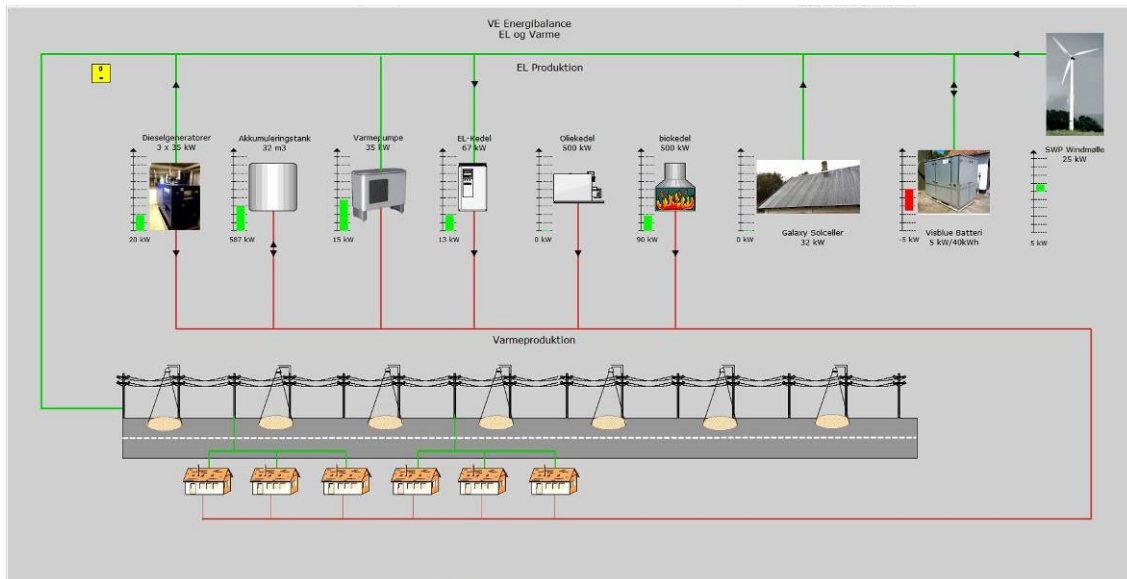


# Livø – Videre implementering af energiforsyningsløsninger på Livø

ForskVE 2012-1-12003

30. SEPTEMBER 2019



## SLUTRAPPORT

Miljø- og Fødevareministeriet  
Naturstyrelsen



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

COWI

intego

## Projektdetaljer

<b>Project title</b>	Livø – Videre implementering af energiforsyning på Livø
<b>Project identification (program abbrev. and file)</b>	ForskVE 2012-1-12003
<b>Name of the programme which has funded the project</b>	ForskVE
<b>Project managing company/institution (name and address)</b>	Naturstyrelsen Himmerland Møldrupvej 26 9520 Skørping
<b>Project partners</b>	COWI Aalborg Universitet, Institut for planlægning Aalborg Universitet, Institut for energiteknik Intego A/S
<b>CVR (central business register)</b>	33157274
<b>Date for submission</b>	1. oktober 2019

## Indholdsfortegnelse

Short description of project objectives and results	4
Kort beskrivelse af projektmål og resultater	4
Resume	5
1. Projektmål	7
2. Projekt resultater og formidling af resultater	9
1.1 Projektforløb	7
2.1 FASE 1-A Etablering af en alternativ	9
2.1.1 Delmål	9
2.1.2 Solceller	9
2.1.3 Vindmølle	11
2.1.4 Elkedel	15
2.1.5 Akkumuleringstank	17
2.1.6 Fjernvarme	17
2.1.7 Måleprogram	19
2.1.8 Delkonklusion	20
2.2 FASE 1-B: Videre udvikling af elsystemet på Livø	22
2.2.1 Delmål	22
2.2.2 Energibalanceanalyse og dynamisk simulering (AAU energi)	23
2.2.3 Batteri	26
2.2.4 Varmepumper	28
2.3 Styringen og overvågningen af el- og varmesystem	29
2.3.1 Analyse af forskellige styringsmuligheder	29
2.3.2 Design af styring og overvågning	31
2.3.3 Idriftsættelse og demonstration	31
2.3.4 Delkonklusion	32
2.4 FASE 1-C: Plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø	34
2.4.1 Delmål	34
2.4.2 Vurdering af forskellige teknologier og scenarier	34
2.4.3 Plan for 100 % VE inkl. også landbrugsmaskiner og transport	34
2.4.4 Tidslig rækkefølge for opsætning af systemer og rapportering	35
2.4.5 Delkonklusion	37
3. Formidling	
3.1 Publikationer, foldere, plakater og projekt hjemmeside	38
3.2 Eksterne samarbejder, artikler, workshops mv.	39
3.3 Udvikling af events for børn og familier med tema om grøn energi	40
3.4 Udvikling af hjemmeside til download af realtidsdata.	40
4. Anvendelse af projektresultater	42
5. Projektkonklusion og perspektivering	43
<b>Annex</b>	<b>45</b>

## **Short description of project objectives and results**

*Based on Livø, suitable RE solutions for small islands without connection to the national main grid are found and established. A power management concept is developed and demonstrated, which at all times ensures that the island's energy needs are met. Finally, an energy plan with the long-term goal of 100% self-sufficiency is described.*

*An electricity and heat production based on solar and wind has been established. The RE technologies cover 45% of the electrical and heat consumption compared to 17% at the start of the project. A saving in consumption of 43%, and a corresponding reduction in CO<sub>2</sub>-emissions.*

*The project has contributed to knowledge of and practical experience in how small RE technologies can be put together and managed for a stable electricity and heat supply. Results can be disseminated to other small islands and other isolated communities where there is a particular challenge to integrate renewable energy.*

## **Kort beskrivelse af projektmål og resultater**

Med udgangspunkt i Livø findes og etableres egnede VE-løsninger til små øer uden tilkobling til det nationale forsyningsnet. Der udvikles og demonstreres en styringskoncept, som til alle tider sørger for at dække øens energibehov. Desuden beskrives en plan for energiforsyning på Livø, hvor det langsigtede mål er 100% selvforsyning.

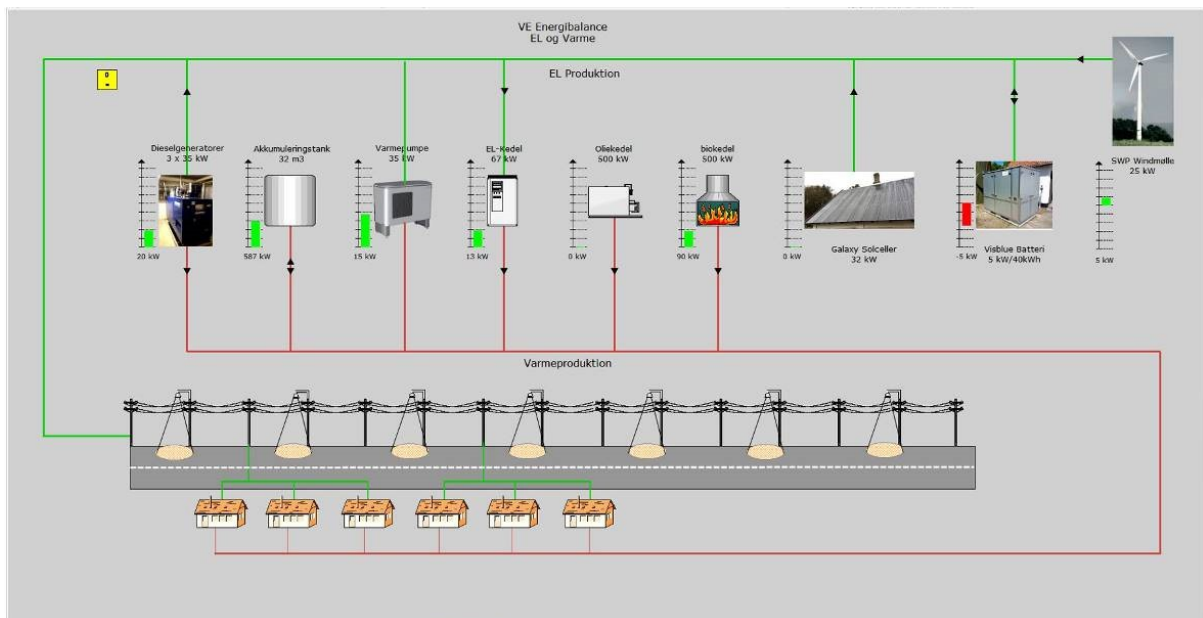
Der er etableret en el- og varmeproduktion baseret på sol og vind, som aflaster øens generatorer. VE-teknologierne dækker 45% af el- og varmekonsumet mod 17% ved projektets start. En besparelse i diesel/olie forbruget på ca. 43%, og tilsvarende reduktion i CO<sub>2</sub>-emissionen.

Projektet har bidraget til viden om og praktisk erfaring med, hvordan små VE teknologier baseret på lokale ressourcer kan sammensættes og styres til en stabil el- og varmeforsyning. Resultater kan udbredes til andre småøer og andre isolerede samfund, hvor det er en særlig udfordring at integrere vedvarende energi.

## Resume

Naturstyrelsen gennemførte i 2012-13 projektet ForskEL 2012-1-10826, Livø – første implementering af energiforsyningsløsninger i samarbejde med COWI. Projekt bestod i at undersøge og beskrive, hvordan Livø, som ikke har noget elkabel til fastlandet, i videst mulig omfang kan forsynes med vedvarende energi.

Resultaterne fra det forudgående ForskEL-projekt udgør en væsentlig del af grundlaget for det netop afsluttede ForskVE projekt, som denne slutrapportering vedrører, og det har netop haft til formål at videreføre den konkrete udbygning af en bæredygtig energiforsyning på Livø, der reducerer forbruget af importeret dieselolie mest muligt og dernæst at udarbejde en plan for den langsigtede energiforsyning på Livø.



Figur 1 Livøs energikoncept.

Projektet har forløbet i 3 delfaser:

- Fase 1 A, hvor det har været målet at få etableret en alternativ elproduktion, som kan aflaste produktion på de eksisterende dieselgeneratorer
- Fase 1 B, hvor det har været målet at videreudvikle elsystemet på Livø, så det er muligt i perioder at stoppe drift af generatorer.
- Fase 1 C, hvor målet har været at udarbejde en plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø.

Projektet har i første omgang omfattet etablering af en 25 kW hustandsvindmølle, 33 kW solceller, en elkedel på 67 kW, og en akkumuleringstank på 30m<sup>3</sup>. Dernæst er etableret et batteri og to varmepumper, samt ikke mindst en overordnet styring, der automatisk balancerer produktionen, og sørger for at overskydende el udnyttes til produktion af varme via elkedel eller varmepumper eller lagres i batteriet.

I projektet er udviklet og demonstreret en lokal og overordnet styring af energiproduktionen, der til alle tider sørger for at dække energibehovet (el så vel som varme). Ved overskudsproduktion af el fra solcellerne og vindmøllen i forhold til elforbruget prioriteres at anvende den først til varmeproduktion via varmepumperne, da det giver en bedre udnyttelsesgrad (høj COP faktor), dernæst anvendes elkedlen eller batteriet til lagring. I mangel af varmeproduktion fra enten dieselgeneratorerne, varmepumperne eller elkedlen anvendes brændselsfyret til dækning af varmebehovet, og kun i virkelig varmekrævende perioder anvendes også oliekedlen til sikring af varmebehovet.

Helt overordnet har projektet resulteret i, at der er etableret en alternativ el- og varme-produktion baseret på sol og vind, som aflaster produktionen på dieselgeneratorerne. Produktionen fra VE-teknologier vurderes at dække 45% af el- og varmekonsumet, fra omkring 17% ved projektets start. Denne forøgelse i Ve-andelen, svarer til en besparelse i diesel/olie forbruget på ca. 43%. Hermed er også CO<sub>2</sub>-emissionen reduceret med 43%.

Der er i projektet arbejdet med at formidle Livø's grønne omstilling på flere niveauer, hvilket er en vigtig del af fortællingen om det fremtidige Livø.

I samarbejde med VisitVesthimmerland er der sket en bred formidling i forhold til øens gæster, der er afholdt familiearrangementer "Grøn Energidag", og samarbejdspartner DEIF har udarbejdet en "case story" om øen. Desuden er oplysninger om produktions- og forbrugsdata for det samlede energisystem på Livø gjort tilgængelig for skoler og andre uddannelsesinstitutioner via Naturstyrelsens projekthjemmeside.

Afslutningsvis er der udarbejdet en plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø. Der er beskrevet mulige tiltag i en tidlig rækkefølge frem mod 80% selvforsyning, samt overvejelser om hvordan et mere langsigtet mål om 100% selvforsyning kan nås. En plan som vil danne grundlag for det videre arbejde med energiforsyningsløsninger på Livø.

Projektet har med Livø som udgangspunkt bidraget til at der er opnået viden om og praktisk erfaring med, hvordan små VE teknologier baseret på lokale ressourcer kan sammensættes og styres til en stabil el- og varmekonsum. En viden og erfaring som kan udbredes til andre småøer og andre isolerede samfund, hvor der er en særlig udfordring at integrere vedvarende energi.

## 1. Projekt mål

Naturstyrelsen gennemførte i 2012-13 projektet ForskEL 2012-1-10826, Livø – første implementering af energiforsyningsløsninger i samarbejde med COWI. Projekt bestod i at undersøge og beskrive, hvordan Livø, som ikke har noget elkabel til fastlandet, i videst mulig omfang kan forsynes med vedvarende energi.

Resultaterne fra det forudgående ForskEL-projekt udgør en væsentlig del af grundlaget for det netop afsluttede ForskVE projekt, som denne slutrapportering vedrører, og det har netop haft til formål at videreføre den konkrete udbygning af en bæredygtig energiforsyning på Livø

Projektets overordnede mål har været:

- at gennemføre en omlægning af energiforsyningsstrukturen på Livø til en mere bæredygtig energiforsyning, som ved brug af egnede VE-løsninger reducerer forbruget af dieselolie mest muligt.
- at udvikle og demonstrere såvel lokal som overordnet styring og beskyttelse af energiproduktionen, som sikrer en stabil leverance af el og varme på øen.
- at formidle Livøs grønne omstilling og sammen med Naturstyrelsens øvrige udviklingsinitiativer på Livø at gøre fortællingen om en bæredygtig ø til en attraktion på lige fod med Livøs øvrige tilbud, natur og kulturhistorie.

### 1.1 Projektforløb

Projektudførelsen har været tilrettelagt til at forløbe i 3 faser:

- Fase 1 A, hvor det har været målet at få etableret en alternativ elproduktion, som kan aflaste produktion på de eksisterende dieselgeneratorer
- Fase 1 B, hvor det har været målet at videreudvikle elsystemet på Livø, så det er muligt i perioder at stoppe drift af generatorer.
- Fase 1 C, hvor målet har været at udarbejde en plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø.

I praksis har overgang mellem projektfaserne været flydende, specielt fase 1-A og 1-B.

For at kvalificere energibalancesimuleringerne af det samlede energisystem var det ønsket at etablere et måleprogram og udstyr til opsamling af data. Ved projektstart var der målinger af produktionsdata fra generatoranlægget, men der var ingen målte varmeforbrugsdata. Det var ligeledes ønskeligt at indsamle data for en længere sammenhængende periode på 6-8 måneder henover både vinter og forår.

Udskiftning af fjernvarmesystemet på Livø forsinkede imidlertid etablering og idriftsættelse af måleudstyret, og projektet opnåede derfor en forlængelse af projektperioden på et år.

I forhold til den reviderede tidsplan for projektet har der været forsinkelser på enkelte delelementer, men de er alle gennemført inden for den samlede tidsplan for projektet.

Hensyn til arealfredningen på Livø blev allerede i forbindelse med projektansøgningen angivet, som en risiko for gennemførelse af energiløsningerne, særligt i relation til opsætning af en vindmølle. Derfor blev der tidligt i projektet arbejdet med flere forskellige placeringer både en indenfor og en udenfor fredningen. Myndighedsbehandling hos henholdsvis Miljøstyrelsen, Vesthimmerlands Kommune og Fredningsnævnet tog tid, men det lykkedes finde en placering af møllen, hvor den ville give en fornuftig produktion, og samtidig med sin placering kunne tilgodese frednings- og miljømæssige krav.

Etablering og idriftsættelse af elkedlen blev forsinket dels fordi det viste sig umuligt at finde en standardløsning med trinløs regulering, og senere fordi leverandørens trinregulering viste sig at være for langsom og grov.

Det har taget tid at finde og installere de rette komponenter til styring og overvågning.

Batterier til lagring af større energimængder er fortsat i sin spæde start, og det har derfor været vanskeligt at finde relevante leverandører af en løsning. I forbindelse med dimensionering og etablering af batteriløsningen blev det konstateret, at behovet for VE-løsningen i høj grad burde rettes mod varmeproduktionen parallelt med elproduktionen. Der kunne opnås en bedre udnyttelse af overskudsenergi via en varmepumpe frem for lagring i et batteri. Derfor blev der foretaget en projektilpasning som omfattede indkøb af to varmepumper.

#### Partnerskift

Caverion A/S som var partner i projektet fra start stoppede deres aktiviteter indenfor automatisering i Danmark pr. 31. september 2018.

Naturstyrelsen og de øvrige projektparter indgik derfor pr. 1 oktober 2018 en samarbejdsaftale med Intego om færdiggørelse af projektet som løber frem til 1. oktober 2019.



## 2. Projekt resultater og formidling af resultater

Nedenfor er for hver af faserne i projektet givet en beskrivelse af delmål og resultater. For en detaljeret beskrivelse af simuleringresultaterne henvises til de udarbejdede projektrapporter (bilag til denne slutrapport).

### 2.1 FASE 1-A Etablering af en alternativ

#### 2.1.1 Delmål

I denne fase af projektet har det været målet at etablere en alternativ elproduktion baseret på sol og vind, som kunne aflaste produktionen på dieselgeneratorerne. Det var målet at produktionen fra VE-teknologien skulle dække mindst 40% af elforbruget med mindst én generator værende i drift.

#### 2.1.2 Solceller

En arealfredning på Livø forhindrer opsætning af tekniske anlæg uden for Livø By, som samtidigt udgør et værdifuldt kulturmiljø. Mulighederne for placering af solcelleanlæg på øen er derfor begrænsede, og ved valg af løsning har det været afgørende at etablering af et anlæg kunne ske med størst mulig respekt og hensyntagen til den bevaringsværdige bebyggelse og de fredede/beskyttede naturområder på øen.

På baggrund af en kravspecifikation er indhentet tilbud fra to leverandører på henholdsvis integrerede tagløsninger og markanlæg. Der er valgt et integreret solcelleanlæg fra Galaxy Energi Danmark. Valget af det integrerede solcelleanlæg er foretaget ud fra en samlet vurdering af æstetik, eksisterende tagfladers anvendelighed (opfyldelse af krav til bl.a. solindfald) og økonomi.

Det integrerede solcelleanlæg er etableret på en eksisterende bygning, kaldet "Smedjen" beliggende i den nordlige ende af Livø by. Der er installeret i alt 215 m<sup>2</sup> eller 33,3 kW. Solpanelerne er af typen monokrystaliske, sorte og transparente, dvs. de tillader 12 % dagslys at skinne igennem panelerne. Invertere er af typen SMA Sunny Tripower. Anlægget er tilsluttet det lokale forsyningsnet via bygningstavle placeret i et operatørrum ved Livøs biokedel i den nordlige ende af byen, og der er i samarbejde med DEIF installeret en styring (DEIF controllerenhed), som balancerer output fra solcelleanlægget samtidig med, at der tages hensyn til generatoranlæggets minimumslast. Kommunikation til den fælles overordnede styring på elværket sker via det etablerede fibernet, som er ført frem til operatørrummet.

Oprindeligt var det tanken at solcellerne skulle etableres ad to omgange, idet man ved hjælp af de systemsimuleringer der også var en del af projektet ville regne på behovet. Men fordi en integreret tagløsning var at foretrække ud fra et æstetisk hensyn, blev det valgt at etablere solcelleanlægget ad en gang.

Anlægget blev idriftsat april 2018.



*Figur 2 Etablering af solcelletag, november 2016.*



*Figur 3 Det færdige solcelletag, maj 2017.*

### 2.1.3 Vindmølle

Indledningsvis blev foretaget en screening af mindre typegodkendte møller, og der blev fundet 4 møller som kunne være relevant for Livø. Specielt én mølle fra Solid Wind Power, type SWP 25 var interessant, idet møllen er forsynet med en inverterløsning, der gør produktionen fra vindmøllen uafhængig af vingernes omdrejningstal. Dette er for Livø et afgørende element pga. den manglende kobling til det nationale elnet. Herudover er det ligeledes en fordel, at vindmøllen også producerer ved meget lave omdrejningstal og derfor kan producere ved lav vindhastighed.

I forbindelse med screening og valg af leverandør blev der gennemført et fabriksbesøg hos SWP sammen med beboere fra Livø, hvor leverandøren præsenterede møllen og emner som støj og visuelle gener mv. blev drøftet. En idriftværende mølle af samme type opstillet ved fabrikken blev besigtiget og det generelle indtryk var positivt. Inddragelse af specielt de faste beboere som nærmeste naboer til møllen var vigtig i forhold til den endelige beslutning om placering af møllen.



Figur 4 Fabriksbesøg i Skjern.



*Figur 5 Fabriksbesøg hos Solid Wind Power.*

Arealfredningen på Livø forhindrer anlæggelse af tekniske anlæg af enhver art indenfor fredningsgrænsen, og krav om overholdelse af støjkrav både i forhold til Livø feriecenter og til helårslejlighederne gør placeringmulighederne for en mølle meget begrænsede. Der blev foretaget en række analyser af møllens ydelser ved forskellige placeringer på Livø under hensyntagen til den gældende landskabsfredning og støjkrav. Der blev ligeledes udarbejdet en række visualiseringer af møllen på disse forskellige placeringer. Disse analyser og visualiseringer blev anvendt som grundlag for ansøgning om tilladelse til op-sætning.

Der blev pr. juli 2017 opnået tilladelse til at opsætte en "husstandsvindmølle" af typen SWP 25 i tilknytning til driftsbygninger ved Livø Avlsgård. Ved den placering, hvortil der er opnået tilladelse, er det vurderet at den årlige netto produktion er ca. 70 MWh/år. Det er ca. 24% mindre, end hvis møllen var placeret på åben mark, som i fht. vindforhold og driftstimer kunne være mere optimal. Landskabsfredningen, overholdelse af støjkrav og afstand til Livø Feriecenter og helårsbeboelserne gør imidlertid placeringen med den reducerede el-produktion til den mest optimale på Livø.

I forbindelse med den endelige placering af "husstandsvindmøllen" på Livø blev der sammen med leverandørerne afholdt en besigtigelse af de aktuelle forhold, herunder forhold omkring færgetransport af materiel til og fra øen. Pga. specifikke forhold på Livø var det nødvendigt at lave yderligere stabilitetssikring af møllefundament.

Medio juni 2018 blev husstandsvindmøllen leveret og opstillet af Solid Wind Power på den valgt position. Møllen er udstyret med komplet decentral styring- og reguleringsudrustning leveret af Orbital. Der blev afholdt "rejsegilde" på møllen den 4. juli 2018.

Møllen er tilsluttet det lokale forsyningsnet i den nordlige ende af byen, hvor den kan bidrage med en nominel effekt på op til 25 kW. Balanceringen af produktionen foregår via den overordnede styring i kombination med styringssystemet fra DEIF, som skal balancere samdriften med de øvrige VE-enheder. Kommunikation til det fælles overordnede styresystem på elværket sker via det etablerede fibernet, som er ført frem til møllen.



*Figur 6 Støbeform til fundament på plads, maj 2018.*



*Figur 7 Møllen samles liggende og derefter hejses på plads.*



*Figur 8 Møllen er på plads. Rejsegilde den 4. juli 2018.*

#### 2.1.4 Elkedel

For optimering af de producerende enheder baseret på VE er det vigtigt at kunne lagre den producerede energi i form af enten el (batterier) og/eller varme. Den varierende elproduktion fordrer en fleksibel konvertering fra el til varme både med hensyn til variationer i størrelsen af udsvingene samt hyppigheden, som udsvingene kommer med.

Elkedlen anvendes ved varierende forbrug til at stabilisere elnettet ved at optage svingninger forårsaget af varierende produktion på solceller og vindmølle. Én dieselgenerator opretholdes i drift med mindst sin minimumslast for samtidigt at kunne styre netfrekvens og  $\cos \phi$ .

Som udgangspunkt var der ønske om at kunne variere lasten på elkedlen trinløst og hurtigt for at udjævne variationer i elproduktionen. Elkedler med denne egenskab fandtes i udgangspunktet ikke som standard på markedet, så i første omgang blev der valgt et kompromis i form af en elkedel med mindst 15 trin. En kedel i det ønskede effektområde fra den Svenske fabrikant Värmebaronen kunne leveres med 15 trin á 4,5 kW, hvilket gav de bedste muligheder for at drive dieselgeneratoren så tæt på minimumslasten (ca. 11 kW) som muligt med samtidig mulighed for at ændre lasten med relativt små trin.

Den valgte elkedel er af type EP 67 NG på 67 kW 3x400 V 50 Hz. Elkedlen er en separat enhed med cirkulationspumpe, reguleringsventil og instrumentering. Elkedlen er indkoblet som en varmeproducerende enhed mellem en akkumuleringstank og fjernvarmenettet. Elkedlen er installeret på Livø elværk og tilsluttet elmæssigt i forsynings- og styretavle. På vandsiden er den tilsluttet på fjernvarmehovedrør via afspærringsventiler.

I forbindelse med idriftsættelse af elkedlen kunne det konstateres at dens indbyggede trinstyring indeholdt u hensigtsmæssige tidskonstanter og effektstyringen er efterfølgende ombygget med en tyristorstyring, så effektaftaget kan reguleres trinløst og hurtigt i det fulde område.



Figur 9 Elkedel installeres på Livø el- og varmeværk



*Akkumuleringstank ankommer færgen på Røn-  
bjerg havn.*



*Hjul monteres på tanken.*



*Tanken rulles ombord på færgen.*



*Akkumuleringstanken er ankommet Livø, og køres  
op mod el- og varmegæret.*



*Tanken er nu placeret ved el- og varmegæret.  
Herefter kan isoleringsarbejdet gå i gang.*



*Den færdige tank. November 2016.*

*Figur 10 Etablering af akkumuleringstank, efteråret 2016*



### 2.1.5 Akkumuleringstank

For at sikre fleksibilitet i systemet er etableret en varmeakkumuleringstank, der kan optage overskudsproduktion fra elkedlen. Lagertanken er vurderet at skulle have en kapacitet på mellem 30-40m<sup>3</sup> og udføres som en fuldt løbende tryktank.

Akkumuleringstankens dimensioner blev delvist fastlagt ud fra ønske om en fabriksproduceret tank og kapaciteten på Miniline færgen for at tanken kunne transporteres til Livø.

Akkumuleringstanken er leveret og opstillet af Danatank. Akkumuleringstanken blev idriftsat sammen med et nyt fjernvarmenet i foråret 2017, se afsnit 2.1.5.

### 2.1.6 Fjernvarme

Naturstyrelsen har parallelt med nærværende ForskVE projekt i perioden april 2016 til februar 2017 etableret nyt fjernvarmenet på Livø.

Det eksisterende fjernvarmenet på øen var nedslidt og utidssvarende. Der var problemer med et stigende antal ledningsbrud og et nettab på op mod 50%. For at opnå en reduktion i varmekonsumet på øen, samt større effekt af initiativerne med vedvarende energi var det derfor hensigtsmæssigt at udskifte øens fjernvarmesystem. Med udgangspunkt i det dimensioneringsgrundlag som blev udarbejdet som en del af det første ForskEL projekt i 2012-13 blev en renovering derfor i gangsat foråret 2016.

Der er således sket udskiftning af ca. 1,2 km forsyningsledninger og forsyningspumper, installeret energimåler i ledningsnet samt etableret varmevekslere i alle boliger for lokal varmt brugsvandstilberedning. Desuden er der foretaget en ombygning af øens biokedel pga. tryksætning af forsyningsledninger samt efterisolering af en eksisterende akkumuleringstank placeret i forbindelse med biokedlen.

Med projektet er nettabet reduceret til ca. 15%.

Samtidigt med etablering af fjernvarmenettet blev der etableret et fibernet, der anvendes til kommunikation og styring i nærværende projekt. Desuden blev der etableret energimålere hos hver enkelt forbruger.



*Fjernvarmerør på 8 meter er lastet på Mini-line, og klar til afgang mod Livø.*



*Ankomst Livø.*



*Fjernvarmerør køres i land.*



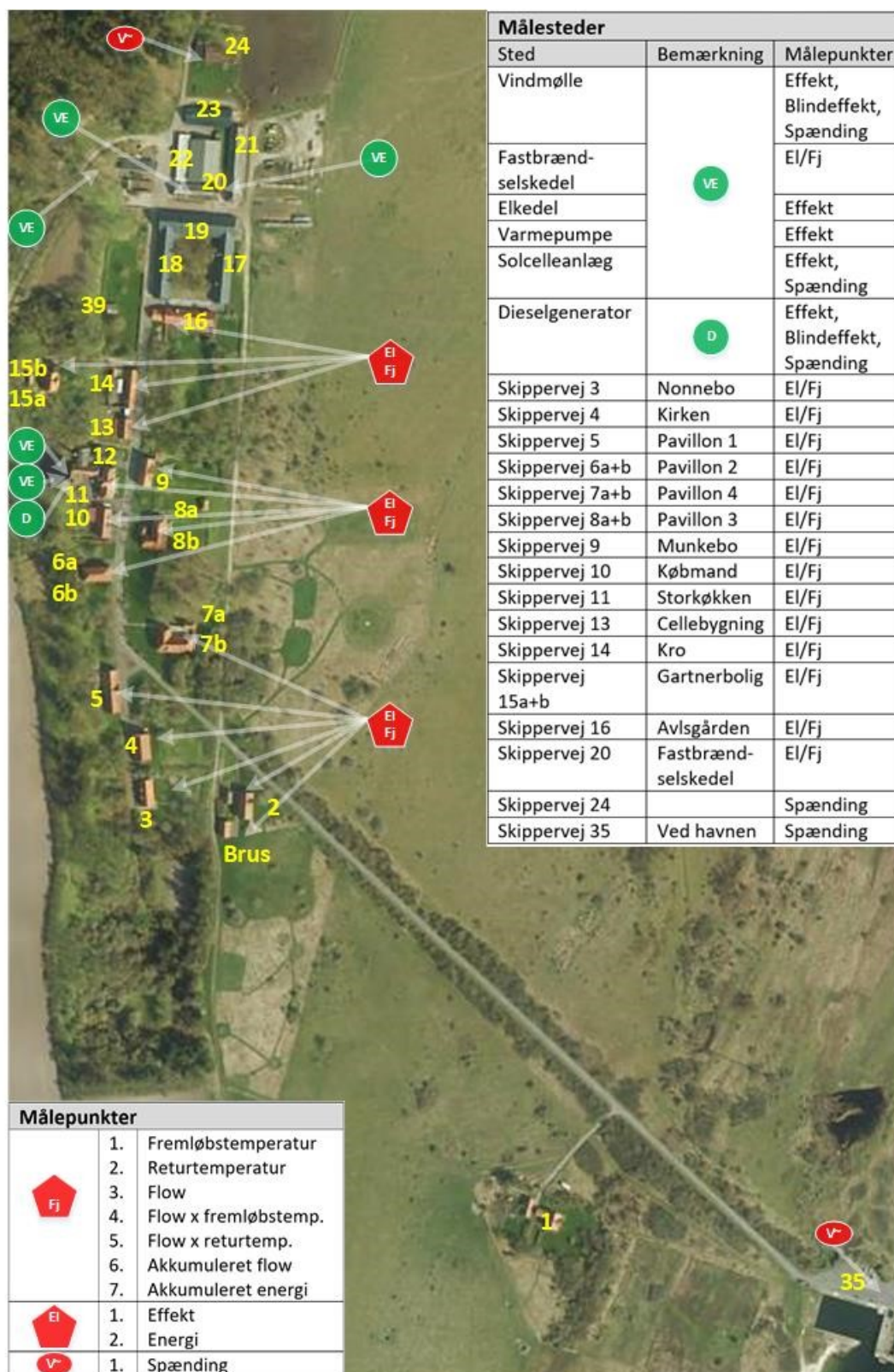
*Anlægsarbejder i gang, juni 2016.*



*Anlægsarbejder i gang, juni 2016.*

*Figur 11 Udskiftning af fjernvarmenet – maj 2016.*

## 2.1.7 Måleprogram



Figur 12 Målepunkter på Livø.

Der er etableret komplet måleprogram og udstyr på Livø for måling af

- El-kvalitet i yderenderne af nettet
- Forbrug af el- og varme hos alle forbrugere
- Relevante data som energi, effekt, blindeffekt og spænding for elproducerende enheder samt energi, effekt, temperaturer og flow for varmereproducerende enheder.
- Relevante data for energilagrende enheder dvs. batteri og varmeakkumuleringstank.

De opsamlede data skal anvendes dels til at skabe et overblik over energibalancen i systemet, dels som grundlag for den styring som skal regulere det samlede energianlæg. Data gøres ligeledes tilgængelige via den fælles FTP-server, der kan tilgås via Naturstyrelsens projekt hjemmeside.

#### *2.1.8 Delkonklusion*

Der er valgt et integreret solcelleanlæg ud fra en samlet vurdering af æstetik, eksisterende tagfladers anvendelighed (opfyldelse af krav til bl.a. solindfald) og økonomi.

Der er fundet en løsning, hvor der ved vind kan produceres mere end de specificerede 20 kW, dette på trods af de begrænsede muligheder som følge af fredningsbestemmelserne og begrænsning af støj. Det er lykkedes, at finde en kompromisløsning for placeringen af en vindmølle på Livø, hvor møllen har en fornuftig produktion, og samtidig med sin placering tilgodeser de æstetiske og miljømæssige krav.

For optimering af de producerende enheder baseret på VE er det vigtigt at kunne lagre den producerede energi i form af enten el (batterier) og/eller varme. Den varierende elproduktion fordrer en fleksibel konvertering fra el til varme både med hensyn til variationer i størrelsen af udsvingene samt hyppigheden, som udsvingene kommer med. Det kræver en stor fleksibilitet af elkedlen både med hensyn til effekttrin samt hastigheden for skift imellem effekttrinene.

Elkedelen er i udgangspunktet velegnet til at foretage tilpasningen af elforbruget til den aktuelle elproduktion ved produktion af fjernvarmevand til akkumuleringstanken ved høj elproduktion henholdsvis afladning af akkumuleringstanken ved lav elproduktion. Men for at elkedlens forbrug kan tilpasses tilstrækkeligt, skal variationen i forbrug kunne ske trinløst og hurtigt. For at anvende den producerede el effektivt vil det være en fordel at anvende en varmepumpe i kombination med elkedlen for at øge virkningsgraden. Herved kan varmepumpens virkningsgrad udnyttes for de længerevarende og langsomt ændrende lasttilpasninger, hvor elkedlen anvendes til de hurtige variationer.

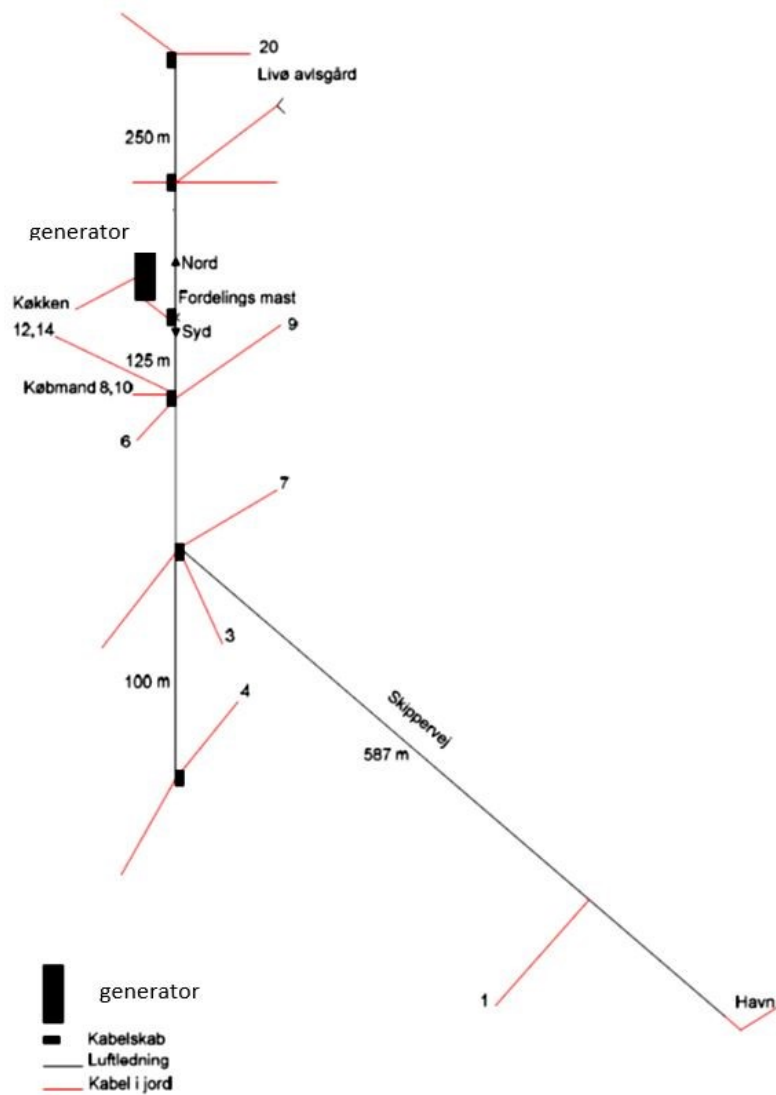
Der er etableret et komplet måleprogram og -udstyr på Livø. Data opsamles og anvendes dels til at skabe et overblik over energibalancen i systemet, dels som grundlag for den styring som skal regulere det samlede energianlæg.

Simuleringerne, jf. afsnit 2.2 viser at der selv med de nye vedvarende energikilder vil være flere perioder på året, hvor der ikke er tilstrækkelig elproduktion til at kunne erstatte dieselgeneratorerne, og det er endvidere også fastlagt at en af dieselgeneratorerne skal køre med minimum 11 kW, for at sikre frekvensstabilitet i nettet. Der kan ved disse simuleringer opnås en dækning på ca. 49 % af elbehovet fra vedvarende energikilder.

## 2.2 FASE 1-B: Videre udvikling af elsystemet på Livø

### 2.2.1 Delmål

I denne fase har det været målet at videreudvikle elsystemet på Livø mod en større grad af selvforsyning, så det bliver muligt i perioder helt at stoppe driften på øens generato-  
rer. Det har ligeledes være målet at udvikle og demonstrere en styring og beskyttelse af  
energiproduktionen, som sikrer en stabil leverance af el og varme på Livø.



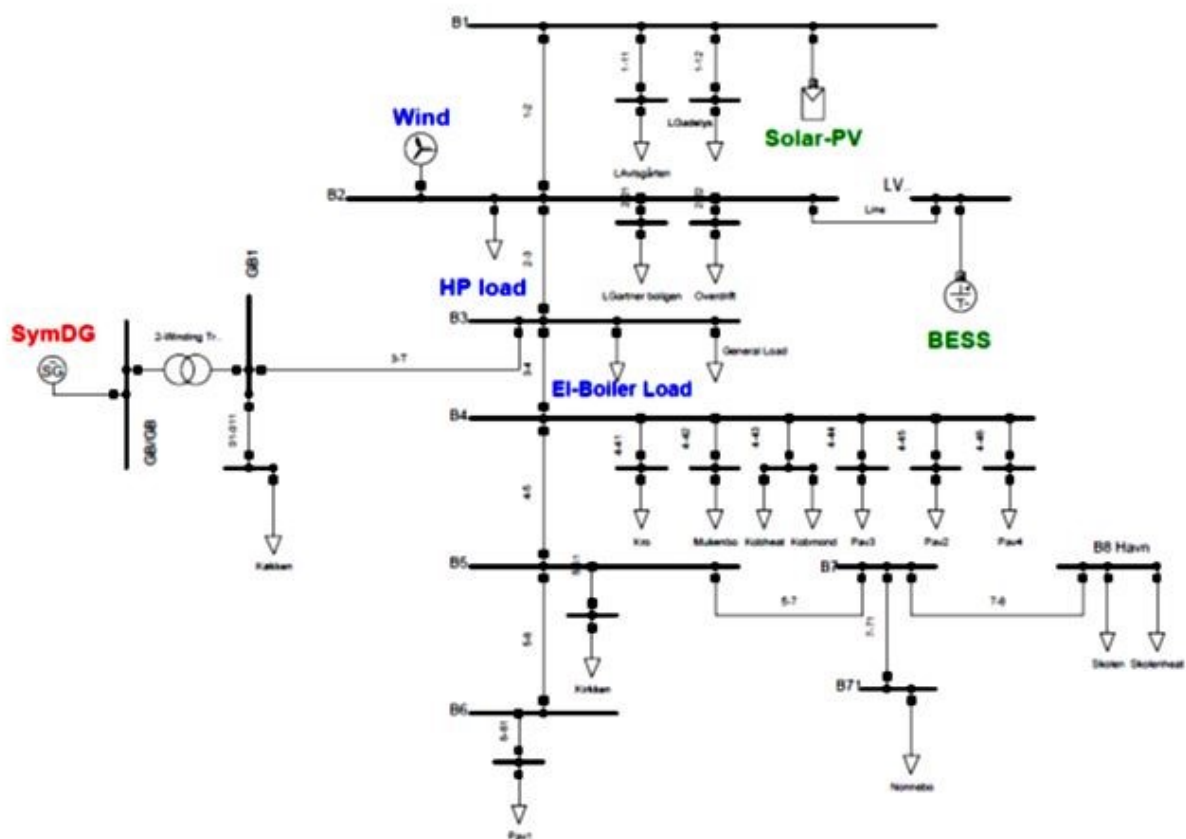
Figur 13 El distributionsnet på Livø.

### 2.2.2 Energibalancesanalyse og dynamisk simulering (AAU energi)

Der er foretaget analyse af, hvordan de valgte teknologier tilsammen og mest optimalt kan dække el- og varmebehovet på Livø time for time i løbet af året, samt foretaget vurdering af den endelige størrelse af VE-teknologierne.

#### Basecase

Systemet på Livø er indledningsvis simuleret i simuleringssprogrammet DigSilent fra Power Factory med de komponenter, som eksisterede ved projektstart (diesलगenerator, olie og brændefyr samt elektriske og termiske belastninger) ud fra målte elektriske data og simulerede varmedata, baseret på årligt varmeforbrug. Dette for at verificere den grundlæggende model.



Figur 14 DIgSILENT model

#### Fase 1-A: vindmølle, solceller, el-kedel og akkumuleringstank

Dernæst er der i løbet af efteråret 2016 og foråret 2017 udført simuleringer med belastningsdata fra 2016 og 2017, hvor en vindmølle (25 kW), solceller (33,3 kW), elkedel (67,5 kW) og en akkumuleringstank på 30 m<sup>3</sup> indgår. Der er indhentet realistiske målinger for solindstråling og vindhastigheder for at simulere de vedvarende energikilder.

I første omgang er styringen simuleret således, at solcellerne og vindmølle primært dækker elforbruget, og overskuds-el anvendes i elkedlen til varmeproduktion, og resten af varmebehovet dækkes primært af fastbrændselsfyret og evt. oliefyret.

Helt overordnet viser simuleringerne at en kombination af sol og vind er nødvendig, hvis øen på en effektiv måde skal selvforsyne Livø med vedvarende energi. Vindmøllen supplerer solcelleanlægget på tidspunkter, hvor der ikke produceres el på disse.

Simuleringerne viser (I rapporten "Simulering af belastning på Livø og Livø - Further Implementation of Energy Supply Solutions"), at selv med de nye vedvarende energikilder vil der være flere perioder på året, hvor der ikke er tilstrækkelig elproduktion til at kunne erstatte dieselgeneratorerne, og det er endvidere også fastlagt at en af dieselgeneratorerne skal køre med minimum 11 kW, for at sikre frekvensstabilitet i nettet. Der kan ved disse simuleringer opnås en dækning på ca. 49 % af elbehovet fra vedvarende energikilder.

Den mængde spildvarme, som tidligere blev tilført systemet fra de nu udskiftede dieselgeneratorer, svarer næsten til den mængde varme som elkedlen producerer ved overskudsel fra sol og vind. Behovet for varme leveret af fastbrændselsfyret og oliefyret er derfor næsten uændret. Besparelsen i fossilt brændstof vil således i det simulerede system svare til den andel, el-produktionen via generatorerne reduceres.

Der vil være nogle få perioder hen over året, hvor der er overskudsproduktion af el i et system med både en vindmølle og solceller, hvis der kun ses på den øjeblikkelige belastning. Men anvendes f.eks. et energilager vil der med ovennævnte system ikke være tilstrækkelig produktion fra de vedvarende energikilder til at dække elforbruget over hele året, idet overskuddet i perioderne med for meget produktion er væsentligt mindre end den energi, der mangler.

Der er yderligere gennemført simuleringer med et større solcelleanlæg (dobbelt størrelse) og en større vindmølle (50kW). Selv i disse simuleringer kan varmeproduktionen via el-kedel og lagringstanken ikke imødekomme varmebehovet.

Installeres der yderligere elproducerende enheder i systemet, f.eks. solceller, vil der forekomme flere perioder, hvor der er behov for at forbruge en overskudsproduktion. Ligeledes viste simuleringer, at overskudsvarmen fra dieselgeneratorerne vil blive reduceret betydeligt med integrationen af solceller og vindmølle, hvorved det vil være relevant at undersøge, hvad der kunne bruges i stedet for denne mindre overskudsvarme. Derfor blev det i løbet af projektperioden undersøgt om et alternativ til elkedlen kunne være at supplere systemet med en luft til vand varmepumpe. COP faktoren for varmepumper er typisk 2-4 mod 1 for elkedlen, hvorved der kan opnås mere varme ved samme elforbrug. En varmepumpe vil ligeledes give fleksibilitet til det integrerede el og varmesystem i forhold til, hvornår varmen produceres. Den producerede varme kan lagres i akkumuleringstanken, som ifølge modelsimuleringerne ser ud til at have rigelig kapacitet.

Registrering af fjernvarmeforbruget blev påbegyndt januar 2018. Med opsamling af data for fjernvarmebehovet ab værk på timeniveau blev det muligt at kvalificere den time-



mæssige distribution af fjernvarmebehovet på Livø, og herved effekten af en varmepumpe i fjernvarmenettet.

For at undersøge effekten af en varmepumpe blev der regnet på et energisystem, hvor elkedel, vindmølle og solceller er i fuld drift. Disse beregninger blev lavet i energibalance simuleringsværktøjet energyPRO, hvor el- og fjernvarmesystemet blev simuleret for et års drift. Der har ligeledes været diskuteret om solvarme kunne være en mulighed for at reducere brændselsforbruget på Livø. I simuleringerne blev det således undersøgt, hvordan solvarme og varmepumper eventuelt vil kunne anvendes i fjernvarmesystemet på Livø, og hvilke effekter disse teknologier ville have på energisystemet og dets brændselsforbrug (ekskl. vind og sol).

Simuleringerne viste, at 125 m<sup>2</sup> solvarme med ekstra fjernvarmelager vil kunne reducere det samlede brændselsforbrug på Livø med op mod ca. 15%, da brugen af oliekedlen og trækedlen kan reduceres især i forårs og sommermånederne.

Ligeledes viste simuleringerne, at 10 kW-el varmepumper i fjernvarmenettet vil kunne reducere brændselsforbruget på Livø med op mod ca. 23%, hvor brugen af oliekedlen og trækedlen kan reduceres igennem hele året, dog ekskl. nogle spidsperioder om vinteren og tidligt forår. Ligeledes viste simuleringerne, at varmepumpen skaber potentialet for en øget udnyttelse af strøm fra solceller og vindmølle i fjernvarmenettet.

#### Fase 1-B: Videre udvikling af energisystem (batteri, yderligere solceller og varmepumper)

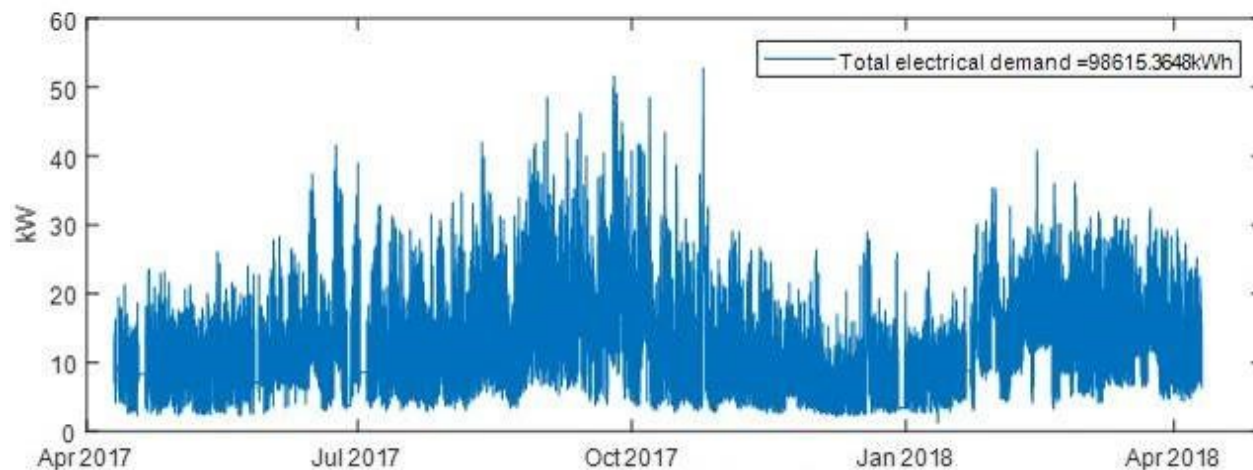
I løbet af foråret 2019 er der lavet yderligere dynamiske simuleringer i DigSilent Power Factory simuleringsprogrammet, hvor alle nye installerede komponenter er taget med i simuleringerne. Det vil sige, at modellen udover dieselgeneratorer, elkedel, vindmølle, solceller, olie- og brændefyr yderligere inkluderes modeller af 2 varmepumper på hver 3,8 kW samt et flow-batteri på 5kW effekt og en kapacitet på 40 kWh. Der er anvendt målte data for el og varme for perioden april 2017 til april 2018. Styringen af disse er nærmere beskrevet i afsnit 2.2.4. Systemet og simuleringerne for dette er nærmere beskrevet i rapporten "Livø-further implementation of energy supply solutions II".

Ved anvendelse af varmepumper i tilknytning til det eksisterende system, forventes det at olieforbruget ved optimal styring af de indgående komponenter kan minimeres fra omkring 35610 liter per år til omkring 27745 liter per år, svarende til 22%.

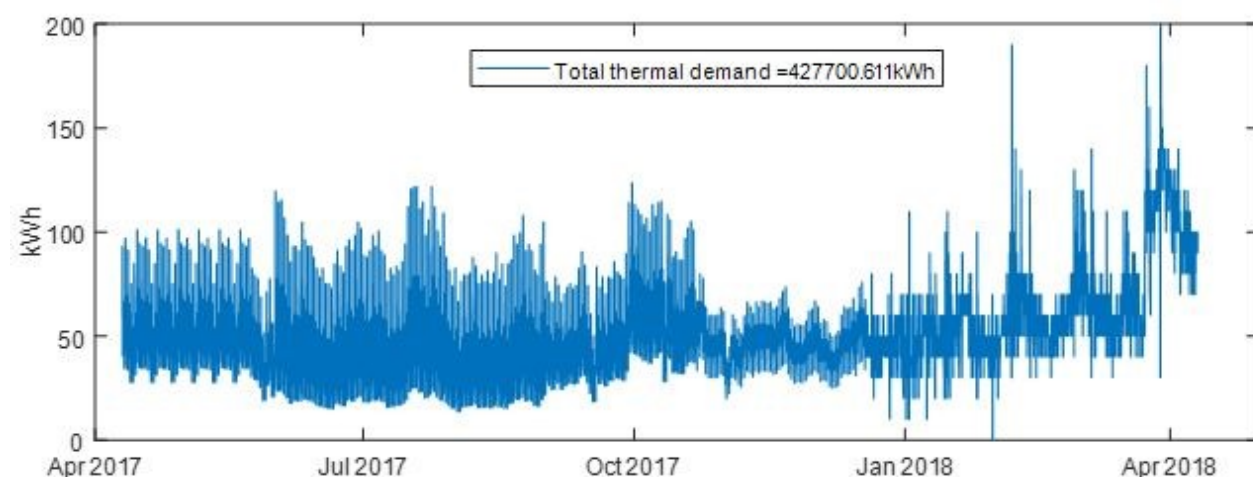
Simuleringerne viser endvidere at der kun er behov for at anvende oliekedlen i meget få perioder over året (oktober og april), mens brændekedlen stadig skal anvendes i flere perioder fra oktober og frem til april, mens der i sommerperioderne ikke længere er et behov herfor, da varmen kan dækkes af dieselgeneratorens varmeproduktion sammen med den varme der produceres fra varmepumperne og elkedlen baseret på overskudsel fra vindmøllen og solcellerne.

Resultaterne viser at dieselgeneratoren pga. den fluktuerende produktion fra vind og sol og kravet om at den som minimum stadig skal køre med en belastning på 11 kW, producerer næsten 85% af el-belastningen, mens knap 5% dækkes af sol og knap 9.5% dækkes af vindmøllen. Til gengæld dækker dieselgeneratoren ca. 33% af varmetalet, mens elkedlen og varmepumperne dækker ca. 58%, brændefyret dækker 6,5 % og olie-

fyret 2,6%. Det er endvidere fundet, at der i enkelte perioder af året vil være tidspunkter, hvor systemet ikke kan optage al overskuds-el fordi varmelagret og batteriet er fyldte, og det vil i disse perioder være nødvendigt at nedskalere produktionen fra vindmøllen og/eller solcellerne til et niveau, der svarer til el-belastningen i systemet.



Figur 15 El forbrug målt i perioden april 2017 til april 2018



Figur 16 Varmeforbrug målt i perioden april 2017 til april 2018.

### 2.2.3 Batteri

Der er arbejdet med muligheder og krav til en mindre batteri-løsning på Livø. Batterierne anvendes til at balancere udsving i elproduktion henholdsvis elforbrug.

Batterier til lagring af større energimængder er fortsat i sin spæde start, og det har derfor været vanskeligt at finde relevante leverandører af løsningen. Disse vil givetvis komme på markedet inden for en kortere årrække som en kombination til solcelleløsninger generelt. En batteriløsning med en væsentlig kapacitet vil være helt unik i forhold til en samlet VE-løsning.

Visblue har installeret et flowbatteri på Livø som led i at markedsmodne deres produkt og ikke mindst for at vi i projektet kunne vurdere den faktiske virkning i forhold til udglatning af elproduktions- og forbrugsudsving.

I første omgang testes et batteri med 5,0 kW nominal power med kapacitet på 40 kWh. Batteriet er ikke stort nok til pt. at erstatte diesel-generatorerne, men den valgte løsning giver mulighed for at afdække det faktiske behov for lagring af el og opnå driftserfaringer hermed. Kabelforbindelse og tilslutningspunkt til elnettet er etableret, så der kan udvides effektmæssigt op til ca. 40-50 kW.

Der er udført elinstallation og kommunikationsnetværk til batteriet ved Livø Elværk.



*Figur 17 Batteriløsning på Livø. Installation af anlægget, juli 2018.*

#### 2.2.4 Varmepumper

I forbindelse med dimensionering og etablering af batteriløsningen er konstateret, at behovet for VE-løsningen i høj grad bør rettes mod varmeproduktionen parallelt med elproduktionen. Batterierne bruges til at balancere udsving i elproduktion henholdsvis elforbrug. For at tilgodese en effektiv balancering imellem el- og varme er der supplerende til elkedlen etableret varmepumper for at øge COP-værdien ved konvertering fra el til varme. Ved høj produktion af el kan de hurtige udsving håndteres ved varierende varmeproduktion via elkedlen, og længerevarende udsving kan håndteres ved varmeproduktion via varmepumperne. Overproduktion af varme kan effektivt lagres via akkumuleringstanken.



Figur 18 Varmepumper ved Livø El- og varmeværk.

## 2.3 Styringen og overvågningen af el- og varmesystem

### 2.3.1 Analyse af forskellige styringsmuligheder

Det er vigtigt at sikre at styringen af de enkelte komponenter er koordinerede med hinanden for at få den bedste energieffektivitet i systemet og minimere dieselforbruget på øen. Samtidigt skal systemet være pålideligt og sikre både el- og varmforsyning til øen. Der er derfor i løbet af projektet opstillet styringsmodeller for hvordan produceret el fra vindmøllen og solcellerne skal anvendes i systemet, således at overskuds-el set i forhold til el-belastningen bliver anvendt til at kunne producere så meget fjernvarme som muligt.

I den første periode af projektet indgik der kun en elkedel til at forbruge overskuds-el, og det blev derfor lavet følgende styringsmæssige prioriteringer:

- Dieseldgeneratoren skal som minimum belastes med 11 kW for at sikre frekvensen i systemet.
- Overskuds-el fra vindmølle og solceller udnyttes i videst muligt omfang til varme-produktion fra elkedlen, og kun i tilfælde hvor varmetanken er fyldt, reduceres mulig produktion fra vindmøllen og solcellerne til at matche el-belastningen.

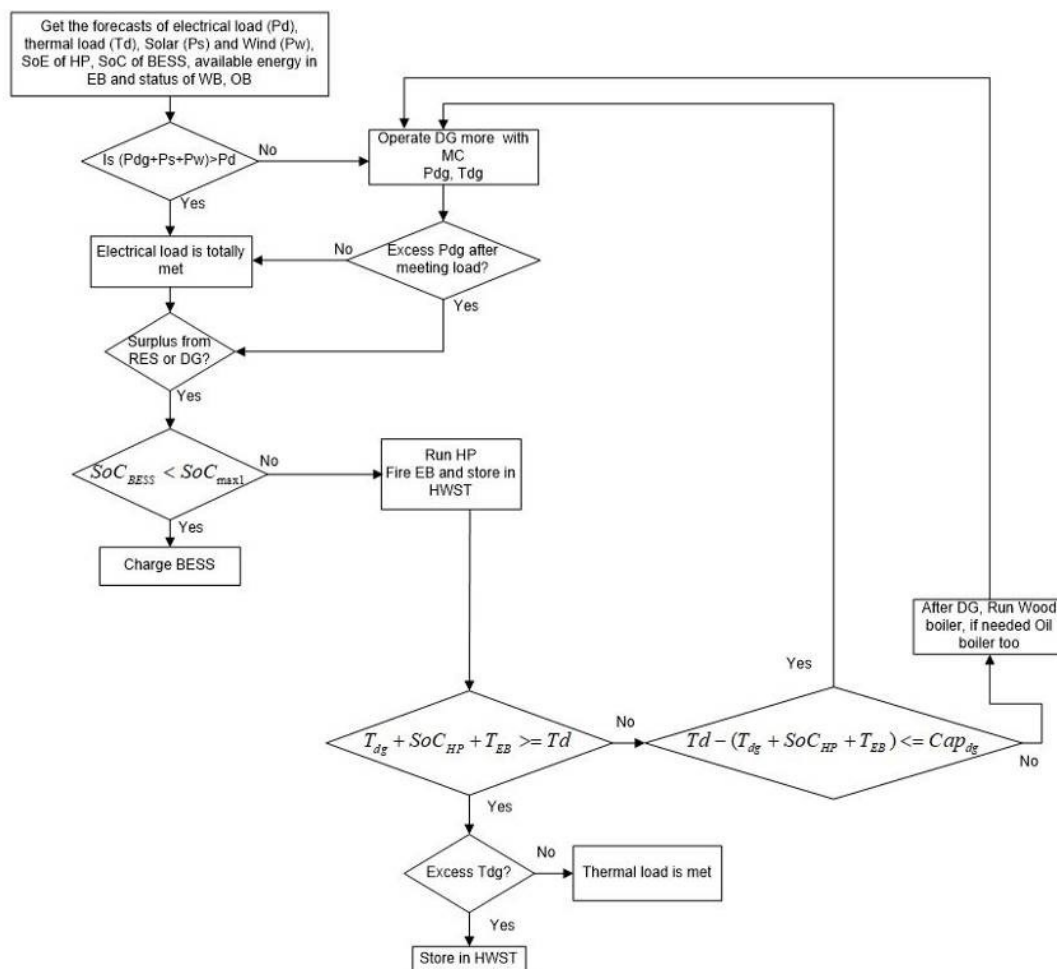
Dette er dokumenteret i rapportererne "Simulering af belastning på Livø, februar 2017" og "Livø – Further Implementation of Energy Supply Solutions maj 2017".

Igennem det seneste år i projektet, er der yderligere blevet mulighed for at anvende to varmepumper på hver 3,8 kW samt et flow batteri. Styringsystemet er derfor udvidet, og arbejder ud fra følgende overordnede principper, se figur 19:

- Hovedformålet er at reducere diesel-forbruget
- Dieseldgeneratoren skal minimum belastes med 11 kW
- Den elektriske belastning dækkes først af dieseldgeneratorens minimum belastning og dernæst af vindmølle og solcelleproduktion
- Er basisbelastning af dieseldgenerator plus vindmølle og solcelleproduktion ikke tilstrækkeligt til at dække elforbruget, dækkes resten af dieseldgeneratorerne.
- Er der overskudsproduktion af el i forhold til elforbruget indhentes information om
  - Energi i brændselsfyrets lagertank
  - Andelen af overskuds-el i systemet
  - Energi i lagertanken til elkedel og varmepumper (HWST)
  - Energien i batterilageret
  - Den termiske belastning
- Baseret på de indhentede data hvis der ikke er nok energi i brændselsfyrets tank og HWST hvis der er overskud-el til rådighed så
  - Prioriteres først at bruge varmepumperne
  - Er der yderligere effekt til rådighed anvendes også elkedlen
  - Hvis dette ikke er nok til at dække varmebehovet anvendes endeligt olie-kedlen til at dække varmebehovet
- Hvis der er varme nok i lagertankene lades batteriet hvis der er yderligere overskuds-el

- Kun hvis der ikke er varmebehov og batteriet er fuldt opladet og der stadig er overskudsel nedskaleres produktionen fra vindmøllen eller solcellerne.

Denne styring er dokumenteret i rapporten "Livø-Further implementation of energy supply solutions II, september 2019".



Figur 19 Flowdiagram. Styringsprincip for Livø.

Som angivet i afsnit 2.2.2 om energibalance, fase 1-B har dette resulteret i forventede besparelser som angivet der.

Yderligere er undersøgt spændings- og frekvensforhold i nettet ved denne styring og ved de indsatte produktionsenheder og belastninger.

Det er fundet at frekvensen kan variere mellem 49,7 Hz -50,4 Hz når de nye belastninger indsættes. Dette ligger uden for grænserne hvis man var tilsluttet el-systemet i Jylland. Det er dog cirka på samme niveau som målt inden de nye vedvarende energikilder og belastninger blev indsat. Endvidere er spændingsvariationer undersøgt og det er fundet at spændingen ligger inden for 230 V plus minus 10% som tilladt med den senest styring, hvor varmepumper og batteri også er indsat. I systemet uden varmepumper, var der dog til tider problemer med at der kunne være for høj spænding i systemet.

### 2.3.2 Design af styring og overvågning

Udfordringerne for energisystemet på Livø er ikke selve produktionen af strøm og varme – den bygger på kendte teknologier. Udfordringerne ligger i at få disse kendte teknologier til at virke sammen i et lille integreret ø-drift system, hvor input fra solceller og vindmølle kan være meget svingende i forhold til forbruget på øen, der i sig selv er atypisk med stort forbrug om sommeren og mindre om vinteren.

Baseret på analyse af styringsmulighederne beskrevet i afsnit 2.3.1 skal systemet til styring og overvågning designes. Der er desuden lavet et dataopsamlingsprogram til måling af data jf. afsnit 2.1.6, som dels anvendes til styringsformålet, dels logges for at kunne bruges i vidensformidlingsammenhæng.

Samspelet mellem produktion og forbrug styres fra el-og varmeværkets SRO-anlæg.

I forbindelse med udskiftning af fjernvarmenettet på Livø, er der nedgravet/nedlagt lyslederforbindelse fra elværket rundt til energimålere hos alle forbrugere og VE-produktionsenheder. Via lyslederforbindelse opsamles måledata for el- og varmeforbrug hos forbrugerne samt produktionsdata ved vindmølle, solcelleanlæg og generatorer.

De opsamlede måledata anvendes til at skabe et overordnet overblik over energibalancen i systemet, og danner grundlag for den styring, der skal regulere det samlede energianlæg. "Masterstyringen" (SRO) placeret på Livø el- og varmeværk skal automatisk regulere systemet, så der opretholdes en stabil forsyning og samtidig udnyttes størst mulig andel af vedvarende energi.

SRO-anlægget kan samtidig formidle oplysninger om energiproduktionen på Livø, idet måledata kan tilgås via en FTP-server. Det muliggør f.eks. at uddannelsesinstitutioner kan bruge el- og varmesystemdata på Livø, som en slags "energilaboratorium".

### 2.3.3 Idriftsættelse og demonstration

Det er lykkedes, at finde den rette kombination af komponenter og programmere styringsmodellen, så der opnås størst mulig udnyttelse af de alternative energikilder – sol, vind, elkedel, varmepumper.

Ved både solceller og vindmølle er installeret controllerenheder, som ved kommunikation med tilsvarende enheder på generatorerne balancerer outputtet fra VE-anlægget og samtidig tager hensyn til generatorernes minimumslast på ca. 11 kW.

I forbindelse med idriftsættelse har der været arbejdet med et par uforudsete problemstillinger.

#### Elkedel

Der er i projektet indkøbt en elkedel, som skal bruges til at flytte overskydende effekt fra solceller og vindmølle til akkumuleringstanken.

Det har imidlertid vist sig, at leverandørens standardopsætning ved indkobling af elkedlen reagerer med 30 sek. forsinkelse, og tilsvarende ved trinregulering. Det har givet

problemer med "blackout" på generatorsættet, idet den ikke når at koble ind hurtigt nok, når der er brug for det.

Efter dialog med leverandøren om mulighederne for at ændre på effektreguleringen har det desværre ikke umiddelbart været muligt at finde en egnet "standardenhed" med trinløs og hurtig effektregulering. Leverandørens elkedel er typegodkendt, og hvis de skal foretage ændringer, vil det kræve en ny godkendelse, hvilket de ikke er indstillet på.

Elkedlen er efterfølgende modificeret, så varmelegemerne forsynes via standard tyristor enheder, der giver mulighed for en hurtig og trinløs regulering, der kan udbalancere de hurtige ændringer i produktion og forbrug i det forholdsvis lille elnet.

#### Vindmølle

Vindmøllen blev opført på den valgte placering på Livø og har været i drift siden. I begyndelsen blev møllen af hensyn til samdriften drevet med en maksimal produktion på først 5 kW og senere 10 kW. I forbindelse med fiberkommunikation med møllen er den integreret i den overordnede styring i styringssystemet fra DEIF.

#### Batteri

Der er gennemført integrationstest på Livø i samarbejde med Caverion. Batteriet blev herefter sat i dvale i en periode for at afvente integrationsløsningen for den samlede VE-styring på Livø, men også for afklaring af driftsproblemer. I den hidtidige driftsperiode har der været problemer med utætheder i batteristack samt udfald af inverternes drift mod dieselgeneratorerne. Utæthederne er nu afhjulpet, men der arbejdes fortsat med samdriftsproblemer.

#### *2.3.4 Delkonklusion*

Med de nye vedvarende energikilder der etableredes i fase 1-A vil der være flere perioder på året, hvor der ikke er tilstrækkelig elproduktion til at kunne erstatte dieselgeneratorerne, og det er endvidere også fastlagt at en af dieselgeneratorerne skal køre med minimum 11 kW, for at sikre frekvensstabilitet i nettet. Der kan ved disse simuleringer opnås en dækning på ca. 49 % af elbehovet fra vedvarende energikilder.

Den reducerede drift af dieselgeneratorerne betyder ligeledes mindre spildvarme til rådighed for fjernvarme. Den mængde overskudsvarme der produceres via elkedlen svarer næsten til den tidligere mængde spildvarme fra dieselgeneratorerne. Selv ved fordobling af solcelle- og vindmøllekapacitet kan varmeproduktionen via elkedel og lagringstanken ikke imødekomme varmebehovet på Livø.

Det er undersøgt, hvordan solvarme og varmepumper eventuelt vil kunne anvendes i fjernvarmesystemet på Livø, og hvilke effekter disse teknologier vil have på energisystemet og dets brændselsforbrug (ekskl. vind og sol).

Som følge af energibalancesimuleringerne af luft til vand varmepumpe og solvarme til brug i fjernvarmenettet, blev det fundet, at luft til vand varmepumpe var mest lovende ift. Livøs energisystem, og der blev på basis af disse simuleringer besluttet at arbejde videre med at finde en leverandør til en luft til vand varmepumpe



Batterier til lagring af større energimængder er fortsat i sin spæde start, og det har derfor været vanskeligt at finde relevante leverandører af løsningen. Disse vil givetvis komme på markedet inden for en kortere årrække som en kombination til solcelleløsninger generelt. En batteriløsning med en væsentlig kapacitet vil være helt unik i forhold til en samlet VE-løsning.

I forbindelse med dimensionering og etablering af batteriløsningen er konstateret, at behovet for VE-løsningen i høj grad bør rettes mod varmeproduktionen parallelt med elproduktionen. Batterierne bruges til at balancere udsving i elproduktion henholdsvis elforbrug. For at tilgodese en effektiv balancering imellem el- og varme er der supplerende til elkedlen etableret varmepumper for at øge COP-værdien ved konvertering fra el til varme. Ved høj produktion af el kan de hurtige udsving håndteres ved varierende varmeproduktion via elkedlen, og længerevarende udsving kan håndteres ved varmeproduktion via varmepumperne. Overproduktion af varme kan effektivt lagres via akkumuleringstanken.

Der er opstillet algoritmer for styringerne som viser at systemet kan styres stabilt så frekvens og spændinger ligger inden for rimelige niveauer for et så lille system. Det er desuden vist at selv med hvad der kaldes en optimal styring, vil der være perioder hvor det bliver nødvendigt at nedregulere noget af produktionen fra vindmøllen eller solcellesystemet, når varmelagertanken og batteriet er fyldte og der stadig er overskuds-el.

Med udgangspunkt i den opstillede algoritme er det lykkedes, at finde den rette kombination af komponenter og programmere styringsmodellen, så der opnås størst mulig udnyttelse af de alternative energikilder – sol, vind, elkedel, varmepumper.

## 2.4 FASE 1-C: Plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø

### 2.4.1 Delmål

Med udgangspunkt i de erfaringer, der er tilvejebragt i de to foregående faser 1-A og 1-B har det været målet at udarbejde en plan for den langsigtede videreudvikling af energiforsyningen på Livø.

### 2.4.2 Vurdering af forskellige teknologier og scenarier

Baseret på analyserne beskrevet i afsnit 2.2 og 2.3, litteratur på området og teknologivurderingerne fra tidligere projekter, er der blevet lavet vurderinger af forskellige teknologiers og tiltags effekter på energisystemet på Livø. Fokus blev lagt på at udnytte så mange lokale ressourcer som muligt, og vurderingerne medtager således ikke import af biobrændsler eller andet fra fastlandet.

Der er lavet vurderinger af:

- Tilgængeligheden af biomasseressourcer
- Fluktuerende energikilder (vindmøller og solceller)
- Varmebesparelser i bygninger
- Reduktion af temperaturer i fjernvarmenettet
- Elbesparelser
- Lagring af el og varme (batterier, hydrogen og fjernvarmelager)
- Omstilling af lastskibet på Livø til anden energikilde (el og biogas)
- Omstilling af køretøjer, maskiner og diverse på selve Livø (el og biogas)
- Biogasmotor til produktion af el og fjernvarme
- Fastbrændselskraftvarme (mindre damp-turbine, stirlingmotor, el. lign.)

Hydrogen blev overvejet som mulighed, men grundet den lave cyklusvirkningsgrad ift. alternativerne, så blev dette ikke fundet at være en realistisk mulighed.

For transportformerne blev der ligeledes lavet nogle tidlige estimater for hvornår de bliver benyttet for at kunne medtage potentielle temporale udfordringer for udnyttelse af el og biogas til disse.

### 2.4.3 Plan for 100 % VE inkl. også landbrugsmaskiner og transport

Baseret på energibalance simuleringerne, jf. afsnit herom og vurderingerne af mulige tiltag og teknologier beskrevet ovenstående, blev der i energibalance simuleringssværket energyPRO udviklet et basisscenarie for Livø, hvor der opnås 80% VE for hele energisystemet (el, fjernvarme, individuel opvarmning, lastskibet, samt transport og maskiner på Livø).

I energyPRO simuleres energibalancen af el- og fjernvarmesystemerne på timeniveau, så det sikres, at el- og fjernvarmebehovene kan opfyldes i alle timer af året med produktionsenhederne og energilagrene.

I fht. energisystemet som er på Livø efter projektets afslutning, er følgende tiltag lavet i basisscenariet:

- Fjernelse af kravet om grundlast på dieselgeneratorerne
- Livø II (lastskib) er omlagt til el

- Traktorer og minilæsser er omlagt til el
- Fjernvarmenettets fremløbstemperatur er reduceret til 55°C
- Fordobling af varmepumpekapaciteten
- Solcellekapaciteten er løftet til 833 kWe med samme produktionsprofil som eksisterende
- Der er installeret sammenlagt 1.350 kWh batterier med en cyklusvirkningsgrad på 90%

Dette basisscenarie blev herefter brugt som et udgangspunkt for at undersøge, hvordan forskellige variationer i tiltag og teknologier kan påvirke behovet for solceller og batterier, da kombinationen af disse er fundet at være den marginale enhedskombination på Livø. Disse variationer blev også analyseret i energyPRO.

I analyserne blev det fundet, at hvis det ønskes at nedbringe behovet for kapaciteten af solceller og batterier, er det især følgende teknologier, som er interessante:

- Kraftvarme baseret på afbrænding af fast biomasse
- Flere vindmøller
- Brug af biogas til transport. Hvis til lastskib vil der dog være behov for sæsonlagring af biogas.

Ligeledes kan reduktioner i det eksisterende elforbrug give besparelser på solcelle- og batteri-kapaciteterne.

Varmebesparelser i bygningerne bidrager ikke i sig selv til en øget VE-andel i systemet, da dette mest reducerer brugen af trækedlen. Dog bør varmebesparelser, som muliggør reduktion af temperatur i fjernvarmenet, implementeres.

Der blev ikke fundet grundlag for at forøge eksisterende fjernvarmelager og eksisterende elkedelkapacitet ved en VE-andel på 80%.

Det blev fundet, at et vigtigt næste skridt for overgangen til mere VE i energiforsyningen på Livø, er implementeringen af teknologier og styringsmetoder, som helt fjerner behovet for at drive dieselgeneratorerne i hver time.

Det blev fundet, at solceller og batterier kan spille en stor rolle på Livø, men at behovet for disse kan reduceres ved installation af kraftvarme baseret på afbrænding af fast biomasse, installation af flere vindmøller eller ved brug af biogas til transport. Ligeledes bør alle mulige besparelser på det eksisterende elforbrug implementeres. Transporten kan med fordel overgå til el.

#### *2.4.4 Tidlig rækkefølge for opsætning af systemer og rapportering*

Den tidlige rækkefølge er opdelt efter tiltag, som der løbende bør arbejdes med, samt tiltag som der bør arbejdes med på hhv. kortsigtet, mellemsigtet og langsigtet.

Denne opdeling skyldes delvist, at der ønskes en løbende fornuftig sammenhæng mellem teknologier i energisystemet på Livø og en forventning til hvornår forskellige teknologier

bliver markedsmodne, således at de kan implementeres i et lille lukket energisystem som Livø.

#### Løbende tiltag:

- Arbejd med at identificere og implementere besparelser på det eksisterende elforbrug.
- Ved udskiftning af traktorer, minilæsser og andet maskineri på Livø som pt. benytter diesel/olie bør det undersøges, om der er et kommercielt tilgængeligt alternativ drevet på el, som kan benyttes.
- Når bygninger renoveres, så bør deres varmesystem også opgraderes, så de kan klare sig med lavere temperaturer i fjernvarmenettet da det giver en bedre afkøling af fjernvarmevandet.

#### Kortsigtet:

- Identificer de teknologiske muligheder for at nedbringe behovet for at drive dieselgeneratorerne i hver time. På kort sigt kunne dette være en mindre generator som vil kunne gå længere ned i kapacitet evt. i samspil med et svinghjul. På sigt kunne det være biogas motor eller fast biomasse til kraftvarmeproduktion, eller brug af hurtigt reagerende batterier og andre ellagringsteknologier.

#### Mellemsigtet:

- Implementer solceller i takt med, at behovet for at drive dieselgeneratorerne i hver time reduceres og elforbruget til transport stiger. Højt effektive batterier bør implementeres sammen med solcellerne.
- Afgør om mere vindkraft kan indgå i energisystemet på Livø, da dette kan reducere behovet for solceller og batterier.

#### Langsigtet:

- Når teknologien er kommercielt tilgængelig, bør det undersøges om Livø II (Lastskib) kan overgå til eldrift, forudsat at dette medfører en betydelig reduktion i energiforbruget til Livø II (Lastskib).
- Når alle bygninger kan nøjes med en lavere fremløbstemperatur, bør fremløbstemperaturen i fjernvarmenettet sænkes.
- Fordobling af varmepumpekapaciteten til at styrke sammenspillet mellem el og fjernvarmen.

For at overgå til 100% VE bør dieselgeneratorerne over tid helt erstattes af anden teknologi. Dette kunne være vindmøller i sammenspil med fastbrændselskraftvarme, batterier eller potentielt biogaskraftvarme, især i sammenhæng med generelle elbesparelser. Alternativt kan dieselgeneratorerne overgå til biodiesel generatorer, hvor biodieslen dog sandsynligvis vil skulle importeres fra fastlandet, da det er usikkert, om det vil være rentabelt at have et mindre anlæg på Livø.

Ligeledes bør dieselforbrug til mejetærsker, varmekanon, savværk og diverse også overgå til anden energiforbrug, hvilket f.eks. kunne være eldrift, hvor muligt. Flaskegas bør erstattes af eks. el, f.eks. elovne, mm. Alternativt kunne der i stedet for naturgas købes flaskegas, som er baseret på biogas fra fastlandet.

Der er blevet lavet en langsigtet plan for overgangen til et energisystem baseret på VE på Livø. Grundet den lille størrelse af Livøs energisystem, vil overgangen af energisystemet især afhænge af den teknologiske udvikling i det omliggende samfund, hvorved nogle relevante teknologier ikke forventes markedsmodne før om en årrække. Dog er der identificeret en tidlig rækkefølge efter tiltag, som bør gøres løbende, samt tiltag som bør ses på hhv. kortsigtet, mellemsigtet og på langsiget for at overgå til et 100% VE energisystem.

#### *2.4.5 Delkonklusion*

Det blev fundet, at et vigtigt næste skridt for overgangen til mere VE i energiforsyningen på Livø, er implementeringen af teknologier og styringsmetoder, som helt fjerner behovet for at drive dieselgeneratorerne i hver time.

Det blev fundet, at solceller og batterier kan spille en stor rolle på Livø, men at behovet for disse kan reduceres ved installation af kraftvarme baseret på afbrænding af fast biomasse, installation af flere vindmøller eller ved brug af biogas til transport. Ligeledes bør alle mulige besparelser på det eksisterende elforbrug implementeres. Transporten kan med fordel overgå til el.

Der er blevet lavet en langsigtet plan for overgangen til et energisystem baseret på VE på Livø. Grundet den lille størrelse af Livøs energisystem, vil overgangen af energisystemet især afhænge af den teknologiske udvikling i det omliggende samfund, hvorved nogle relevante teknologier ikke forventes markedsmodne før om en årrække. Dog er der identificeret en tidlig rækkefølge efter tiltag, som bør gøres løbende, samt tiltag som bør ses på hhv. kortsigtet, mellemsigtet og på langsiget for at overgå til et 100% VE energisystem.

### **3. Formidling**

Livø udgør et minisamfund, som er et vellignende spejlbillede af det danske samfund og i et overskueligt miniformat for alle. Livøs grønne omstilling til vedvarende energi og selvforsyningsløsninger giver sammen med Naturstyrelsens øvrige opgaver på øen en helt unik mulighed for i en overskuelig skala at formidle og anskueliggøre, hvad bæredygtighed betyder. Projektet åbner desuden mulighed for, at energiforsyningen på Livø kan udgøre et "energilaboratorium", hvor samspillet mellem teknologier kan afprøves under kontrollerede forhold, f.eks. til undervisnings- og forskningsformål. Derfor har der i i projektet været arbejdet med formidling af Livø grønne omstilling på flere forskellige niveauer.

#### **3.1 Publikationer, foldere, plakater og projekt hjemmeside**

Der er gennem Naturstyrelsens interne formidlingskanaler arbejdet med at gøre offentligheden bekendt med projektets gennemførelse og hele idéen bag "Grøn Livø".

Ved Livø EL- og varmegærk er etableret et "formidlingsspot", hvor der på 4 plancher fortælles om arbejdet med omlægning af forsyningsstruktur på Livø og hvorfor den netop på Livø er særegen. Der fortælles desuden om de enkelte nye produktionsenheder – solceller og vindmølle samt hvordan det samlede system virker sammen. Formidlingspottet besøges nu som en del af de offentlige rundvisninger, som Naturstyrelsen tilbyder på Livø, ligesom solcelleanlæg og vindmølle besøges.

Desuden er der foretaget en generel opdatering af projektbeskrivelsen og det udførte arbejde på Naturstyrelsens projekthjemmeside – "Grøn Livø – Naturens Stillekupe". <https://naturstyrelsen.dk/naturbeskyttelse/naturprojekter/groen-livoe/energiloesning/>

Senest er der arbejdet med en folder, som beskriver og anskueliggør Livø som bæredygtig ø.



Figur 20 Formidling ved Livø Elværk.

### 3.2 Eksterne samarbejder, artikler, workshops mv.

Ved kontakt til lokale medier har der været arbejdet bredt på formidling af Livø, og Naturstyrelsens arbejde på Øen.

Livø er en central turismested i Vesthimmerland og øen har derfor en helt særlig plads i turismekampagner fra VisitVesthimmerland og via organisationens hjemmeside. Naturstyrelsen har via andre projekter bidraget til at der er udarbejdet en kort film om Livø – Naturens stillekupert, hvor energiprojektet indgår i fortællingen om øen.

Livøs grønne omstilling har løbende været fulgt af en journalist fra "Grøn energi", og der har været offentliggjort 2 artikler om Livø.

Den 8.-10. oktober 2018 besøgte Århus arkitektskole Livø i forbindelse med semesterprojekt for 1. og 3. år studerende. Temaet for deres besøg var bæredygtighed, og i den forbindelse bidrog projektet med en præsentation af projektet og hvordan el- og varmebehov søges løst ved selvforsyning.

Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik har ligeledes brugt Livø, som case for både 1. og 3 årsstuderende.

DEIF, som har leveret powermanagement systemet til både generatorer, solcelleanlæg og vindmølle har udarbejdet en case story for projektet og Livøs energiforsyning. Artikel og film er tilgængelig via deres hjemmeside. <https://www.deif.com/land-power/cases/off-grid-island-gets-reliable-power-with-deif-pms>

Resultaterne for den fremtidige plan for Livøs energisystem blev præsenteret på konferencen "5th international conference on Smart energy Systems and 4th generation district heating" i København d. 10. september 2019. Konferencen er for både forskere og aktører fra industrien og offentlige institutioner.

Baseret på resultaterne fra rapporten "Livø-Further implementation of energy supply solutions II, september 2019" vil der blive skrevet en forskningsartikel til en relevant journal som f.eks. IEEE transaction of smart grid system, eller en af Elseviers journaler.

### **3.3 Udvikling af events for børn og familier med tema om grøn energi**

Der er den 20. august 2017 afholdt temadag om Grøn Energi på Livø. Arrangementet blev afholdt af NST, COWI og Aalborg Universitet, Institut for Energiteknik i samarbejde og fokus var omstilling til vedvarende energi.

Der blev holdt åbent hus på Livø elværk, som normalt er lukket for offentligheden, og der var centralt i byen etableret et "energiværksted", hvor besøgende kunne eksperimentere med små solceller og eksperimenteres med udformning af vinger til deres helt egen mølle, og efterfølgende teste resultatet.

Desværre viste det danske sommervejr sig ikke sin bedste side, og besøgstallet kunne sagtens have været højere. Fremadrettet gennemføres arrangementet, som en "stand" i forbindelse med andre arrangementer på øen, f.eks. Livø høstmarked.

### **3.4 Udvikling af hjemmeside til download af realtidsdata.**

Det er målet at sikre uddannelsesinstitutioner adgang til produktions- og forbrugsdata fra det samlede energisystem på Livø

Der er ved de forskellige termiske og elektriske systemer installeret forskellige sensorer, og dataopsamlingsenheder. Der logges oplysninger om spænding, strøm, effektproduktion, temperatur, flow, mv. Disse data kan via link til FTP-server etableret på Naturstyrelsens projekthjemmeside tilgås at eksterne.





*Figur 21 Energiværksted – Livø By, august 2017.*



*Figur 22 Der eksperimenteres med at udforme optimale møllervinger.*

## 4. Anvendelse af projektresultater

Der er i projektet opnået viden og erfaringer med integrerede multienergisystemer, hvor fleksibiliteten i det integrerede el- og varmesystem udnyttes for at opnå så stor en andel af VE som muligt.

Resultaterne af projektet vil blive brugt som grundlag for en forsat udbygning af energiforsyningsløsningerne på Livø. Her vil den tidlige rækkefølge af tiltag beskrevet i afsnit 2.4.3 været et vigtigt værkstøj. For så vidt angår energiforsyningsløsninger beskrevet i afsnit 2.4.2 vil der blive arbejdet med at afsøge muligheder for ekstern støtte til et nyt projekt frem mod i første omgang 80% selvforsyning.

Projektet har ikke direkte skabt viden eller resultater, som af projektparterne tænkes brugt i et kommercielt produkt, men samarbejdsparter i projektet som DEIF og Visblue vil givet kunne udnytte Livø som demonstrationssite.

I forhold til energiforsynings størrelse har projektet resulteret i en markant nedgang i brugen af fossile brændsler på Livø og dermed også i CO<sub>2</sub> emissionen fra el- og varme- produktionen. Produktionen fra VE-teknologier vurderes at dække 45% af el- og varme- forbruget, fra omkring 17% ved projektets start. Denne forøgelse i Ve-andelen, svarer til en besparelse i diesel/olie forbruget på ca. 43%. Hermed er også CO<sub>2</sub>-emissionen reduceret med 43%.

Via den etablerede hjemmeside, hvor det er muligt at downloade online målinger, får skoler og universiteter muligheder for at anvende målingerne. For skoler kan disse anvendes til at fortælle om hvordan sol og vindmølleenergi varierer, og hvordan overskudsel bliver anvendt i forhold til f.eks. varmeproduktionen. Universiteterne søger reelle målinger for at kunne lave realistiske simuleringer for multi-energisystemer, hvilket hjemmesiden giver mulighed for. Disse simuleringer kan så videre anvendes til videreudvikling af systemet på Livø, eller for andre forhold hvor lignende systemer indgår.

## 5. Projektkonklusion og perspektivering

Der er i projektet etableret en 25 kW husholdningsvindmølle, 33 kW solceller, en elkedel på 67 kW, og en akkumuleringstank på 30m<sup>3</sup>. Dernæst er etableret et batteri og to varmepumper, samt ikke mindst en overordnet styring, der automatisk balancerer produktionen, og sørger for at overskydende el udnyttes til produktion af varme via elkedel eller varmepumper eller lagres i batteriet.

Det er endvidere også fastlagt at en af dieselgeneratorerne skal køre med minimum 11 kW, for at sikre frekvensstabilitet i nettet. Batterier til lagring af større energimængder er fortsat i sin spæde start, og det har derfor været vanskeligt at finde relevante leverandører af løsningen. Disse vil givetvis komme på markedet inden for en kortere årrække som en kombination til solcelleløsninger generelt. En batteriløsning med en væsentlig kapacitet vil være helt unik i forhold til en samlet VE-løsning.

Der er udviklet og demonstreret en lokal og overordnet styring af energiproduktionen, der til alle tider sørger for at dække energibehovet (el så vel som varme). Ved overskudsproduktion af el fra solcellerne og vindmøllerne i forhold til elforbruget prioriteres at anvende den først til varmeproduktion via varmepumpen, da det giver en bedre udnyttelsesgrad (høj COP faktor), dernæst anvendes elkedlen eller batteriet til lagring. I mangel af varmeproduktion fra enten dieselgeneratorerne, varmepumperne eller elkedlen anvendes brændselsfyret til dækning af varmebehovet, og kun i virkelig varmekrævende perioder anvendes også oliekedlen til sikring af varmebehovet.

Helt overordnet har projektet resulteret i, at der er etableret en alternativ el- og varmeproduktion baseret på sol og vind, som aflaster produktionen på dieselgeneratorerne. Produktionen fra VE-teknologier vurderes at dække 45% af el- og varmekonsumet, fra omkring 17% ved projektets start. Denne forøgelse i VE-andelen, svarer til en besparelse i diesel/olie forbruget på ca. 43%. Hermed er også CO<sub>2</sub>-emissionen reduceret med 43%.

Der er i projektet arbejdet med at formidle Livø's grønne omstilling på flere niveauer, og dette er en vigtig del af fortællingen om det fremtidige Livø.

I samarbejde med VisitVesthimmerland er der sket en bred formidling i forhold til øens gæster, der er afholdt familiearrangement "Grøn Energidag", og samarbejdspartner DEIF har udarbejdet en "case story" om øen. Desuden er oplysninger om produktions- og forbrugsdata for det samlede energisystem på Livø gjort tilgængelig for skoler og andre uddannelsesinstitutioner via Naturstyrelsens projekthjemmeside.

Afslutningsvis er der udarbejdet en plan for den langsigtede udvikling af energiforsyningen på Livø. Der er beskrevet mulige tiltag i en tidlig rækkefølge frem mod 80% selvforsyning, samt overvejelser om hvordan et mere langsigtet mål om 100% selvforsyning kan nås. En plan som vil danne grundlag for det videre arbejde med energiforsyningsløsninger på Livø.

Projektet har med Livø som udgangspunkt bidraget til at der er opnået viden om og praktisk erfaring med, hvordan små VE teknologier baseret på lokale ressourcer kan

sammensættes og styres til en stabil el- og varmforsyning. En viden og erfaring som kan udbredes til andre småøer og andre isolerede samfund, hvor der er en særlig udfordring at integrere vedvarende energi.

## **Annex**

1. "Simulering af belastning på Livø". Aalborg Universitet – institut for energiteknik.
2. "Simulering af belastning på Livø - Further Implementation of Energy Supply Solutions"). Aalborg Universitet – Institut for energiteknik, maj 2017
3. "Livø - Further implementation of energy supply solutions II, september 2019". Aalborg Universitet – institut for energiteknik.
4. "Plan for langsigtet udvikling af energiforsyningen på Livø". September 2019. Aalborg Universitet – Institut for planlægning.