG MÅNEDLIG EL-PRODUKSJON FRA PV, GASSTURBIN (CHPGEN) OG VIND (G10)



FIGUR 36: GJENNOMSNTLIG MÅNEDLIG TERMISK ENERGIPRODUKSJON FRA GASSTURBIN (CHPGEN) OG OLJEFYR (BOILER)

Tabell 20 viser årlig energiproduksjon fra alle produksjonsenhetene i mikronettet. Tabellen viser at 39 711 kWh/år overskuddselektrisitet blir omgjort til termisk energi, og at overskuddet av termisk energi 22 881 kWh/år. I praksis er det mulig å lagre termisk energi til bruk senere slik at den termiske overskuddsenergien også kan utnyttes, men dette er ikke mulig å simulere i dagens versjon av Homer Energy. Selv uten denne funksjonen er andelen ubrukt energi betydelig lavere i alternativ 3 enn de andre alternativene.

TABELL 20: ÅRLIG ELEKTRISK OG TERMISK PRODUKSJON

Enhet	Elektrisk produksjon [kWh/år]	Termisk produksjon [kWh/år]
Solceller	12 338	
Vindturbin	122 772	
Gassturbin	54 916	56 977
Oljekjel		35 711

Termisk lastkontroller		39 711
Ubrukt energi		22 881
Sum produksjon	190 027	132 381

KOSTNADER

Kostnadene for hver komponent gjennom prosjektets økonomiske levetid er vist i Tabell 21. Den største utgiften er drivstoff, etterfulgt av kapitalkostnaden til prosjektet. Kostnaden av å bygge ut et nærvarmeanlegg er ikke inkludert, og derfor er den reelle kostnaden til dette alternativet betydelig høyere enn resultatene viser.

TABELL 21: NETTONÅVERDIKOSTNADER OVER PROSJEKTETS LEVETID I USD

Komponent	Kapital	Erstatning	O&M	Drivstoff	Restverdi	Totalt
Solceller	42 206	0	9 404	0	0	227 626
Vindturbiner	250 000	159 404	64 638	0	-89 834	634 207
Gassturbin med varmegjennvinning	500	540	188	617 636	-32	618 832
Termisk lastkontroller	10 000	3 188	0	0	-1 797	11 391
Oljekjel (biodiesel)	0	0	0	173 041	0	173 041
Li-Ion batteri	33 600	14 327	10 859	0	-2 604	56 183
Systemkonverter	2 857	1 212	0	0	-228	3 840
System	339 162	98 969	45 185	790 677	-49 578	1 224 415

MILJØ

Fornybarprosenten er 42 %, og denne er lav på grunn av at Homer Energy anser gassturbinen og oljefyren som ikke-fornybare siden de også kan drives av fossile energikilder som diesel eller gass. I planleggingen her er de begge driftet av biodiesel som kan være miljøvennlig når den er produsert på en bærekraftig måte. Mikronett ansees derfor som 100 % fornybart når biodieselen som er brukt er bærekraftig. Utslipp fra mikronettet er vist i Tabell 22. Mikronettet bruker totalt 20 387 liter biodiesel hvert år.

TABELL 22: UTSLIPP

	Emissions [kg/yr]
Carbon dioxide	0
Carbon Monoxide	102
Unburned hydrocarbons	0
Particle matter	3
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxide	215

6.4.2 MIKRONETT KRAFTSYSTEM PLANLEGGING

Dette steget av planleggingen er ikke sett nærmere på da det antas at mikronett kraftsystem planleggingen vil påvirke alle alternative relativt likt. På Givær er det allerede utbygd et distribusjonsnett og det er trolig fornuftig å fortsette å benytte denne infrastrukturen og velge et AC basert mikronett slik som vist tidligere i forklaring av alternativene (Figur 25, Figur 30 og Figur 33). Mikronettet bruker AC til distribusjon og tilkobling av AC-generatorer, mens det er en DC samleskinne hvor solceller og batterier er tilkoblet. Kalkulasjoner av elektriske parameter er ikke utført.

KALKULASJONER AV ELEKTRISKE PARAMETER

Det antas i dette steget av planleggingen at det ikke trengs oppgraderinger av eksisterende infrastruktur, og at energilagring og DER generatorer blir tilkoblet i det punktet hvor diesellaggregatet nå tilkoblet nettet, siden effekten da vil flyte likt som før. Hvis det likevel blir nødvendig med oppgraderinger i eksisterende infrastruktur påvirker det alternativene 1 og 2 relativt likt, mens alternativ 3 har et lavere elektrisitetsforbruk og derfor også lavere krav til infrastruktur.

IEC sine retningslinjer for mikronettplanlegging anbefaler at det blir utført følgende kalkulasjoner/simuleringer:

- Lastflytanalyse for typiske operasjonsmoduser
- Kortslutningsstrømmer
- Stabilitetskalkulasjoner
- Fault ride through capacity verifikasjon [56]

Sistnevnte er ikke aktuell for et isolert mikronett siden det går ut på å måle motstandsdyktigheten til mikronettet ved feil i overliggende kraftsystem.

6.4.3 MIKRONETT NÆRVARMEANLEGG PLANLEGGING

Dette avsnittet er bare aktuelt for alternativ 3 hvor det må bygges ut et nærvarmeanlegg for å forsyne termisk energi til bygningene. I henhold til energiloven er størrelsen på nærvarmeanlegget ikke konsesjonspliktig og levering av energi kan baseres på frivillige avtaler mellom partene.

Bebyggelsen på Givær er relativt tett på Husøya, og de aller fleste bygningene kan enkelt tilkobles et nærvarmeanlegg. Kostnaden for å bygge ut et nærvarmeanlegg er usikker, men for å sette en kostnadsramme kan det sammenlignes med et fjernvarmeanlegg som ble installert i Svolvær. Det anlegget dekker et større område og har mer energi levert enn det er aktuelt på Givær og det kostet i underkant av 4 000 000 kr, det er derfor trolig at anlegget på Givær blir betydelig mye billigere. Prosjektet i Svolvær fikk Enova støtte, noe som trolig også er mulig for Givær [65]. I tillegg til å bygge ut infrastruktur for nærvarmeanlegg må bygningene tilpasses for å utnytte varmen, dette koster omtrent 200 000 kr per bolig.

Et slikt nærvarmeanlegg gir også muligheter til å utnytte andre energikilder som for eksempel jordvarme og sjøvarme.

6.5 FASE 3 – TEKNISKE KRAV

Denne fasen skal avsløre om alternativene er mulige med hensyn til tekniske krav slik som spenninger og belastning av linjer. Dette er for omfattende for denne oppgaven å undersøke så det er antatt at alle løsningene kan prosjekteres slik at de tilfredsstillende de tekniske kravene betydelige kostnadsøkninger.

6.6 FASE 4 – EVALUERING AV MIKRONETTPROSJEKTET

6.6.1 VALG AV LØSNING

Tabell 23 oppsummerer dimensjonen av de viktigste komponentene for hvert av alternativene. Alternativ 1 og 2 er relativt like, se Tabell 13, og har derfor også relativt dimensjonerte komponenter.

TABELL 23: INSTALLERT EFFEKT FOR DG OG ES FOR ALTERNATIVENE

Komponent	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Solceller	72,8 kW	72,7 kW	14,1 kW
Vindturbiner	100 kW	100 kW	50 kW
Batteri	517 kW	397 kW	84 kW
Konverter	58,1 kW	57,1 kW	9,52
Dieselgenerator	57 kW	55 kW	
Gassturbin med varmegjenvinning			50 kW

Tabell 24 viser evalueringen av de forskjellige løsningene. Alternativ 3 er anbefalt på grunn av en vesentlig lavere kostnad og at energiresursene blir utnyttet best. Det er også mulig å utnytte termisk varmelagring og/eller fleksibel last for å presse kostnaden ytterligere ned. Sammenlignes alternativ 2 med alternativ 1 vises det at å utnytte fleksibel last gjør at kostnaden reduseres noe.

TABELL 24: EVALUERING AV DE ALTERNATIVE LØSNINGENE

	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
Forsyningsikkerhet	Avhengig av at enten batterier eller dieselgenerator virker		Svært avhengig av at gassturbin virker
Hvor lett er det å gjøre fremtidige utvidelser?	Det kreves ikke utbyggelser hvis dieselaggregatet/gassturbin øker produksjonen. Ved store utvidelser bør det vurderes å installere mer energilagring, solceller, vind og eventuelt bølgekraft avhengig av teknologistatus, men dette krever nødvendigvis ikke endringer i nåværende installasjon.		
Miljøvennlighet	Utslipp fra dieselgeneratoren, men de kan unngås ved å bruke biodrivstoff. Systemene utnytter energi dårlig og det er mye overskuddsenergi.		Lokale utslipp fra gassturbinen og oljefyren, men den er ansett klimanøytral med biodrivstoff. Systemet utnytter energiresursene bra.
Omfang av utbyggingen	Krever store areal til vind, sol og batteri. Alternativ 1 krever litt mer areal enn alternativ 2.		Stort omfang på grunn av behov for infrastruktur til nærvarmeanlegg. Arealbruk er mindre enn for alternativ 1 og 2.

Usikkerhet knytt til drivstoffpris	Liten		Stor
Usikkerhet knytt til aldring av komponenter ikke er vurdert i simuleringene i Homer	Stor		Liten
Drivstoff	11 154 liter	10 752 liter	20 387 liter
Overskuddsenergi	83 MWh (el)	80,8 MWh (el)	22,8 MWh (termisk)
Total kostnad gjennom økonomisk levetid	1 750 070 \$	1 639 820 \$	1 224 415 \$ + nærvarmeanlegg
Totalvurdering rank	3	2	1

6.6.2 KVALITETSVURDERING OG VIDERE ARBEID

I planleggingsarbeidet er det gjort mange forenklinger og estimat som er forklart underveis, slik som estimering av belastning, fleksibelt potensial, bruk av termisk energi og priser for drivstoff og generatorer. Dette gir store feilmarginer og før en eventuell prosjektering av mikronettet bør planleggingen gjennomgå og datagrunnlaget kvalitetssikres. Det gjenstår også å undersøke om alternativene tilfredsstillende tekniske krav siden dette er for tidkrevende for denne masteroppgaven, men siden det er mye produksjon fra vind og gassturbin er det trolig at kortslutningsstrømmene er tilfredsstillende for å løse ut vern.

Det nevnes også at Homer bruker flere forenklinger i simuleringene sine. Det er for eksempel ikke tatt hensyn til at energiproduksjonen fra solceller reduseres eller at kapasiteten til batterier reduseres gjennom anleggets levetid. En artikkel publisert av Elsevier sier følgende om Homers simuleringer:

While HOMER has a relatively sophisticated and realistic modeling approach for most system components, its battery models are more theoretical to maintain ease of calculation. As a result, HOMER underestimates or neglects several important issues relating to battery operation in microgrid systems, such as capacity fade, temperature effects, or rate-based battery efficiency. We believe that the battery modeling is the weakest part of this useful modeling tool, and can be improved with a more realistic battery model [66].

Dette betyr at løsninger funnet med optimeringsfunksjonen til Homer bør vurderes med tanke på disse forenklingene, og dette er ikke gjort i denne planleggingen. Homer Energy har en modul, Multi-Year module, som muliggjør modellering av prosjektet levetid som blant annet inkluderer degradering av solceller, økende drivstoffpris, økende energipris på kraftmarked, lastøkning i mikronettet [67].

7 KONKLUSJON

Målsetningen med oppgaven var å belyse hvordan et mikronett generelt kan planlegges og designes på en best mulig måte. Oppgaven er delt i to deler, hvor den første delen er et litteraturstudium og den andre delen er praktisk planlegging av et mikronett.

Litteraturstudiet inkluderer en systematikk for å planlegge et mikronett som er basert på SINTEF sin planleggingsbok og retningslinjer for planlegging av mikronett utarbeidet av IEC. Det er krevende å planlegge mikronett med en stor andel uregulerbare fornybare energikilder slik som vind og sol på grunn av usikkerhet tilknyttet elproduksjon, og de er avhengig av energilagring. Derfor anbefales det å benytte et planleggingsverktøy slik som Homer Energy som tar hensyn til variabiliteten i produksjon og forbruk til å finne gode løsninger. Litteraturstudiet inkluderer også relevant teori for planlegging av mikronett som gir verdifull informasjon om distribuert energiproduksjon, energilagringsteknologier, energibruk og laststyring.

I den praktiske delen ble et mikronett for øyen Givær planlagt i planleggingsverktøyet Homer Energy. Dagens elforsyning på Givær er basert på dieselaggregat og netteier ønsker en mer fornybar energiforsyning som også reduserer kostnadene tilknyttet elforsyningen. I planleggingen av mikronett for Givær ble tre alternative løsninger vurdert, og den billigste løsningen var den som best utnytter energiresursene. I løsningen leveres det mest energi fra et kombinert varme- og kraftverk, mens sol og vind supplerer forsyningen. Det leveres både elektrisitet og termisk energi, og løsningen viser at det beste resultatet kan oppnås når energiforsyningen blir planlagt som en helhet. Løsningen krever også mye samarbeid med kundene siden de må bygge om husene sine for å utnytte termisk energi. Mikronettet som er planlagt på Givær kan forbedres ytterligere ved å vurdere å bruke sjøvarme, utnytte termisk energilagring og fleksible laster.

Bruken av planleggingsverktøy slik som Homer Energy forenkler planleggingen mye og det har mulighet til å simulere de fleste energikilder, men muligheten til å simulere fleksible laster er svært begrenset og det tas ikke hensyn til degradering i ytelse for komponenter igjennom levetiden. En funksjon som ikke er blitt benyttet i dette prosjektet men som har stor verdi er muligheten for å sammenligne kostnaden av å bygge et isolert mikronett med kostanden av å tilkoble mikronettet til kraftnettet.

Planlegging av mikronett skiller seg vesentlig fra tradisjonell planlegging av kraftnett ved at det må tas hensyn til flere faktorer slik som produksjon, energilagring og energiforbruk. Det blir dermed viktigere å se helheten i energiforsyningen. Planleggingen er også mer avhengig av kundene enn tidligere, hvor kundene får en aktiv rolle ved å muliggjøre utnyttelse av fleksibel energi eller få solceller installert på takene.

8 VIDERE ARBEID

I planleggingssystematikken i denne rapporten gjenstår det å se mer på de tekniske kravene i mikronett slik som vern, kontroll og så videre. Det må også undersøkes hvordan lovverk setter begrensninger for mikronett.

Videre arbeid kan være å planlegge et tilkoblet mikronett og undersøke hvordan de forskjellige målsetningene og rammene til tilkoblede mikronett vil påvirke planleggingssystematikken. Det kan også vurderes om det bør utarbeides separate planleggingssystematikker for planlegging av tilkoblede mikronett og isolerte mikronett. Erfaringer fra planlegging av et tilkoblet mikronett vil vise om dette er nødvendig. Det bør også undersøkes hvilke tekniske krav og utfordringer i mikronett som må tas hensyn til i planleggingsfasen for et mikronett. Og vil dette være forskjellig for tilkoblede og isolerte mikronett? Det er også være interessant å undersøke nytteverdien til mikronett sammenlignet med kostnaden.

For mikronettet på Givær gjenstår det detaljert planlegging og prosjektering med kalkulasjoner av lastflyt, kortslutningsstrømmer og stabilitetskalkulasjoner. Det gjenstår også å vurdere innflytelsen av aldrende komponenter (hovedsakelig PV og batteri) og sensitivitetsanalyser mot drivstoffpriser og lignende. Som tidligere nevnt bør det også vurderes å inkludere termisk energilagring og sjøvarme i mikronettet.

9 BIBLIOGRAFI

- [1] C. Marnay, «Chapter 3 – Microgrids: Finally Finding their Place,» i *Future of Utilities Utilities of the Future*, Elsevier, 2016, p. 51–74.
- [2] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [3] NVE, «Nett,» NVE, 02 08 2016. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/nett/>. [Funnet 02 05 2017].
- [4] NVE, «Fritak for leveringsplikt,» NVE, 02 08 2016. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/nett/omradekonsesjon/fritak-for-leveringsplikt/>. [Funnet 02 05 2017].
- [5] J. Naas-Bibow og G. Martinsen, *Energiloven med kommentarer*, Oslo: Gyldendal Akademisk, 2011.
- [6] NVE, «Spenningskvalitet,» 23 02 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/leveringskvalitet/spenningskvalitet/>. [Funnet 29 05 2017].
- [7] NVE, «Avbruddsstatistikk,» 10 05 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/leveringskvalitet/leveringspalitelighet/avbruddsstatistikk/>. [Funnet 29 05 2017].
- [8] NVE, «Leveringskvalitet,» 04 01 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/leveringskvalitet/>. [Funnet 02 05 2017].
- [9] NVE, «AMS,» 24 02 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/sluttbrukermarkedet/ams/>. [Funnet 30 04 2017].
- [10] NVE, «Ny teknologi og forbrukerfleksibilitet,» 18 11 2016. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/sluttbrukermarkedet/ny-teknologi-og-forbrukerfleksibilitet/>. [Funnet 30 04 2017].
- [11] NVE, «En plusskunde er en forbrukskunde som i enkelttimer har overskuddskraft som kan mates inn i nettet,» NVE, 07 12 2016. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/>. [Funnet 29 04 2017].
- [12] REN, «TEKNISKE FUNKSJONSKRAV til tilknytnings- og nettleieavtale for Innmatingskunder i Lavspenningsnettet,» 16 08 2016. [Internett]. Available: <https://www.ren.no/doc/api/rest/download/renblad/342>. [Funnet 29 04 2017].
- [13] C. Marnay, S. Chatzivasileiadis, G. Joos, C. Abbey, P. Lombardi, P. Mancarella, R. Iravani, P. Mancarella og J. v. Appen, «Microgrid Evolution Roadmap: Engineering, Economics, and Experience,» ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Berkeley, 2015.

- [14] J. Taneja, K. Lutz og D. Culler, The impact of flexible loads in increasingly renewable grids, Vancouver: 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013, pp. 265-270.
- [15] «Energiforbruk,» Enøk, udat.. [Internett]. Available: http://www.enok.no/enokguiden/09_1.html. [Funnet 23 03 2017].
- [16] «BMW i3: Technical data,» BWM, udat.. [Internett]. Available: http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2013/showroom/technical_data.html. [Funnet 10 03 2017].
- [17] H. Seljeseth, K. Sand og T. Solvang, «Håndtering av utfordrende elektriske apparat som tilknyttes elektrisitetsnettet,» 19 desember 2012. [Internett]. Available: <http://www.energinorge.no/getfile.php/FILER/NYHETER/NETT%20OG%20SYSTEM/H%C3%A5ndtering%20av%20utfordrende%20elektriske%20apparater%20-TRA7203.pdf>. [Funnet 14 mai 2015].
- [18] K. Hofstad og T. Eggen, «Fritak for leveringsplikt. Prinsipper og prosedyrer,» Norges vassdrags- og energidirektorat, 1999.
- [19] CIGRE, «MICROGRIDS 1 ENGINEERING, ECONOMICS, & EXPERIENCE,» CIGRE, 2015.
- [20] L. Fusheng, L. Ruisheng og Z. Fengquan, Microgrid Technology and Engineering Application, Elsevier Inc, 2016, pp. 29-67, 91-113.
- [21] J. A. J. I. G. I. M. d. A. E. I. Estefanía Planas n, «AC and DC technology in microgrids: A review,» 05 12 2014. [Internett]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010065#>. [Funnet 08 06 2017].
- [22] F. Mumtaz og I. B. Safak, «Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview,» Hamad Bin Khalifa University, Doha 5825, 2017.
- [23] N. L. D. Aldana, J. C. V. Quintero og J. M. Guerrero, «A Communication-less Distributed Control Architecture for Islanded Microgrids with Renewable Generation and Storage,» IEEE Transactions on Power Electronics, Aalborg, 2017.
- [24] I. Patrao, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 415-424.
- [25] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcerá og R. González-Medina, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2014.
- [26] NVE, «Solenergi,» NVE, 25 04 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/solenergi/>. [Funnet 02 05 2017].
- [27] ENOVA, «El-produksjon,» ENOVA, 27 12 2016. [Internett]. Available: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/solenergi/el-produksjon/>. [Funnet 29 04 2017].
- [28] Norsk Solenergiforening, «Statistikk,» [Internett]. Available: <http://solenergi.no/statistikk/>. [Funnet 29 04 2017].

- [29] fornybar.no, «Teknologi,» [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/solenergi/teknologi>. [Funnet 30 04 2017].
- [30] fornybar.no, «Miljøkonsekvenser,» 05 2016. [Internett]. Available: https://l.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Fwww.fornybar.no%2Fsolenergi%2Fmiljokonsekvenser&h=ATOiz-O6xEI5-88bgtZliIVjTJrww07VNGT3JBpFremFR04dyxHzckwfLZDxru-GQbHzRqc9U_8Obi0NgXJg40r2SpNWHnURtoaO8_pA3-RJNSLf-OccdLfyzJ5Tvnma0egCKzkEWMkTqc8S3h-wR2sNXKMdFH_RQ. [Funnet 30 04 2017].
- [31] Fornybar.no, «Ressursgrunnlag Vind,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/vindkraft/ressursgrunnlag#vind1.1>. [Funnet 07 06 2017].
- [32] NVE, «Vindressurser,» 08 03 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/vindkraft/vindressurser/>. [Funnet 07 06 2017].
- [33] fornybar.no, «teknologi,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/vindkraft/teknologi>. [Funnet 07 06 2017].
- [34] IRENA, «Wind Power,» 06 2012. [Internett]. Available: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf. [Funnet 4 06 2017].
- [35] fornybar.no, «Miljøkonsekvenser,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/vindkraft/miljokonsekvenser>. [Funnet 07 06 2017].
- [36] fornybar.no, «teknologi,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/vannkraft/teknologi#vann2.2>. [Funnet 24 06 2017].
- [37] NVE, «Vannkraftpotensialet,» 08 06 2017. [Internett]. Available: <https://www.nve.no/energiforsyning-og-konsesjon/vannkraft/vannkraftpotensialet/>. [Funnet 24 06 2017].
- [38] fornybar.no, «Miljøkonsekvenser,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/vannkraft/miljokonsekvenser>. [Funnet 24 06 2017].
- [39] The European Marine Energy Centre LTD, «Marine Energy,» udat. udat. udat.. [Internett]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>. [Funnet 01 07 2017].
- [40] fornybar.no, «Bølgekraft,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/nye-teknologier/bolgekraft>. [Funnet 05 07 2017].
- [41] T. STENSVOLD, «Norge har fått sitt første bølgekraftverk som leverer strøm til kraftnettet. Slik virker det,» TU, 12 06 2017. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/norge-har-fatt-sitt-forste-bolgekraftverk-som-leverer-strom-til-kraftnettet-slik-virker-det/395569>. [Funnet 05 07 2017].
- [42] P. Asmus og D. Gaunlett, «Hydrokinetic and ocean energy: Renewable power generation from ocean wave, tidal stream, river hydrokinetic, ocean current, and ocean thermal technology,» Pike Research , 2012.

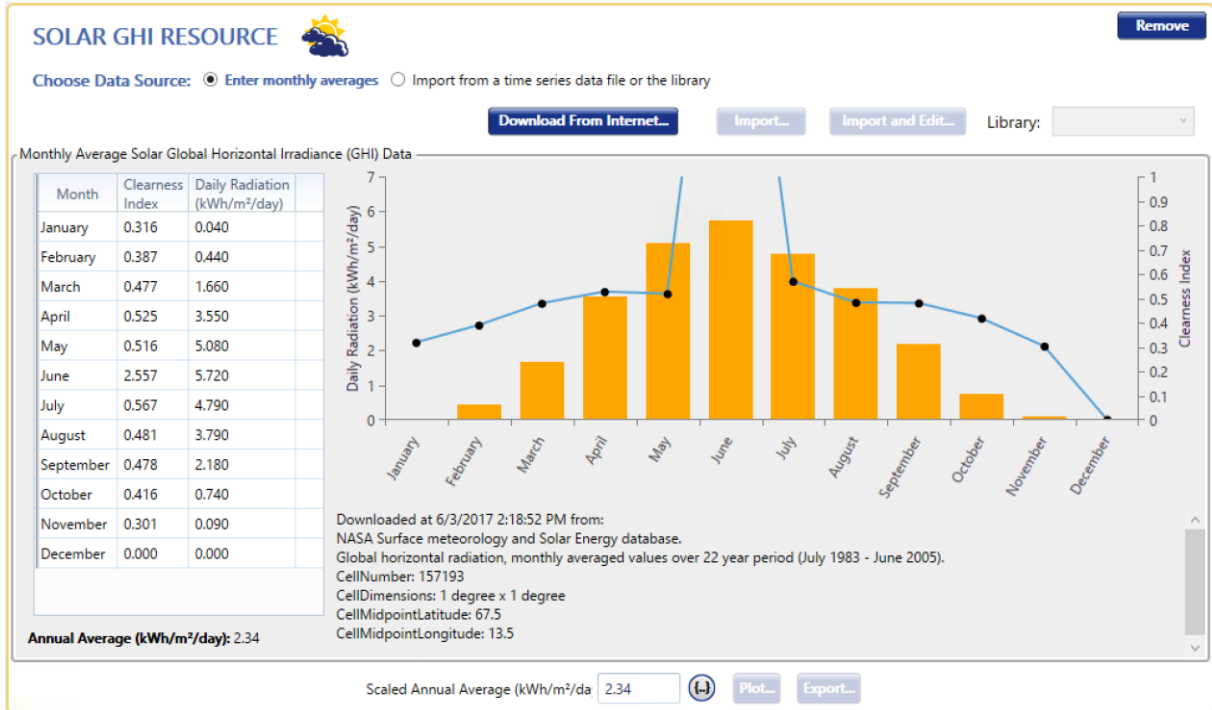
- [43] fornybar.no, «tidevannskraft,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/nye-teknologier/tidevannskraft>. [Funnet 05 07 2017].
- [44] fornybar.no, «ressursgrunnlag,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/bioenergi/ressursgrunnlag>. [Funnet 05 07 2017].
- [45] J. M. Christensen, P. V. Hendriksen, J.-D. Grunwaldt og A. D. Jensen, «Chemical energy storage,» DTU International Energy Report 2013, 2013.
- [46] NVE, «Kostnader i energisektoren,» 2015. [Internett]. Available: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_02a.pdf. [Funnet 05 07 2017].
- [47] T. J. Brænd, «bioenergi,» 27 06 2017. [Internett]. Available: <https://snl.no/bioenergi>. [Funnet 06 07 2017].
- [48] IRENA, «Wind Power Biomass for Power Generation,» 06 2012. [Internett]. Available: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf. [Funnet 05 07 2017].
- [49] fornybar.no, «miljøkonsekvenser,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/bioenergi/miljokonsekvenser>. [Funnet 05 07 2017].
- [50] Miljødirektoratet, «Fakta om biodrivstoff,» 23 02 2017. [Internett]. Available: <http://www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/2017/Februar-2017/Fakta-om-biodrivstoff1/>. [Funnet 05 07 2017].
- [51] R. Komor og J. Glassmire, «Electricity Storage and Renewables for Island Power: A Guide for Decision Makers,» IRENA, 2012.
- [52] fornybar.no, «Teknologier for lagring av energi,» 05 2016. [Internett]. Available: <http://www.fornybar.no/overforing-og-lagring-av-energi/lagring-av-energi/teknologier-for-lagring-av-energi>. [Funnet 10 06 2017].
- [53] IPHE Renewable Hydrogen Report, «Utsira Wind Power and Hydrogen Plant,» 03 2011. [Internett]. Available: http://www.iphe.net/docs/Renew_H2_Ustira.pdf. [Funnet 06 07 2017].
- [54] SINTEF, «Planleggingsbok for kraftnett,» SINTEF, 2010.
- [55] SINTEF Energi AS, «Planleggingsbok for kraftnett: Systematikk ved større utbygginger i distribusjonsnettet,» SINTEF Energi AS, 2010.
- [56] «IEC/TS 62898-1 Ed.1: Microgrids - Guidelines for microgrid projects planning and specification,» 2016.
- [57] SINTEF Energi AS, «Systematikk for integrasjon av distribuert produksjon i distribusjonsnett,» SINTEF Energi AS, 2012.
- [58] wikipedia, «Givær,» 26 01 2017. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Givær>. [Funnet 01 07 2017].

- [59] T. E. Akselsen, «Heggmovann helt til Givær,» 08 08 2017. [Internett]. Available: <http://bodo.kommune.no/forside/heggmovann-helt-til-givar-article68994-6.html>. [Funnet 09 08 2017].
- [60] NVE, «Vindkart for Norge,» 2009. [Internett]. Available: https://www.nve.no/media/2462/vind_80m_kartbok1a_4140.pdf. [Funnet 05 06 2017].
- [61] NREL, «NREL Report Shows U.S. Solar Photovoltaic Costs Continuing to Fall in 2016,» 28 09 2016. [Internett]. Available: www.nrel.gov/news/press/2016/37745. [Funnet 08 05 2017].
- [62] Homer Energy, «Boiler,» [Internett]. Available: <http://www.homerenergy.com/support/docs/3.9/boiler.html>. [Funnet 19 07 2017].
- [63] Wikipedia, «Lithium-ion battery,» 02 06 2017. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery. [Funnet 28 06 2017].
- [64] Homer Energy, «Thermal Load Controller,» [Internett]. Available: http://www.homerenergy.com/support/docs/3.9/thermal_load_controller.html. [Funnet 19 07 2017].
- [65] Follo fjernvarme, «Fjernvarme infrastruktur i Svolvær,» 2011. [Internett]. Available: <http://wpstatic.idium.no/follofjernvarme.no/2015/03/120205UtkilomtaleavprosjSvolvr.pdf>.
- [66] E. Hittinger, T. Wiley, J. Kluza og J. Whitacre, «Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved Energy Systems Model,» 01 01 2015. [Internett]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414008929>. [Funnet 03 08 2017].
- [67] Homer Energy, «Multi Year Module,» [Internett]. Available: http://www.homerenergy.com/modules/Multi_Year.html. [Funnet 03 08 2017].

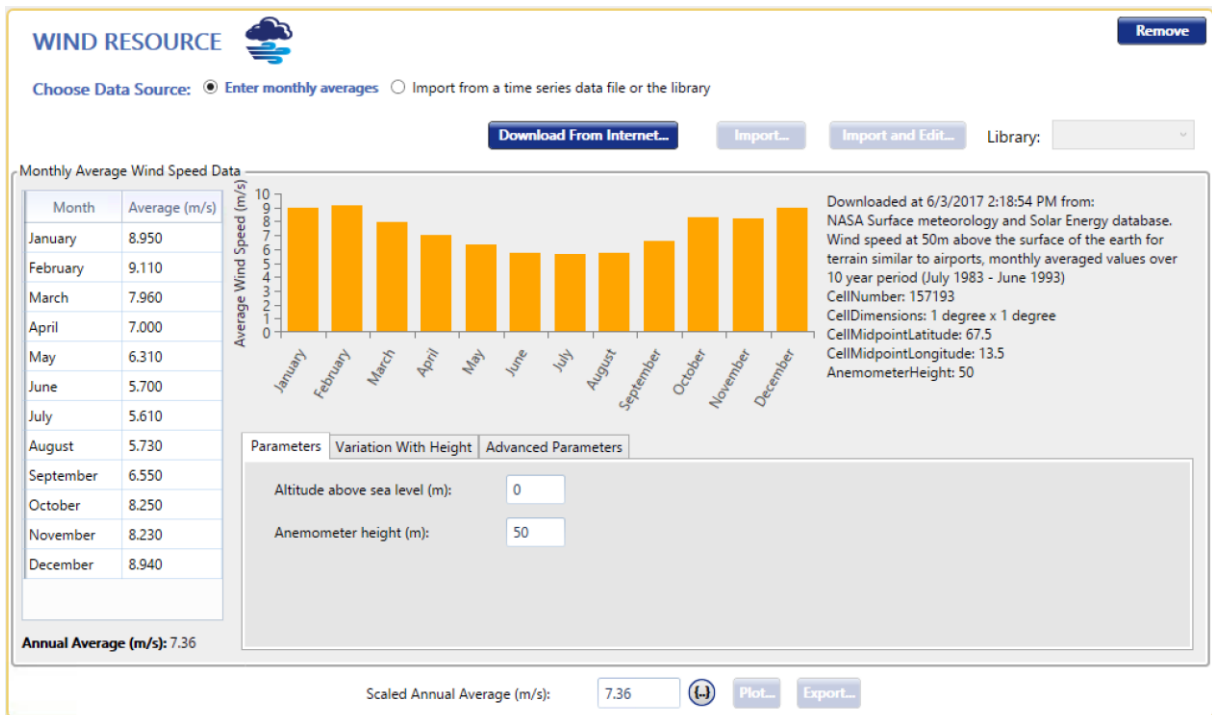
VEDLEGG

TABELL 25: ENERGIFORBRUK PER BRUKER TILKOBLET KRAFTFORSYNINGEN PÅ GIVÆR

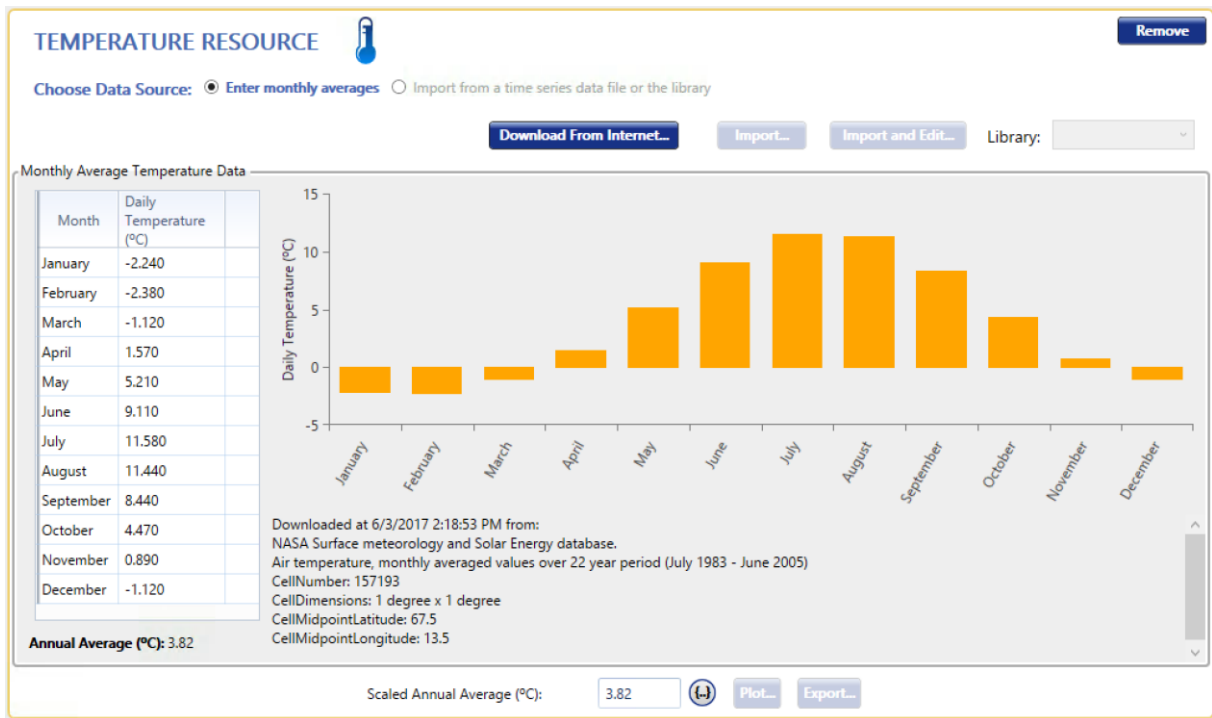
Type bruker	Årlig forbruk [kWh]
Hytte og fritidshus	6985
Hytte og fritidshus	5889
Hytte og fritidshus	6614
Hytte og fritidshus	3531
Hytte og fritidshus	4336
Hytte og fritidshus	2695
Bolig	7472
Bolig	10468
Bolig	17313
Bolig	21386
Bolig	16086
Bolig	7189
Bolig	20237
Bolig	20106
Bolig	14268
Bolig	7016
Bolig	5674
Jordbruk eller fiske	255
Anne transport og lagring	4261
Informasjon og kommunikasjon	6715
Offentlig administrasjon	45532



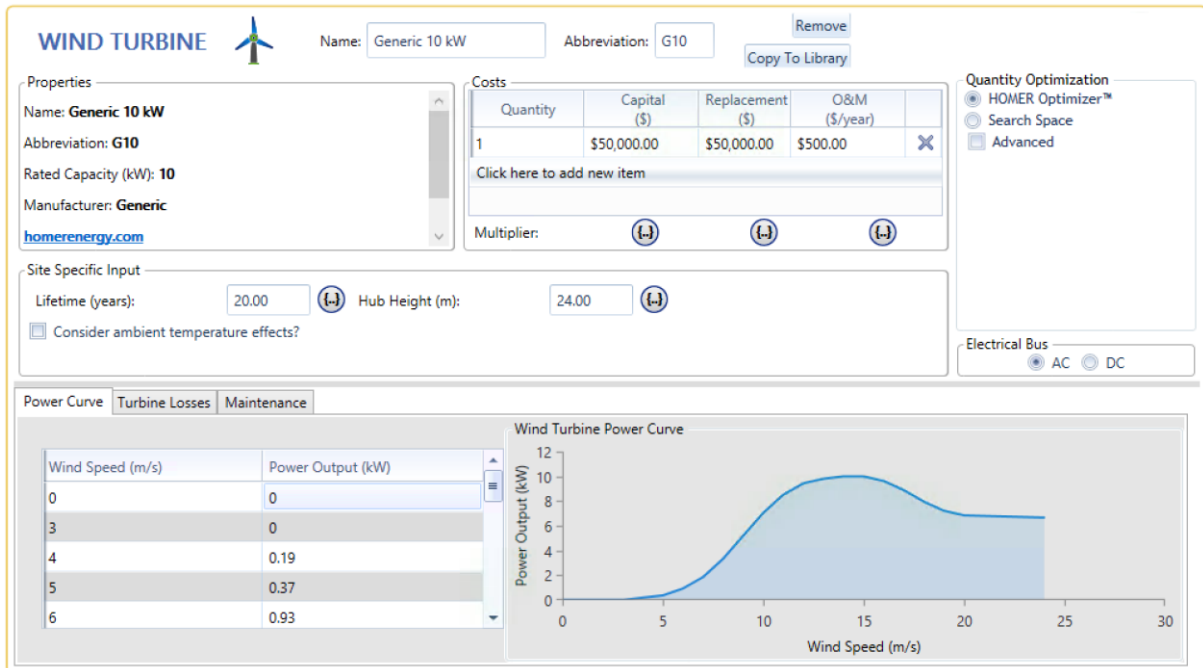
FIGUR 37: SOLRESSURS




FIGUR 38: VINDRESSURS



FIGUR 39: TEMPERATUR



FIGUR 40: DATA FOR VINDTURBIN

PV  Name: Abbreviation:

Properties

Name: **Generic flat plate PV**
 Abbreviation: **PV**
 Panel Type: **Flat plate**
 Rated Capacity (kW): **1**
 Temperature Coefficient: **-0.5**
 Operating Temperature (°C): **47**
 Efficiency (%): **13**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes:
This is a generic PV system.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$3,000.00	\$3,000.00	\$10.00

[Click here to add new item](#)

Multiplier:

Site Specific Input

Lifetime (years):

Derating Factor (%):


Capacity Optimization

HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Electrical Bus

AC DC

FIGUR 41: DATA FOR SOLCELLEPANEL

CONVERTER  Name: Abbreviation:

Properties

Name: **System Converter**
 Abbreviation: **Converter**
www.homerenergy.com
 Notes:
This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$300.00	\$300.00	\$0.0

[Click here to add new item](#)


Multiplier:

Capacity Optimization

HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Upper:
 Lower:
 Base:

Generic
[homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)
 Andy Kruse
sales@homerenergy.com
 +(1) 720-565-4046
 HOMER Energy
 1790 30th St, Suite 100
 Boulder, CO 80301 USA



Inverter Input

Lifetime (years):

Efficiency (%):

Parallel with AC generator?

Rectifier Input

Relative Capacity (%):

Efficiency (%):

FIGUR 42: DATA FOR KONVERTER

GENERATOR Name: Autosize Genset Abbreviation: Gen

Remove
Copy To Library

Properties
Name: Autosize Genset

Generator is auto-sizing

Fuel: Diesel
Fuel curve intercept: 1.59 L/hr
Fuel curve slope: 0.251 L/hr/kW

Emissions
CO (g/L fuel): 16.5
Unburned HC (g/L fuel): 0.72
Particulates (g/L fuel): 0.1
Fuel Sulfur to PM (%): 2.2
NOx (g/L fuel): 15.5

Optimization
 Simulate systems with and without this generator
 Include in all systems

Generic
homerenergy.com
 Andy Kruse
sales@homerenergy.com
 +(1) 720-565-4046
 HOMER Energy
 1790 30th St, Suite 100
 Boulder, CO 80301 USA

HOMER ENERGY

Generator Cost
\$ per kW of capacity.

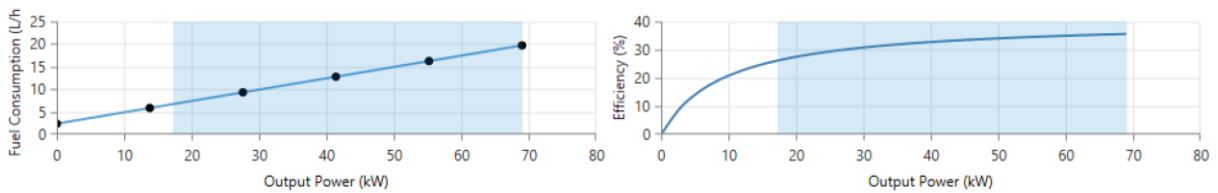
Initial Capital: \$500.00
Replacement: \$500.00
O&M (per hour): \$0.030

More Information

Electrical Bus
 AC DC

Site Specific Fuel Maintenance Schedule

Minimum Load Ratio (%): 25.00
Heat Recovery Ratio (%): 0.00
Lifetime (Hours): 15,000.00
Minimum Runtime (Minutes): 0.00



FIGUR 43: DATA FOR DIESELGENERATOR

GENERATOR Name: Generic Gas Microturbine Abbreviation: CHPGen

Remove
Copy To Library

Properties
Name: Generic Gas Microturbine with CHP
Abbreviation: CHPGen
Manufacturer: Generic
www.homerenergy.com

Notes:

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/hr)
200	\$2,000.00	\$1,500.00	\$0.010

Click here to add new item

Multiplier:

Capacity Optimization
Size (kW)
0
25
50

Electrical Bus
 AC DC

Site Specific Input
 Minimum Load Ratio (%): 10.00 Heat Recovery Ratio (%): 60.00
 Lifetime (Hours): 40,000.00 Minimum Runtime (Minutes): 0.00

Fuel Resource Fuel Curve Biogas Emissions Maintenance Schedule

Reference generator capacity: 50
Intercept Coefficient (L/hr/kW rated): 0.0000
Slope (L/hr/kW output): 0.2900

Fuel Curve Table

Output (kW)	Consumption (L/hr)
Click here to add new item	

Chart Type: Fuel Flow Efficiency

The figure contains a single graph plotting Fuel Consumption (L/hr) on the y-axis (0 to 16) against Output Power (kW) on the x-axis (0 to 60). A blue line shows a linear increase from 0 L/hr at 0 kW to 15 L/hr at 50 kW.

FIGUR 44: DATA FOR GASTURBIN

BOILER

Remove
Copy To Library

Name: Abbreviation:

Generic Boiler ▼

Efficiency (%): ⬅️ ➡️

Emissions

Carbon monoxide (g/L of fuel):

Unburned hydrocarbons (g/L of fuel):

Particulate matter (g/L of fuel):

Proportion of sulfur converted to PM (g/L of fuel):

Nitrogen oxides (g/L of fuel):

SELECT FUEL: ▼ Manage Fuels

Biodiesel Fuel Price (\$/L): ⬅️ ➡️

PROPERTIES

Lower Heating Value (MJ/kg): 38.5

Density (kg/m3): 880

Carbon Content (%): 0

Sulfur Content (%): 0

FIGUR 45: DATA FOR OLJEFYR

STORAGE

Remove
Copy To Library

Name: Abbreviation:

Properties

Idealized Battery Model

Nominal Voltage (V): 6

Nominal Capacity (kWh): 1

Nominal Capacity (Ah): 167

Roundtrip efficiency (%): 90

Maximum Charge Current (A): 167

Maximum Discharge Current (A): 500

www.homerenergy.com

This is a generic 6 volt lithium ion battery with 1 kWh of energy storage.

Generic

homerenergy.com

Andy Kruse

sales@homerenergy.com

+(1) 720-565-4046

HOMER Energy

1790 30th St, Suite 100

Boulder, CO 80301 USA

More Information

Batteries

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$400.00	\$400.00	\$10.00

Lifetime

time (years): ⬅️ ➡️

throughput (kWh): ⬅️ ➡️

More...

Quantity Optimization

HOMER Optimizer™

Search Space

Advanced

Upper:

Lower:

Base:

Site Specific Input


String Size: Voltage: 6 V

Initial State of Charge (%): ⬅️ ➡️

Minimum State of Charge (%): ⬅️ ➡️

Minimum storage life (yrs): ⬅️ ➡️ Maintenance Schedule...

FIGUR 46: DATA FOR BATTERI



THERMAL LOAD CONTROLLER

Name: Thermal Load Controller Abbreviation: TLC

Remove
Copy To Library

Thermal Load Controller

Properties

Name: **Thermal Load Controller**

Abbreviation: **TLC**

Manufacturer: **Generic**

www.homerenergy.com

Notes:
This is a generic Thermal Load Controller.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)	
1	\$200.00	\$200.00	\$0.0	✕
Click here to add new item				

Multiplier: (-) (-) (-)

Capacity Optimization

Size (kW)

50

Lifetime (years): 20.00 (-)

Bus Connection: AC

Do not include the thermal load controller in the optimization.

FIGUR 47: DATA FOR TERMISK LASTKONTROLLER

ECONOMICS \$

Nominal discount rate (%): 8.00 (-)

Expected inflation rate (%): 2.00 (-)

Project lifetime (years): 25.00 (-)

System fixed capital cost (\$): 0.00 (-)

System fixed O&M cost (\$/yr): 0.00 (-)

Capacity shortage penalty (\$/kWh): 0.00 (-)

Currency: US Dollar (\$)

Real discount rate (%): 5.88

FIGUR 48: ØKONOMISKE PARAMETER BRUKT I SIMULERINGENE

CONSTRAINTS 📦

Maximum annual capacity shortage (%): 1.00 (-)

Minimum renewable fraction (%): 10.00 (-)

Operating Reserve

As a percentage of load

Load in current time step (%): 10.00 (-)

Annual peak load (%): 0.00 (-)

As a percentage renewable output

Solar power output (%): 25.00 (-)

Wind power output (%): 50.00 (-)

FIGUR 49: SYSTEMRESTRIKSJONER FOR SIMULERINGER