

Ingvild Skaftun

Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)

Masteroppgave i Kybernetikk og robotikk

Veileder: Geir Mathisen

Juni 2019

Ingvild Skaftun

Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)

Masteroppgave i Kybernetikk og robotikk
Veileder: Geir Mathisen
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for teknisk kybernetikk



HOVEDOPPGAVE/MASTER THESIS

Kandidatens navn: **Ingvild Skaftun**

Fag: **Teknisk kybernetikk/Engineering Cybernetics**

Oppgavens tittel (norsk): **Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)**

Oppgavens tittel (engelsk): **Power consumption in a swimming pool (Pirbadet)**

Oppgavens tekst:

Idrettsbygg karakteriseres som prosessanlegg med store elektriske og termiske laster som varierer ut fra prosessmessige hensyn, antall besøkende og uteklime. Framtidig tariffstruktur for energi tilsier økt fokus på effektlast, noe som vil føre til vesentlig økning i driftskostnader for slike anlegg. En ønsker derfor å kunne styre / optimalisere effektforbruket for å redusere kostnadene.

Denne oppgaven ønsker å se på muligheter for å redusere de elektriske effekttoppene ved et svømmeanlegg.

Oppgaven består av følgende punkter:

1. Foreta en litteraturstudie / undersøkelse på elektrisk effektreduksjon i bygninger, med spesielt fokus på svømmeanlegg.
2. Samle inn måledata fra Pirbadet relatert til effektforbruk av utvalgte laster på bakgrunn av funn i prosjektoppgave.
3. Undersøke muligheter for reduksjon av effekttopper ved Pirbadet og deres innvirkning på effektforbruket samt vurdere lønnsomhet av tiltak.

Oppgaven gitt: 14. Jan, 2019
Besvarelsen leveres: 10. Jun, 2019
Besvarelsen levert: 10. Jun, 2019

Utført ved Institutt for Teknisk kybernetikk

Faglig veileder: Bjørn Aas

Trondheim, den 14.01.2019

Geir Mathisen
Faglærer

Forord

Denne oppgaven er skrevet som avsluttende masteroppgave ved Institutt for teknisk kybernetikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet våren 2019 i samarbeid med Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT). Masteroppgaven bygger videre på deler av et fordypningsprosjekt gjennomført høsten 2018, se vedlegg F [1]. I prosjektoppgaven ble Pirbadets elektriske effektforbruk undersøkt, større elektriske laster ble identifisert og installasjon av effektmålinger ble planlagt.

Jeg vil spesielt takke Geir Mathisen (veileder Teknisk kybernetikk), Snorre Nordbo Olsen (tidligere medveileder SIAT) og Bjørn Aas (nåværende medveileder SIAT) for god faglig støtte og veiledning i forbindelse med både prosjektoppgaven og masteroppgaven. Videre ønsker jeg å takke personell ved Pirbadet for samarbeidet. Spesielt vil jeg takke Erlend Lunde Sjørdal (tekniker elektro), Kjetil Øvretveit (teknisk leder) og Hallgeir Revhaug (tekniker maskin), som har vært til stor hjelp med innhenting av informasjon om anlegget.

Måledata ble innhentet via Entro [2] og ved bruk av seks ELITEpro måleinstrument fra DENT Instruments [3]. Måleinstrumentene ble installert av Erlend Lunde Sjørdal i begynnelsen av 2019. Måledata ble uthentet via software ELOG 15 også fra DENT Instruments. I tillegg ble det installert loggføring av AMS måler ved hjelp fra Marius Lervik (medstudent, Kybernetikk og robotikk). For å analysere innsamlet effektdata ble MATLAB benyttet.

For å modellere innvirkningen av mulige alternative energikilder på Pirbadets effektforbruk ble modelleringsverktøyet HOMER Pro [4] benyttet

med studentlisens. Valg av verktøy tok utgangspunkt i en artikkel fra Ringkjøb et al. [5]. Realistiske modelleringsparametre er innhentet fra artikler, internett og personlige meddelelser fra ansatte på Pirbadet.

Bortsett fra det overnevnte er denne oppgaven et selvstendig arbeid utført av Ingvild Skaftun, inkludert litteraturgjennomgang, innhenting og analyse av data, tolking av resultater og skriving av masteroppgave.



Ingvild Skaftun (Kandidat)



Geir Mathisen (Veileder)

Sammendrag

Elektrisk energi- og effektforbruk er ventet å øke i årene fremover. Kraftnettet må være dimensjonert for den høyeste tenkelige effekttoppen, det er derfor ønskelig å begrense topper i effektforbruket. Målet med denne oppgaven er å undersøke mulige effektreduserende tiltak for svømmeanlegget Pirbadet, samt å vurdere lønnsomheten av eventuelle tiltak.

Måledata for Pirbadet ble innhentet fra Entro og seks ELITEpro måleinstrument som ble installert i forbindelse med oppgaven. Variasjoner i effektforbruk og fordeling på utvalgte lastkategorier ble kartlagt. Modelleringsverktøyet HOMER Pro ble benyttet for å undersøke hvordan elektrisk effektforbruk fra strømmettet ville blitt påvirket ved installasjon av solcellepanel og ved bruk av batterier. Lønnsomheten av disse tiltakene ble vurdert.

Pirbadets elektriske effektforbruk følger en tydelig døgnsyklus som gjen-speiler åpningstidene, men variasjonene mellom ukedager og årstider er små. De største elektriske lastene er ventilasjonsanlegg og vannpumper. Det er mulig å redusere topper i effektforbruket fra strømmettet ved installasjon av solcellepanel eller batterier, men dette vil ikke være økonomisk lønnsomt med dagens kostnadsnivå. Økonomisk lønnsomme tiltak for effektreduksjon ved Pirbadet kan være økt bruk av behovsstyring og i noen tilfeller oppgradering av teknisk utstyr.

Med dagens energi- og effektpriser vil det ikke være økonomisk lønnsomt for Pirbadet å gjennomføre større investeringer for å redusere topper i effektforbruket. Dersom utregningsmetoden av effekttariff endres, kan det bli lønnsomt for Pirbadet å gjennomføre effektreduserende tiltak.

Abstract

The consumption of electricity is expected to increase in the years to come. The electrical grid has to be dimensioned for the maximum peak power and hence it is desirable to limit peaks in the power consumption. The aim of this master thesis is to investigate possible measures for reducing peak power at a swimming facility, Pirbadet, as well as to evaluate the financial profitability of the measures.

Measured data for Pirbadet were obtained from Entro and six ELITEpro instruments installed as part of the work with this thesis. Temporal variations of selected loads as well as the total power consumption were analyzed. The modelling tool HOMER Pro was used to investigate how the installation of solar panels and/or batteries would affect electrical power consumption from the grid. The financial profitability of these measures was assessed.

Pirbadet's electrical power consumption follows a daily cycle that reflects their opening hours. Variations between weekdays, weekends and seasons are small. The largest electric loads are ventilation and water pumps. It is possible to reduce peaks in power consumption from the grid by installing solar panels or batteries, but this is not financially profitable with current costs. Financially profitable measures for power reduction at Pirbadet may include increased use of demand side management and in some cases upgrading the technical equipment.

Major investments to reduce the peak power consumption at Pirbadet is not financially profitable given the existing tariffs for energy and power consumption. However, if the tariffs for peak power changes it might become profitable to implement more power-reducing measures.

Innhold

1 Innledning	1
2 Litteratursøk	5
2.1 Svømmeanlegg	5
2.2 Effektreducerende tiltak	10
2.3 Alternative energikilder	13
2.3.1 Ikke-fornybar energiproduksjon	15
2.3.2 Fornybar energiproduksjon	17
2.3.3 Elektrisk energilagring (EES)	19
2.4 Modelleringsverktøy for energisystemer	31
2.5 Økonomi	33
2.5.1 Fakturering av strøm	33
2.5.2 Inflasjon	34
2.5.3 Diskonteringsrente	34
2.5.4 NPC - Net Present Cost	34
2.5.5 LCOE - Levelized Cost of Energy	35
2.6 Pirbadet	35
3 Oppgavens mål	39
4 Metode	41
4.1 Innhenting av måledata	41
4.2 Analyse av måledata	43
4.3 Estimering av ikke-målt effektforbruk	44
4.4 Modellering og simulering	45
4.4.1 Valg av modelleringsverktøy	45
4.4.2 Input data	46

4.4.3	Grunnmodell	48
4.4.4	Modell med solcellepanel (Photovoltaic system - PV)	48
4.4.5	Modell med batterilagring	50
4.4.6	Modell med både PV og batterilagring	52
5	Resultater	53
5.1	Variasjon i totalt effektforbruk	53
5.2	Effektforbruk av utvalgte laster	55
5.3	Estimering av ikke-målt effektforbruk	66
5.4	Simulering	68
5.4.1	Grunnmodell	68
5.4.2	Modell med solcellepanel (Photovoltaic system - PV)	69
5.4.3	Modell med batterilagring	69
5.4.4	Modell med både PV og batterilagring	70
5.4.5	Sammenstilling av resultatene fra modellene	73
6	Diskusjon	75
6.1	Effektforbruk ved Pirbadet	75
6.1.1	Variasjon i totalt effektforbruk	75
6.1.2	Effektforbruk av utvalgte laster	76
6.1.3	Kilder til ikke-kartlagt effektforbruk	79
6.1.4	Utfordringer ved måling av effektforbruk	81
6.1.5	Modellering av fremtidig effektforbruk	81
6.2	Mulige effektreduserende tiltak	83
6.2.1	Effektivisering og omlegging	84
6.2.2	Laststyring	85
6.2.3	Lastreduksjon	86
6.2.4	Kombinasjon av batterilagring og solcellepanel (PV)	88
6.3	Anbefalinger	89
6.3.1	Anbefalinger for Pirbadet	89
6.3.2	Overføring til andre bygg	90
7	Konklusjon og fremtidig arbeid	91
7.1	Konklusjon	91
7.2	Videre arbeid	92
	Bibliografi	93

A	Effektforbruk av utvalgte laster	101
B	Simuleringsrapport: Grunnmodell	107
C	Simuleringsrapport: Modell med PV	113
D	Simuleringsrapport: Modell med batterilagring	123
E	Simuleringsrapport: Modell med PV og batterilagring	131
F	Prosjektoppgave	137

Forkortelser

ABES	Advanced Battery Energy Storage
AMS	Avanserte Måle- og Styringsystem
CAES	Compressed Air Energy Storage
CT	Combustion turbines
EES	Electrical Energy Storage
ESOI	Energy Stored On Invested
FES	Flywheel Energy Storage
GT	Gas turbines
HAN	Home Area Network
LCOE	Levelized Cost of Energy
MT	Micro-turbines
NPC	Net Present Cost
PHS	Pumped Hydroelectric Storage
PV	Photovoltaic systems

Kapittel 1

Innledning

Grunnprinsippet i det elektriske energisystemet er balanse mellom produksjon og forbruk av elektrisk energi. Balansen må til enhver tid overholdes ettersom strøm ikke kan lagres i strømmettet (grid). I tradisjonelle kraftsystem gjennomføres balansering ved å øke/senke produksjon etter endringer i forbruk [6]. Basert på prognoser forventes det høyere kritiske effekttopper og økt produksjon fra variable fornybare energikilder [7, 8]. Dette kan føre til at balansen mellom forbruk og produksjon vil kreve andre former for regulering for å opprettholde balansen i kraftsystemet [9].

Å redusere det totale elektrisitetsforbruket ved økt energieffektivitet har lenge vært i fokus. Det har derimot vært mindre fokus på effektregulering og reduksjon av effekttopper. Statnett sine prognoser fra 2016 anslår at maksimal effekttopp i Norge vil være 28 GW i 2025, en økning på 22 % fra 23 GW i 2016 [7]. Samtidig forventes det at elektrisk energiforbruk vil øke med 18 TWh. Økende effekttopper kan nødvendiggjøre mer investering i nettinfrastruktur da kraftnettet må være dimensjonert for den timen i året med høyest forbruk (maksimal belastning/ dimensjonerende effekt).

Reduksjon av maksimal belastning, kritisk effekttopp, kan være et alternativ til å bygge nytt nett, da investeringer i kraftinfrastruktur er kostbart for samfunnet. I det norske sentral- og regionalnettet er det planlagt investeringer rundt 40 milliarder kroner mellom 2016 og 2020 [7]. Av

dette er ca. 25 % til prosjekter med økt forbruk eller bedret forsynings-sikkerhet som hovedårsak for investeringen.

Reduksjon av næringskunder sine effekttopper stimuleres i dag ved bruk av effektprising i Norge. Det er vanlig å ha en tredelt strømgregning for næringskunder; fastledd, energiledd og effektledd. Hvordan effektleddet beregnes, er opp til strømleverandør, men blir ofte beregnet ved bruk av gjennomsnittlig effektforbruk per hele time i en gitt periode, for eksempel en måned. I 2015 ble det anslått at rundt 60-70 % av strømgregningen for næringskunder var relatert til effektleddet [10]. Noen bygg kan ha en effektprofil hvor det kan oppnås betydelige besparelser ved å kontrollere tidspunkt for bruk av større elektriske laster. Fokuset på effektprising vil sannsynligvis øke i fremtiden [6].

Svømmeanlegg har komplekse energisystemer, og blir ofte utelatt fra forskningsstudier da direkte sammenligninger mellom anlegg er utfordrende [11]. Svømmeanlegg kan sees på som prosessanlegg med høyt energi- og vannforbruk som varierer basert på uteklima og antall besøkende. Kostnader relatert til energiforbruk utgjør ca. 30 % av driftskostnadene for idrettsanlegg i Storbritannia [12]. Det forventes et økt fokus på effektprising i oppbyggingen av fremtidige energi tariffier [6], noe som kan føre til en økning i driftskostnadene for svømmeanlegg.

Pirbadet i Trondheim er Norges største innendørs svømmeanlegg med et vannareal på ca. 2 740 m² og rundt 400 000 besøkende per år. Årlig strømforbruk er rundt 2,9 GWh [1]. Oppvarming av Pirbadet gjøres av fjernvarme, øvrig energiforbruk er elektrisitet fra grid. De siste årene har Pirbadet gjort flere tiltak for å redusere energiforbruket, blant annet er det installert gråvanns-gjenvinnere og nye ventilasjonsanlegg.

Målet med denne masteroppgaven er å undersøke mulige tiltak for å redusere elektriske effekttopper ved Pirbadet. Oppgaven bygger på prosjektoppgaven fra høsten 2018 [1]. Både masteroppgaven og prosjektoppgaven er gjennomført i samarbeid med Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT), som tidligere har gjennomført flere studier av svømmeanlegg [13]. Noen av studiene omhandler energiforbruk i svømmeanlegg, men det har vært lite fokus på effektforbruk. Også ellers i litteraturen har det vært lite fokus på effektforbruk i svømmeanlegg, mens effektfor-

bruk i andre typer bygg har i større grad blitt omtalt.

Denne oppgaven vil i kapittel 2 ta for seg hva som er kjent i litteraturen om effektforbruk i ulike bygg og alternative energikilder som kan benyttes for å redusere effekttopper fra strømnettet. I kapittel 3 presenteres oppgavens mål. Kapittel 4 beskriver metodene som er benyttet til denne oppgaven, inkludert innhenting av måledata, valg av modelleringsverktøy og oppbygging av modeller som kan benyttes for å undersøke bruk av alternative energikilder. Kapittel 5 presenterer resultatene av arbeidet, mens resultatenes betydning diskuteres i kapittel 6.

Oppgaven vil kun fokusere på elektrisk energiforbruk. Fjernvarmeforbruk vil ikke bli tatt hensyn til da det ikke direkte påvirker det elektriske effektforbruket. Reduksjon i effektforbruk defineres i denne oppgaven som reduksjon i effektuttak fra grid. Prosjektet ble gjennomført innenfor standard økonomiske og tidsmessige rammer for en masteroppgave.

Kapittel 2

Litteratursøk

Dette kapittelet tar for seg relevant litteratur angående reduksjon av elektriske effekttopper i bygninger, med spesielt fokus på svømmeanlegg. Først vil generell informasjon om elektrisk forbruk i svømmeanlegg bli omtalt. Så vil effektreduserende tiltak i bygninger omtales. Videre undersøkes alternative energikilder og energilagings-prinsipper, samt verktøy for modellering av energisystemer. Til slutt oppsummeres de viktigste funnene om Pirbadet fra prosjektoppgaven [1].

Svømmeanlegg har store våtromsarealer, høy luftfuktighet og komplekse energisystem. Store forskningsstudier på energiytelse (energy performance) ekskluderer ofte svømmeanlegg da det er utfordrende å sammenligne forskjellige svømmeanlegg [11]. Det har ikke lyktes å finne litteratur som primært omhandler effektforbruk i svømmeanlegg. Litteraturgjennomgangen baserer seg derfor på litteratur om energiforbruk i svømmeanlegg og effektforbruk i andre typer bygg.

2.1 Svømmeanlegg

I Europa er det rundt 1,5 millioner idrettsanlegg utstyrt med svømmebasseng [11]. Svømmeanlegg kan betraktes som prosessanlegg med mye teknisk utstyr med varierende energiforbruk, spesielt grunnet krav til ventilasjonssystem og vannbehandling [12]. Sammenlignet med vanlige kontorbygg er forventet energiforbruk for svømmeanlegg syv ganger høy-

ere per kvadratmeter [11]. Vannforbruket er ikke uventet også betydelig høyere enn i kontorbygg. I Sydney ble det funnet et vannforbruk på rundt 1 million m³ per år for svømmeanlegg, mens et 10 000 m² kontorbygg forbruker rundt 15 000 m³ per år [11].

Svømmeanlegg skiller seg fra andre bygningstyper blant annet med høyt energi- og vannforbruk, høy temperatur, høy luftfuktighet, omfattende energigjenvinning og komplekse styringssystemer for teknisk utstyr [12]. Avdamping fra basseng fører til høy luftfuktighet som må tas hensyn til ved byggets design og valg av byggemateriale, både for brukers komfort og for å hindre korrosjon [11]. Vanligvis er relativ fuktighet i svømmehaller mellom 55 % og 60 % [12], Energigjenvinning benyttes for å redusere energiforbruket, for eksempel ved bruk av varmevekslere og varmpumper.

Svømmeanlegg blir ofte ekskludert fra store forskningsstudier på energiytelse (energy performance) på grunn av komplekse energisystem [11]. Forbruket varierer fra anlegg til anlegg blant annet på grunn av arkitektur, bruksmønster, bygningenes alder og vedlikeholdstilstand. Selv om to identiske anlegg bygges på samme tidspunkt, kan faktorer som geografisk lokasjon og lokalt klima, åpningstider og antall brukere, føre til at energiforbruket er forskjellig.

Energibruken i svømmehaller er avhengig av blant annet [14]:

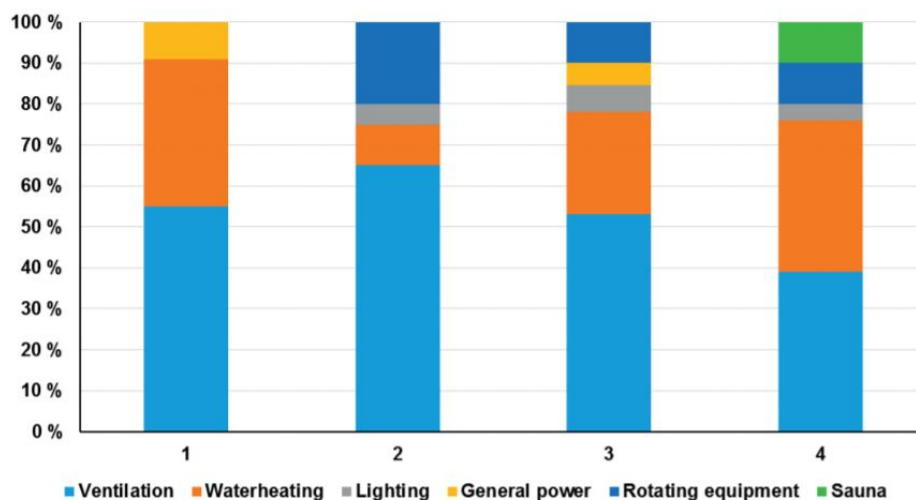
- Ute- og innetemperatur
- Bassengtemperatur
- Vannareal og vannvolum
- Antall besøkende

Vannareal, vannvolum, innetemperatur og bassengtemperatur kan betraktes som tilnærmet konstant. Utetemperatur og antall besøkende er derimot varierende og ikke kontrollerbare.

Forskjellige måter å rapportere energiforbruk gjør det vanskelig å sammenligne anlegg. Energiforbruk for svømmeanlegg har i litteraturen vært oppgitt blant annet som kWh per vannareal, kWh per bygningsvolum, kWh per bruksareal, kWh per besøkende og kWh per årlige

driftstimer [12]. W. Kempel anbefaler å benytte kWh per besøkende der besøksstatistikk er tilgjengelig, ellers anbefaler han å benytte kWh per vannareal, men da er det viktig at kun anlegg med lignende publikums-tilbud sammenlignes [12].

Flere forfattere påpeker at avdamping fra basseng er en viktig faktor med hensyn til energiforbruk [11, 12, 15]. Avdamping medfører høye ytelseskrav til ventilasjonsanlegg. I følge Duverges studie av svømmeanlegg i Victoria, Australia, brukes energi i svømmeanlegg til oppvarming/kjøling, ventilasjon, vannbehandling og lys [11]. Dette stemmer godt med Kampels sammenligning av svømmeanleggs energiforbruk basert på europeiske studier, se figur 2.1 [12]. Her fremkommer det at ventilasjon er den største lasten i de europeiske studiene, etterfulgt av oppvarming av vann. En dansk rapport fra 2015 har lignende resultat, se tabell 2.1 [16]. Den danske rapporten inkluderer også nøkkeltall for energi- og vannforbruk basert på vannareal, se tabell 2.2. Nøkkeltallene viser at energiforbruket per vannareal er lavere i større anlegg enn i mindre anlegg.



Figur 2.1: Fordeling av energiforbruk i svømmeanlegg i fire ulike artikler (1 til 4), analysert av W. Kempel [12].

Tabell 2.1: Fordeling av energi i danske svømmeanlegg [16].

Varmeenergi		Elektrisk energi	
	%		%
Ventilasjon, svømmehall	45	Vannbehandling	30
Dusjvann	20	Ventilasjon	20
Ventilasjon, servicebygg	10	Lys	20
Bassengvann	10	Sauna	20
Annen oppvarming	10	Varmeanlegg	5
Diverse	5	Diverse	5

Tabell 2.2: Nøkkeltall for energi- og vannforbruk i danske svømmeanlegg basert på vannareal [16].

Vannareal [m ²]	Elektriskenergi [kWh/vannareal/år]	Varmeenergi [kWh/vannareal/år]	Vannforbruk [liter/person/år]
< 300	715	2033	82
300 - 600	662	1754	72
> 600	623	1520	68
Gjennomsnitt	667	1769	74

Det finnes mange tiltak som potensielt kan redusere svømmeanleggs energiforbruk. Flere tiltak bør gjennomføres for å redusere energiforbruket da hvert enkelt tiltak kun vil gi liten reduksjon i forbruk [11]. Tiltak kan blant annet inkludere:

- **Design og arkitektur:** Design og arkitektur av svømmeanlegg kan ha stor betydning for energiforbruk over tid [15]. Det er viktig at systemer er beregnet ut fra hvert enkelt anleggs egenart og da spesielt ventilasjonssystemet. Overdimensjonerte system vil bruke mer energi enn nødvendig.
- **Isolasjon:** Isolering rundt rør og oppbevaringstanker for vann kan redusere termisk tap. Isolasjon er et lavkostnadstiltak som ofte enkelt kan etterinstalleres. Det kan medføre betydelig energisparing, gjerne mellom 2 % og 10 %, men er ofte ikke anvendt [17].
- **Drift og vedlikehold:** Gode rutiner for drift og vedlikehold er

viktig [17]. Ved å benytte styringssystemer kan driften av ulike komponenter organiseres etter behov. I tillegg vil en få tidlig varsel dersom feil oppstår. For eksempel er bruk av frekvensregulator for omsirkulerings-pumper anbefalt for å redusere energibruk relatert til sirkulering av vann [16]. Bruk av dagslyssensor og bevegelses-sensor for styring av lys er også anbefalt [11].

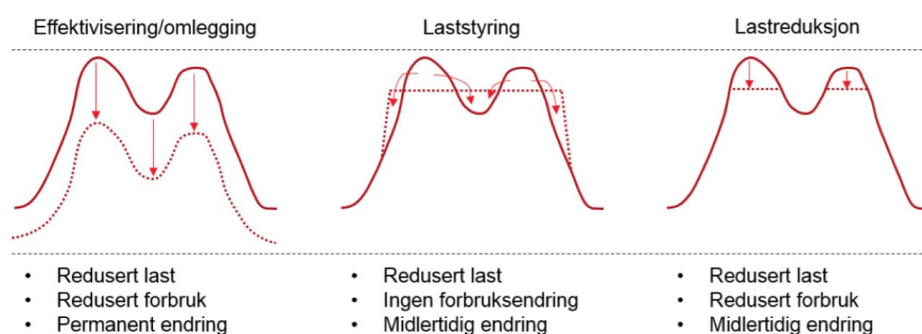
- **Styring av vann- og lufttemperatur:** Vann- og lufttemperatur bør reguleres med stor nøyaktighet for å begrense avdamping. En studie viser 7,4 % reduksjon i energiforbruk ved å redusere vann-temperaturen i bassenget fra 28 °C til 27 °C [18]. Det anbefales at lufttemperaturen er minimum 2 °C høyere enn vanntemperaturen for å begrense avdamping [16].
- **Ventilasjonsanlegg:** Behovsstyring og automatisk regulering av luftmengden i ventilasjonsanlegg (for eksempel i/utenfor åpnings-tid) kan redusere energiforbruket. Riktig innstilt regulator og korrekt kalibrerte sensorer er nødvendig for å få utbytte av automatisk styring [16]. Det er viktig å ha riktig dimensjonert utstyr. Oppgradering av gammelt utstyr kan vurderes.
- **Oppgradering av teknisk utstyr:** Å oppgradere teknisk utstyr fører normalt til en direkte reduksjon av energiforbruk [17]. En vurdering av installasjonskostnader kontra mulig reduksjon av energikostnader bør gjennomføres før eventuell oppgradering. Det er også viktig å vurdere hvordan nytt teknisk utstyr vil påvirke effektforbruk. Spesifikt anbefales det å oppgradere belysning til LED-lys [16].
- **Tildekking av svømmebasseng:** Tildekking av basseng i perioder der bassenget er ute av bruk, kan redusere avdampingen fra vannet. Det kan bety redusert avdamping av farlige stoffer samt reduksjon av termisk energitap [17]. Redusert avdamping kan føre til at ventilasjonsanlegget opereres på et lavere nivå med et redusert energiforbruk.
- **Varmegjenvinning fra gråvann:** Restvarme i gråvann kan benyttes til å varme opp rent vann ved å bruke varmeveksler før gråvannet forlater bygget. Varmegjenvinning fra gråvann bør vur-

deres, og kan i enkelte tilfeller være en god løsning for å redusere mengden energi brukt til vannoppvarming. I andre tilfeller vil etterinstallasjon av slike systemer ikke lønne seg da det kan medføre store kostnader på grunn av bygningsmassens utforming [16].

- **Alternative energikilder:** Duverge's studie av svømmebasseng i Victoria, Australia, konkluderer med at bruk av solcellepanel og andre soloppvarmingssystem hadde positiv innvirkning med hensyn på energisparing [11]. Andre energikilder kan også være gode alternativer, som for eksempel bruk av fjernvarme for å varme opp bassengvann. Hvilke alternative energikilder som kan benyttes, vil variere blant annet på grunn av lokale forhold.

2.2 Effektreducerende tiltak

Tiltak for effektreduksjon kan deles i 3 hovedkategorier avhengig av hvordan tiltakene påvirker lastkurven; effektivisering / omlegging, laststyring og lastreduksjon, se figur 2.2 [6]. Disse er nærmere beskrevet under. Informasjonen i dette delkapittelet er i hovedsak basert på informasjon fra "Smarte bygg som del av det norske energisystemet" [6].



Figur 2.2: Kategorier for effektreducerende tiltak [6].

Effektivisering / omlegging er tiltak som fører til en permanent reduksjon av effektforbruket. Forbruket reduseres ofte ved at det tekniske utstyret blir oppgradert til nyere og mindre effektkrevende utstyr. Omlegging kan være å endre energikilde fra elektrisitet til, for eksempel, fjernvarme og er således en permanent endring. Effektiviseringstiltak

kan vurderes for alle forbrukstyper, men omlegging er kun relevant for termiske laster [19]. Et eksempel på et mulig effektiviseringstiltak er bytte av belysning til LED. Energieffektiviseringstiltak kan redusere totalt elektrisk forbruk, men vil ikke nødvendigvis føre til en reduksjon i effektforbruket. Eksempelvis kan momentan oppvarming av vann bruke mindre energi totalt enn en varmtvannsbereder, men føre til et høyere effektforbruk i kortere perioder. Endring av belysning til LED vil derimot både redusere energi- og effektforbruket dersom forbruksmønsteret ellers er likt.

Laststyring er tiltak der deler av effektforbruket flyttes i tid til en periode med lavere forbruk. Dette fører til reduserte effekttopper uten å endre det totale forbruket av energi. Termiske laster er ofte passende til laststyring på grunn av termisk treghet, og lastene vil kunne flyttes uten opplevd komfortendring. Eksempler på laststyring er tidsforskyving av oppvarming og nattsinking av romtemperatur. Nattsinking av innetemperatur er vanlig i mange bygg hvor det er lite aktivitet om natten. For å redusere investeringer i nettinfrastruktur anbefales det i stedet at større bygg øker temperaturen om natten og lagrer varmen i bygninger. Avhengig av hvilke energilagings-løsninger som er tilgjengelig, kan alle typer forbruk i prinsippet styres [19]. For eksempel kan et batteri lades opp i perioder med lavt forbruk og tappes når det ellers ville være en effekttopp. Dette flytter ikke direkte lasten, men det vil fra nettleverandørs side oppfattes som om deler av lasten er flyttet. Denne typen tiltak vil imidlertid ha høye kostnader, og tidshorizonten er kort.

Lastreduksjon er tiltak som innebærer at effektforbruket reduseres i en periode uten at det elektriske forbruket øker ved et annet tidspunkt. Lite kritiske laster kan reduseres eller kobles helt ut, for eksempel lys kan dimmes eller skrues av i ikke-kritiske områder. Andre energibærere kan også benyttes i kortere perioder, for eksempel kan ved/gass benyttes i stedet for elektrisitet til oppvarming. Det er imidlertid viktig at lastreduksjonen ikke går på bekostning av brukers komfort.

Det finnes altså flere tiltak som kan bidra til å redusere effektforbruk i bygg. Tiltakene vil variere avhengig av om det er byggets egen daglige effekttopp, eller en kritisk effekttopp i nettet som skal reduseres. Hvilke tiltak som bør iverksettes, vil være situasjonsavhengige. Generelt

kan effektivisering redusere forbruk i de fleste tilfeller, mens omlegging, laststyring og lastreduksjoner vil være mest aktuell for termiske laster. Det kan være store motsetninger mellom hva som er teknisk mulig og økonomisk lønnsomt. Mulige tiltak vil også begrenses av hvor fleksibel forbruker er villig til å være. Figur 2.3 viser en oversikt over laster og anbefalte tiltak funnet i en undersøkelse om alternativer til nettinvesteringer i Oslo og Akershus fra 2011 [19].

Forbrukskategori	Døgnvariasjon	Maks MW 2020	Effektivisering	Omlegging og lastreduksjoner	Laststyring
Romoppvarming		2 200			
Ventilasjonsluft		380			
Varmtvann		330			
Belysning		300			
Teknisk utstyr		300			
Vifter/pumper		220			
Industri		580			

Figur 2.3: Muligheter for effektreduserende tiltak fra en undersøkelse om alternativer til nettinvesteringer i Oslo og Akershus, 2011 [19]. Grønn sirkel indikerer gode muligheter for reduksjon av effektforbruk, oransje indikerer mulig men ikke optimal løsning, rød indikerer en ikke anbefalt metode.

Kritiske effekttopper inntreffer når belastningen i strømmettet er nær maksimal overføringskapasitet. Maksimal belastning er ofte sterkt påvirket av klima og vil i varme regioner normalt oppstå på varme sommerdager. I kaldere områder vil topplast oppstå på kalde vinterdager grunnet stort oppvarmingsbehov. For eksempel utgjør oppvarming 78 %

av totalt energiforbruk i norske boliger, mens for yrkesbygg utgjør det mellom 35 % og 60 % [6].

Tiltak som kan hjelpe å redusere kritiske effekttopper, inkluderer blant annet reduksjon av luftmengden i ventilasjonsanlegg, kontroll av større laster og bruk av alternative energikilder. Ventilasjonsanlegg kan ofte redusere luftmengden uten at brukeren vil føle noe ubehag ved normal drift. Enkelte større laster kan flyttes til perioder med lavt forbruk uten ulempe for brukeren. For eksempel bør oppvarming av vann unngås i perioder med høyt effektforbruk. Generelt er det ønskelig å flytte fleksible laster som lading av elbil og oppvarming av vann til natt da det normalt er lavere forbruk. Når lastene flyttes til natt, er det viktig at de flyttes til ulike tidspunkt for å unngå at ny effekttopp oppstår på grunn av lastflyttingen. Bruk av andre energikilder som nød-/reserveaggregat, kan hjelpe å redusere strømforbruket ved kritiske effekttopper. Eksempelvis kan brenselfyrte kjeler benyttes til oppvarming, mens nød-/reserveaggregat kan brukes for å redusere eget effektuttak fra nett eller stilles til disposisjon for kraftregulerende instanser.

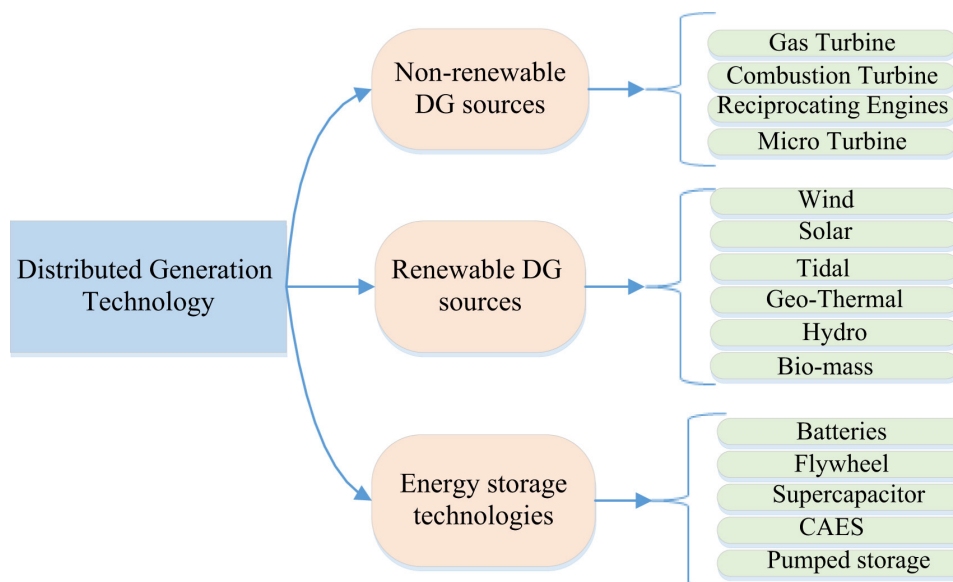
Solcelleteknologi er et tiltak som ikke er anbefalt for å redusere kritiske effekttopper i kjølige regioner. Dette skyldes at kritiske effekttopper vanligvis oppstår på kalde vinterdager med lite sollys og derav lav produksjon fra solcellepaneler. Avhengig av forbruksmønster kan solcellepaneler, om sommeren, ha mer innvirkning på daglige effekttopper i bygg. Batteri er heller ikke anbefalt for å redusere kritiske effekttopper. Det er teknisk en god løsning, men har per dags dato høye kostnader og store energitap relatert til lading/utlading. For eksempel, skal det være lønnsomt å benytte elbil-batteri som strømforsyning til nett, må prisdifferansen mellom lading og utlading være minst 35 øre/kWh [6].

2.3 Alternative energikilder - Distribuert genereringsteknologi (DG)

Distribuert genereringsteknologi (Distributed Generation Technologies - DG) omfatter et bredt spekter av teknologier som direkte leverer elektrisitet til distribusjonsnettet, med lavt til medium spenningsnivå [20].

DG kan også kobles til etter måler hos sluttbruker, for eksempel ved å plassere solcellepanel på tak direkte tilkoblet last. Det finnes ingen klar definisjon på distribuert genereringsteknologi, men det er generell enighet i litteraturen om at teknologiene har begrenset kapasitet, og at de er lokalisert nært sluttbruker [20, 21, 22, 23]. Det finnes flere måter å kategorisere DG. Ackerman foreslo å dele teknologiene i 4 kategorier avhengig av kapasitet; mikro DG (1 W - 5 kW), små DG (5 kW - 5 MW), medium DG (5 MW - 50 MW) og store DG (50 MW - 300 MW) [21].

Distribuert genereringsteknologi deles inn i 3 hovedkategorier; ikke fornybar energiproduksjon, fornybar energiproduksjon og energilagring, se figur 2.4 [22]. Energiproduksjon kan videre deles inn i regulerbar teknologi hvor elektrisitetsproduksjonen kan styres, for eksempel vannkraft, og ikke-regulerbar teknologi som produserer elektrisitet når fysiske forhold tillater, eksempelvis sol- og vindkraft [24]. Økt avhengighet av ikke-regulerbar teknologi medfører også økt energilagringsbehov for å ha energileveranse i perioder med lav produksjon. Variabel fornybar produksjon blir sett på som en av de største utfordringene knyttet til DG [24].



Figur 2.4: Distribuert genereringsteknologi (Distributed Generation Technologies) [22].

Det er flere grunner til å vurdere DG som et alternativ eller tillegg til

tradisjonell elektrisitetsproduksjon. Systemene har ofte begrenset fysisk størrelse og kan være modulbasert. Det gjør oppstartskostnadene relativt lave og reduserer investeringsrisiko [22]. Kompakte moduler kan også bety mindre strenge krav til godkjenning fra myndigheter før utbygging [22]. Flere av DG teknologiene blir betraktet som mer klimavennlig enn tradisjonell produksjonsteknologi og kan hjelpe til å redusere CO₂ utslipp fra energisektoren [20, 23, 24]. DG har ofte rask responstid og kan følge endringer i lastprofilen [22]. Ved å produsere elektrisitet nært forbrukssted kan energitap i transportleddet reduseres. Samtidig kan lokal produksjon potensielt minske overlast i transmisjonsnettet og derved oppnå reduksjon av investeringer til infrastruktur og til kapasitetsoppgraderinger [20, 23, 24].

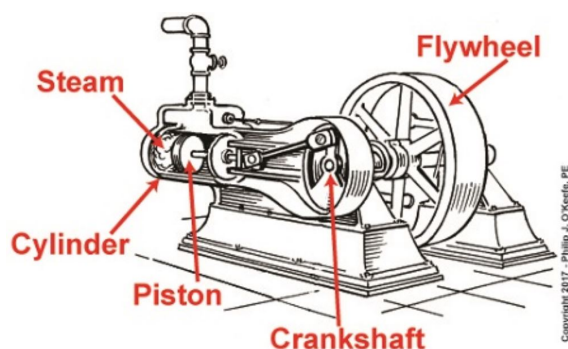
Mulige bruksområder for DG teknologi inkluderer [22]:

- Produsere strøm til kraftnettet.
- Reservekraft ved strømbrudd til essensielle oppgaver.
- Strømkilde i områder uten nettilgang.
- Reduksjon av effekttopper, både daglige effekttopper i bygg og kritiske effekttopper i nett.
- Forbedre spenningsprofilen og strømkvaliteten i nettet, samt redusere overføringstap ved å plassere produksjon nært forbrukssted.

2.3.1 Ikke-fornybar energiproduksjon

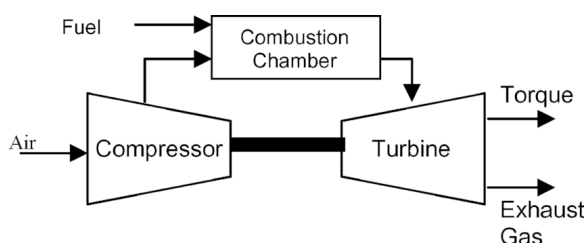
Ikke-fornybar energiproduksjon inkluderer blant annet stempelmotorer (Reciprocating engines) og gassturbiner (Gas turbines - GT) [22]. Informasjonen nedenfor er i hovedsak hentet fra "Distributed energy resources and benefits to the environmen" [20]. Stempel-motorer er en undergruppe av interne forbrenningsmotorer. Et stempel (piston) i en sylinder beveges grunnet trykkendringer i sylinderen. Stempelet er festet til en veivaksel (crankshaft) som for eksempel kan rotere et svinghjul (flywheel), se figur 2.5 [25]. Stempelmotorer varierer i størrelse fra små enheter på 1 kVA til flere MVA. De har lav investeringskostnad og høy effektivitet, men har høye vedlikeholdskostnader og høye utslipp av

klimagasser samt karbonmonoksid (CO) og NO_x gasser. Ved å benytte naturgass, kan utslippene av NO_x reduseres sammenlignet med bruk av diesel for å drive stempelmotoren.



Figur 2.5: Skjematisk tegning av en stempelmotorer [25].

Gassturbiner bruker en gasstrøm til å rotere en turbin, se figur 2.6. Gassturbiner kan deles inn i mikroturbiner (Micro-turbines - MT) og forbrenningsturbiner (Combustion turbines - CT). Mikroturbin systemer har ofte en produksjonskapasitet mellom 30 kW og 400 kW, mens forbrenningsturbiner er i skala 200 kW til 250 MW. Forbrenningsturbiner er ofte brukt i industri og storskala produksjon, men er regnet som upraktisk for småskala distribuert energiproduksjon. Mikroturbiner begynner å bli vanlige som distribuert, kombinert varme- og elektrisitetsproduksjon. MT har en effektivitet på mellom 33 % og 37 % for elektrisitetsproduksjon, men kan få en effektivitet på over 80 % dersom de samtidig benyttes til å produsere varme. Sammenlignet med stempelmotorer har MT høyere energitetthet, mindre klimagass-utslipp og færre bevegelige deler. MT har derimot ofte lavere effektivitet, spesielt ved produksjon med redusert effekt, og det tar lengre tid å endre produksjonsnivå.



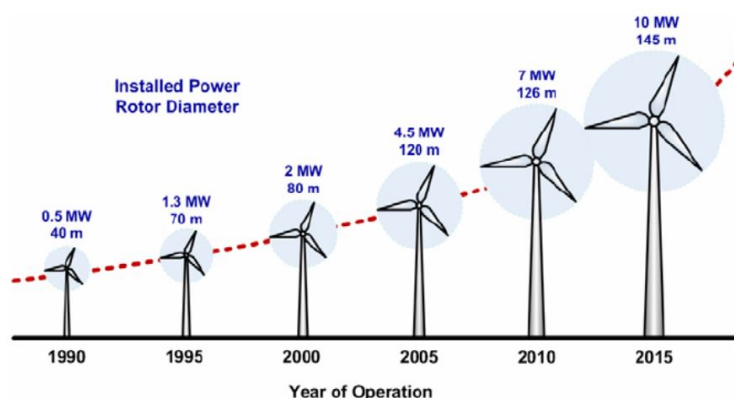
Figur 2.6: Skjematisk tegning av en gassturbin [26].

2.3.2 Fornybar energiproduksjon

Fornybar energiproduksjon er basert på å utnytte naturlige energikilder som stadig fornyes. Nedenfor er noen fornybare energiteknologier kort beskrevet.

- **Vindkraft:** Vindmøller konverterer kinetisk energi fra luftmasser i bevegelse til elektrisk energi [20]. Det kreves minimum vindhastighet på om lag 4 m/s før en vindmølle starter å produsere kraft. Ved vindhastigheter over 25 m/s blir generatoren koblet fra for å beskytte utstyret, og derved stopper produksjonen. Vindmøller har de siste årene økt i størrelse og produksjonskapasitet, se figur 2.7 [27].

Vindmølleparker offshore er økende i antall og disse kan være direkte tilkoblet transmisjonsnett. Det ventes at investering i vindmøller vil fortsette, og antatt årlig vindenergiproduksjon i 2050 vil være 9 400 TWh. Dette vil tilsvare 25 % av all energiproduksjon i verden [8].

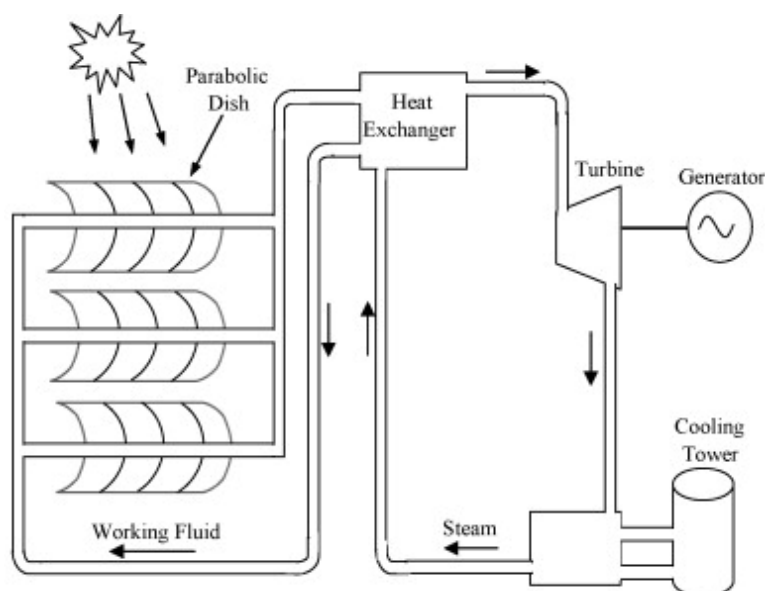


Figur 2.7: Størrelsesutvikling av vindturbiner [27].

- **Solenergi:** Solenergi kan deles inn i solcellepanel (Photovoltaic systems - PV) og termisk solenergi (solar thermal). Antatt solenergiproduksjon i 2050 er 9 200 TWh, litt under 25 % av forventet total energiproduksjon i verden [8].
 - **Solcellepanel** konverterer solenergi direkte til elektrisk energi ved hjelp av fotoelektrisk effekt, lys omdannes til elektrisitet [20]. Effektiviteten er generelt lav, mellom 10 % og

24 % [20] og produksjonskapasitet er proporsjonal med solcelleens overflateareal, rundt 150 W per m² [28].

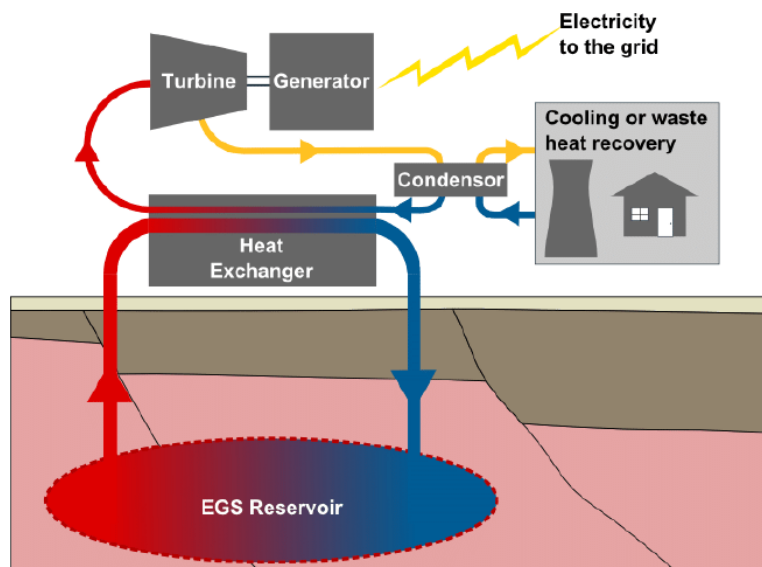
- **Termisk solenergi** kan brukes både til oppvarming og elektrisitetsproduksjon. Speil benyttes for å konsentrere solstråler som varmer opp et arbeidsmedium (working fluid), se figur 2.8 [20]. Oppvarming av arbeidsmedier til høye temperaturer, over 1000 °C, blir generelt brukt til elektrisitetsproduksjon. Oppvarming til lavere temperaturer blir derimot ofte brukt til oppvarming av vann for boliger og næringsbygg [20].



Figur 2.8: Skjematisk diagram av elektrisk energiproduksjon fra termisk solenergi [20].

- **Geotermisk energi:** Geotermisk energi bruker jordvarme til oppvarming og elektrisitetsproduksjon [20]. For å benytte energien bores dype hull til et område med tilstrekkelig geotermisk varme. Kaldt vann ledes ned via ett rør og blir til damp som returnerer via et annet rør, se figur 2.9 [29]. Energien fra dampen kan benyttes til å drive en turbin, og restvarmen kan for eksempel benyttes i et fjernvarmesystem. Geotermisk energi er miljøvennlig, og installert kapasitet i verden er over 14 GW [30]. Produksjon av geotermisk energi er meget lokasjonsavhengig, og kilder som har produsert i

mange år, kan plutselig opphøre [20].



Figur 2.9: Skjematisk diagram av geotermisk energiproduksjon (Enhanced Geothermal Systems - EGS) [29].

- **Vannkraft:** Vannkraft konverterer kinetisk energi fra vann i bevegelse til elektrisitet ved å lede vannet gjennom en vannturbin. Småskala vannkraft kan variere i størrelse fra 5 kW til 10 MW, med vannstrømmer fra noen hundre liter per sekund til flere titalls kubikkmeter per sekund [20]. I 2018 var verdens produksjon av elektrisitet fra vannkraft estimert til 4 200 TWh [8].
- **Biomasse:** Biomasse er organisk materiale fra planter og dyr [20]. Ved forbrenning av biomasse blir kjemisk energi frigitt i form av varme. Varmen kan benyttes enten i seg selv til oppvarming eller til å produsere damp som kan brukes til å drive en turbin. Småskala forbrenning av biomasse er alltid brukt til oppvarming. Biomasse kan også benyttes til å produsere drivstoff, for eksempel til biler, og resulterer i mindre klimagass-utslipp enn fra bensin.

2.3.3 Elektrisk energilagring (EES)

Elektrisk energilagring (Electrical Energy Storage - EES) dreier seg om lagringsmetoder som ved behov kan konverteres til elektrisitet [31].

Teknologiene som brukes til kommersiell energilagring er pumpekraftverk (PHS), komprimert luft (CAES), elektrokjemisk batteri (ABES) og svinghjul (FES) [31]. Både dagens og fremtidens strømmnett kan ha nytte av at større energimengder lagres for å være tilgjengelig i det elektriske energisystemet ved behov. Fordeler med økt energilagringsskapasitet inkluderer blant annet [32, 33]:

- **Reduserte klimagassutslipp:** Variable fornybare energikilder produserer energi når fysiske forhold tillater produksjon. Det kan føre til produksjonsoverskudd. Dersom overskuddsenergien lagres, kan bruk av tradisjonelle energikilder som fossilt brennstoff reduseres, og andel fornybar energi økes.
- **Redusert maksimal effekttopp:** Lokalt lagret energi kan benyttes når det oppstår kritiske effekttopper i strømmettet og derved utjevne effektuttaket i nettet.
- **Reduserte investeringer i infrastruktur:** Avhengig av tilgjengelig mengde energi lagret kan investeringer i andre deler av infrastrukturen reduseres. Både økning i produksjonskapasitet og transmisjonskapasitet kan i noen tilfeller unngås.
- **Økt pålitelighet i strømmettet:** Energilagringsteknologier kan brukes for å sikre overføringsbalansen i strømmettet. For eksempel kan energilagring benyttes til frekvensregulering.

Hvilken energilagringsteknologi som er best egnet, avhenger av tiltenkt bruksområde. Flere av bruksområdene for EES-teknologi er beskrevet i tabell 2.3. Noen egenskaper som bør vurderes ved valg av teknologi, er beskrevet under [35].

- **Effekt og energi:** Maksimal effekt (power rating) oppgir hvor stor effekt lagringseenheten kan håndtere under lading og utlading. Energi betegner total lagringsskapasitet i systemet. Ofte benyttes spesifikk effekt og spesifikk energi for å sammenligne forskjellige systemer, oppgitt som effekt per masse og energi per masse.
- **Effektivitet:** Effektivitet er et mål på forholdet mellom levert energi fra lagringssystem og mengde energi brukt til å lade systemet i utgangspunktet.

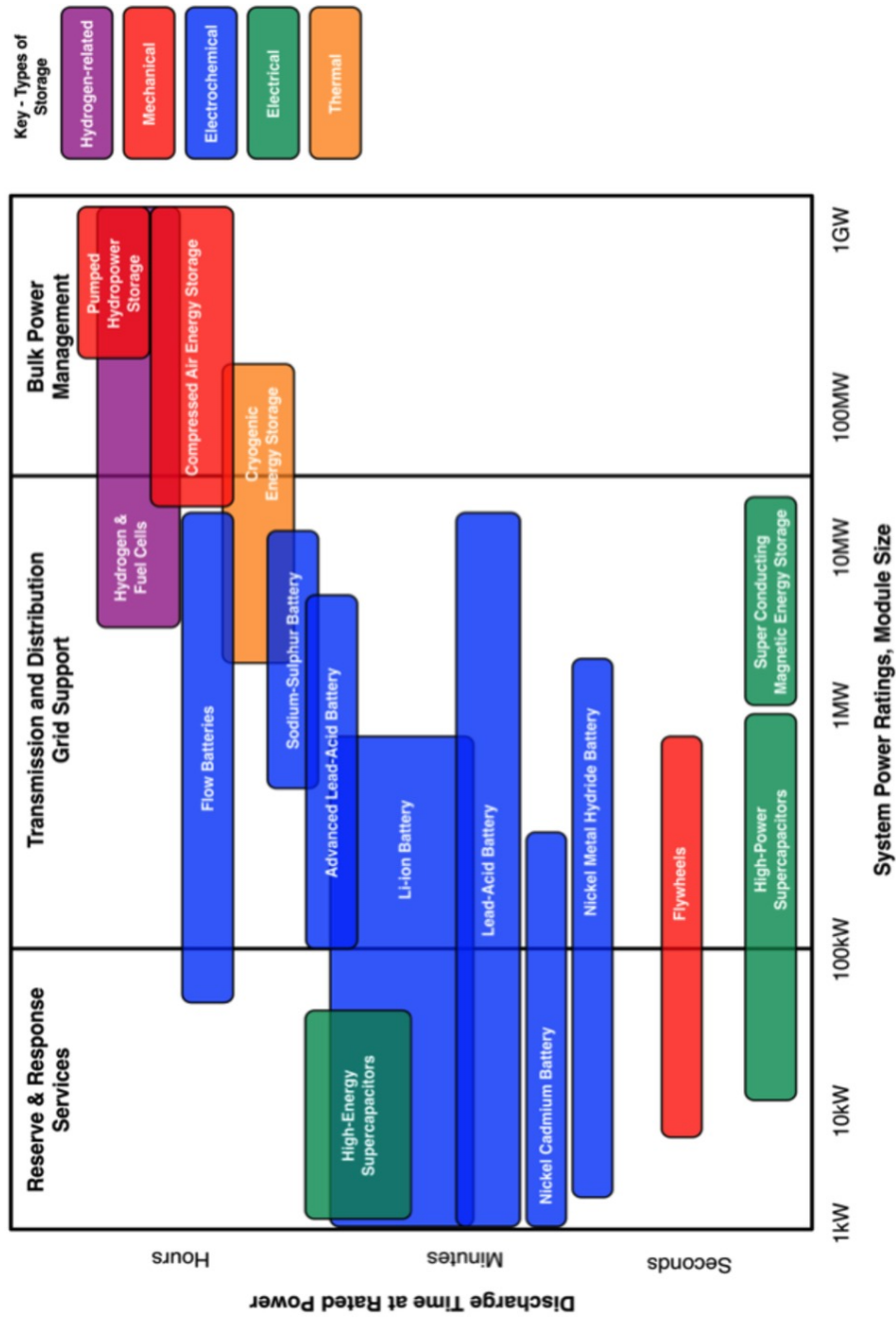
Tabell 2.3: Noen bruksområder for elektrisk energilagring [34].

Application	Description	Necessary Characteristics
Energy Arbitrage	Storing low-cost energy which is discharged and sold when prices are higher.	Discharge time of hours.
Generation Capacity Deferral	Discharge energy during peak-load hours, reducing the need for peaking generators.	Discharge times of up to a few hours.
Ancillary Services		
<i>Regulation</i>	Increase or decrease in net output of storage to ensure real-time balance between system energy supply and demand.	Response time of seconds to minutes. Charge and discharge times are typically minutes. Service is theoretically zero net energy over extended periods of time.
<i>Contingency Reserves</i>	Increase in net output of storage to response to a contingency, such as a generator or transmission outage.	Response time of minutes. Discharge time of up to a few hours.
Ramping	Follow hourly changes in electricity demand.	Response time of minutes to hours. Discharge time of hours.
T&D Capacity Deferral	Storing energy when T&D are lightly loaded and discharging when T&D are constrained.	Response time of minutes to hours. Discharge time of hours. Small-scale deployments may be necessary, depending on each specific site.
End-User Applications		
<i>Managing Energy Costs</i>	Storing energy when retail price is low and discharging when price is higher. Functionally equivalent to Energy Arbitrage.	Response time of minutes to hours.
<i>Power Quality and Service Reliability</i>	Using storage to improve power quality (e.g. voltage, frequency, harmonics). Discharging storage during a service outage.	Response time of seconds to minutes. Discharge time of hours.
Renewable Curtailment	Reduce curtailment of renewable generation due to generator (e.g. ramping, minimum load) or transmission constraints.	Response time of minutes to hours. Discharge time of hours.

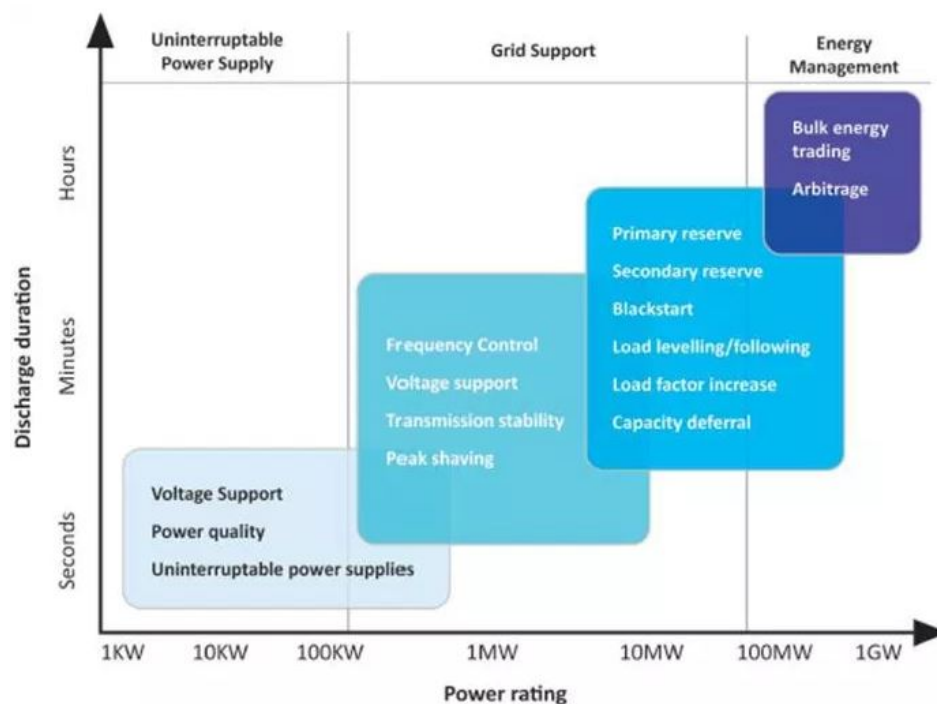
- **Utladningshastighet:** EES har forskjellige utladningshastighet som grovt kan deles inn:
 - Kort: under 1 time, svinghjul og superkondensator
 - Medium: opptil 10 timer, småskala CAES og batteri
 - Lang: mer enn 10 timer, pumpekraftverk og storskala CAES
- **Levetid:** Levetiden angir hvor lenge det kan ventes at et energilagringssystem skal fungere uten betydelig reduksjon i effekt, energi eller effektivitet. Beskrives ofte i antall lade/utlade-sykluser. Generelt har mekaniske lagringssystem lengre levetid enn elektrokjemisk lagring.

- **Kostnad:** Kostnader kan deles i to; installasjon og drift, og vil variere avhengig av teknologi. Ofte er kostnad per effekt [kost/kW] eller kostnad per energi [kost/kWh] brukt i analyser av de ulike teknologiene.
- **Teknisk modenhet:** Dette begrepet angir erfaring med energilagringsteknologien og gir en indikasjon til investorer om risiko rundt et prosjekt. Det kan grovt deles inn i:
 - Eldre/modne teknologier (Mature): mange år i kommersielt bruk, for eksempel pumpekraftverk
 - Utviklede teknologier (Early Com): nylig kommersialisert, for eksempel Litium-ionbatterier
 - Teknologier under utvikling (Developing): teknologi som ikke er kommersielt klar, for eksempel hydrogenlagring

Det har i lang tid vært forsket på lagring av elektrisk energi, og det ventes at kostnader relatert til energilagring reduseres etterhvert som teknologier utvikles og blir tatt i bruk [36]. Figur 2.10 viser forskjellige energilagringsteknologier, både på forskningsstadiet og i kommersiell bruk, med maksimal effekt (power rating) på x-aksen og utladningshastighet (discharge duration) på y-aksen [37]. Plasseringen i diagrammet gir en indikasjon på hvilken type oppgave som teknologien best kan anvendes til, se figur 2.11 [36]. Eksempelvis kan pumpekraftverk generere strøm over lang tid med en høy maksimal effekt og kan derfor operere som en vanlig produsent av elektrisitet. Tabell 2.4 gir en mer detaljert oversikt over tekniske egenskaper for enkelte energilagringsteknologier.



Figur 2.10: Oversikt over forskjellige energilagringsteknologier [38].



Figur 2.11: Generalisering av bruksområde basert på utladingshastighet og maksimal effekt for energilagringsteknologier [36].

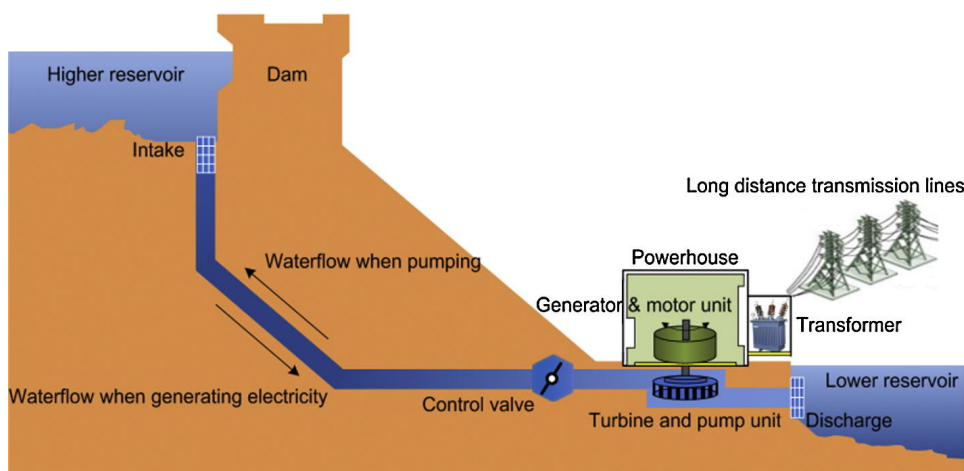
Tabell 2.4: Tekniske egenskaper av forskjellige EES teknologier [39].

Technology	Energy Density (Wh/L)	Power Rating (MW)	Suitable Storage Duration	Lifetime (years)	Discharge Time	Cycling Times (cycles)	Maturity
PHS	0.5–2	30–5000	H-Mon	40–60	1–24 H+	10,000–30,000	Mature
Flywheel	20–80	0.1–20	Sec-Min	15–20	Sec-15 Min	20,000	Early Com
CAES	2–6	≥300	H-Mon	20–40	1–24 H+	8000–12,000	Early Com
Capacitor	2–6	0–0.05	Sec-H	1–10	Millis-1 H	50,000+	Com
SMES	0.2–6	0.1–10	Millis-H	20–30	≥30 Min	10,000+	Demo/Early Com
TES	80–500	0.1–300	Min-Days	5–30	1–24 H+	-	Demo/Early Com
Solar fuel	500–10,000	0–10	H-Mon	-	1–24 H+	-	Developing
Hydrogen fuel cell	500–3000	0–50	H-mon	5–20	Sec-24 H+	1000+	Developing/Demo
Li-ion	150–500	0–100	Min-Days	5–15	Min-H	1000–10,000	Demo
Lead-acid	50–90	0–40	Min-Days	5–15	Sec-H	500–10,000	Mature

Abbreviations: SMES, Superconducting magnetic energy storage; TES, Thermal energy storage.

Pumpekraftverk (Pumped Hydroelectric Storage - PHS)

Pumpekraftverk er vannkraftverk med reversible aggregat. I perioder med overproduksjon eller lav kraftpris kan aggregatet pumpe vann fra et lavereliggende reservoar til et høyereliggende reservoar, se figur 2.12 [32]. Når det er ønskelig å produsere elektrisitet, slippes vannet ut av det øvre reservoaret, gjennom vannturbinen og den mekaniske energien i vannet bli omdannet til elektrisk energi i generatoren. Lagret energimengde avhenger av høydeforskjellen mellom reservoarene og mengden vann som kan lagres.



Figur 2.12: Skjematisk tegning av pumpekraftverk [32].

Pumpekraftverk har lang levetid, over 40 år, og er vanligvis mellom 70 % og 85 % effektive [32]. Det er den mest utbredte formen for energilagring med henholdsvis 94 % og 96 % av den installerte lagringskapasitet i USA og Europa [31, 5]. På grunn av store investeringskostnader og lang byggetid er geografisk plassering viktig for å få et høyt utbytte fra investeringen. Det kreves blant annet et høytliggende og et lavtliggende vannreservoar med passende høyde/avstands forhold [38]. Mange tradisjonelle pumpekraftverk-lokasjoner er allerede utbygd. Undersøkelser rundt sjøvanns- og underjordiske pumpekraftverk (for eksempel i gamle gruver) er derfor påbegynt [38].

Komprimert luft (Compressed Air Energy Storage - CAES)

I situasjoner med overskuddsproduksjon av elektrisitet eller ved lave strømpriser kan kompressorer benyttes til kompresjon av luft. Den komprimerte luften lagres i en tett beholder. Når det er aktuelt å produsere elektrisitet, blir luften sluppet ut via en turbin. Mengden energi som kan lagres ved bruk av CAES avhenger av type teknologi som benyttes, samt beholdervolum og trykknivå, se tabell 2.5.

Tabell 2.5: Sammenligning av forskjellige CAES teknologier [39].

Technology	Energy Density (Wh/L)	Power Rating (MW)	Storage Duration	Lifetime (Years)	Discharge Time	Cycling Times (Cycles)
Large CAES	2–6	110 & 290	Hours-months	20–40	1–24+ h	8000–12,000
AA-CAES	2–6	110 & 290	Hours-months	20–40	1–24+ h	-
LAES	8–24	0.3 & 2.5	-	20–40	1–12+ h	-
SC-CAES	8–24	110 & 290	Hours-months	20–40	1–24+ h	-
Small CAES	2–6	0.003 & 3	Hours-months	23+	Up to ~hour	Test 30,000

Abbreviations: AA-CAES, Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage; LAES, Liquid Air Energy Storage; SC-CAES, Supercritical Compressed Air Energy Storage; Cycling times—number of cycles.

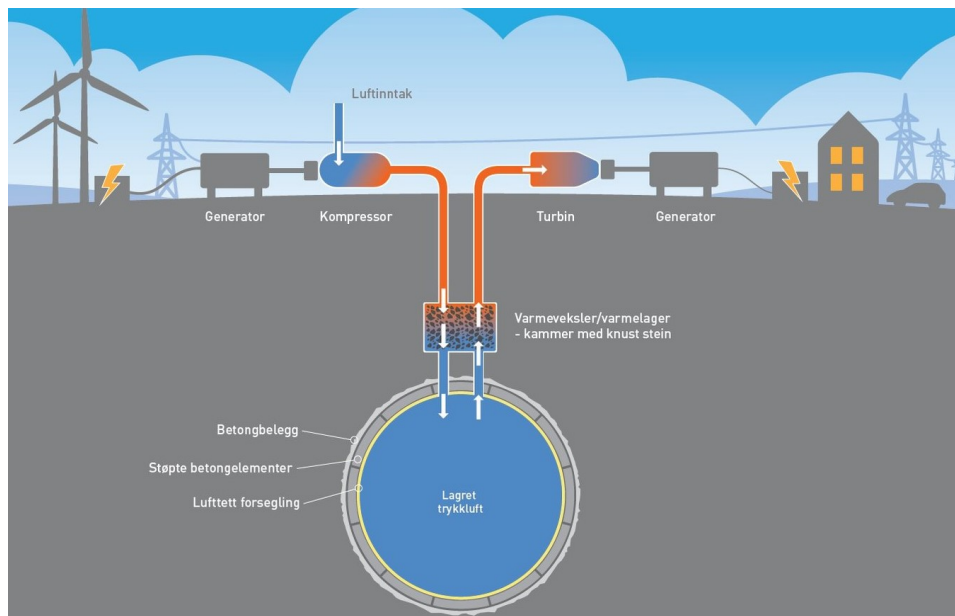
I tillegg til demonstrasjonsprosjekt var det i 2017 to kommersielt drevne CAES system i verden, ett i USA og ett i Tyskland, se tabell 2.6 [39]. Det er lav effektivitet på disse, henholdsvis 42 % og 54 %. Planlagte prosjekter er utsatt på grunn av den lave virkningsgraden kombinert med lave energipriser.

Tabell 2.6: Informasjon om kommersielt drevne CAES anlegg [39].

Location	Manufacturer	Year of Operation	Power Rating (MW)	Charge Time/Discharge Time (h)	Air Pressure (bars)	Heat Sources	Efficiency
Huntorf, Germany	Browne Boveri	1978	290	8/2	46-66	Natural Gas	42%
McIntosh, USA	Dresser-Rand	1991	110	40/46	45-74	Natural Gas	54%

Beholderen for komprimert luft kan være et bergrom. Det forskes på å anvende for eksempel gamle gruveganger til oppbevaring samt å øke effektiviteten i prosessen [40]. Ekstraksjon av varme er et sentralt punkt for økning av effektivitet, se figur 2.13 [41]. Kompresjon fører til temperaturøkning i luften. Forskningsprosjektet RICAS 2020 i regi av EU, planlegger å føre den komprimerte luften gjennom et rom med knust stein før luften lagres. Steinmassene tar opp varme fra luften [40]. Når elektrisitet skal produseres, vil luften igjen passere rommet med knust stein, bli varmet opp og dermed gi mer energi når den kommer til turbi-

nen. Det er beregnet at effektiviteten kan bli mellom 70 % og 80 %.

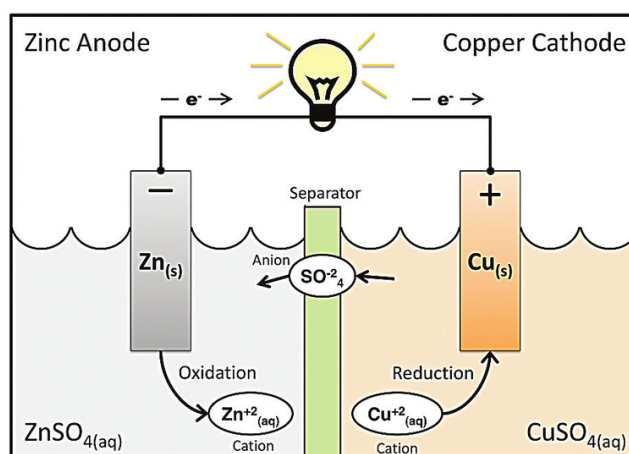


Figur 2.13: Skjematisk tegning av CAES fra forskningsprosjektet RICAS 2020 [41].

Batteri (Advanced Battery Energy Storage - ABES)

Et batteri lagrer energi i form av kjemisk energi som kan omformes direkte til elektrisk energi [42]. Galvaniske celler er byggeblokkene i et batteri, og hvert batteri kan bestå av en eller flere galvaniske celler. Ved å koble sammen celler i parallell eller serie kan ønsket spenning og lagringskapasitet oppnås [35]. Et eksempel på en sink - kobber galvanisk celle er vist i figur 2.14 [43]. En galvanisk celle består av to elektroder (anode og katode) i hver sin elektrolytt [42]. Cellen må inneholde en separator som leder ioner, men som samtidig hindrer direkte kontakt mellom elektrolyttene. I tillegg må det være en ekstern ledning mellom elektrodene slik at det blir en lukket krets.

Når det produseres elektrisitet, skjer en oksidasjon ved anoden som gjør at elektroner blir frigitt [42]. Elektronene beveger seg via den ytre ledningen til katoden hvor elektronene deltar i en reduksjonsreaksjon. Strømkretsen lukkes ved at ioner forflytter seg mellom elektrodekam-



Figur 2.14: Eksempel på en sink - kobber galvanisk celle [43]

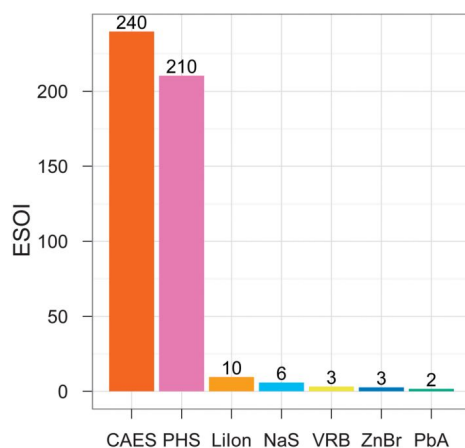
rene via separatoren slik at ladningsbalansen opprettholdes. Mengde energi som kan lagres, avhenger av hvor mye elektrodemateriale som er tilgjengelig. Oppladbare batterier lades ved å påtrykke en strøm i den ytre kretsen med høyere spenning enn hva som blir levert ved utlading. Dette tvinger elektronene i den ytre kretsen til å bevege seg i motsatt retning ved lading sammenlignet med utlading. Tabell 2.7 viser en oversikt over noen vanlige batteriteknologier og noen av deres egenskaper.

Batterier kan benyttes i mange forskjellige applikasjoner, blant annet for å sikre strømkvalitet, i transportsystemer og som midlertidig energikilde [32]. Forskning i dag fokuserer på å redusere kostnader, øke levetiden, øke produksjon/ytelse og samtidig gjøre dem mer miljøvennlig. Batterier er fleksible med tanke på hvor de kan installeres sammenlignet med pumpekraftverk (PHS) og komprimert luft (CAES). På den annen side lagrer batterier betydelig mindre energi gjennom sin levetid sammenlignet med mengde energi brukt til å produsere batteriet (energy stored on invested - ESOI) [45]. Figur 2.15 viser ESOI verdier (formel 2.1) for CAES, PHS og fem forskjellige batteriteknologier.

$$\text{ESOI} = \frac{\text{Lifetime energy stored}}{\text{Embodied energy}} \quad (2.1)$$

Tabell 2.7: Sammenligning av forskjellige batteriteknologier [44].
Forkortelser: Li-ion - Litium-ionbatteri, Na S - Natriumsulfat batteri, VRB - Vanadium Redox Battery

Parameter/Technology	Li-ion	Na S	Lead acid	VRB	Flow battery
Energy density	Average	High	Low	Low	Varies (lower than Li-ion)
Efficiency	High (near 100 %)	High (~92 %)	85 %	~ 85 %	60–85 %
Lifecycle	500–1000		200–300	High	
Toxicity	Non-toxic (electrolyte may be harmful)	Highly Corrosive	Sulphuric acids in the lead is highly corrosive	No fire hazard No highly reactive or toxic substances	Low toxicity
Cost	High (above ~ \$600)	High (up scaling)	Low	High	Low on average (depends on type of chemical)
Other		High operation temperature (heating process needed)	Requires regular maintenance	Independent energy and power rating more complicated technology	High power and capacity for load levelling in grid system

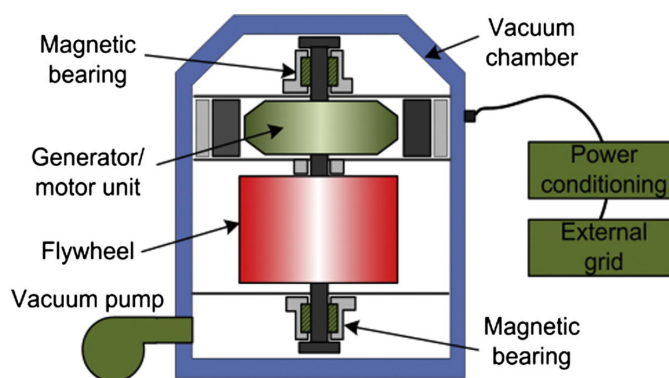


Figur 2.15: Energy stored on invested (ESOI) verdier av forskjellige energilagringsteknologier [45].

Forkortelser: CAES - Compressed Air Energy Storage, PHS - Pumped Hydro Storage, LiIon - Litium-ionbatteri, NaS - Natriumsulfat batteri, VRB - Vanadium Redox Battery, ZnBr - Zinc–Bromine battery, PbA - Lead–Acid battery

Svinghjul (Flywheel Energy Storage - FES)

Svinghjul lagrer energi ved å øke hjulrotasjonen. Uttak av energi skjer ved reduksjon av hjulrotasjon, den kinetiske energien i hjulet omdannes til elektrisitet i generatoren. Til dette anvendes en maskin som kan operere som både en generator og en motor. Figur 2.16 viser prinsipielt hvordan en moderne FES er bygget opp. Ved å plassere svinghjulet i et høyvakuumkanter reduseres energitap fra luftmotstand. Energi-mengden som kan lagres i et FES, avhenger av rotasjonshastighet og tregheten i hjulet.



Figur 2.16: Skjematisk tegning av svinghjul [32].

FES benyttes i hovedsak for å sikre strømkvaliteten i nettet. FES har kort responstid og høy effektivitet, opp til 95 %, men kan ha høy selvutlading i ventemodus, opptil 20 % av lagret kapasitet per time [32]. FES kan benyttes som midlertidig energikilde når nettet skal veksle mellom to produksjonskilder [38]. Basert på rotasjonshastighet kan FES deles i to kategorier; lav- og høyhastighets FES [32]. Lavhastighets FES roterer med hastigheter under 6000 rotasjoner per minutt (rpm) og er generelt konstruert av stål. Høyhastighets FES er produsert ved bruk av komposittmaterialer, som for eksempel karbonfiber, med opptil 100 000 rpm. Høyhastighets FES har høyere kostnader, men kan lagre mer energi og har et større bruksområde enn lavhastighet FES.

2.4 Modelleringsverktøy for energisystemer

Valg av modelleringsverktøy vil ofte være situasjonsbetinget. Det som vil passe bra for optimalisering av drift med kort tidshorisont, vil ikke nødvendigvis være det beste verktøyet for å planlegge hvordan energisystemet bør se ut om 20 år. Informasjonen i denne seksjonen er i hovedsak basert på “A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables”, publisert i 2018 [5].

Modeller av energisystem er ofte utviklet med en spesifikk problemstilling som ønskes løst. Grovt sett kan problemstillinger deles inn i fire kategorier, hvor et modelleringsverktøy prøver å løse en eller flere av dem.

- **“Power System Analysis Tools”** er verktøy som ser på et system på detaljnivå. Ofte er systemet relativt lite, for eksempel kan kraftelektronikken i en enkelt vindturbin undersøkes.
- **“Operation Decision Support”** opererer med korte tidsintervall, men ser på større system enn Power System Analysis Tools. Operation Decision Support kan for eksempel brukes til å avgjøre hvem som skal produsere strøm til det nasjonale nettet.
- **“Investment Decision Support”** skal hjelpe å evaluere investeringsmuligheter i det elektriske systemet, ofte med lange tidshorisonter.
- **“Scenario”** ser på energisektoren med lang tidshorisont og inkluderer ofte forskjellige politiske avgjørelser, eksempelvis CO₂-avgift.

Modeller kan ha flere tekniske og økonomiske komponenter. Modelleringsverktøyene kan for eksempel inkludere innebygde muligheter for å modellere tradisjonell kraftproduksjon, fornybar produksjon, energilagring, kraftinfrastruktur / kraftnett, forbrukerrespons (demand response), kostnader, energimarkeder og klimagassutslipp for å nevne noen. Metodene som benyttes til å modellere energisystem vil variere, og passer vanligvis inn i en av tre kategorier.

- **Simuleringsmodeller** benytter ofte detaljerte tekniske beskrivelser for å bygge opp et energisystem med spesifiserte egenskaper.

Modeller kan benyttes til å teste hvilken innvirkning ulike valg har på energisystemet. For eksempel kan effekten av å installere solcellepaneler på et bygg beregnes.

- **Optimaliseringsmodeller** ønsker å optimalisere en gitt funksjon. For eksempel kan det være ønskelig å finne ut hvordan bruk av fornybare energikilder kan maksimeres og/eller hvordan kostnader kan minimeres.
- **Likevektsmodeller** (Equilibrium models) har en økonomisk fremgangsmåte og prøver å modellere energisektoren i relasjon til resten av økonomien. Ofte benyttes denne type modell for å se hvordan ulike politiske avgjørelser kan påvirke totaløkonomien.

Geografisk utstrekning og tidsintervall er to viktige parametere ved valg av modelleringsverktøy. Spesielt viktig er det dersom systemet som skal modelleres, inkluderer mye variabel fornybar energi, da variasjon i produksjon må inkluderes i modellen. Geografisk utstrekning kan variere fra små lokale til globale prosjekt. Tidsintervall kan variere fra millisekunder i Power System Analysis Tools til flere år i økonomiske likevektsmodeller.

Et problem som kan oppstå ved bruk av lange tidsintervall, er undervurdering av mengde produksjonskapasitet som kreves. Dette skyldes at variasjonene i fornybar produksjon ikke blir godt nok representert, noe som kan føre til en overestimering av produksjon fra fornybare kilder. Spesielt utfordrende er det å forutse vindproduksjon. For å redusere estimeringsfeil kan lengde av tidsintervall reduseres. Det vil medføre økt beregningskostnad og kan gjøre simuleringen for kostbar å gjennomføre. Lengden på tidsintervallet i en simulering er et krevende spørsmål og kan ha stor betydning for resultatet.

En styrke ved å modellere med kort tidshorisont, er muligheten for å teste om modellen skapte riktig bilde av hva som reelt skjedde. Realitetssjekk av resultat fra modeller med lang tidshorisont er vanskelig. Mange ulike faktorer kan påvirke hvordan systemet utvikles, men modellen kan gi en god antydning av hva som kan gjøres. Det er ønskelig at modelleringsverktøy skal ha "open source-code" slik at det er mulig å se hvilke antagelser som er benyttet under simuleringen. Da vil det være

enklere å uavhengig etterprøve simuleringen.

2.5 Økonomi

I dette delkapittelet blir noen økonomiske begreper med tanke på investering i alternative energikilder kort forklart. Avsnittet om fakturering av strøm er fra prosjektoppgaven, men er gjengitt her for å gi et helhetlig bilde [1]. De økonomiske variablene er beskrevet ut fra hvilke verdier som er av interesse for modelleringsverktøyet som er benyttet i denne oppgaven, HOMER Pro. Informasjonen er i hovedsak hentet fra HOMER Pro sin hjemmeside [4].

2.5.1 Fakturering av strøm

I Norge er det vanlig å ha en tredelt strømregning for næringskunder [10]:

1. **Fastledd:** skal minst dekke faste kostnader. Fastleddet faktureres ofte som en fast kostnad per år.
2. **Energiledd:** skal minst dekke marginaltapet i nettet. Det er vanlig å fakturere energileddet i øre per kWh energi brukt. Hvor mange øre en kWh koster varierer. Pris avhenger av tilbud og etterspørsel og kan ha store variasjoner.
3. **Effektledd:** det er ingen faste bestemmelser på hvordan effektpriking skal utformes. En vanlig måte å fakturere effektleddet på er å fakturere den klokketimen med høyest gjennomsnittlig effektforbruk i en gitt periode. Totalt energiforbruk vil ikke ha innvirkning på effektleddet.

Nettselskaper kan fritt utforme sin egen tariffstruktur så lenge minimumskravene er innfridd. Dette fører til variasjon avhengig av leverandør. For næringskunder med maksimalt effektforbruk mellom 200 og 1000 kW ble det i 2015 anslått at 60–70 % av strømregningen var relatert til effektleddet [10].

2.5.2 Inflasjon

Inflasjon beskriver den generelle veksten i prisnivå over en periode, for eksempel ett år [46]. Verdien av penger følger forholdet mellom markedets samlede tilgang på penger og tilgjengelige varer og tjenester. En inflasjon på 2 % per år betyr at det som koster 100 kr i dag, vil om et år koste 102 kr.

2.5.3 Diskonteringsrente

Diskonteringsrente blir benyttet for å regne ut hva fremtidige penger er verdt i dag (nåverdi), og er et risikojustert avkastningskrav [4]. Dersom fremtiden er usikker, økes diskonteringsrenten for å redusere risiko ved vurdering av mulige investeringer. I HOMER benyttes en diskonteringsfaktor, f_d , til å beregne nåverdi av fremtidig inntekt/utgift og er gitt som

$$f_d = \frac{1}{(1+i)^N} \quad (2.2)$$

der N er antall år og i er reell diskonteringsrenten. Den årlige reelle diskonteringsrenten i kan regnes ut av formelen

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (2.3)$$

hvor f er forventet inflasjon og i' er nominell diskonteringsrente, renten for et eventuelt lån.

2.5.4 NPC - Net Present Cost

NPC er livssyklus-kostnader (life-cycle cost) tilknyttet et system / en komponent i nåverdi. Livssyklus-kostnaden inkluderer blant annet nåverdi av installasjon-, erstatning-, drift- og vedlikeholdskostnader, minus nåverdi av all fortjeneste i prosjektets levetid. NPC er gitt ved

$$NPC = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (2.4)$$

der R_t er kostnader minus inntekter per år, i er diskonteringsrenten og n er antall år.

2.5.5 LCOE - Levelized Cost of Energy

LCOE kan defineres som den gjennomsnittlige kostnaden per kWh nyttig elektrisitet produsert fra et system. LCOE kan regnes ut fra

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (2.5)$$

Hvor $C_{ann,tot}$ er total årskostnad (total annualized cost), årlig verdi av NPC, og E_{served} er total nyttig elektrisitet inkludert forbruk og salg til grid.

2.6 Pirbadet

For å få en mer helhetlig beskrivelse av Pirbadet gir dette delkapittelet et sammendrag av funn i prosjektoppgaven [1], se vedlegg F, i tillegg til noe ny informasjon innhentet i forbindelse med masteroppgaven.

Pirbadet er Norges største innendørs svømmeanlegg med over 400 000 besøkende i 2017, et samlet vannareal på 2 741,5 m² og vannvolum på ca. 3 500 m³. Svømmeanlegget består av ni innendørsbasseng, inkludert et bølgebasseng, i tillegg et utebasseng og tre boblebad. Andre fasiliteter inkluderer vannsklier, strømningskanal, stupetårn og tre badstuer. Videre har Pirbadet garderobes, treningscenter, velværeavdeling, kafé samt kontorer og andre driftsnødvendige områder. En oversikt over Pirbadets vanlige åpningstider er gitt i tabell 2.8.

Tabell 2.8: Oversikt over Pirbadets vanlige åpningstider [47].

Dag			Åpner	Stenger
Man	Ons	Fre	06:30	21:00
Tir	Tor		12:00	21:00
Lør	Søn		10:00	19:00

Byggtekniske endringer de siste årene

- I 2016 ble ventilasjonssystemet oppgradert. Fire nye ventilasjonsanlegg ble installert, hver med en luftstrøm på 25 000 m³ per time. Elektriske effektmålere med timesintervall ble installert på de nye anleggene.
- Våren 2017 ble det installert tre varmepumper for energigjenvinning fra gråvann. Energien brukes til å varme opp kaldt vann for å redusere bruk av fjernvarme til oppvarming av vann.
- Februar 2018 åpnet to nye undervisningsbasseng i et påbygg. I den forbindelse ble to nye ventilasjonsanlegg av samme merke som i 2016 installert, hver med en luftstrøm på 6 000 m³ per time.
- Et utendørsbasseng ble åpnet i starten av 2019. Bassenget er 2 m x 10 m og har et vannvolum på 20 m³.

Årlig energiforbruk

Pirbadet hadde i gjennomsnitt et totalt energiforbruk på 9,1 GWh per år i perioden 2008 til 2017. Gjennomsnittlig forbruk av elektrisk energi var i samme periode 2,9 GWh per år. Elektrisk energi ble målt av en hovedmåler, i tillegg til fire målere for de ovenfor nevnte ventilasjonsanleggene installert i 2016, alle med timesoppløsning. Basert på måledata fra 2017 utgjorde de målte ventilasjonsanleggene 21 % av totalt elektrisk forbruk. Fra gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time per ukedag i 2017 kommer det frem en tydelig daglig syklus i elektrisitetsforbruket, med høyt forbruk om dagen og lavt om natten.

Laster

- **Ventilasjonssystemet** består av 16 hoveddeler; 8 anlegg for tørr sone og 8 anlegg for våt sone. Da fokuset i prosjektoppgaven var på våt sone, ble disse 8 anleggene undersøkt nærmere. Disse inkluderer et eldre ventilasjonsanlegg, 4 anlegg installert i 2016, 2 anlegg installert i 2018 og et omsirkulerings-aggregat. Teoretisk maks effekt per anlegg ble funnet som henholdsvis 28 kW (sikring), 48,1 kVA (databled), 16,1 kVA (databled) og 3,5 kW (sikring).
- **Oppvarming av vann** blir i hovedsak gjennomført ved bruk av fjernvarme. Elektrisk energi blir benyttet til å drifte varmpumperne i de tre gråvanns-gjenvinnerne installert i 2017. Maks effekt er oppgitt til 10,8 kVA (databled).
- **Roterende utstyr** inkluderer blant annet en bølge-genererende maskin (93 kW, sikring), to strømnings-genererende maskiner (15 kW per, etikett på utstyr) og flere vannpumper (opp til 22 kW, etikett på utstyr). De strømnings-genererende maskinene og de større vannpumpene styres av frekvensomformere som måler effektforbruk uten å loggføre forbruket.
- **Badstuene** varmes av elektrisk energi og styres av en termostat i åpningstiden. Det er tre badstuer; en dampbadstue (2x12 kW, etikett på utstyr) og to tørrbadstuer varmet av hver sin elektriske ovn (22 kW per sikring).
- **Lysene** kan deles ut fra areal; våt sone og tørr sone. For våt sone ble 15,4 kW med effekt fra lys kartlagt sammenlignet med 12,3 kW i tørr sone. Tallene er basert på telling av lysarmaturer, men mye informasjon mangler. Det er kun installert LED-lys i påbygget og i garderobene per november 2018.
- **Kjøkkenet** var generelt dårlig merket, og det var derfor vanskelig å få oversikt. Den høyeste sikringen var 25 A som tilsier at den største enkeltlasten maksimalt kan ha en effekt på 5,8 kW (sikring).

Utvelgelse av måleinstrument og laster for effektmåling

Det ble satt opp en spesifikasjonsliste til måleinstrument basert på prosjektoppgavens litteraturgjennomgang. Måleinstrumentet ELITEpro XC™ Portable Power Data Logger oppfylte de ønskede kriteriene og ble valgt [3]. Av praktiske og økonomiske grunner måtte antall måleinstrument begrenses. Det ble derfor valgt ut noen laster som var ønskelig å loggføre effektførbbruk med minuttintervall. De ønskede lastene var:

- Ventilasjonsanlegg 36.02
- Bølge-genererende maskin
- Dampbadstuen og en av tørrbadstuene
- Strømnings-genererende maskin og større vannpumper

Kapittel 3

Oppgavens mål

Den overordnede målsettingen i denne oppgaven er å undersøke mulige tiltak for å redusere maksimalt elektrisk effektforbruk fra grid ved et idrettsanlegg, samt lønnsomheten av eventuelle tiltak. Dette er gjennomført ved innsamling og analyse av måledata samt simulering av alternative energikilder med datagrunnlag fra et svømmeanlegg; Pirbadet i Trondheim. Fokuset i denne rapporten er på elektrisk effektforbruk i våt sone (bassengrom), men forbruket fra tørr sone blir også sett på for å danne et mer komplett bilde av det totale forbruket. Fjernvarme-forbruk ble ikke undersøkt da det kun har indirekte påvirkning på det elektriske forbruket.

Delmål:

1. Kartlegge og analysere elektrisk effektforbruk fra utvalgte laster på Pirbadet
2. Modellere og simulere det elektriske forbruket ved Pirbadet, for både dagens situasjon og med tanke på installasjon av mulige alternative energikilder
3. Undersøke teknisk mulige effektreduserende tiltak, vurdere lønnsomheten av eventuelle tiltak, samt anbefale om tiltakene bør gjennomføres

Kapittel 4

Metode

Dette kapitlet beskriver innhenting av måledata og valg av modelleringsverktøy. I tillegg beskrives data og variabler som benyttes av modelleringsverktøyet til å undersøke muligheter for bruk av alternative energikilder.

4.1 Innhenting av måledata

I forbindelse med denne oppgaven ble seks ELITEpro XC™ Portable Power Data Logger installert for å måle effektforbruk av utvalgte laster ved Pirbadet [3]. Disse ble installert i begynnelsen av 2019 med god hjelp fra elektriker Erlend Lunde SørDAL. Det ble også installert loggføring av totalt effektforbruk. I tillegg ble måledata om Pirbadet innhentet fra Entro [2], som Pirbadet bruker for å loggføre energi- og vannmålinger.

Entro loggfører blant annet gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time, og en oversikt over elektriske laster som loggføres er gitt i tabell 4.1. I tillegg registreres fjernvarmeforbruk (totalt, ventilasjonsanlegg og tappevann), fjernkjølingsforbruk (totalt) og vannforbruk (totalt) med timesintervall. Økonomiske data relatert til energikostnader er også innhentet via Entro.

Tabell 4.1: Oversikt over laster med installert elektrisk effektmåler med timesoppløsning. Det maksimale registrerte effektforbruket i første kvartal 2019 er oppgitt for å vise størrelsesorden på lastens effektforbruk. Målingene loggføres via Entro.

Last	Maks registrert effekt [kW]
Hovedmåler elektrisitet	531,0
Ventilasjonsanlegg 36.01A	21,4
Ventilasjonsanlegg 36.01B	23,7
Ventilasjonsanlegg 36.02	25,4
Ventilasjonsanlegg 36.03	16,0

ELITEpro måleinstrumenter ble installert på strategiske laster som beskrevet i prosjektoppgaven [1]. Utvelgelsen ble gjort for å få representativ informasjon om effektforbruk fra ulike lastkategorier. Måleinstrumentet ELITEpro registrerer gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk, samt maksimum effekt og minimum effekt målt i et gitt tidsintervall. I hovedsak er måleintervall på ett minutt benyttet. Fire av målerne ble installert på lastene oppgitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Oversikt over laster med installert elektrisk effektmåler med minutttoppløsning (ekskludert vannpumper). Teoretisk maksimal effekt for lastene funnet i prosjektoppgave, er oppgitt for å vise størrelsesorden på lastens effektforbruk [1].

Last	Teoretisk maks effekt (kilde)
Ventilasjonsanlegg 36.02	48,1 kVA (datablad)
Bølge-genererende maskin	93 kW (sikring)
Tørrbadstue	22 kW (sikring)
Dampbadstue	2x12 kW (etikett)

De to siste målerne ble plassert for å måle forbruket fra utvalgte vannpumper. Det er totalt 25 vannpumper med frekvensomformer på Pirbadet, inkludert to strømnings-genererende maskiner, i tillegg til et ukjent antall mindre vannpumper (under 2,5 kW) uten frekvensomformere. De to målerne ble installert slik at de målte forbruk fra totalt seks vannpumper, se tabell 4.3. Stikkprøver av effektforbruket ble gjort på de resterende vannpumpene med frekvensomformer.

Tabell 4.3: Oversikt over vannpumper med installert elektrisk effektmåler med minutt oppløsning. Teoretisk maksimal effekt for lastene funnet i prosjektoppgave er oppgitt for å vise størrelsesorden på lastens effektforbruk [1].

Navn benyttet i oppgave	Pirbadets nummerering	Teoretisk maks effekt [kW] (kilde: etikett)
Vannpumpe A	MB 10	18,5
Vannpumpe B	MB 12	15,0
Vannpumpe C	MB 15	18,5
Vannpumpe D	MB 20	22,0
Vannpumpe E	MB 21	18,5
Vannpumpe F	MB 22	18,5

Loggføring av det totale effektforbruket ble gjort med høyere oppløsning enn tidsmålinger. Home Area Network-porten (HAN) på en Avanserte Måle- og Styringssystem måler (AMS) ble benyttet for å få tilgang til måleverdiene. Marius Lervik (medstudent, Kybernetikk og robotikk) laget et system for å lese måleverdier fra HAN-porten med høyere oppløsning, og han var behjelpelig med installasjon for uthenting og loggføring av verdier fra HAN-port. Det totale effektforbruket ble loggført hvert andre sekund, mens strøm og spenning ble loggført hvert femte sekund.

Pirbadet ble besøkt flere ganger for å få oversikt over anlegget, installere måleinstrumenter og hente ut måledata. Erlend Lunde Sjørdal, tekniker elektro ved Pirbadet, Kjetil Øvretveit, teknisk leder ved Pirbadet og Hallgeir Revhaug, tekniker maskin ved Pirbadet, har vært til stor hjelp med innhenting av informasjon om anlegget.

4.2 Analyse av måledata

Måledata innhentet via Entro og seks ELITEpro måleinstrument er benyttet for å undersøke hvordan det elektriske effektforbruket ved Pirbadet fordeler seg på utvalgte lastkategorier. Variasjon i det totale effektforbruket er basert på måledata fra 2018, mens måledata benyttet for å undersøke effektforbruk av utvalgte laster er fra første kvartal

2019. Analysene er utført i MATLAB og Microsoft Excel.

Variasjonen i det totale ukentlige effektforbruket er analysert ved bruk av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time per ukedag. For å analysere effektforbruket fra utvalgte laster ble dagen med høyest og lavest effektforbruk identifisert. Data fra disse dagene ble brukt for å vurdere døgnvariasjoner i effektforbruk.

4.3 Estimering av ikke-målt effektforbruk

For å få bedre oversikt over hvordan elektrisk effektforbruk fordeler seg på de forskjellige lastkategoriene, ble det gjort estimater av ulike lasters effektforbruk. For eksempel kan man med relativt stor sikkerhet anslå effektforbruket til flere av vannpumpene og ventilasjonsanleggene, selv om dette forbruket ikke er direkte målt. Følgende antagelser ble gjort for å estimere effektforbruk som ikke ble målt:

- **Ventilasjonsanlegg:** Ventilasjonsanleggene installert i 2018 er laget av samme produsent som de målte ventilasjonsanleggene, men hvert av de to nye anleggene har en fjerdedel av luftstrømmen. Det antas at de 2 mindre ventilasjonsanleggene har et lignende forbruksmønster som de målte anleggene. Et estimat av forbruk for hvert av de minste ventilasjonsanleggene ble beregnet som 25 % av gjennomsnittsförbruket for de målte anleggene.
- **Vannpumper:** Vannpumpe A (MB 10), C (MB 15) og D (MB 20) er alle en del av hvert sitt par, med henholdsvis MB 11, MB 14 og MB 19. Pumpene i disse parene skal teoretisk ha et tilnærmet likt forbruk, det ble også gjennomført stikkprøver for å vurdere dette. Vannpumpe B (MB 12) er også en del av et par, men den andre delen, MB 13, har dobbelt effektforbruk sammenlignet med B, men det antas likt forbruksmønster. Effektforbruket til MB 11, MB 14 og MB 19 estimeres som likt de målte verdiene for henholdsvis vannpumpe A, C og D. Effektforbruket til MB 13 estimeres som det dobbelte av det målte forbruket fra pumpe B. De resterende vannpumpene med frekvensomformer antas å ha et jevnt to-trinns forbruk basert på stikkprøve-målinger, størst når Pirbadet er åpent

og lavere ellers.

- **Tørrbadstuer:** Det er to tørrbadstuer på Pirbadet. Det ble installert effektmåler på den ene tørrbadstuen. Det kan antas at den andre tørrbadstuen har en lik effektprofil.
- **Fjernkjøling:** Fjernkjøling er benyttet blant annet for kjøling av et datarom. Det kan antas at kjølingen er kontinuerlig og har et jevnt effektforbruk hele døgnet. Det ble gjennomført en stikkprøve-måling av fjernkjølingspumpen under arbeidet med prosjektoppgaven, og effektforbruket ble målt til 11 kW.
- **Lyskilder:** Effektforbruk fra lyskilder ble estimert til minimum 25 kW i prosjektoppgaven. Det antas at alle lyskilder er tent en halvtime før og etter åpningstid.

4.4 Modellering og simulering

4.4.1 Valg av modelleringsverktøy

Modelleringsverktøy ble valgt med utgangspunkt i verktøyene undersøkt i "A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables" [5]. Verktøyets evne til å se på et bygg / lokalt system med tidsintervall på ett minutt, en tidshorisont på minst 25 år, samt å beregne fremtidige kostnader ved bruk av alternative energikilder ble vektlagt. Tilgjengelighet, kostnad og brukergrensesnitt ble også tatt hensyn til ved valg av modelleringsverktøy. HOMER Pro [4] oppfylte kravene og ble valgt som modelleringsverktøy.

HOMER er et modelleringsverktøy som kan benyttes for å planlegge utbygning av mikrogrid. Det tar hensyn til både det tekniske og økonomiske aspektet ved et energisystem. En modell av et eksisterende bygg kan lages i HOMER ved å bruke tidligere innhentede måledata om byggets elektrisitetsforbruk. Kombinert med blant annet prisinformasjon kan innvirkningen av eventuelle endringer i energisystemet undersøkes.

4.4.2 Input data

Modelleringen i HOMER er basert på data og variabler fra Pirbadet. Lastdata fra elektrisk hovedmåler ble brukt for å simulere elektrisk forbruk. Målinger av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time er hentet fra Entro. I tillegg ble nødvendige værdata hentet fra NASA Surface meteorology and Solar Energy via en funksjon i HOMER. En oversikt over data benyttet til alle modelleringene i HOMER, er gitt i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Oversikt over data benyttet til modellering i HOMER.

Data	Kilde
Lastprofil	Entro, Elektrisk hovedmåler, timesoppløsning
Energipris	Entro, Energipriser fra 2018, månedsoppløsning
Effekttariff	TrønderEnergi Nett, 200-500 kW [48]
Værdata	NASA Surface meteorology and Solar Energy

Data for total energikostnad ble innhentet fra Entro og brukt i modellene, se tabell 4.5 for oversikt over energikostnad per måned. Total energikostnad inkluderer spotpris, forbruksandelen av nettleie og forbruksavgift. Modellen tar ikke hensyn til eventuell inntjening fra overskuddsproduksjon ved mulig bruk av alternative energikilder.

Effekttariffen er avhengig av måned og maksimum effektforbruk, se tabell 4.6. Prisene er hentet fra hjemmesiden til TrønderEnergi Nett som er netteieren Pirbadet er tilknyttet [48]. Det er kun mulig å oppgi ett tall for effekttariff per måned i HOMER. Pirbadet har vanligvis et maksimalt effektforbruk rundt 500 kW per måned, kostnadstariffen for effektforbruk mellom 200 kW og 500 kW ble derfor benyttet. Faste kostnader er ikke medberegnet i modellen og utgjør 8 800 kr per år.

Enkelte makroøkonomiske variabler er påkrevd for å lage en modell i HOMER, deriblant forventet inflasjon og nominell diskonteringsrente. Forventet inflasjon er satt til 2,2 % basert på et gjennomsnitt av inflasjonsraten i Norge siden 2006 [49]. Diskonteringsrente er et tall som settes av investor og uttrykker hans vilje til investeringsrisiko. I disse simuleringene er diskonteringsrente satt til 5 %. På grunn av usikkerhet i verdiene for inflasjon og nominell diskonteringsrente vil

Tabell 4.5: Gjennomsnittlig energikostnad per kWh for Pirbadet i 2018 basert på data fra Entro.

Måned	Kostnad per kWh i 2018 [kr/kWh]
Januar	0,6268
Februar	0,4058
Mars	0,5398
April	0,5278
Mai	0,4918
Juni	0,4958
Juli	0,5128
August	0,5628
September	0,5918
Oktober	0,5148
November	0,5358
Desember	0,5668
Gjennomsnitt	0,5311

Tabell 4.6: Effekttariff fra TrønderEnergi Nett basert på nettleiepriser for bedrifter med lavspenning [48].

Måned	Kostnad effekt (0-200 kW) [kr/kW/mnd]	Kostnad effekt (200-500 kW) [kr/kW/mnd]	Kostnad effekt (over 500 kW) [kr/kW/mnd]
Vinter Nov - Feb	60	53	47
Sommer Mar - Okt	45	40	35

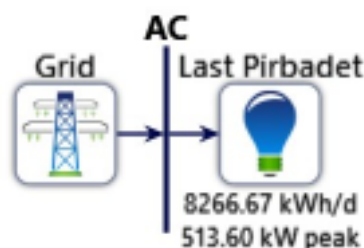
simuleringene også gjennomføres med inflasjonsverdiene 1,1 % og 3,3 % og diskonteringsrentene 2,5 % og 7,5 %, se tabell 4.7.

Tabell 4.7: Oversikt over økonomiske variabler benyttet til modellering i HOMER.

Variabler	Lav	Forventet	Øvre
Inflasjon	1,1 %	2,2 %	3,3 %
Diskonteringsrente	2,5 %	5,0 %	7,5 %

4.4.3 Grunnmodell

En grunnmodell av dagens situasjon ved Pirbadet ble simulert for å kunne sammenligne den nåværende situasjonen med eventuelle alternative energikilder. Skjematisk tegning av modellen er vist i figur 4.1. Parametrene beskrevet i delkapittel 4.4.2 er benyttet i modellen.



Figur 4.1: Skjematisk tegning av grunnmodell laget i HOMER. Modellen beskriver dagens situasjon ved Pirbadet basert på lastdata fra 2018.

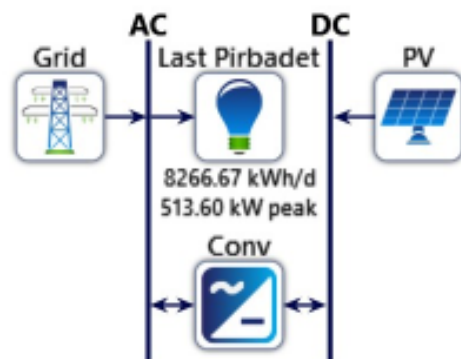
4.4.4 Modell med solcellepanel (Photovoltaic system - PV)

Bruk av solcellepanel (PV) ble undersøkt som en alternativ energikilde. I en rapport fra 2015 ble investeringskostnad av solcellepanel i 2018 estimert til 15 000 kr per kW for næringsbygg [50]. Det antas i modellen at investeringskostnaden er for hele systemet, inkludert PV-modulene, omformer og installasjon/ oppkobling. På grunn av forventet prisreduksjon av PV-moduler er en erstatningskostnad på 10 000 kr per kW benyttet. Drifts- og vedlikeholdskostnader for PV-anlegg i et næringsbygg er

estimert til 1,5 % av investeringskostnadene [50].

PV-systemet er modellert som en “generic flat plate PV” uten sporings-system i HOMER. En oversikt over variablene som inngår i modellen er presentert i tabell 4.8. Albedo (ground reflectance) er et mål på refleksjon fra en overflate og er i modellen antatt lik 20 %. En skaleringsfaktor på 85 % er benyttet for å simulere produksjon under reelle driftsforhold sammenlignet med forholdene PV-modulene ble testet under (derating factor). Produksjonsforskjeller grunnet temperaturendringer er ikke tatt hensyn til, og hellningsgrad er satt til “default”, som vil si at hellningsgrad av panelene blir bestemt ut i fra lokal breddegrad.

En omformer (vekselretter) er benyttet for å omdanne likestrøm fra PV til vekselstrøm. Omformerer er modellert som en “generic lagre, free converter” da kostnader relatert til omformerer er antatt inkludert i installasjonskostnadene til PV-modulene. Effektiviteten til omformer er satt til 95 %. Det antas at omformerer har en kapasitet som er mye større enn PV-produksjonen, slik at omformer ikke vil være en begrensende faktor for produksjon. Et skjematisk diagram av modellen er vist i figur 4.2.



Figur 4.2: Skjematisk tegning av modell med PV laget i HOMER.

Pirbadet har et takareal på rundt 8 000 m². Fra litteraturgjennomgangen kom det frem at produksjonskapasitet er proporsjonal med overflateareal av solcellene, og at panelene har en kapasitet rundt 150 W per m² [28]. Det antas at inntil 50 % av takarealet kan dekkes med PV da det er viktig med lett tilkomst for vedlikehold. Dersom 50 % av taket dekkes av

PV, vil samlet kapasitet være rundt 600 kW.

Tabell 4.8: Oversikt over moduler og variabler benyttet til PV modellering i HOMER. Kostnader er oppgitt per kW PV kapasitet.

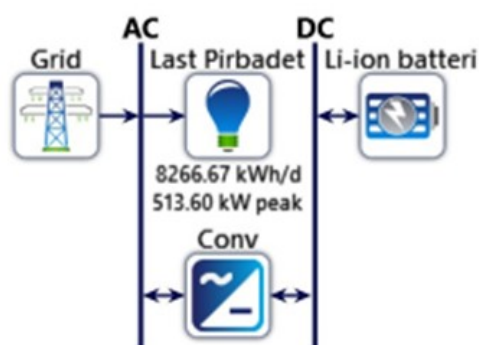
Modul	
Solar PV	Generic flat plate PV
Omformer	Generic lagre, free converter
Konstanter	
Installasjonskostnad PV	15 000 kr
Erstatningskostnad PV	10 000 kr
Drift og vedlikehold PV	225 kr
Derating factor	85 %
Hellningsgrad	default
Ground reflectance	20 %
Antatt levetid PV	25 år
Omformer effektivitet	95 %
Prosjekt levetid	25 år
Maksimal PV kapasitet	600 kW

4.4.5 Modell med batterilagring

En modell med batterilagring er benyttet for å se på kostnader relatert til reduksjon av effekttopper ved bruk av batterier. Et skjematisk diagram av systemet er vist i figur 4.3 og en oversikt over variablene som inngår i modellen er presentert i tabell 4.9. Den elektriske lasten og omformeren er uendret fra tidligere modelleringer. Ved å begrense maksimal effekt som kan leveres fra grid, kalkulerer HOMER antall batteri som kreves for å dekke lastforbruket. Batteri lades opp i perioder med lavt effektforbruk og den lagrete energien brukes når mer effekt kreves mer enn hva grid kan levere.

Modelleringen av batteriet i HOMER har tatt utgangspunkt i batteriet LG Chem RESU [6.4kWh] [51]. Batteri koster rundt 42 500 kr per stykk per april 2019. Forventet levetid for batteriet er 10 år. Det forventes at prisen for litium-ionbatteri vil bli omtrent halvert de neste 10 årene,

og erstatningskostnad er i modellen er derfor satt til 25 000 kr for nye batterier [52]. For små- og mediumskala litium-ionbatterilagring er drift- og vedlikeholdskostnader anslått til 2 500 kr hvert 5 år for hele systemet [52]. I modellen i HOMER er ikke drift- og vedlikeholdskostnader tatt med da de er lave sammenlignet med investeringskostnadene. En begrensning på 90 % utladning er satt (Depth of Discharge = 90 %).



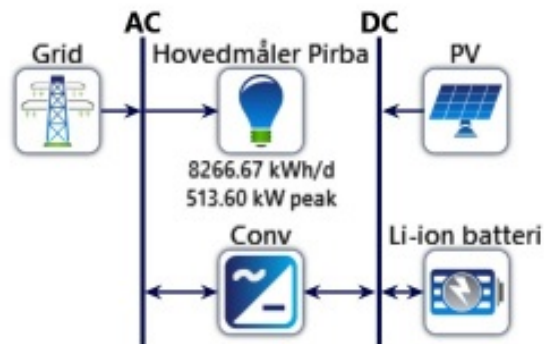
Figur 4.3: Skjematisk diagram av modell med batterilagring laget i HOMER.

Tabell 4.9: Oversikt over moduler og variabler benyttet til batteri modellering i HOMER. Kostnader er oppgitt per batteri.

Modul	
Batteri	LG Chem RESU [6.4kWh]
Omformer	Generic lagre, free converter
Konstanter	
Installasjonskostnad batteri	42 500 kr
Erstatningskostnad batteri	25 000 kr
Drift og vedlikehold batteri	0 kr
Depth of Discharge	90 %
Antatt levetid batteri	10 år
Omformer effektivitet	95 %
Prosjekt levetid	25 år

4.4.6 Modell med både PV og batterilagring

En modell med solcellepanel (PV) og batterilagring ble undersøkt for å se hvordan kombinasjonen av produksjon og lagring kan påvirke reduksjon av effekttopper. Et skjematisk diagram av systemet er vist i figur 4.4. Lasten og omformerer er uendret fra tidligere modelleringer. PV modulen er den samme som er benyttet i “Modell med solcellepanel”, seksjon 4.4.4, og batterimodellen er lik modulen benyttet i “Modell med batterilagring”, seksjon 4.4.5.



Figur 4.4: Skjematisk tegning av modell med både PV og batterilagring laget i HOMER.

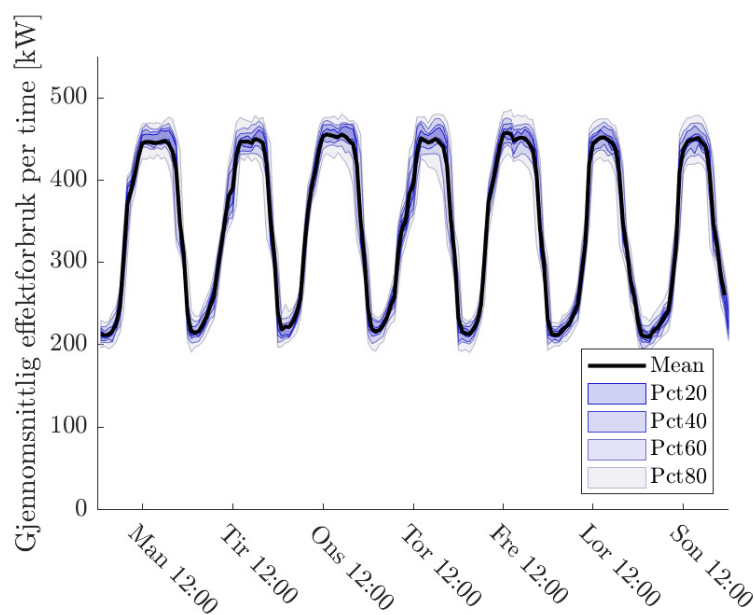
Kapittel 5

Resultater

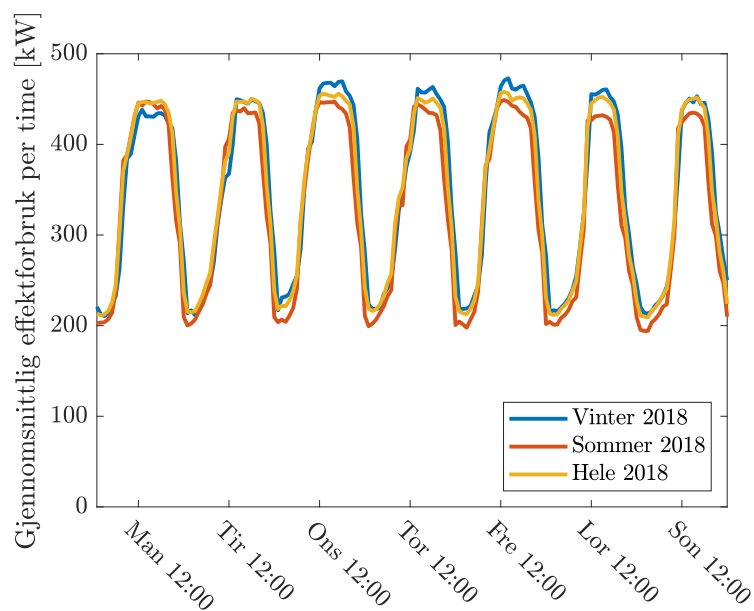
5.1 Variasjon i totalt effektforbruk

Elektrisk effektforbruk ved Pirbadet per time per ukedag er fremstilt i figur 5.1 og 5.2. Effektforbruket varierer etter tidspunkt på døgnet, med et gjennomsnittlig effektforbruk på 223 kW fra midnatt til kl. 6, og et gjennomsnittlig effektforbruk på 443 kW mellom kl. 12 og kl. 19. Det gjennomsnittlige effektforbruket er høyest mellom kl. 12 og kl. 13 på fredager med 458 kW. Ukedagen med lavest gjennomsnittlige effekttopp er mandager mellom kl. 17 og 18 med 448 kW. Variasjoner mellom vinter og sommer er vist i figur 5.2. I gjennomsnitt var effektforbruket om vinteren 18 kW høyere enn om sommeren.

Loggføring av det totale effektforbruket med høy oppløsning ved lesning fra HAN-port på AMS måler viste et totalt effektforbruk mellom 300 W og 1100 W. Tilsvarende verdier for gjennomsnittlig timesmålt effektforbruk fra Entro var fra 230 kW til 530 kW.



Figur 5.1: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time per uke-dag i 2018 for det totale elektriske effektforbruket. Diagrammet viser gjennomsnittsverdier, samt 20-, 40-, 60- og 80-persentilene.

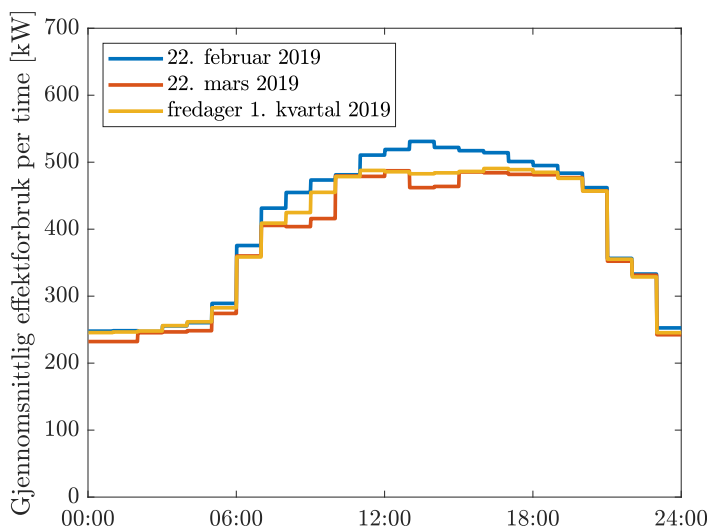


Figur 5.2: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time per ukedag for det totale elektriske effektforbruket for vinter 2018 (uke 1-8 og uke 49-52), sommer 2018 (uke 22-34) og hele året.

5.2 Effektforbruk av utvalgte laster

I dette delkapittelet presenteres effektforbruket av utvalgte laster ved Pirbadet, med særlig fokus på dagen med den høyeste registrerte effektforbrukstimen (fredag 22. februar). Tilsvarende figurer for fredagen med lavest registrert maksimal effektforbrukstime er vist i vedlegg A (fredag 22. mars).

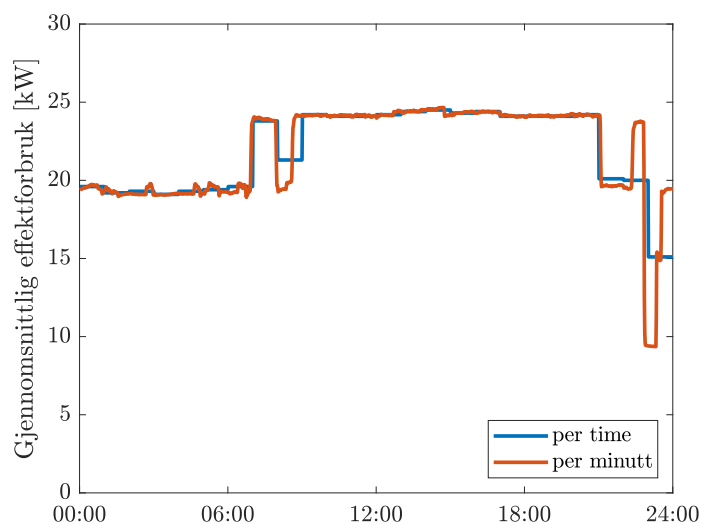
Den høyeste registrerte effektforbrukstimen i første kvartal 2019 ble registrert fredag 22. februar. Mellom klokken 13 og 14 ble det registrert et gjennomsnittlig effektforbruk på 531 kW. De fem timene mellom kl. 12 og kl. 17 på fredag 22. februar var alle blant de 15 høyeste effektforbrukstimerne i første kvartal 2019. Fredagen med laveste maksimale effektforbrukstimer i første kvartal 2019 var 22. mars. Maksimalt effektforbruk var da 487,2 kW i timen mellom klokken 12 og 13. Det totale elektriske effektforbruket per time fredag 22. februar, fredag 22. mars og et gjennomsnitt av alle fredager i første kvartal 2019 er vist i figur 5.3. Pirbadet er åpent fra 06:30 til 21:00 på fredager.



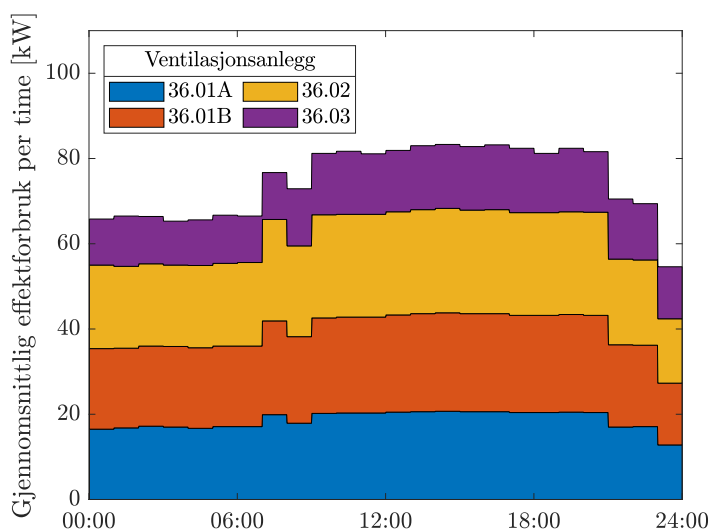
Figur 5.3: Totalt gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time fredag 22. februar, fredag 22. mars, og et gjennomsnitt av alle fredager i første kvartal 2019.

Ventilasjonsanlegg

Gjennomsnittlig effektforbruk for ventilasjonsanlegg 36.02 målt med minutt- og timesintervall fredag 22. februar er vist i figur 5.4. Maksimal gjennomsnittlig effekt målt med timesintervall var 24,5 kW, målt med minuttintervall var maksimal gjennomsnittlig effekt 24,7 kW. Effektforbruk per time for de fire ventilasjonsanleggene med effektmåler er vist i figur 5.5. I tidsrommet med høyeste totale effekttopp for Pirbadet (kl. 13 - 14) sto de målte ventilasjonsanleggene for 15,6 % (83,0 kW) av det totale forbruket. Ventilasjonsanlegg 36.02 sto for 4,6 % (24,4 kW) av det totale forbruket.



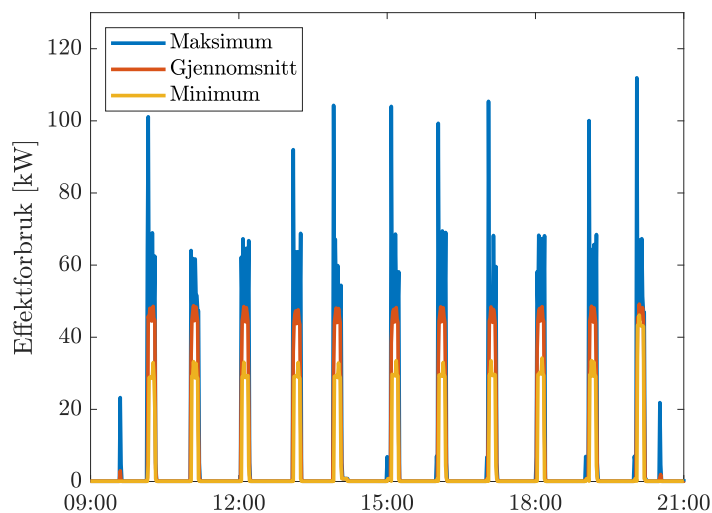
Figur 5.4: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt og per time for ventilasjonsanlegg 36.02 fredag 22. februar 2019.



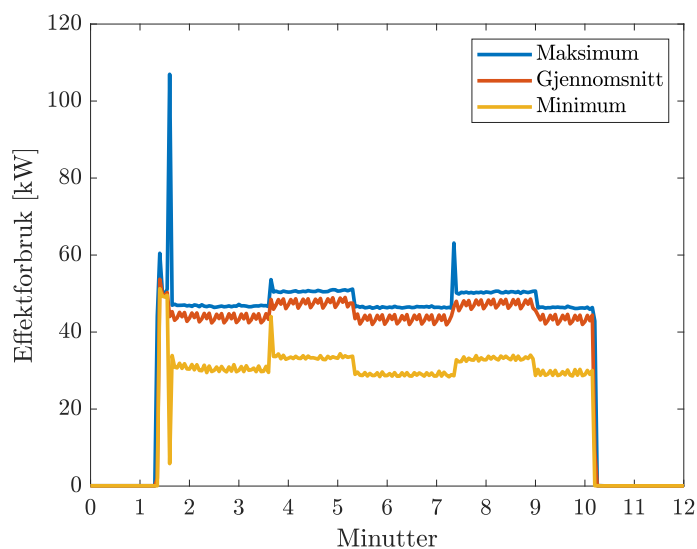
Figur 5.5: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time fredag 22. februar 2019 fra de fire ventilasjonsanleggene med effektmåler.

Bølge-genererende maskin

Den bølge-genererende maskinen er i bruk fem til ti minutter hver hele time mellom klokken 10 og 21. Figur 5.6 viser maksimum, minimum og gjennomsnittlig effektforbruk målt fredag 22. februar, målinger registrert hvert minutt. Figur 5.7 viser variasjoner i maksimum, minimum og gjennomsnittlig effekt gjennom en 10-minutters kjøring av bølgemaskinen, her med målinger hvert 3 sekund. Gjennomsnittlig effektforbruk er i underkant av 50 kW, mens maksimal registrert effekt fredag 22. februar er 111,9 kW. Det gjennomsnittlige effektforbruket per time øker med rundt 7 kW ved en kjøring av bølgemaskinen. I tidsrommet med høyeste totale effekttopp for Pirbadet (kl. 13 - 14) sto den bølge-genererende maskinen for 2,1 % (11,3 kW) av det totale forbruket.



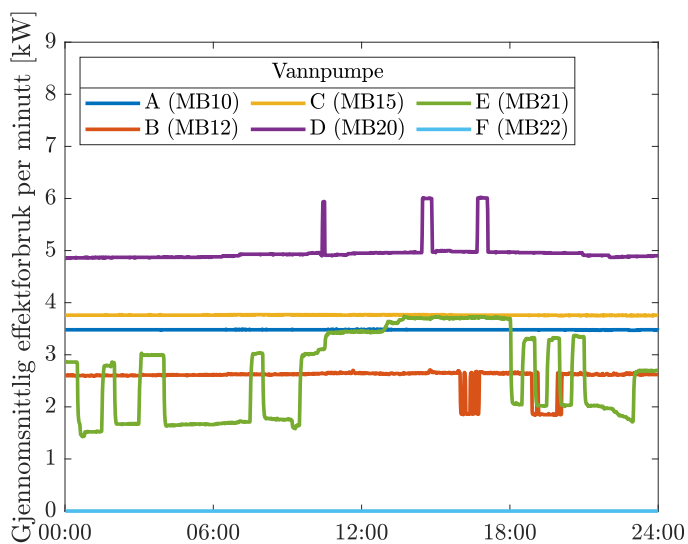
Figur 5.6: Maksimum, minimum og gjennomsnittlig effektforbruk for bølgemaskinen i tidsrommet 10-21 fredag 22. februar 2019. Målinger er registrert hvert minutt.



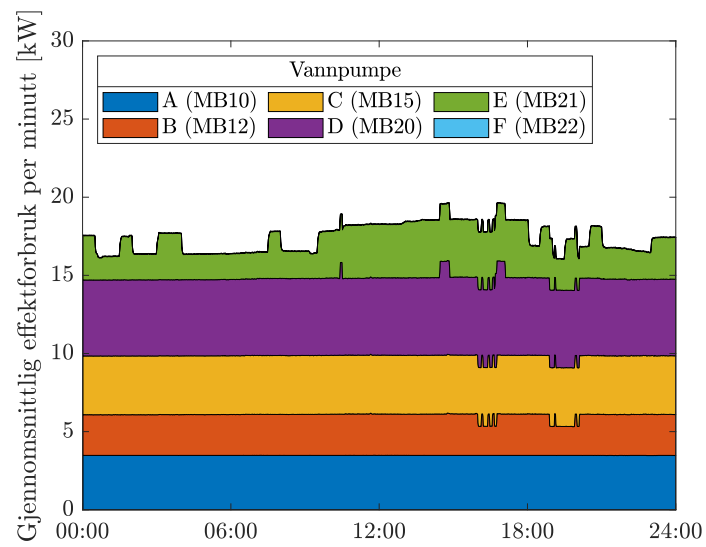
Figur 5.7: Maksimum, minimum og gjennomsnittlig effektforbruk for en periode hvor bølgemaskinen er i drift. Gjennomsnittlig effektforbruk er registrert for perioder på 3 sekunder.

Vannpumper

Effektforbruk fredag 22. februar fra de seks vannpumpene med installert måleinstrument er vist i figur 5.8. Målingene er vist som et stablet linjediagram i figur 5.9. I tidsrommet med høyeste totale effekttopp for Pirbadet (kl. 13 - 14) sto de målte vannpumpene for 3,5 % (18,5 kW) av det totale forbruket. Ved stikkprøver av samtlige 25 vannpumper med frekvensomformer, ble effektforbruket målt til 65,1 kW i Pirbadets åpningstid. Dette ville tilsvart 12,3 % av effekttoppen 22. februar, se tabell 5.1.



Figur 5.8: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt fra de målte vannpumpene fredag 22. februar 2019.



Figur 5.9: Stabilt linjediagram av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt fra de målte vannpumpene fredag 22. februar 2019.

Tabell 5.1: Resultater fra stikkprøver av effektforbruk for vannpumpene med frekvensomformer.

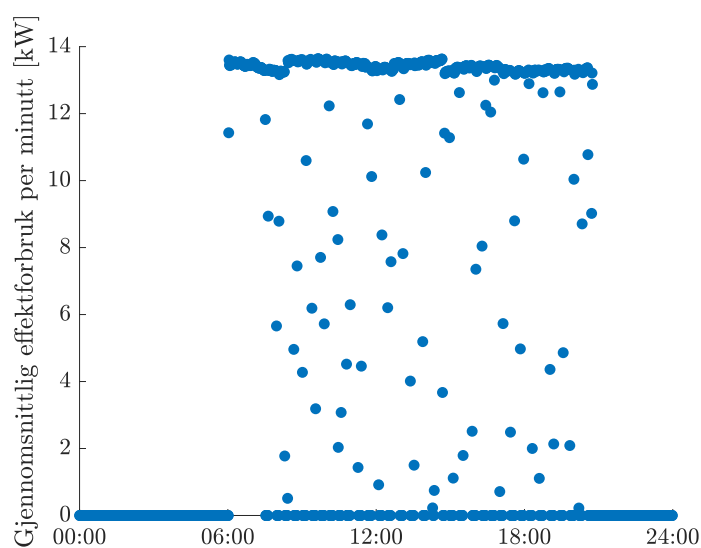
* Stikkprøver gjennomført mens Pirbadet var åpent

** Stikkprøver gjennomført mens Pirbadet var stengt

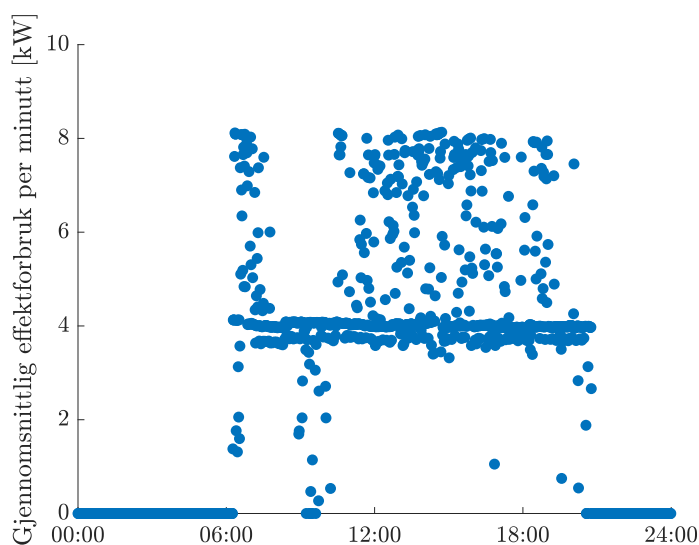
Pirbadets nummerering	Stikkprøve effekt [kW]		Målt med ELITEpro	Kommentar
	*	**		
MB 10	3,5	3,5	X	Antas kjøres likt
MB 11	3,7	3,7		
MB 12	2,0	1,9	X	MB 13 antas dobbelt MB 12
MB 13	4,1	4,1		
MB 14	3,5	3,5		Antas kjøres likt
MB 15	3,8	3,8	X	
MB 16				Ikke funnet
MB 17	0,6	1,2		Kjøres vekselsvis
MB 18	0,0	0,0		
MB 19	5,4	5,3		Antas kjøres likt
MB 20	5,4	5,3	X	
MB 21	2,6	1,6	X	Kjøres vekselsvis
MB 22	0,0	0,0	X	
MB 23	0,9	0,4		
MB 24	2,9	2,7		
MB 25	0,0	0,0		
MB 26	6,6	0,0		Strømnings- genererende maskin Antas kjøres likt
MB 27	6,5	0,0		
MB 28	1,1	0,0		
AH-W139	5,0	0,0		
F01:A	2,5	2,5		Antas kjøres likt
F02:A	2,6	2,6		
F010:A	0,9	0,9		Antas kjøres likt
F011:A	0,8	0,8		
Ny umerket	0,7	0,7		
Totalt	65,1	44,5		

Badstue

Det er tre badstuer på Pirbadet; to tørrbadstuer og en dampbadstue. Figur 5.10 viser effektforbruket til oppvarming av en tørrbadstue og figur 5.11 viser effektforbruket for oppvarming av dampbadstuen. I tidsrommet med høyeste totale effekttopp for Pirbadet (kl. 13 - 14) sto den målte tørrbadstuen for 1,6 % (8,6 kW) og dampbadstuen for 1,0 % (5,4 kW) av det totale forbruket.



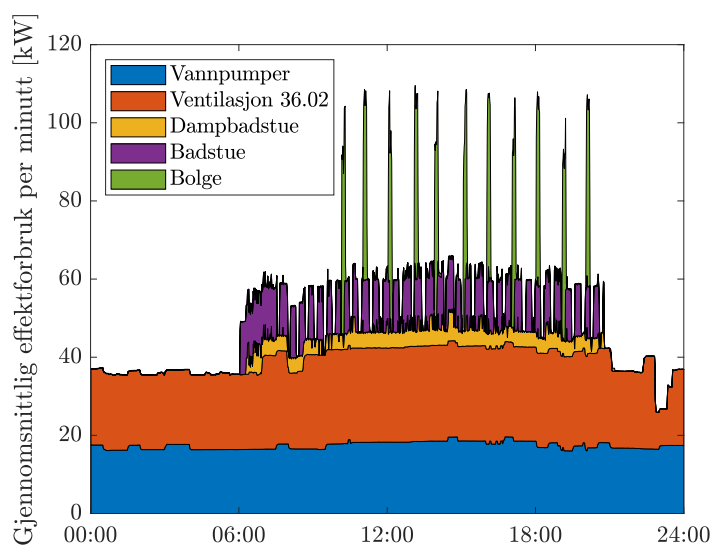
Figur 5.10: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt for en tørrbadstue fredag 22. februar 2019.



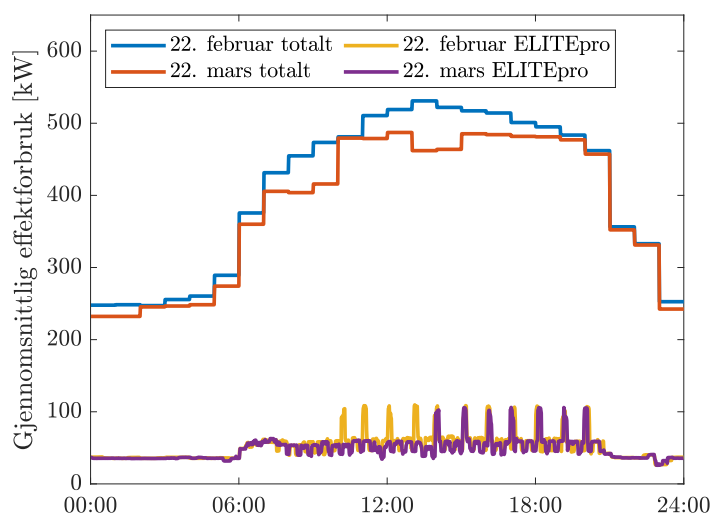
Figur 5.11: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt for dampbadstuen fredag 22. februar 2019.

De målte lastenes bidrag til det totale elektriske effektforbruket

Gjennomsnittlige effektmålinger fra de målte lastene er vist i et stablet linjediagram i figur 5.12. Det totale registrerte forbruket per time samt minuttmålinger fra ELITEpro målerne er vist i figur 5.13 for både dagen med den høyeste og den laveste registrerte maksimale effektforbrukstimen. I tidsrommet med høyeste totale effekttopp for Pirbadet (kl. 13 - 14 fredag 22. februar) var summen av de målte lastene ved bruk av ELITEpro målere 12,8 % (68,2 kW) av det totale forbruket. Tilsvarende var det målte forbruket 11,0 % (53,6 kW) av den maksimale effektforbrukstimen (487,2 kW) på dagen med den laveste registrerte maksimale effektforbrukstimen (kl. 12 - 13, fredag 22. mars). Hvor stor andel de forskjellige lastkategoriene utgjør av effekttoppen, er oppsummert i tabell 5.2 for både 22. februar og 22. mars.



Figur 5.12: Stablet linjediagram av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk fra de installerte effektmålerne med minutttoppløsning fredag 22. februar 2019.



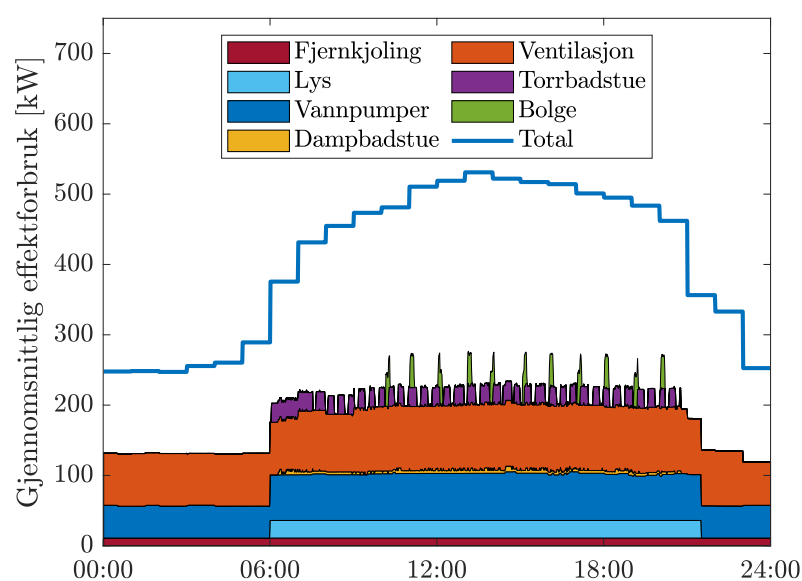
Figur 5.13: Totalt gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time og samlet gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt fra laster målt med ELITEpro, fredag 22. februar 2019 og fredag 22. mars 2019.

Tabell 5.2: Forskjellige lastkategoriers andel av effekttopp.

Lastkategori	22. februar kl. 13 - 14		22. mars kl. 12 - 13	
	kW	%	kW	%
Ventilasjonsanlegg 36.01A	20,6	3,9	20,2	4,1
Ventilasjonsanlegg 36.01B	23,0	4,3	21,7	4,4
Ventilasjonsanlegg 36.02	24,4	4,6	23,9	4,9
Ventilasjonsanlegg 36.03	15,0	2,8	14,4	3,0
Bølgemaskinen	11,3	2,1	0,0	0,0
Vannpumpene	18,5	3,5	17,1	3,5
Tørrbadstue	8,6	1,6	9,1	1,9
Dampbadstuen	5,4	1,0	3,4	0,7
Totalt (ELITEpro)	68,2	12,8	53,6	11,0
Totalt (ELITEpro + timesmålte ventilasjonsanlegg)	126,8	23,9	110,0	22,6
Totalt	531,0	100,0	487,2	100,0

5.3 Estimering av ikke-målt effektforbruk

I tillegg til det målte effektforbruket, ble deler av effektforbruket estimert basert på antagelser beskrevet i delkapittel 4.3. Figur 5.14 viser det målte totale effektforbruket per time samt et stablet linjediagram av de forskjellige lastkategoriene sitt estimerte bidrag til effektforbruket 22. februar 2019. Med disse antagelsene er 43,4 % av effekttoppen kartlagt, fordeling av effekttoppen på de ulike lastene er vist i tabell 5.3.



Figur 5.14: Stablet linjediagram av forskjellige lastkategoriers effektforbruk basert på målinger samt antagelsene beskrevet i delkapittel 4.3 for fredag 22. februar. Det totale forbruket og ventilasjonsanleggene sitt forbruk er estimert per time, de andre kategoriene er per minutt.

Tabell 5.3: Forskjellige lastkategoriers andel av effekttopp basert på målinger, samt antagelsene beskrevet i delkapittel 4.3

Lastkategori	22. februar kl. 13 - 14		Målt
	kW	%	
Ventilasjonsanlegg 36.01A	20,6	3,9	X
Ventilasjonsanlegg 36.01B	23,0	4,3	X
Ventilasjonsanlegg 36.02	24,4	4,6	X
Ventilasjonsanlegg 36.03	15,0	2,8	X
Ventilasjonsanlegg installert i 2018	10,4	2,0	
Bølgemaskinen	11,3	2,1	X
Vannpumpene (målte)	18,5	3,5	X
Vannpumpene (målte + estimat)	67,1	12,6	
Tørrbadstue	8,6	1,6	X
Tørrbadstuene (2 stk.)	17,2	3,2	
Dampbadstuen	5,4	1,0	X
Fjernkjøling	11,0	2,1	
Lys	25,0	4,7	
Totalt (ELITEpro)	68,2	12,8	X
Totalt (ELITEpro + timesmålte ventilasjonsanlegg)	126,8	23,9	X
Totalt (ELITEpro + timesmålte ventilasjonsanlegg + estimat)	230,4	43,4	
Totalt	531,0	100,0	X

5.4 Simulering

Dette delkapittelet presenterer resultatene fra simuleringer av modellene beskrevet i delkapittel 4.4. Forventet inflasjon på 2,2 % og diskonteringsrente på 5 % er benyttet med mindre annet er spesifisert. Simuleringsrapporter fra HOMER er lagt ved i vedlegg B for grunnmodell, vedlegg C for modell med PV, vedlegg D for modell med batterilagring og vedlegg E for modell med både PV og batterilagring.

5.4.1 Grunnmodell

Grunnmodellen er en modellering av dagens situasjon ved Pirbadet basert på forbruk og priser fra 2018. Modellen ga en “levelized cost of energy” (LCOE) på 0,619 kr per kWh, der LCOE er den gjennomsnittlige kostnaden per nyttig kWh elektrisitet. Ut fra modellen ble årlig driftskostnad beregnet til 1,87 millioner kr, se tabell 5.4. Alle driftskostnader vil i denne simuleringen gå til å betale effekt- og energikostnader, henholdsvis 0,26 millioner kr (14 %) og 1,61 millioner kr (86 %). “Net present cost” (NPC) er livssyklus-kostnader i nåverdi og varierer fra 23,1 millioner kr til 51,7 millioner kr med en forventet verdi på 33,5 millioner kr avhengig av inflasjon og diskonteringsrente. En simuleringsrapport for grunnmodellen med 2,2 % inflasjonsrate og 5 % diskonteringsrente finnes i vedlegg B.

Tabell 5.4: Utdrag av resultater fra simulering av grunnmodell.

Variabler	Minimum NPC	Forventet NPC	Maksimum NPC
Diskonteringsrente [%]	7,5	5,0	2,5
Inflasjon [%]	1,1	2,2	3,3
LCOE [kr/kWh]	0,619	0,619	0,619
Driftskostnad [kr/år]	1,87 M	1,87 M	1,87 M
NPC [kr]	23,1 M	33,5 M	51,7 M

5.4.2 Modell med solcellepanel (Photovoltaic system - PV)

Installasjon av PV fører til reduserte driftskostnader, men betydelige investeringskostnader, samt økt LCOE og NPC, se tabell 5.5. Installasjon av 600 kW PV vil utgjøre en årlig produksjon på rundt 545 MWh, 17,8 % av Pirbadets elektriske energibehov, se vedlegg C. Dersom 600 kW installeres blir NPC 6,5 millioner kr høyere enn dagens situasjon. Driftskostnader vil i dette scenariet være delt mellom drift- og vedlikeholdsutgifter for PV, samt effekt- og energikostnader for elektrisitet fra strømmnett. Det er en liten reduksjon i effektkostnader sammenlignet med grunnmodellen, omkring 7 000 kr per år (2,7 %). Fra simuleringen er det ingen kombinasjoner av inflasjon og diskonteringsrente som gir en lavere NPC til et system med PV.

Tabell 5.5: Utdrag av resultater fra simuleringer med mulige installasjoner av PV kapasitet.

PV kapasitet [kW]	LCOE [kr/kWh]	NPC [kr]	Investerings- kostnad [kr]	Drifts- kostnad [kr/år]
0	0,619	33,5 M	0 M	1,87 M
150	0,648	35,0 M	2,25 M	1,83 M
300	0,678	36,7 M	4,50 M	1,79 M
450	0,708	38,3 M	6,75 M	1,76 M
600	0,737	40,0 M	9,00 M	1,73 M

5.4.3 Modell med batterilagring

Batterier kan redusere nødvendig effekt levert fra grid. Resultater av simuleringer viser at det antall batteri som kreves for å sikre strømfor- syning, øker eksponensielt ved reduksjon i effekt fra grid, dette er vist i tabell 5.6. En effektbegrensning fra grid på 360 kW er på grensen for hva som er teknisk gjennomførbart ved bruk av batterier.

Batteri er ikke økonomisk lønnsomt i noen av de gjennomførte simuleringene sammenlignet med dagens situasjon. Fra simuleringen med 450 kW begrensning fra grid (simuleringsrapport i vedlegg D) er effektkostnader

reduisert med 23 000 kr per år (8,8 %) sammenlignet med grunnmodellen (vedlegg B). Simuleringen estimerer at batteriene vil stå for 0,9 % av Pirbadets totale energiforbruk.

Tabell 5.6: Utdrag av resultater fra simulering av modell med batterilagring med begrensninger på maksimalt effektuttak fra grid.

Maks fra grid [kW]	Batteri [antall]	LCOE [kr/kWh]	NPC [kr]	Invest. kost. [kr]	Drifts-kostnad [kr/år]
ubegrenset	0	0,619	33,5 M	0 M	1,87 M
500	11	0,633	34,2 M	0,47 M	1,88 M
475	26	0,649	35,1 M	1,11 M	1,90 M
450	59	0,688	37,2 M	2,51 M	1,94 M
425	114	0,743	40,9 M	4,85 M	2,01 M
400	180	0,840	45,4 M	7,65 M	2,11 M
375	320	0,982	62,2 M	13,6 M	2,31 M
360	4281	6,12	331 M	182 M	8,33 M
350		Ingen mulig løsning			

5.4.4 Modell med både PV og batterilagring

For simuleringen med både PV og batterilagring antas det at modellen inkluderer 600 kW PV. Simuleringer med begrensninger fra grid er gjennomført på lik måte som i “Modell med batterilagring”, se utdrag av resultater i tabell 5.7. Nødvendig antall batteri øker eksponensielt ved reduksjon av effekt som kan leveres fra grid, men økningen er mindre i modellen med PV og batterilagring enn i modellen med kun batterilagring. For simuleringen med 450 kW begrensning fra grid er effektkostnader redusert med 23 500 kr per år (9,0 %) sammenlignet med grunnmodellen (vedlegg B).

Simuleringer med begrensninger på grid kun i månedene mai til og med august ble også gjennomført da PV har høyest produksjon om sommeren, se utdrag av resultat i tabell 5.8. Ved å kun innføre begrensninger i disse månedene ble nødvendig antall batteri betydelig redusert sammenlignet med de tidligere simuleringene. Ingen begrensning på effekt levert fra

Tabell 5.7: Utdrag av resultater fra simulering av modell med 600 kW PV og batterilagring med begrensninger på maksimalt effektuttak fra grid.

Maks fra grid [kW]	Batteri [antall]	LCOE [kr/kWh]	NPC [kr]	Invest. kost. [kr]	Drifts-kostnad [kr/år]
ubegrenset	0	0,713	40,0 M	9,00 M	1,73 M
500	11	0,751	40,8 M	9,47 M	1,75 M
475	23	0,765	41,5 M	9,98 M	1,76 M
450	43	0,788	42,7 M	10,8 M	1,78 M
425	93	0,849	46,0 M	13,0 M	1,84 M
400	149	0,918	49,7 M	15,3 M	1,92 M
375	238	1,03	55,7 M	19,1 M	2,04 M
350	2676	4,17	226 M	123 M	5,73 M
340		Ingen mulig løsning			

grid de resterende månedene, førte derimot kun til en reduksjon i effekt-topp på lik linje med simulering med PV uten batteri disse månedene, se figur 5.15. Simuleringen førte til en reduksjon i effektkostnader på 15 000 kr per år (5,8 %) sammenlignet med grunnmodellen.

Tabell 5.8: Utdrag av resultater fra simulering av modell med 600 kW PV og batterilagring med begrensninger på maksimalt effektuttak fra grid i månedene mai til august.

Maks fra grid [kW]	Batteri [antall]	LCOE [kr/kWh]	NPC [kr]	Invest. kost. [kr]	Drifts-kostnad [kr/år]
500	0	0,737	40,0 M	9,00 M	1,73 M
450	15	0,756	41,1 M	9,64 M	1,75 M
400	40	0,786	42,7 M	10,7 M	1,78 M
350	96	0,856	46,4 M	13,1 M	1,86 M
300	308	1,13	61,4 M	22,1 M	2,19 M

Ved en 400 kW begrensning på maksimal effekt fra grid om sommeren, beregnes det at 40 batteri kreves for å levere det resterende effektforbruket. Med utgangspunkt i 40 batterier, ble maksimal begrensning på

grid beregnet per måned, se tabell 5.9. En simuleringsrapport er lagt ved i vedlegg E der det antas 600 kW PV og månedsbegrensninger på grid som oppgitt i tabell 5.9. Resultater fra simuleringen er oppgitt i tabell 5.10. Effektkostnader ble redusert med 28 000 kr per år (10,7 %) i simuleringen sammenlignet med grunnmodellen (vedlegg B).

Tabell 5.9: Nødvendig maksimalt effektuttak fra grid dersom 40 batterier installeres.

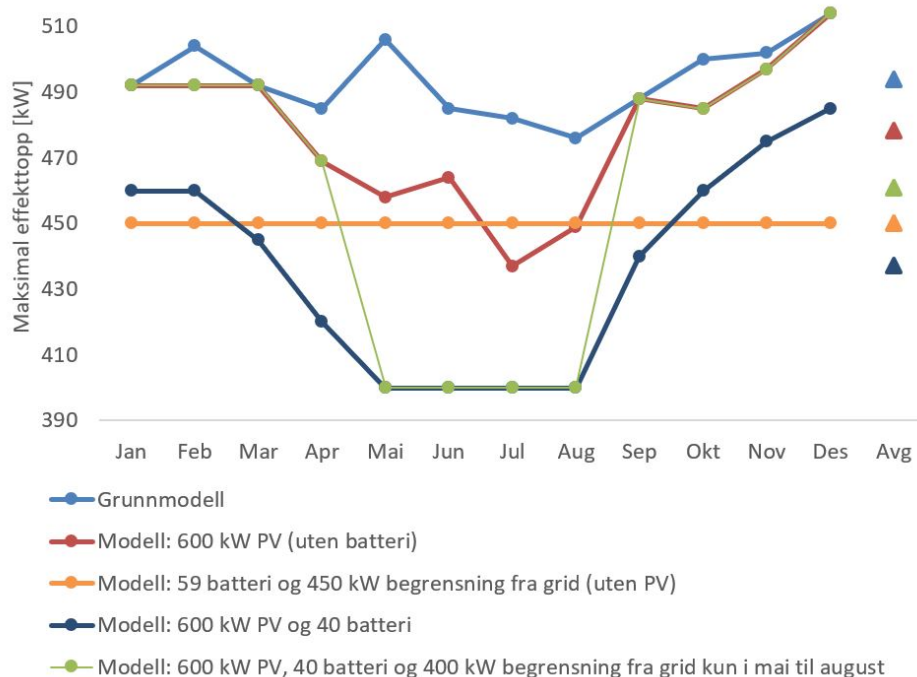
Måned	Maks fra grid [kW]
Januar	460
Februar	460
Mars	445
April	420
Mai	400
Juni	400
Juli	400
August	400
September	440
Oktober	460
November	475
Desember	485

Tabell 5.10: Resultater fra modellering av 600 kW PV og batterilagring med månedlige begrensninger på maksimalt effektuttak fra grid i henhold til verdier oppgitt i tabell 5.9.

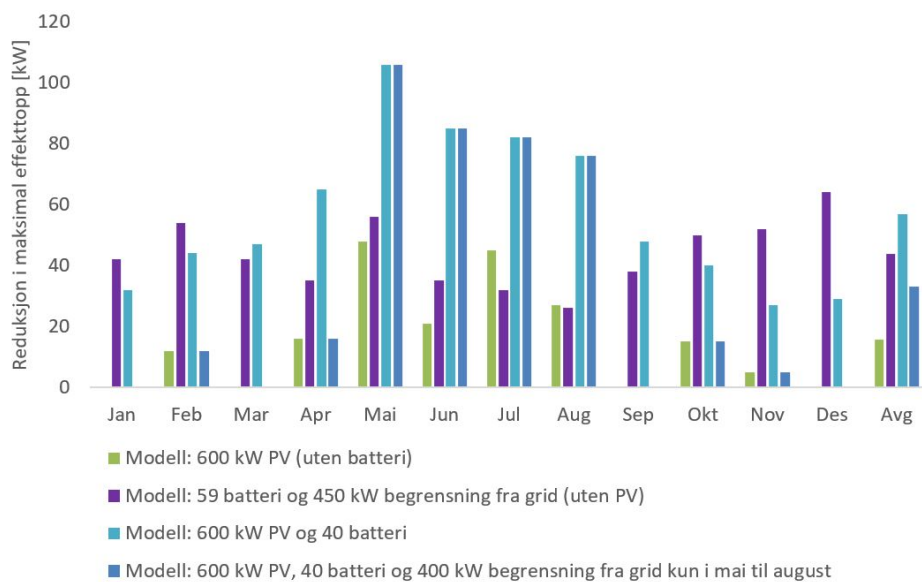
Maks fra grid [kW]	Batteri [antall]	LCOE [kr/kWh]	NPC [kr]	Invest. kost. [kr]	Drifts-kostnad [kr/år]
400 - 485 (se tabell 5.9)	40	0,782	42,4 M	10,7 M	1,77 M

5.4.5 Sammenstilling av resultatene fra modellene

Ved å se på resultatene fra de forskjellige modellene i delkapittel 5.4.1 - 5.4.4 fremkommer det at grunnmodellen har klart lavest NPC. Grunnmodellen har derimot det høyeste effektforbruket, se figur 5.15. Den største reduksjonen i effekttopper vil være avhengig av installert PV kapasitet samt antall batteri benyttet, se figur 5.16.



Figur 5.15: Maksimal effekttopp per måned ved forskjellige simuleringer, hentet fra vedlegg B, C, D og E.



Figur 5.16: Reduksjon i maksimal effekttopp per måned ved forskjellige simuleringer sammenlignet med grunnmodell.

Kapittel 6

Diskusjon

6.1 Effektforbruk ved Pirbadet

6.1.1 Variasjon i totalt effektforbruk

Variasjon i det totale effektforbruket for Pirbadet er vist i figur 5.1 og 5.2 med måledata fra 2018. Det viser en tydelig døgnvariasjon i totalt gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time, noe som sammenfaller med Pirbadets åpningstider. Det er forholdsvis små variasjoner i effektforbruket fra dag til dag. På grunn av variasjoner i åpningstider, se tabell 2.8, er det en viss forskjell på når og hvor raskt endringen mellom lavt og høyt forbruk forekommer. Mandag, onsdag og fredag er dagene med høyest energiforbruk, ikke uventet da Pirbadet har lengst åpent disse dagene, åpningstid fra 06:30 til 21:00.

Sesongvariasjon kan sees i figur 5.2. Sommerforbruket (uke 22 til 34) er med unntak av mandager litt lavere enn vinterforbruket (uke 1-8 og 49-52). Det litt lavere forbruket om sommeren kan blant annet skyldes redusert krav til oppvarming. Oppvarming ved Pirbadet er basert på bruk av fjernvarme, men elektrisitet benyttes for å sirkulere varmen i bygget. For eksempel benyttes et snøsmelteanlegg om vinteren for å holde inngangspartiet isfritt, dette er ikke aktuelt om sommeren. En annen mulig faktor er bruk av lys. Om sommeren er det lysere ute, noe som kan redusere behov for belysning inne, og dermed redusere det

elektriske forbruket. Lavere antall besøkende i sommermånedene kan også bidra til sesongvariasjoner.

6.1.2 Effektforbruk av utvalgte laster

Målet for denne oppgaven var å undersøke muligheter for å redusere maksimale effekttopper ved Pirbadet. Det ble derfor valgt å fokusere på den dagen i måleperioden med høyest effektforbruk uavhengig av ukedag. For å undersøke variasjonene i maksimal effekttopp ble det også valgt å fokusere på en dag med lavt maksimalt effektforbruk. For best sammenligning av resultatene, ble dagen med lavest effekttopp begrenset til samme ukedag som dagen med høyest effekttopp slik at åpningstiden var den samme. Dager Pirbadet var stengt, ble ikke vurdert.

Totalforbruket har lignende effektprofil for både dagen med høyest effekttopp, dagen med lavest effekttopp og en gjennomsnittlig fredag første kvartal 2019, se figur 5.3. Fra figuren kommer den daglige syklusen i effektforbruket klart frem. Fra klokken 11 til klokken 19 er effektforbruket relativt stabilt rundt 480 kW per time både for en gjennomsnitts-fredag og for dagen med lavest effekttopp, mens dagen med høyest effekttopp har et klart høyere forbruk. Dette skyldes antageligvis antall besøkende. Det var 2 189 besøkende dagen med høyest effektforbruk, det høyeste antall besøkende på en dag i første kvartal. Til sammenligning var det 1 244 besøkende fredagen med lavest effektforbruk og 1 349 besøkende på en gjennomsnitts-fredag. Det høyere antall besøkende skyldes antageligvis at det var skolefri (vinterferie).

Ventilasjonsanlegg

Effektforbruket til ventilasjonsanlegg 36.02 ble målt både av et ELITEpro måleinstrument installert i forbindelse med oppgaven og et av Pirbadets egne måleinstrument, se figur 5.4 og A.1. Verdiene fra de to uavhengige måleinstrumentene samsvarer, dette tyder på at ELITEpro-instrumentene gir pålitelige målinger av effektforbruk.

Ventilasjonsanleggene tidsstyres ut fra Pirbadets åpningstid, i tillegg benyttes sensorer for luftfuktighet og temperatur. Ventilasjonsanleg-

genes effektforbruk avspeiler Pirbadets åpningstid, dette fremkommer tydelig i figur 5.5. Sensorene for luftfuktighet og temperatur er i hovedsak benyttet for å styre ventilasjonsanlegget når Pirbadet er åpent. Ventilasjonsanlegget opererte på et høyt trinn store deler av dagen med høyest effektforbruk, se figur 5.4, i motsetning til dagen med lavest effektforbruk hvor ventilasjonsanlegget delvis opererte på lavere trinn, se figur A.1. Med flere besøkende vil temperaturen og luftfuktigheten i bassengrommene øke, noe som fører til økt drift av ventilasjonsanleggene.

Bølge-genererende maskin

Bølgemaskinen er planlagt virksom i 5 til 10 minutter hver hele time i åpningstiden etter klokken 10. Avhengig av antall besøkende kan vakthavende velge å ikke starte maskinen. Det gjennomsnittlige effektforbruket er rett under 50 kW når bølgemaskinen kjører, mens maksimum målt effekt er betydelig høyere og mer varierende, se figur 5.6 og A.3. Det er en tydelig maksimal effekttopp når maskinen igangsettes. Dette er forventet, da maskiner med store mekaniske komponenter ofte har høy startstrøm.

Bølgemaskinen kan ha bidratt til høyt effektforbruk på tidspunktene med høyest effektforbruk. I timen med det høyeste registrerte effektforbruket kjørte bølgemaskinen en gang kl. 13, og i tillegg startet den neste kjøringen før kl. 14, slik at omtrent halve denne kjøringen ble registrert i forbrukstimen mellom kl. 13 og 14. Bølgemaskinen ble også benyttet flere ganger enn normalt den dagen med høyest effektforbruk, antageligvis på grunn av flere besøkende.

Vannpumper

Vannpumpene har lignende forbruk for både dagen med høyt effektforbruk og fredagen med lavest effekttopp, se henholdsvis figur 5.9 og A.5. Unntaket er vannpumpe E som har litt høyere forbruk i åpningstiden på dagen med høyest effektforbruk. Det kan derfor virke som at vannpumpene i liten grad påvirkes av dag-til-dag variasjoner i besøkstall. Vannpumpe F er ikke i bruk hverken dagen med høyest eller lavest

effekttopp. Dette skyldes at vannpumpe E og F kjører vekselvis annenhver uke. Fra figur A.4 kan det sees at vannpumpe A og C har en rask fluktasjon i forbruk rundt kl. 15. Fluktasjonen kommer antageligvis fra rensing av vannfiltre. Forbruket går til null før og etter en 10 minutters effekttopp som er ca. 1 kW over det vanlige forbruket.

Det er et ukjent antall mindre vannpumper uten frekvensomformer som også bidrar til effektforbruket. De mindre vannpumpene er generelt under 2,5 kW per pumpe. For eksempel estimeres det at 20 vannpumper på 2,2 kW benyttes i boblebadene. Disse vil ha et varierende bruksmønster i åpningstiden og kan teoretisk medføre en effekttopp på 44 kW dersom alle vannpumpene i boblebadene benyttes samtidig. Disse vannpumpene er ikke tatt med i analysene grunnet manglede data.

Badstue

Tørrbadstuene er styrt av hver sin termostat. Det ble kun installert måler på en av de to tørrbadstuene, men det er sannsynlig at den andre tørrbadstuen hadde et tilsvarende forbruk som den målte tørrbadstuen. Forbruksmønsteret for tørrbadstuen er lignende for dagene med høyest og lavest effekttopp, men tidspunkt for når ovnen er på/av varierer.

Dampbadstuen varmer i utgangspunktet jevnt med rundt 4 kW. Når det er nødvendig, kan effektforbruket reguleres opp til rundt 8 kW. Dampbadstuen hadde et tydelig høyere forbruk dagen med høyest effekttopp sammenlignet med dagen med lavest effekttopp, se figur 5.11 og A.7. Dette skyldes antageligvis flere brukere, noe som fører til at døren er mer åpen slik at den varme dampen slippes ut.

Lastenes bidrag til det totale elektriske effektforbruket

Av de målte lastene er vannpumper og ventilasjonsanlegg de to klart største kategoriene, og de har et relativt jevnt effektforbruk, se figur 5.12 og A.8. Bølgemaskinen skiller seg ut med høye effekttopper i korte intervall. Det målte effektforbruket med ELITEpro dekker 12,8 % av effektforbruket da den høyeste effekttoppen inntraff i første kvartal

2019. Dersom de timesmålte ventilasjonsanleggene også blir inkludert, er 23,9 % av effekttoppen kartlagt, se tabell 5.2.

Det er ikke uventet at en så lav andel av effektforbruket kartlegges av målingene. For eksempel er det kun 4 av 16 ventilasjonsanlegg og 6 av 25 varmpumper med frekvensomformer som ble målt. For fremtidig arbeid kan det med fordel installeres flere målere på større laster, i tillegg til mer høyoppløselige målinger av det totale forbruket. Det er imidlertid mulig å estimere en større andel av effektforbruket, se figur 5.14 og tabell 5.3. Basert på disse antagelsene kan 43,4 % av effektforbruket kartlegges i timen med maksimal effekttopp første kvartal 2019.

6.1.3 Kilder til ikke-kartlagt effektforbruk

Det er flere kilder til det ikke-kartlagte effektforbruket. Noen av kildene kan være små alene og er derfor ikke prioritert for installasjon av måleinstrument, men kan utgjøre en betydelig andel samlet. Andre kilder kan være større, men på grunn av tekniske og økonomiske årsaker er forbruket ikke målt. Nedenfor er noen mulige kilder til ikke-kartlagt effektforbruk beskrevet.

- **Ventilasjonsanlegg:** Det er totalt 16 ventilasjonsanlegg som betjener forskjellige deler av Pirbadet. Det er 10 anlegg der forbruksmønsteret ikke er identifisert, to av disse er i våt sone, de resterende åtte er i tørr sone. Disse anleggene utgjør sannsynligvis en stor del av det ikke-kartlagte effektforbruket. Det er rimelig å anta at alle anleggene er kontinuerlig på, styres på lik måte som de målte anleggene og har økt forbruk i åpningstid (kontortid for enkelte anlegg).
- **Vannpumper:** For større vannpumper med frekvensomformere regnes forbruket som helt eller delvis kjent. Derimot kan en ikke-kartlagt kilde til effektforbruket være et ukjent antall mindre vannpumper (generelt under 2,5 kW). Samlet kan de mindre vannpumpene utgjøre en betydelig del av effektforbruket. Mindre vannpumper benyttes blant annet for å lage bobler i boblebadene, "opplevelsedsduj" i basseng og andre vannstråler. Det kan antas at de

aller fleste av de mindre vannpumpene kun er i bruk i bassengets åpningstid.

- **Varmepumpe i gråvanns-gjenvinnere:** Varmepumpene i gråvannsgjenvinnerne utgjør hovedforbruket av elektrisitet for oppvarming av vann. Fra det tekniske databladet til gråvannsgjenvinnere er det maksimale effektforbruket 10,8 kVA. I en bacheloroppgave fra 2017 er det beskrevet at to av gjenvinnerne er i drift rundt 55 % av tiden, mens den tredje er i drift rundt 25 % av tiden [53]. Det framkom ikke et klart mønster for når anleggene var i drift. Dersom alle varmepumpene er i drift samtidig, kan de teoretisk ha et effektforbruk på ca. 30 kVA. Dette tilsvarer forbruket for de tre badstuene, og kan derfor utgjøre en viktig del av det ikke-kartlagte effektforbruket.
- **Kjøkken:** Det ble gjort forsøk på å få oversikt over de største elektriske lastene på kjøkkenet i prosjektoppgaven [1]. Det viste seg å være utfordrende da sikringene var generelt dårlig merket. Den største sikringen er 25 A, med et teoretisk maksimalt effektforbruk på 5,8 kW. Det er rimelig å anta at det aller meste av kjøkkenets effektforbruk er i restaurantens åpningstid.
- **Lys:** Det reelle effektforbruket fra lyskilder er sannsynligvis betydelig høyere enn det estimerte forbruket. Estimater er basert på telling av lysarmaturer og tar kun hensyn til de armaturene der også effektforbruket er kjent (447 lysarmaturer), gjennomført som del av prosjektoppgaven [1]. Det ble identifisert 291 lysarmaturer der effektforbruket er ukjent. I tillegg er det flere områder som ikke ble talt, blant annet treningscenteret og kontorareal i 3. og 4. etasje.
- **Annet:** Andre ikke-kartlagte kilder er blant annet kontor, treningscenter, resepsjon med butikk og garderober. Samlet vil disse kildene ha påvirkning på totalt effektforbruk. Det er rundt 20 kontoransatte med kjernetid fra klokken 9 til 15. Treningscenteret er åpent fra kl. 5 til 23 de fleste dager. Generelt vil forbruket fra disse kategoriene forekomme på dagtid.

6.1.4 utfordringer ved måling av effektforbruk

Pirbadet er et stort anlegg bestående av mange laster. Det var ikke mulig å måle samtlige laster, både av praktiske og økonomiske årsaker. Det var derfor viktig at målte laster skulle gi god og representativ informasjon om effektforbruket ved Pirbadet.

Ved bruk av seks ELITEpro måleinstrumenter var det ønskelig å få best mulig oversikt over hvordan effektforbruket fordelte seg på forskjellige lastkategorier. Det var planlagt at to av måleinstrumentene skulle måle fire vannpumper hver. På grunn av manglende utstyr ved to av de utvalgte vannpumpene, ble måling kun gjennomført på 6 av de 8 planlagte pumpene. Det ble ikke valgt nye vannpumper for måling grunnet fysiske avstander mellom målepunktene. Vannpumpene som ikke ble målt, var MB 13 og enten MB 26 eller MB 27. MB 13 er en av vannpumpene som brukes i vannfiltreringssystemet, mens MB 26 og MB 27 er vannpumper som skaper strømning i strømningsbassenget.

Det ble forsøkt installert loggføring av det totale effektforbruket via HAN-porten på AMS-måleren for å få høyere oppløsning enn timesmålingene som er loggført via Entro. De målte verdiene av totalt effektforbruk var betydelig lavere enn forventet. Det ble konkludert med at det forelå feil med de målte verdiene og undersøkelser for å finne eventuelle feilkilder ble gjennomført. Da ingen feilkilde ble funnet, ble det valgt å ikke benytte disse verdiene. En gjennomgang av valgt metode og vurdering av alternative metoder bør gjøres før et eventuelt nytt forsøk gjennomføres.

6.1.5 Modellering av fremtidig effektforbruk

Valg av modelleringsverktøy

Modelleringsverktøy ble valgt med utgangspunkt i de 75 verktøyene som ble undersøkt i "A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables" [5]. HOMER Pro [4] og DER-CAM [54] var to av alternativene som oppfylte ønskene til modelleringsverktøy. Etter testing av begge verktøyene ble HOMER Pro valgt på grunn av foretrukket brukergrensesnitt. Andre modelleringsverktøy

kunne også vært benyttet, men det er rimelig å anta at det kun ville vært små forskjeller i resultater mellom de ulike verktøyene.

Mulige feilkilder i modellen

Det vil alltid være usikkerhet knyttet til modeller, ettersom historiske data og ulike antagelser benyttes for å vurdere fremtidige scenarier. Noen usikkerhetsmomenter i modellen som er benyttet i denne oppgaven, er:

- HOMER Pro har mye teknisk dokumentasjon på nett, men programmet er ikke “open source”. Da ikke all informasjon om programmet er tilgjengelig, kan det være vanskelig å finne ut hvilke antagelser som ligger til grunn for simuleringene.
- Det modellerte forbruket tar utgangspunkt i måledata og prisnivå fra 2018. Modellen tar ikke høyde for endringer i forbruk eller prisnivå med unntak av inflasjon.
- Effektprising er begrenset av modelleringsverktøyets oppbygging, da det kun er mulig å oppgi en verdi for effektforbruket på et tidspunkt. Effekttariffen for Pirbadet er forskjellig priset for forskjellige deler av forbruket. Eksempelvis er det en pris for de første 200 kW og en annen for forbruket over 200 kW.
- Inflasjon og diskonteringsrente er av natur usikre. Analysene er derfor utført med et spenn av verdier for å ta høyde for denne usikkerheten.
- Modellen tar ikke hensyn til eventuell inntjening fra overskuddsproduksjon ved mulig bruk av alternative energikilder. Denne antagelsen er en forenkling og vil sannsynligvis være ukorrekt, men ha liten betydning for resultatet av simuleringene. Det vil ha mest å si for simuleringen med 600 kW PV uten batteri da 2 % av PV-produksjonen vil kunne selges til grid.
- Antagelsene som er benyttet for å lage både PV-modulen og batterimodulen er satt basert på forskjellige generelle kilder. Det er ikke undersøkt hva som spesifikt vil gjelde for Pirbadet. For eksempel er

batterimodulen basert på batteriet LG Chem RESU [6.4kWh] [51], resultatet av analysene kunne blitt noe annerledes ved valg av et annet batteri.

6.2 Mulige effektreduserende tiltak

Effektreduserende tiltak i bygg kan deles i tre hovedkategorier; effektivisering / omlegging, laststyring og lastreduksjon, dette er nærmere beskrevet i delkapittel 2.2. Under diskuteres noen mulige tiltak Pirbattet kan gjennomføre innenfor disse kategoriene, samt lønnsomheten av eventuelle tiltak.

Lønnsomheten av en eventuell investering kan forenklet vurderes ved å se på investeringskostnad mot forventet kostnadsreduksjon per år multiplisert med forventet levetid av investeringen. Dersom investeringskostnaden er betydelig mindre enn samlet reduksjon i utgifter, er investeringen sannsynligvis lønnsom. Denne forenklingen tar ikke hensyn til blant annet inflasjon. Inflasjon kan ha innvirkning på hvilket alternativ som er mest lønnsomt dersom kostnadsreduksjon og investeringskostnader er tilnærmet lik.

En reduksjon i den maksimale effekttoppen på 1 kW per måned vil redusere effektkostnaden med 532 kr per år med effekttariff som oppgitt i tabell 4.6. Dersom reduksjonen også fører til en jevn reduksjon i energiforbruket med 1 kWh per time (tilsvarende en reduksjon på 8760 kWh per år), vil energikostnadene reduseres med 4 652 kr per år forutsatt en gjennomsnittlig energipris på 0,5311 kr/kWh (verdi fra 2018). Dersom forventet levetid er 20 år, bør investeringskostnadene være under 10 000 kr per antatte kW reduksjon av maksimal effekttopp per måned dersom energiforbruket forblir uendret. Tilsvarende, dersom systemets energiforbruk også reduseres, bør en eventuell investering ikke overskride 100 000 kr per kW reduksjon.

6.2.1 Effektivisering og omlegging

Effektivisering og omlegging er tiltak som permanent reduserer effektforbruket. Oppgradering av tekniske utstyr er en vanlig måte å effektivisere forbruket på, mens omlegging kan være å endre energikilde permanent fra elektrisitet til for eksempel fjernvarme.

For Pirbadet er det antageligvis lite å hente på å effektivisere det tekniske utstyret. Effektforbruksmålingene, se figur 5.12, viste at ventilasjon og vannpumper er lastkategoriene med høyest målt effektforbruk. Av de 8 ventilasjonsanleggene i våt sone er 6 av anleggene installert i 2016 eller senere. Det er rimelig å anta at anlegg med god kvalitet ble installert, og at en oppgradering vil gi minimal reduksjon i effektforbruk. Det vil også kreve en vesentlig investeringskostnad for å erstatte relativt nye anlegg. Det kan være mer å hente ved å effektivisere de eldre ventilasjonsanleggene, dette bør undersøkes nærmere.

En oppgradering av vannpumpene er også utfordrende. Det er mange vannpumper, men hver enkelt har et relativt lavt forbruk, opp til 6,6 kW målt med stikkprøver, se tabell 5.1. Å oppgradere alle vannpumpene vil kreve mye investeringskapital, men det er mulig å oppgradere kun enkelte av vannpumpene. Det er imidlertid usikkert om dette vil være lønnsomt. Flere undersøkelser rundt kostnad og nytteverdi bør gjennomføres før eventuelle tiltak iverksettes.

Lys er antageligvis den lastkategorien som enklest kan effektiviseres. Både energi- og effektforbruket reduseres dersom de 32 metallhalogenlyskasterne på 400 W i våt sone erstattes med LED, for eksempel Osram Floodlight 20 som brukes i andre svømmeanlegg [55, 56]. Floodlight 20 mini LED (96 W) vil gi en jevn effektreduksjon på 300 W og en energireduksjon på 0,3 kWh per lyskaster. Med dagens elektrisitetskostnader vil dette gi en besparelse på anslagsvis 600 kr per lyskaster per år. Dersom lyskasterne er i bruk åtte timer hver dag, vil forventet levetid for lyskasterne være 34 år. Dersom investeringskostnaden er under 20 000 kr kan det forenklet antas at investeringen er lønnsom. Generelt vil en endring fra glødelampe til LED redusere forbruket med mellom 80 % og 85 %, en endring fra halogen til LED vil redusere forbruket med rundt 75 %, mens en endring fra “compact fluorescent light” (CFL) til LED vil

redusere forbruket fra 10 % til 30 % avhengig av lysstyrke [57].

Omlegging til andre energikilder er også en teoretisk mulighet for å redusere effektforbruket. Dette er sannsynligvis lite aktuelt for Pirbadet, da omlegging kun er relevant for termiske laster [6]. Oppvarming av Pirbadet gjøres allerede ved bruk av fjernvarme. Badstuene er den last-kategorien som teoretisk kan være relevant for omlegging. En eventuell omlegging til for eksempel fjernvarme kan føre til betydelige bygningsmessige endringer, og det er derfor lite sannsynlig at dette vil være lønnsomt.

6.2.2 Laststyring

Laststyring er tiltak hvor en del av forbruket styres vekk fra tidspunkt med høyt effektforbruk. Det er ingen reduksjon av det totale energiforbruket, men effekttoppen blir redusert. Termiske laster, for eksempel oppvarming av vann, egner seg godt til laststyring på grunn av termisk treghet, i motsetning til kritiske laster, eksempelvis stasjonære PCer, hvor forbruket ikke kan flyttes i tid. Ved laststyring er det viktig å sørge for at ikke lastene blir flyttet til samme tidspunkt for å unngå å skape en ny effekttopp.

Med dagens utregning av effektkostnad er det lite å hente ved bruk av laststyring på Pirbadet. Effektkostnad beregnes ut fra gjennomsnittlig effektforbruk per hele time. Pirbadets gjennomsnittlige effektforbruk per time har en syklisk oppførsel med høyt forbruk mellom klokken 11 og 19, se figur 5.1. Det høye forbruket holder seg jevnt i mange timer, noe som betyr at eventuelle laster må flyttes flere timer. Det er teknisk mulig å flytte laster som bølgemaskin, badstuer og gråvanns-gjenvinnere, men det er neppe mulig å flytte lastene flere timer uten at dette har innvirkning på brukerkomfort.

Bruk av energilagring ved hjelp av batterier vil være den beste tekniske løsningen for å redusere Pirbadets effekttopper med dagens effekttariff. Energilagring flytter teknisk sett ikke forbruket, men flytter tidspunkt for når forbruket hentes fra grid. Batteri kan lades om natten når effektforbruket er lavt, og elektrisitet kan hentes delvis fra batteri når

forbruket er høyt. På denne måten reduseres effekttopper i uttak fra grid. Bruk av batterilagring vil derimot gi økt energiforbruket på grunn av tap relatert til lading og utlading.

Det ble gjennomført flere simuleringer i HOMER Pro for å undersøke hvilken innvirkning bruk av batterier vil ha på maksimalt effektforbruk, se delkapittel 5.4.3. Det er ingen av de simulerte mulighetene med batterilagring som er lønnsomme sammenlignet med dagens situasjon. Simuleringen anbefaler først batteriløsning som mest lønnsomt når investerings- og erstatningskostnadene er rundt 3 000 kr per batteri, forutsatt at de andre verdiene forblir uendret. Tilsvarende, ved øking av effekttariff, vil batteriløsning bli lønnsom når effekttariffen øker til rundt 450 kr per kW per måned, altså en ni-dobling av dagens effekttariff. En så stor reduksjon i batteripris eller økning i effekttariffen er usannsynlig i nær fremtid.

Dersom utregningen av effektkostnad endres, f.eks. til gjennomsnittlig effektforbruk per kvarter, kan laststyring i kortere intervall bli mer interessant. Bølgemaskinen er en last som kan ha betydelig innvirkning på Pirbadets effektprofil. Man kan for eksempel flytte oppvarming av badstuer vekk fra tidspunkt der bølgemaskinen kjøres for å redusere effekttopper. Det kan også være aktuelt å flytte bølgemaskinen slik at den kjører halvt i slutten av en måleperiode og halvt i begynnelsen av neste måleperiode for å dele det høye effektforbruket på to måleperioder. Dette reduserer ikke den reelle effekttoppen, men kan ha betydning for den økonomiske effektkostnaden. Det er også til en viss grad mulig å styre tidspunkt for de strømnings-genererende maskinene, andre mindre vannpumper, spyling av vannfiltre og gråvanns-gjenvinnere. Dersom laststyring skal benyttes i kortere intervall, er det viktig å måle det totale effektforbruket med høy oppløsning samt å kunne predikere når effekttopper vil oppstå, slik at de lettere kan unngås.

6.2.3 Lastreduksjon

Lastreduksjon er tiltak der forbruket reduseres i en periode uten å øke forbruket ved et annet tidspunkt. Laster som ikke er kritiske kan reduseres eller kobles ut i perioder, for eksempel kan lys dimmes eller

skrus av dersom det ikke er i et kritisk område. Alternative energikilder kan også benyttes, som for eksempel solcellepanel (PV) eller aggregat. Bruk av alternative energikilder vil ikke gi reduksjon i byggets totale effektforbruket, men effektuttak fra grid vil reduseres.

Lastreduksjon kan blant annet gjøres ved bruk av behovsstyring. Lys er et godt eksempel på en lastkategori som relativt enkelt kan endres til å bli mer behovsstyrt. Lys kan behovsstyres ved bruk av tids-, dagslys- og bevegelses-/ tilstedeværelses-sensorer [58]. I februar 2019 installerte Pirbadet dagslyssensor for behovsstyring av lys i det største bassengrommet. For andre rom, for eksempel garderobe og kjeller, vil bevegelses- eller tilstedeværelses-sensorer være aktuelt da det ikke er noen vinduer, og rommene kan være ubrukt i perioder. Manuell bryter bør være tilgjengelig for å kunne overstyre behovsstyringen. Ventilasjonsanlegg og badstuer er per i dag også til en viss grad behovsstyrt ved bruk av termostat, timer og luftfuktighets- og temperaturmåler.

Den bølge-genererende maskinen, de strømnings-genererende maskinene og boblebad er laster som er styrt manuelt per mai 2019, disse maskinene startes og stoppes av Pirbadets personale. Den bølge-genererende maskinen skal startes hver hele time og kjøres i 5 til 10 minutter, men det er en viss usikkerhet når den reelt startes. Det kan med fordel benyttes en timer til å styre de manuelle systemene for å gjøre forbruket mer forutsigbart. Bruk av tilstedeværelsesensor for strømningsbasseng og boblebad kan være aktuelt for å redusere forbruk når det ikke er noen som bruker dem.

Endring av settpunkt for de forskjellige systemene kan vurderes for å redusere forbruket. For eksempel kan det vurderes om luftkvaliteten opprettholdes ved å justere ventilasjonsanleggene slik at luftutskiftning reduseres. Et annet eksempel kan være å redusere maksimal temperatur i badstuene med 5 °C. På den annen side kan være utfordrende å opprettholde kvalitet og brukers komfort ved endring av settpunkt.

Alternative energikilder kan også benyttes for lastreduksjon. Solcellepanel er teknologi som er godt egnet ved Pirbadet på grunn av geografiske forhold, kostnad og Pirbadets ønske om miljøvennlig drift. Termisk solenergi er et annet alternativ, men elektrisk effektforbruk vil ikke redu-

seres nevneverdig ved innføring av dette ettersom oppvarming allerede gjøres ved bruk av fjernvarme. Et tredje alternativ er installasjon av generator drevet av fossilt brennstoff eller biodrivstoff, men solcellepanel ble vurdert som mer miljøvennlig og enklere i drift.

Det ble gjennomført flere simuleringer i HOMER Pro for å undersøke hvilken innvirkning bruk av PV ville ha på det maksimale effektforbruket samt hvilke installasjons- og driftskostnader dette ville medføre, se delkapittel 5.4.2. Tidspunkt for PV-produksjon passer godt overens med Pirbadets forbruk, da mesteparten av produksjon vil være om dagen når Pirbadet har høyest forbruk. Det er likevel ikke mulig å garantere at den maksimale effekttoppen vil bli redusert, da det vil avhenge av lokale værforhold. Målt mot dagens situasjon er det ingen av de simulerte PV løsningene som er mer lønnsom. Installasjon av PV vil bli lønnsomt dersom investeringskostnadene reduseres til rundt 5 000 kr per kW installert PV kapasitet. Tilsvarende vil en dobling av energipris føre til at PV bli en mer lønnsom løsning. Dersom energipriser øker og kostnad for PV installasjon reduseres, kan PV bli et attraktivt alternativ. I tillegg bør mulige subsidier for installasjon av PV undersøkes nærmere.

6.2.4 Kombinasjon av batterilagring og solcellepanel (PV)

Dersom flere effektreduserende tiltak kombineres, kan effekttopper i større grad reduseres. Effekten og lønnsomheten av å kombinere energilagring ved bruk av batterier og energiproduksjon ved bruk av solcellepanel (PV) ble derfor vurdert, se delkapittel 5.4.4. Av de simulerte løsningene med både PV og batteri, var bruk av individuelle grid begrensninger per måned den mest lønnsomme. Effekttoppene ble mer redusert når en kombinasjon av PV og batteri benyttes enn ved sammenlignbare kapasitetsinstallasjoner av kun PV eller batteri. NPC var derimot høyere for kombinasjonen av teknologier, og en tilsvarende investering i kun batteri kunne redusere effekttoppen mer enn å investere i en kombinasjon av teknologier.

6.3 Anbefalinger

6.3.1 Anbefalinger for Pirbadet

Med dagens tariffstruktur er det få effektreduserende tiltak Pirbadet kan gjennomføre som samtidig vil være økonomisk lønnsomt. Flere av tiltakene kan bli mer interessante i fremtiden dersom investeringskostnader reduseres og/ eller energikostnader øker. Nedenfor er en oppsummering av anbefalte tiltak fra de forskjellige kategoriene.

Oppgradering av teknisk utstyr kan redusere effektforbruk, men vil i mange tilfeller ikke gi stor nok reduksjon i effekt- og energiforbruk til å gjøre investeringen lønnsom. Unntak kan være dersom det uansett må investeres i nytt utstyr. Oppgraderinger som fører til betydelig energireduksjon, kan være mer lønnsomme og bør vurderes, eksempelvis endring fra halogen til LED lys.

Omlegging til alternativ energikilde blir ikke sett på som en god løsning i Pirbadet sitt tilfelle. Dette skyldes hovedsakelig at det meste av oppvarmingen allerede gjøres ved bruk av fjernvarme.

Laststyring er med dagens tariffstruktur lite relevant. Bruk av batterier er en teknisk mulighet, men med dagens kostnadsnivå er det ikke anbefalt å redusere effekttopper ved bruk av batteri. Laststyring kan bli mer relevant dersom effekttariff endres. Det anbefales å få en bedre oversikt over effektforbruket med høyere tidsoppløsning enn dagens loggføring med timesintervall.

Behovsstyring er på generelt grunnlag å anbefale da det reduserer unødvendig bruk av energi, men det er ingen garanti for at det reduserer effekttopper. Særlig anbefales det å vurdere å installere timer på bølgemaskinen og sensorstyring av lys, begge med mulighet for manuell overstyring.

Alternative energikilder kan vurderes, solcellepanel (PV) er mest aktuelt. Med dagens prisnivå vil installasjon av PV ikke være lønnsomt. Det anbefales imidlertid å undersøke mulige støtteordninger for å installere PV, samt å ta kontakt med spesifikke leverandører for å undersøke den reelle kostnaden for installasjon av PV på Pirbadet. Det anbefales

videre å følge med på prisnivået for PV og revurdere lønnsomheten av en eventuell investering med jevne mellomrom.

6.3.2 Overføring til andre bygg

Denne studien er gjennomført på Pirbadet, et bygg som skiller seg fra de fleste andre næringsbygg, blant annet på grunn av høyt vannforbruk og store krav til ventilasjon og oppvarming. Resultatene fra denne oppgaven kan sannsynligvis i grove trekk overføres til andre svømmeanlegg av tilsvarende størrelse. Noen av funnene i oppgaven vil også kunne gjelde for andre typer bygg.

De fleste andre bygg har antageligvis større variasjon i effektforbruk enn Pirbadet. Eksempelvis vil kontorbygg sannsynligvis ha høyest forbruk i ukedager mellom kl. 8 og 15 når de ansatte er på jobb og ellers lavt forbruk. Motsatt vil et privathus ha lavt forbruk i arbeidstid og høyere om morgen og ettermiddag. Oppgradering av teknisk utstyr vil kunne redusere effektforbruket for de fleste typer bygg, men vil sannsynlig ikke være lønnsomt med mindre utstyret uansett må byttes ut. Behovsstyring er generelt et bra alternativ for å redusere energiforbruk, men kan ikke garantere reduksjon av effekttopper.

Andre næringsbygg vil antageligvis ha lignende utfordringer som Pirbadet når det kommer til laststyring. Laster må flyttes i flere timer for å redusere effekttopper. Eksempler på laster som kan være egnet for styring over lengre tidsintervall, er el-bil-lading og oppvarming. Dersom oppvarming er basert på elektrisitet, bør forbruke tidsstyres eller vurderes omlagt til for eksempel fjernvarme. Laststyring på kortere tidsintervall vil antageligvis bli mer aktuelt dersom beregning av effekttariff endres.

Bruk av batteri er en teknisk mulig løsning for å redusere effektforbruk, men vil for de fleste bygg sannsynligvis ikke være lønnsomt. Alternative energikilder som PV kan vurderes, men byggets utforming og plassering må tas hensyn til. PV kan være et attraktivt alternativ avhengig av geografisk plassering og økonomiske støtteordninger.

Kapittel 7

Konklusjon og fremtidig arbeid

7.1 Konklusjon

Pirbadet er et bygg med stort energi- og effektforbruk. Det er en tydelig døgnvariasjon i Pirbadets effektprofil som gjenspeiler åpningstidene. Det er forholdsvis små variasjoner i forbruket fra dag til dag og mellom årstider.

Basert på måledata innhentet i forbindelse med oppgaven, ble en fjerdedel av effektforbruket til den maksimale effekttoppen kartlagt. Ved bruk av antagelser om effektforbruket til noen av lastene ble nesten halvparten av forbruket estimert. De største lastkategoriene er ventilasjonsanlegg og vannpumper, i tillegg gir antageligvis drift av den bølge-genererende maskinen en kortvarig effekttopp hver time. Ventilasjonsanlegg og vannpumper har et jevnt forbruk, og er dermed lite egnet for laststyring.

Det ble gjennomført simulering av både dagens situasjon og hvordan forbruket vil være dersom det investeres i alternative energikilder. Per i dag er det mest lønnsomt å ikke investere i alternative energikilder eller batterier for å redusere effektforbruket. Samtidig er dagens situasjon også scenarioet med høyest effektforbruk.

Det er få tiltak som kan redusere effekttopper og samtidig vil være økonomisk lønnsomme for Pirbadet. Blant tiltakene som anbefales, er effektivisering av teknisk utstyr med fokus på lyskilder og behovsstyring av laster. Dersom tariffstrukturen for effekt endres, kan det bli mer aktuelt å se på andre tiltak som laststyring i korte intervall, samt å revurdere lønnsomheten av alternative energikilder.

Fra et samfunnsperspektiv er reduksjon av effekttopper gunstig for å redusere utbygging av infrastruktur. Med dagens effekttariff vil det imidlertid ikke lønne seg for Pirbadet å gjennomføre større tiltak for å redusere effektforbruket. Dersom det er et politisk ønske at næringsbygg aktivt skal arbeide for å redusere effekttopper, bør alternative økonomiske insentiver utredes.

7.2 Videre arbeid

I denne oppgaven er effektforbruket på Pirbadet kartlagt, og ulike tiltak for å redusere effektforbruk er vurdert. For videre arbeid med reduksjon av effektforbruket ved Pirbadet kan følgende vurderes:

- Installere måler på det totale effektforbruket med høy oppløsning.
- Installere flere målere for å få bedre oversikt over forbruksmønsteret til forskjellige laster, og andelen lasten utgjør av effektforbruket. Spesifikt anbefales det å undersøke effektforbruket fra flere av ventilasjonsanleggene, kjøkkenet og treningssenteret.
- Undersøke hvordan effektforbruk kan predikeres, og hvordan laststyring i praksis kan gjennomføres i Pirbadets daglige drift.
- Undersøke den reelle kostnaden av ulike tiltak.
- Vurdere andre batteri/ energilagringsteknologier og bruk av andre alternative energikilder.

Bibliografi

- [1] Skaftun I. Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet); 2018. Prosjektoppgave ved institutt for teknisk kybernetikk, se vedlegg F.
- [2] Entro. Entro hjemmeside;. Available from: <https://www.entro.no/>.
- [3] DENT Instruments. ELITEpro XC™ Portable Power Data Logger;. Aksessert 25/10/18. Available from: <https://shop.dentstruments.com/collections/test-measurement/products/elitepro-xc-power-meter?src=img>.
- [4] HOMER Energy. HOMER Pro;. Aksessert: 08/02/19. Available from: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- [5] Ringkjøb HK, Haugan PM, Solbrekke IM. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. Renewable Sustainable Energy Rev. 2018;96:440 – 459. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305690>.
- [6] Leafhill AS GGL. Smarte bygg som del av det norske energisystemet; 2018. Rapport for Statsbygg. Available from: <https://www.statsbygg.no/files/nyheter/SmarteByggDelEnergisystemet.pdf>.
- [7] Bakke AM, Paulen SL. Status og prognoser for kraftsystemet 2016. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE); 2016.
- [8] Bloomberg NEF. New Energy Outlook 2018; 2018. Available from: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>.
- [9] Lund PD, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable

electricity. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015;45:785 – 807. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000672>.

- [10] Fiksen K, Tennbakk B, Noreng CH, Åsmund Jenssen. Kommentar til NVEs konseptthøring om tariffer i distribusjonsnett. *THEMA*; 2015.
- [11] Duverge J. Energy performance and water usage of aquatic centres [PhD Thesis]. 2019;.
- [12] Kampel W. Energy efficiency in swimming facilities [PhD Thesis]. NTNU; 2015.
- [13] Senter for idrettsanlegg og teknologi . Tidligere oppgaver;. Ak-sessert 25/08/18. Available from: <https://www.ntnu.no/web/siat/tidligere-oppgaver>.
- [14] Enova. Energioppfølging i næringsbygg – en innføring; 2004.
- [15] Saari A, Sekki T. Energy consumption of a public swimming bath. *Open Construction and Building Technology Journal.* 2008;2:202–206.
- [16] Svømmebadsteknologi TI. Spar på energien i din svømme-hal - godt for miljøet og din bundlinje; 2015. Available from: <https://www.teknologisk.dk/ydelser/svoemmebade/spar-paa-energien/22647,10>.
- [17] Cardoso B, Gaspar AR, Góis JC, Rodrigues E. Energy and Water Consumption Characterization of Portuguese Indoor Swimming Pools. In: *CYTEF 2018 VII Congreso Ibérico, Ciencias y técnicas del frío.* 19-21 June 2018, Valencia, Spain; 2018. .
- [18] Marín JPD, García FV, Cascales JRG. Use of a predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy. *Sol Energy.* 2019;179:380 – 390. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19300040>.
- [19] Ole Lislebø MHEB Linn RenéeNaper. *Nettplan Stor-Oslo: Alternativer til nettutbygging. En potensialstu-*

- die for Oslo og Akershus.; 2012. Aksessert: 11.20.18. <https://www.statnett.no/globalassets/her-bygger-vi/region-ost/nettplan-stor-oslo/alternativer-til-nettinvesteringer-2011.pdf>.
- [20] Akorede MF, Hizam H, Pouresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2010;14(2):724 – 734. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002561>.
- [21] Ackermann T, Andersson G, Söder L. Distributed generation: a definition. *Electr Power Syst Res.* 2001;57(3):195 – 204. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779601001018>.
- [22] Zubo RHA, Mokryani G, Rajamani HS, Aghaei J, Niknam T, Pillai P. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2017;72:1177 – 1198. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306840>.
- [23] Allan G, Eromenko I, Gilmartin M, Kockar I, McGregor P. The economics of distributed energy generation: A literature review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015;42:543 – 556. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005164>.
- [24] Rahman HA, Majid MS, Jordehi AR, Kim GC, Hassan MY, Fadhil SO. Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015;51:1412 – 1420. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007029>.
- [25] O’Keefe PJ. Reciprocating Engines Maximize Efficiency When They Employ Flywheels; 2017. *Engineering Expert Witness Blog*. Available from: <http://www.engineeringexpert.net/Engineering-Expert-Witness-Blog/reciprocating-engines-maximize-efficiency-when-they-employ-flywheels>.

- [26] Kiat Yee S, V Milanovic J, Hughes FM. Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies. *Power Systems, IEEE Transactions on*. 2008 03;23:108 – 118.
- [27] Molina M, Enrique Mercado P. In: *Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines*; 2011. .
- [28] solcellekysten no. Årlig strømproduksjon fra et solcellepane; 2015. Aksessert 25/03/19. Available from: <https://solcellekysten.no/2015/06/24/arlig-stromproduksjon-fra-et-solcellepanel/>.
- [29] Huddlestone-Holmes C, Hayward J. The potential of geothermal energy. 2011 04;.
- [30] International Energy Agency. Geothermal energy;. Aksessert: 02/04/19. Available from: <https://www.iea.org/topics/renewables/geothermal/>.
- [31] Center for Sustainable Systems. U.S. Grid Energy Storage Factsheet; 2018. Aksessert 11/02/19. University of Michigan. Available from: <http://css.umich.edu/factsheets/us-grid-energy-storage-factsheet>.
- [32] Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl Energy*. 2015;137:511 – 536. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>.
- [33] California Energy Commission. California Energy Commission—Tracking progress, Energy Storage. Sacramento, CA: California Energy Commission.; 2018. Aksessert 11/02/19. Available from: https://www.energy.ca.gov/renewables/tracking_progress/documents/energy_storage.pdf.
- [34] Sioshansi R, Denholm P, Jenkin T. Market and policy barriers to deployment of energy storage. *Economics of Energy & Environmental Policy*. 2012;1(2):47–64.
- [35] Amirante R, Cassone E, Distaso E, Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical

- and hydrogen technologies. *Energy Convers Manage.* 2017;132:372–387. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041631055X>.
- [36] Towler J. Energy storage - the missing piece?; 2016. Akseptert 11/02/19. BSRIA Worldwide Market Intelligence. Available from: <https://www.bsria.co.uk/news/article/energy-storage-the-missing-piece/>.
- [37] Taylor P, Bolton R, Stone D, Zhang XP, Martin C, Upham P. Pathways for energy storage in the UK. Report for the centre for low carbon futures, York. 2012;.
- [38] Barbour E. Energy Storage Technologies Explained;. Akseptert 11/02/19. Available from: <http://energystoragesense.com/energy-storage-technologies/>.
- [39] Wang J, Lu K, Ma L, Wang J, Dooner M, Miao S, et al. Overview of compressed air energy storage and technology development. *Energies.* 2017;10(7):991.
- [40] RICAS2020. Project Objectives;. Akseptert 13/02/19. Available from: <http://www.ricas2020.eu/project/project-objectives/>.
- [41] Tønseth S. Luft kan bli verdens neste batteri; 2017. Akseptert: 12/02/19. SINTEF. Available from: <https://www.sintef.no/siste-nytt/luft-kan-bli-verdens-neste-batteri/>.
- [42] Haarberg GM. Batteri; 2018. Akseptert 25/03/19. Store norske leksikon. Available from: <https://snl.no/batteri>.
- [43] Moura S, Perez H. Better Batteries Through Electrochemistry. *ASME Dynamic Systems and Control Magazine.* 2014 06;136:15–21.
- [44] Mohanty P, Karnamadakala RS, Gujar M, Kolhe M, Nazmin Azmi A. In: *PV System Design for Off-Grid Applications.* vol. 196; 2015. p. 49–84.
- [45] Barnhart CJ, Benson SM. On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage. *Energy & Environmental Science.* 2013;6(4):1083–1092.

- [46] Stoltz G. Inflasjon; 2018. Aksessert: 16/04/19. Store norske leksikon. Available from: <https://snl.no/inflasjon>.
- [47] Pirbadet. Pirbadet hjemmeside;. Available from: <https://www.pirbadet.no/>.
- [48] AS TN. Nettleie- og tilknytningsavtaler;. Aksessert: 01.04.19. Available from: <https://tronderenerginett.no/kunde/avtaler>.
- [49] Norges Bank. Indikatorer for prisvekst;. Aksessert: 02/04/19. Available from: <https://www.norges-bank.no/Statistikk/Inflasjon/Indikatorer-for-prisvekst/>.
- [50] Sidelnikova M, Weir D, Groth L, Nybakke K, Stensby K, Langseth B, et al.. Kostnader i energisektoren: Kraft, varme og effektivisering. Rapport (Norges vassdrags-og energidirektorat: trykt utg.). Vol; 2015. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- [51] Ltd EPS. 6.4kWh LG Chem RESU 6.4Ex Lithium-ion Battery Packs;. Aksessert 09/04/19. EcoPowerSupplies.com. Available from: <https://www.ecopowersupplies.com/lg-chem-resu-6400kwh-solar-energy-storage-battery-solutions>.
- [52] Brinsmead T, Graham P, Hayward J, Ratnam E, Reedman L. Future energy storage trends: An assessment of the economic viability, potential uptake and impacts of electrical energy storage on the NEM 2015–2035; 2015.
- [53] Lien JP, Øyvind Witsø Jacobsen. Energigjenvinning fra gråvann i badeanlegg [Bachelor's Thesis]; 2017.
- [54] Berkeley Lab. Distributed Energy Resources - Customer Adoption Model (DER-CAM);. Aksessert: 08/02/19. Available from: <https://building-microgrid.lbl.gov/projects/der-cam>.
- [55] OSRAM. Et forbildeprosjekt med fokus på energieffektivitet, Svømmehall - Holmen Norge; 2017. Aksessert 11/02/19. Available from: <https://www.osram.no/ls/projects/swimming-hall-holmen/index.jsp>.
- [56] OSRAM. Etterlengtet svømmehall ble en umiddelbar suksess, Svømmehall - Årnes Norge; 2017. Aksessert 11/02/19. Availab-

le from: <https://www.osram.no/ls/projects/swimming-hall-arnes/index.jsp>.

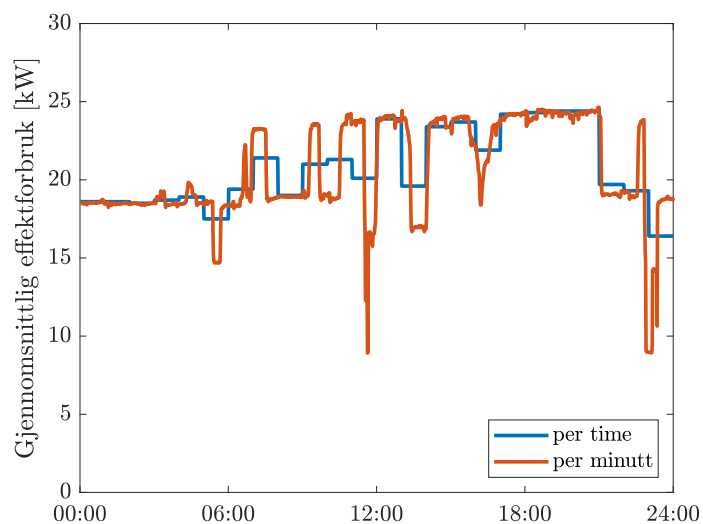
[57] The Lightbulb Co UK. LED Lumens to Watts Conversion Chart;. Aksessert 22/05/19. Available from: https://www.thelightbulb.co.uk/resources/lumens_watts/.

[58] Micro Matic. Opptil 75 Aksessert: 08/05/19. Available from: https://www.micromatic.no/siteassets/3-proffsenter/brosj.-og-salgsmateriell/brosjyrer/pdfer/behovsstyrtlys_mmn190912_web_v2.pdf.

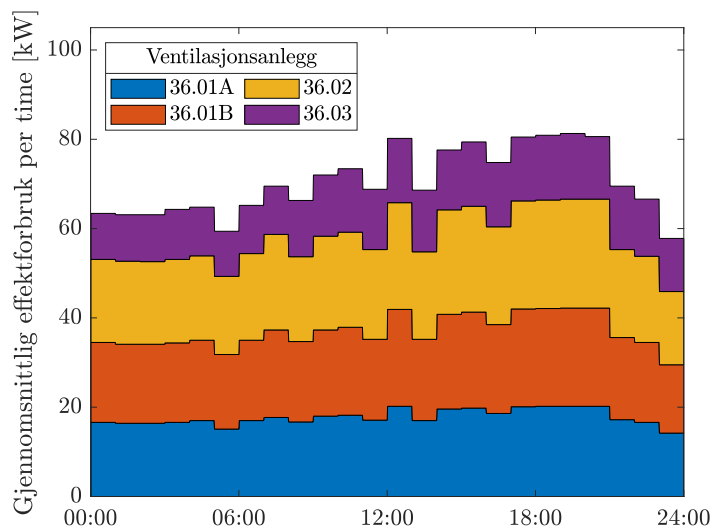
Tillegg A

Effektforbruk av utvalgte laster

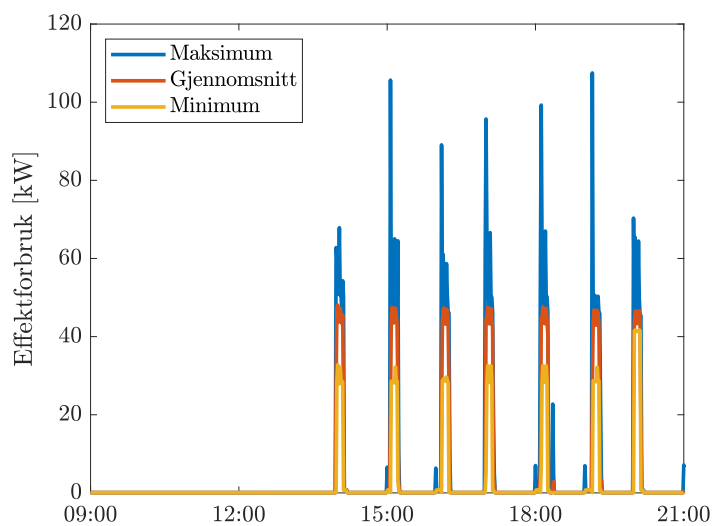
Under presenteres effektforbruket av utvalgte laster ved Pirbadet for fredagen med den laveste effekttoppen i første kvartal 2019. Den laveste registrerte maksimale effektforbrukstimen på en fredag var 22. mars. Maksimalt effektforbruk denne dagen var 487,2 kW mellom klokken 12 og 13.



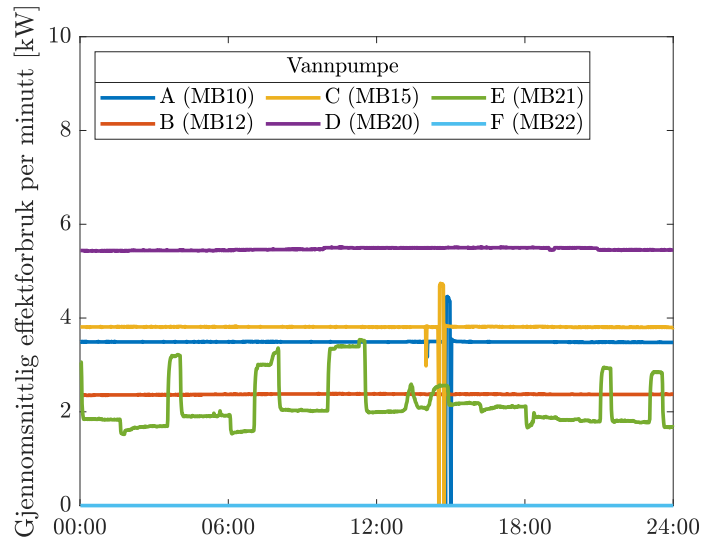
Figur A.1: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt og per time av ventilasjonsanlegg 36.02 fredag 22. mars 2019.



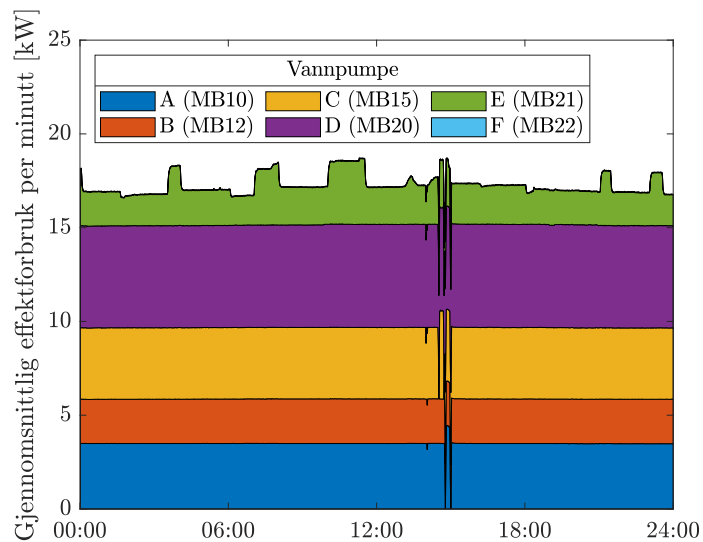
Figur A.2: Stabilt linjediagram av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per time fredag 22. mars 2019 fra de fire ventilasjonsanleggene med effektmåler.



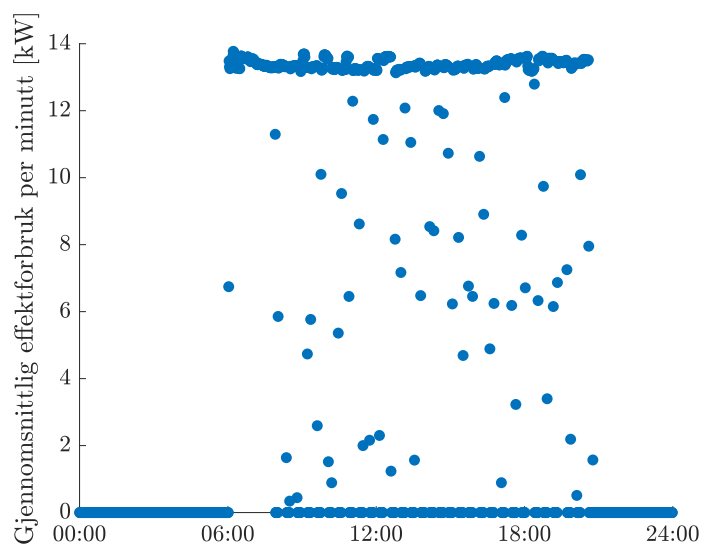
Figur A.3: Maksimum, minimum og gjennomsnittlig effektforbruk for bølgemaskinen i tidsrommet 10-21 fredag 22. mars 2019. Målinger er registrert hvert minutt.



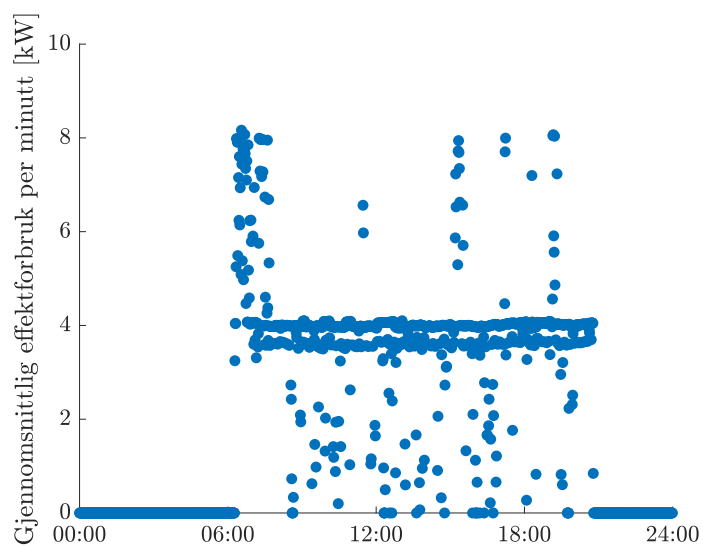
Figur A.4: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt fra de målte vannpumpene fredag 22.mars 2019.



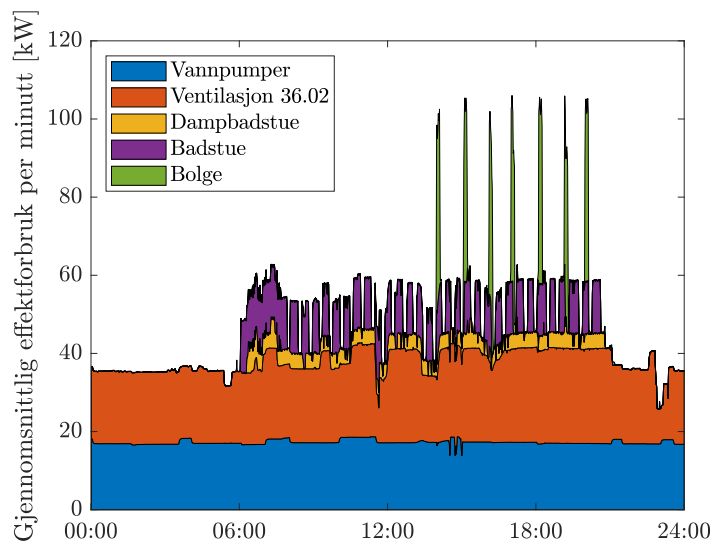
Figur A.5: Stablet linjediagram av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt fra de målte vannpumpene fredag 22. mars 2019.



Figur A.6: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt for en tørrbadstue fredag 22. mars 2019.



Figur A.7: Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk per minutt for dampbadstuen fredag 22.mars 2019.



Figur A.8: Stablet linjediagram av gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk fra de installerte effektmålerne med minutttoppløsning fredag 22. mars 2019.

Tillegg B

Simuleringsrapport: Grunnmodell



Author: Ingvild Skaftun

Location: Havnegata 12, 7010 Trondheim, Norway (63°26.4'N, 10°24.0'E)

Total Net Present Cost: kr 33,487,140.00

Levelized Cost of Energy (kr/kWh): kr 0.619

Notes: Modell og simulering av elektrisk forbruk på Pirbadet - Dagens situasjon.

Sensitivity variable values for this simulation

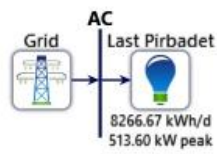
Variable	Value	Unit
Expected Inflation Rate	2.20	%
Nominal Discount Rate	5.00	%



System Architecture

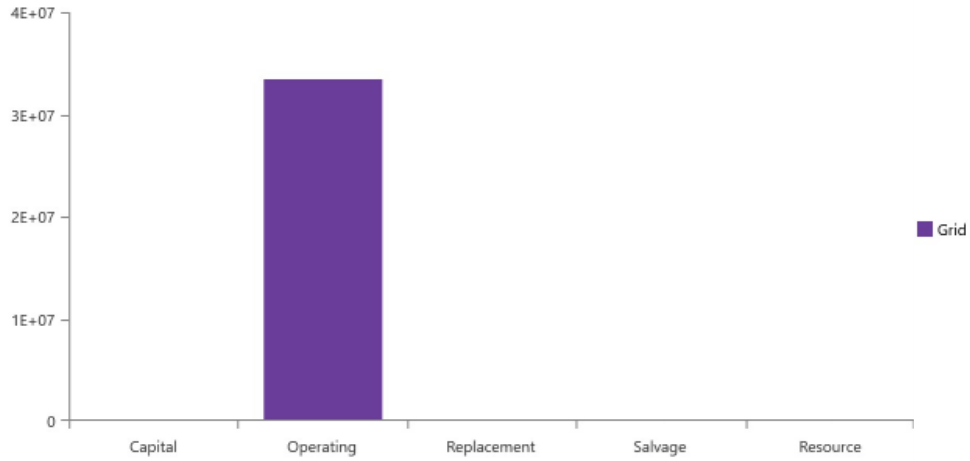
Component	Name	Size	Unit
Grid	Grid	999,999	kW
Dispatch strategy	HOMER Cycle Charging		

Schematic





Cost Summary



Net Present Costs

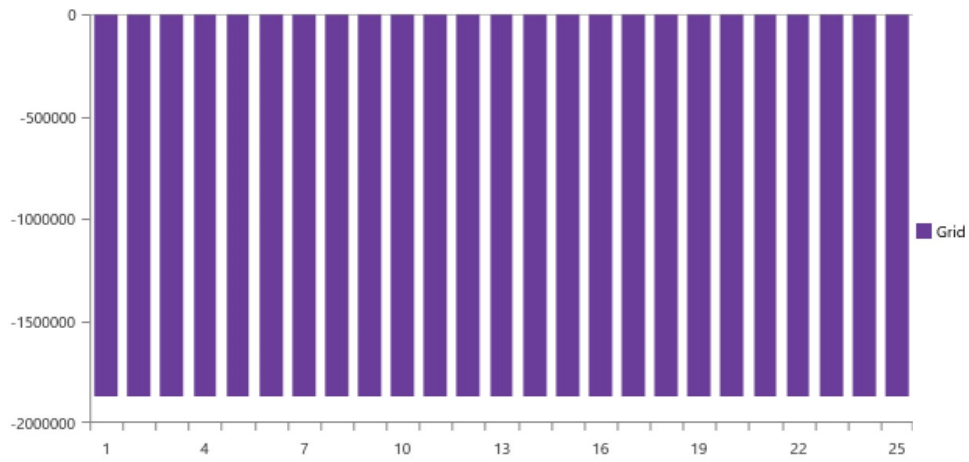
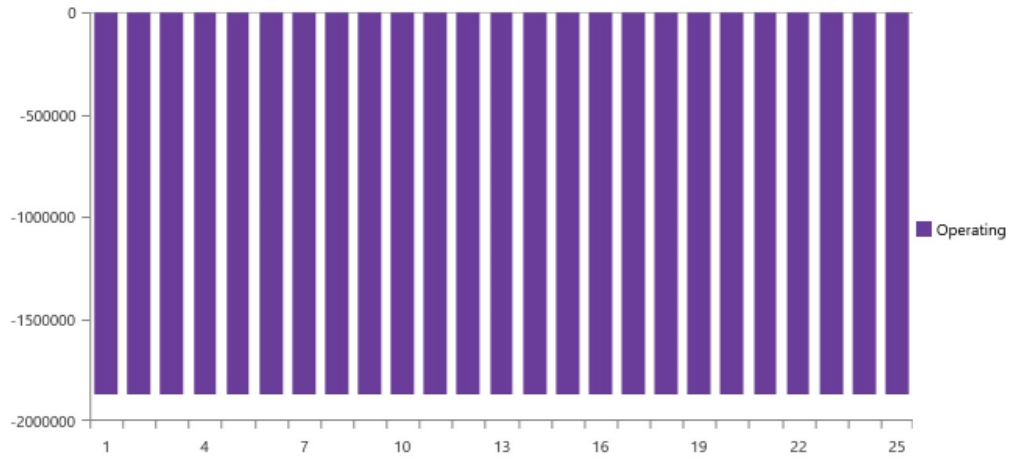
Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Grid	kr0.00	kr33.5M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr33.5M
System	kr0.00	kr33.5M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr33.5M

Annualized Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Grid	kr0.00	kr1.87M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr1.87M
System	kr0.00	kr1.87M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr1.87M



Cash Flow





Electrical Summary

Excess and Unmet

Quantity	Value	Units
Excess Electricity	0	kWh/yr
Unmet Electric Load	0	kWh/yr
Capacity Shortage	0	kWh/yr

Production Summary

Component	Production (kWh/yr)	Percent
Grid Purchases	3,017,334	100
Total	3,017,334	100

Consumption Summary

Component	Consumption (kWh/yr)	Percent
AC Primary Load	3,017,334	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	3,017,334	100

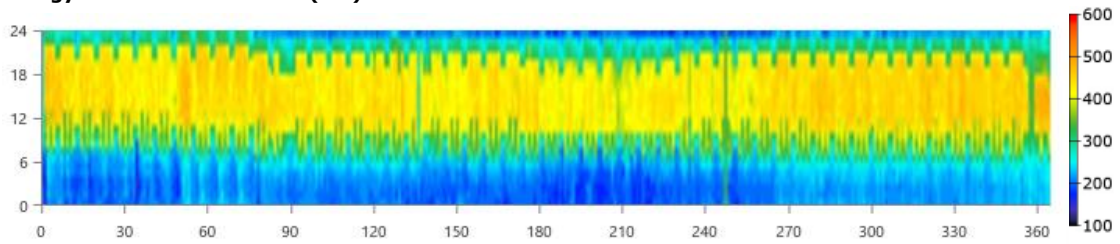


Grid: Grid

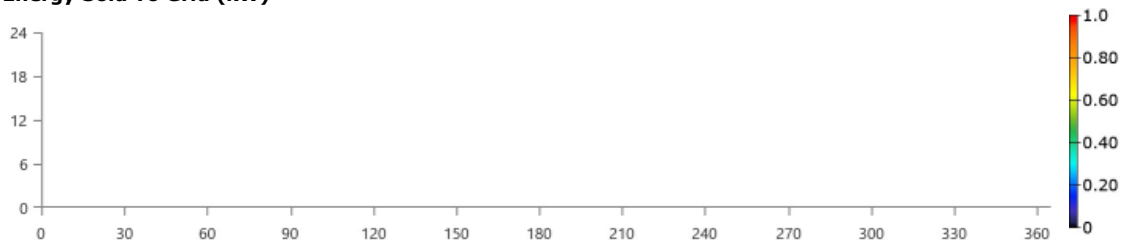
Grid rate: All

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge	Demand Charge
January	256,386	0	256,386	492	kr160,703	kr26,076
February	233,166	0	233,166	504	kr94,619	kr26,712
March	262,610	0	262,610	492	kr141,757	kr19,680
April	246,947	0	246,947	485	kr130,339	kr19,392
May	251,054	0	251,054	506	kr123,468	kr20,256
June	244,910	0	244,910	482	kr121,426	kr19,272
July	239,432	0	239,432	467	kr122,781	kr18,672
August	245,776	0	245,776	476	kr138,323	kr19,032
September	244,751	0	244,751	488	kr144,844	kr19,512
October	267,788	0	267,788	500	kr137,857	kr19,992
November	259,989	0	259,989	502	kr139,302	kr26,585
December	264,525	0	264,525	514	kr149,933	kr27,221
Annual	3,017,334	0	3,017,334	514	kr1.61M	kr262,402

Energy Purchased From Grid (kW)



Energy Sold To Grid (kW)



Tillegg C

Simuleringsrapport: Modell med PV



Author: Ingvild Skaftun

Location: Havnegata 12, 7010 Trondheim, Norway (63°26.4'N, 10°24.0'E)

Total Net Present Cost: kr 40,029,360.00

Levelized Cost of Energy (kr/kWh): kr 0.737

Notes: Modell og simulering av elektrisk forbruk ved Pirbadet dersom 600 kW PV installeres.

Sensitivity variable values for this simulation

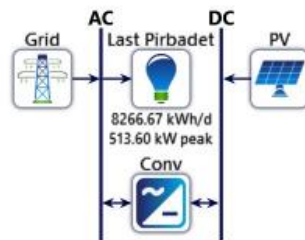
Variable	Value	Unit
Expected Inflation Rate	2.20	%
Nominal Discount Rate	5.00	%



System Architecture

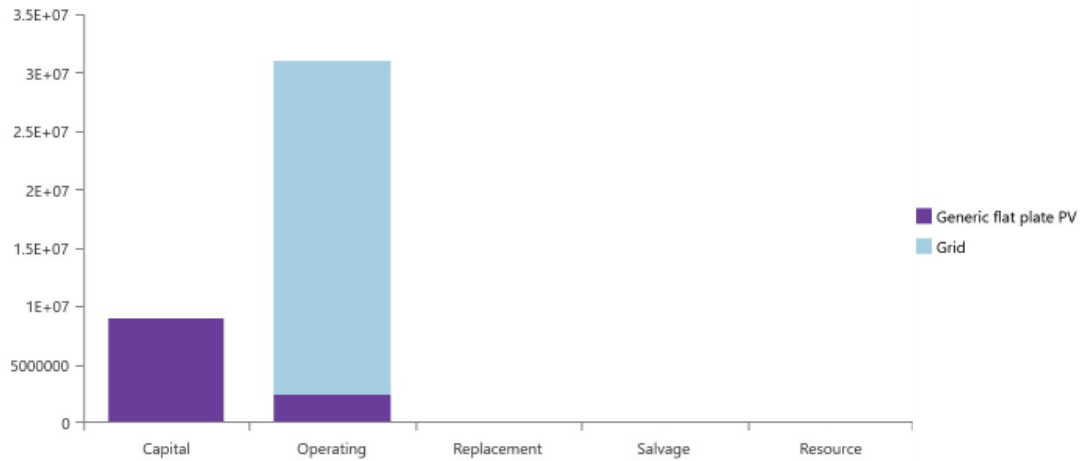
Component	Name	Size	Unit
PV	Generic flat plate PV	600	kW
System converter	Generic large, free converter	9,999,999	kW
Grid	Grid	999,999	kW
Dispatch strategy	HOMER Cycle Charging		

Schematic





Cost Summary



Net Present Costs

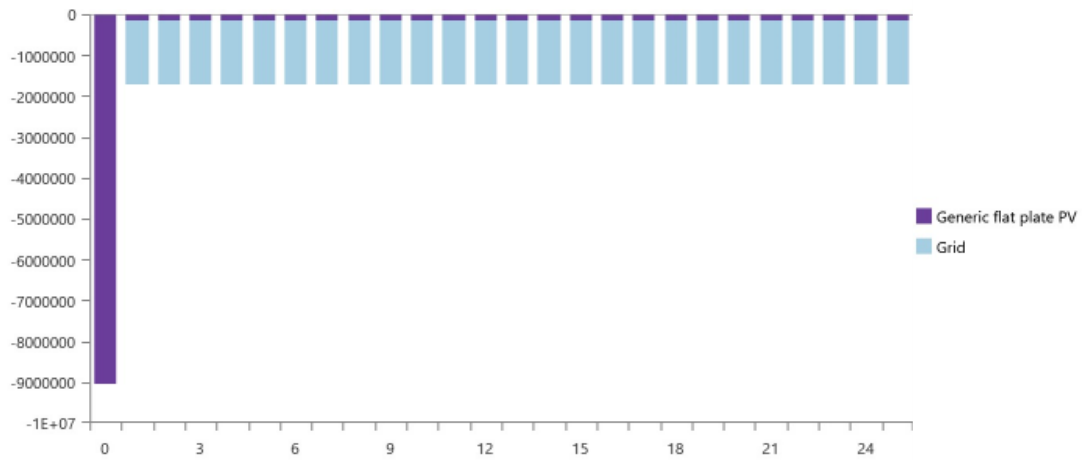
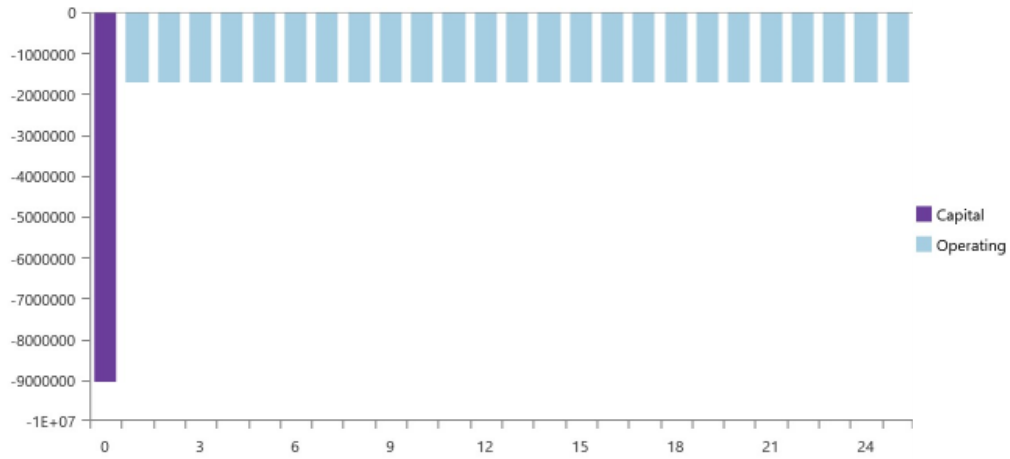
Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Generic flat plate PV	kr9.00M	kr2.42M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr11.4M
Grid	kr0.00	kr28.6M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr28.6M
System	kr9.00M	kr31.0M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr40.0M

Annualized Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Generic flat plate PV	kr501,977	kr135,000	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr636,977
Grid	kr0.00	kr1.60M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr1.60M
System	kr501,977	kr1.73M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr2.23M



Cash Flow





Electrical Summary

Excess and Unmet

Quantity	Value	Units
Excess Electricity	0	kWh/yr
Unmet Electric Load	0	kWh/yr
Capacity Shortage	0	kWh/yr

Production Summary

Component	Production (kWh/yr)	Percent
Generic flat plate PV	544,931	17.8
Grid Purchases	2,510,417	82.2
Total	3,055,348	100

Consumption Summary

Component	Consumption (kWh/yr)	Percent
AC Primary Load	3,017,334	99.6
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Grid Sales	10,767	0.356
Total	3,028,101	100

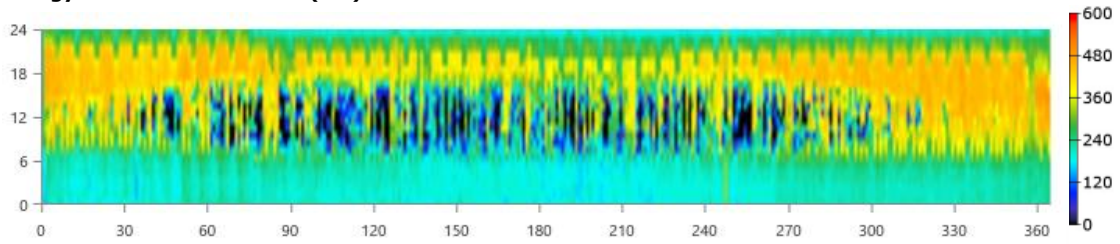


Grid: Grid

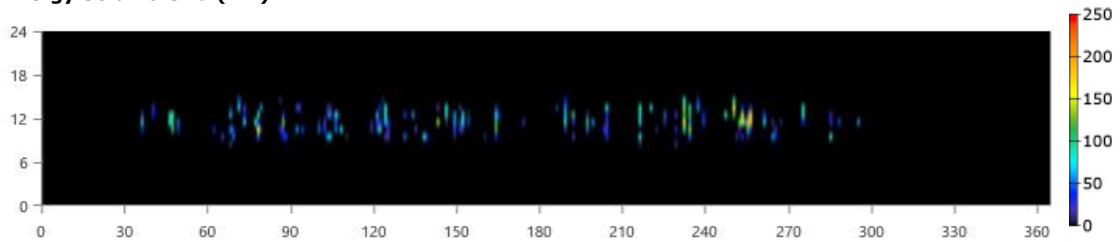
Grid rate: All

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge	Demand Charge
January	249,656	0	249,656	492	kr156,485	kr26,076
February	206,641	838	205,803	492	kr83,855	kr26,076
March	211,499	1,399	210,100	492	kr114,167	kr19,680
April	183,167	906	182,260	469	kr96,675	kr18,768
May	178,795	1,495	177,300	458	kr87,931	kr18,324
June	179,027	729	178,298	464	kr88,762	kr18,575
July	176,701	979	175,722	437	kr90,612	kr17,481
August	187,557	1,855	185,701	449	kr105,557	kr17,954
September	191,250	2,102	189,147	488	kr113,182	kr19,512
October	232,924	463	232,461	485	kr119,909	kr19,416
November	250,362	0	250,362	497	kr134,144	kr26,330
December	262,839	0	262,839	514	kr148,977	kr27,221
Annual	2,510,417	10,767	2,499,650	514	kr1.34M	kr255,413

Energy Purchased From Grid (kW)



Energy Sold To Grid (kW)





Compare Economics

IRR (%): **N/A**

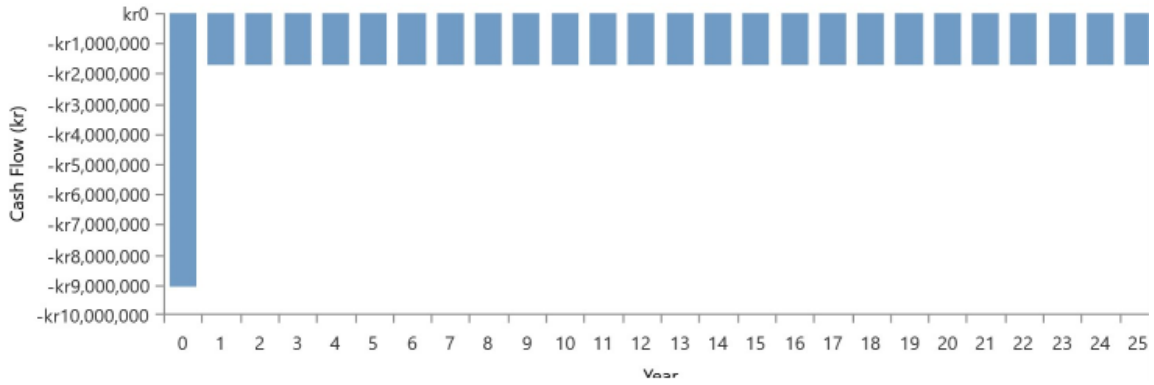
Discounted payback (yr): **N/A**

Simple payback (yr): **N/A**

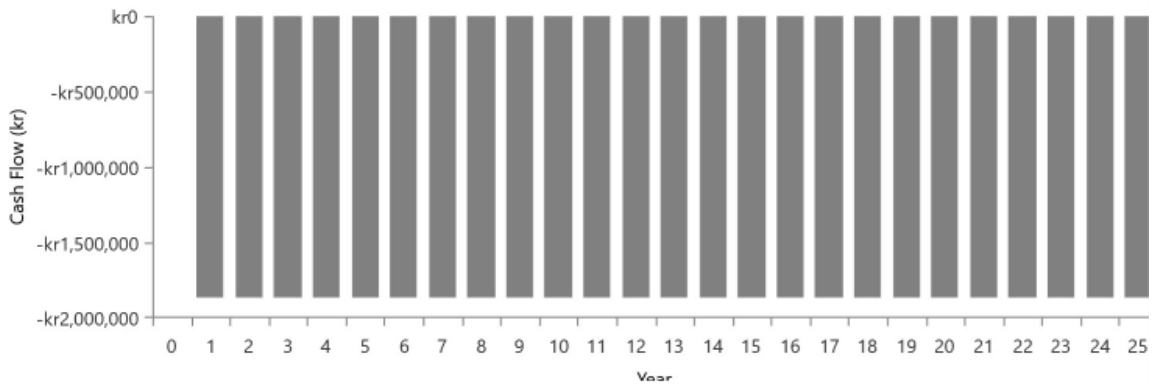
	Base Case	Current System
Net Present Cost	kr33.5M	kr40.0M
CAPEX	kr0.00	kr9.00M
OPEX	kr1.87M	kr1.73M
LCOE (per kWh)	kr0.619	kr0.737
CO2 Emitted (kg/yr)	1,906,955	1,586,584
Fuel Consumption (L/yr)	0	0



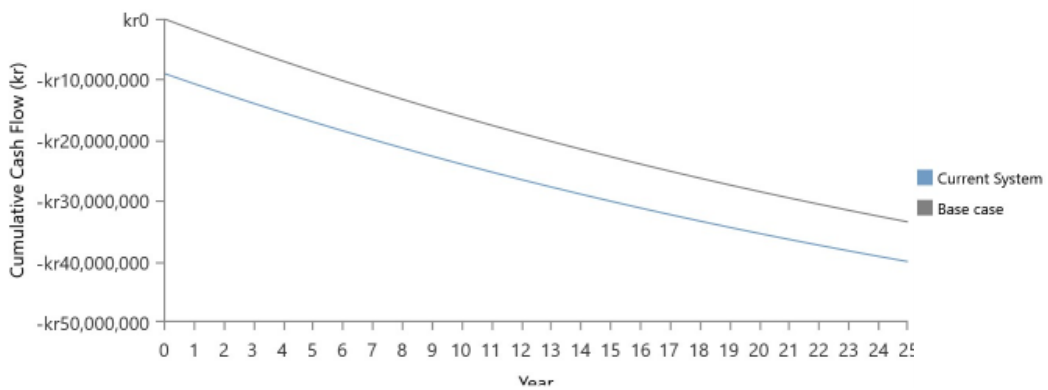
Current Annual Nominal Cash Flows



Base Case Annual Nominal Cash Flows



Cumulative Discounted Cash Flows





PV: Generic flat plate PV

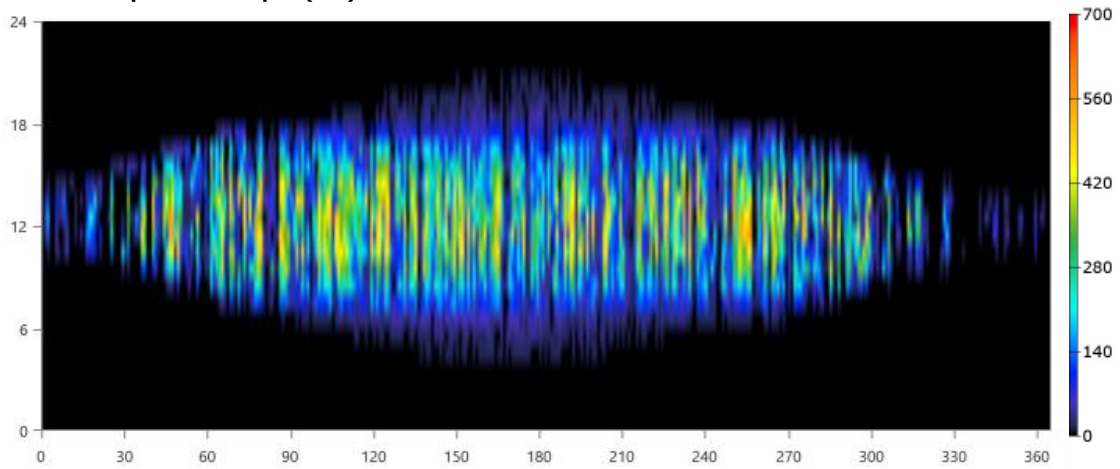
Generic flat plate PV Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	619	kW
PV Penetration	18.1	%
Hours of Operation	4,378	hrs/yr
Levelized Cost	1.17	kr/kWh

Generic flat plate PV Statistics

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	600	kW
Mean Output	62.2	kW
Mean Output	1,493	kWh/d
Capacity Factor	10.4	%
Total Production	544,931	kWh/yr

Generic flat plate PV Output (kW)





Converter: Generic large, free converter

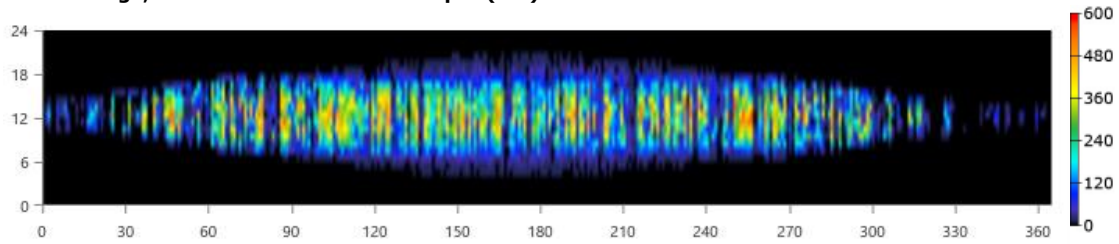
Generic large, free converter Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	4,378	hrs/yr
Energy Out	517,684	kWh/yr
Energy In	544,931	kWh/yr
Losses	27,247	kWh/yr

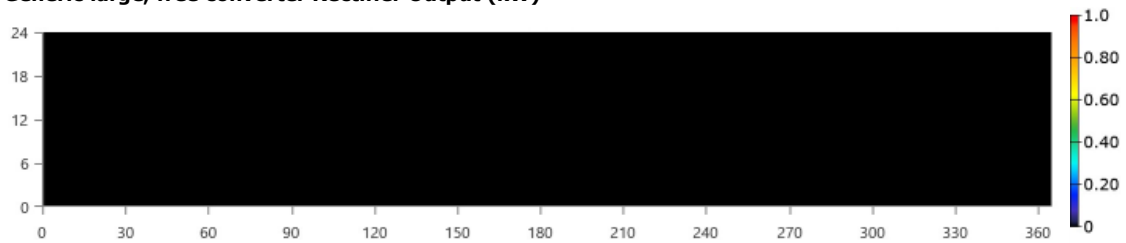
Generic large, free converter Statistics

Quantity	Value	Units
Capacity	9,999,999	kW
Mean Output	59.1	kW
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	588	kW
Capacity Factor	0.000591	%

Generic large, free converter Inverter Output (kW)



Generic large, free converter Rectifier Output (kW)



Tillegg D

Simuleringsrapport: Modell med batterilagring



Author: Ingvild Skaftun

Location: Havnegata 12, 7010 Trondheim, Norway (63°26.4'N, 10°24.0'E)

Total Net Present Cost: kr 37,228,300.00

Levelized Cost of Energy (kr/kWh): kr 0.688

Notes: Modell og simulering av elektrisk forbruk ved Pirbadet dersom en 450 kW begrensning eksisterer på uttak fra grid og batteri installeres for å levere når grid er utilstrekkelig.

Sensitivity variable values for this simulation

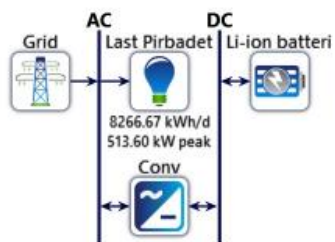
Variable	Value	Unit
Expected Inflation Rate	2.20	%
Nominal Discount Rate	5.00	%



System Architecture

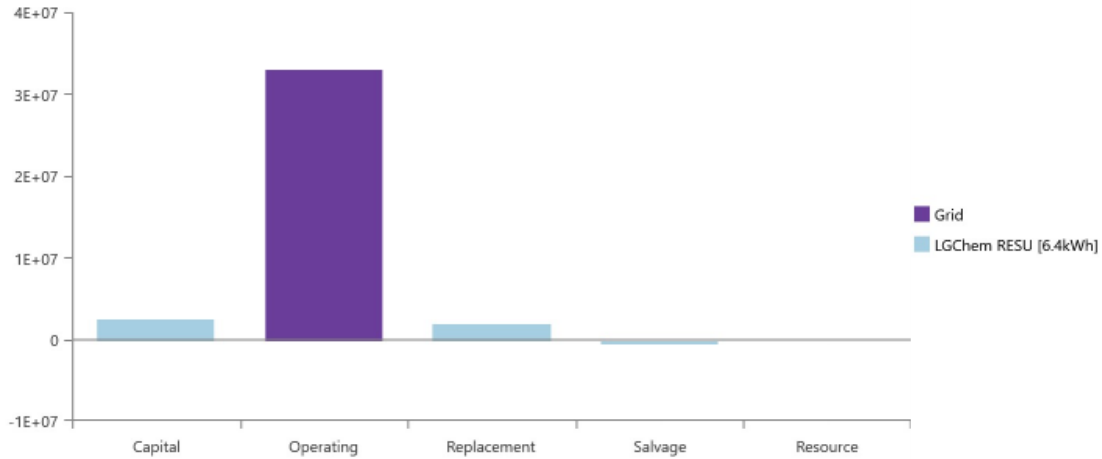
Component	Name	Size	Unit
Storage	LGChem RESU [6.4kWh]	59	strings
System converter	Generic large, free converter	9,999,999	kW
Grid	Grid	450	kW
Dispatch strategy	HOMER Cycle Charging		

Schematic





Cost Summary



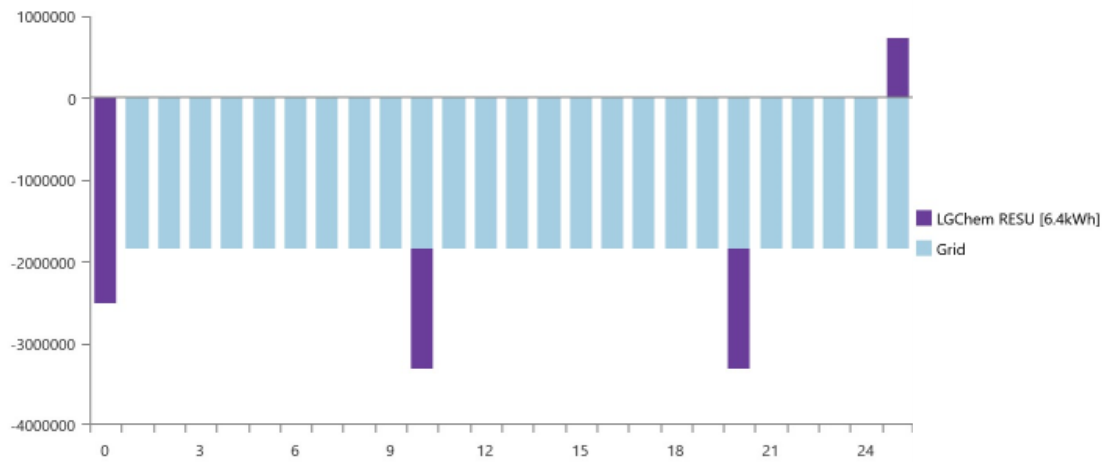
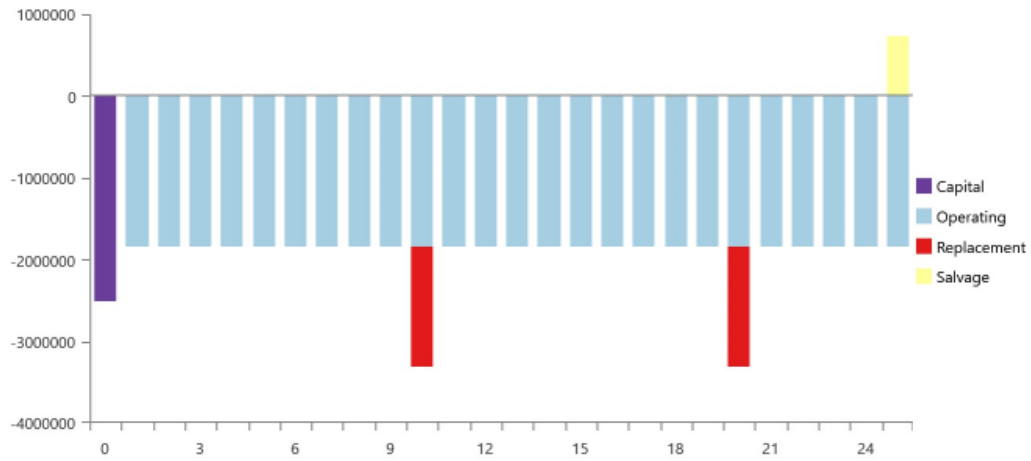
Net Present Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Grid	kr0.00	kr33.1M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr33.1M
LGChem RESU [6.4kWh]	kr2.51M	kr0.00	kr1.98M	-kr375,234	kr0.00	kr4.12M
System	kr2.51M	kr33.1M	kr1.98M	-kr375,234	kr0.00	kr37.2M

Annualized Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Grid	kr0.00	kr1.85M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr1.85M
LGChem RESU [6.4kWh]	kr139,856	kr0.00	kr110,698	-kr20,929	kr0.00	kr229,626
System	kr139,856	kr1.85M	kr110,698	-kr20,929	kr0.00	kr2.08M

Cash Flow





Electrical Summary

Excess and Unmet

Quantity	Value	Units
Excess Electricity	0	kWh/yr
Unmet Electric Load	568	kWh/yr
Capacity Shortage	2,947	kWh/yr

Production Summary

Component	Production (kWh/yr)	Percent
Grid Purchases	3,021,103	100
Total	3,021,103	100

Consumption Summary

Component	Consumption (kWh/yr)	Percent
AC Primary Load	3,016,766	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	3,016,766	100

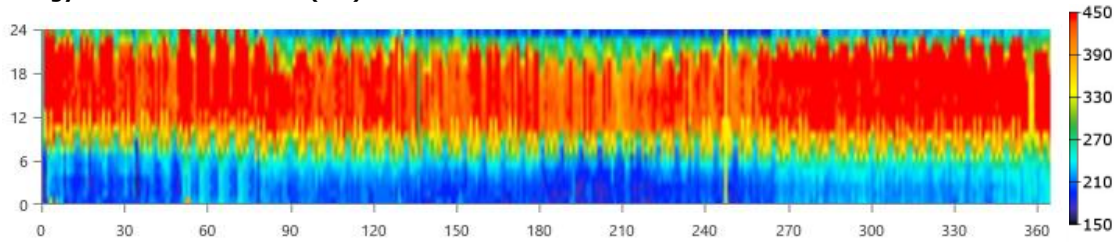


Grid: Grid

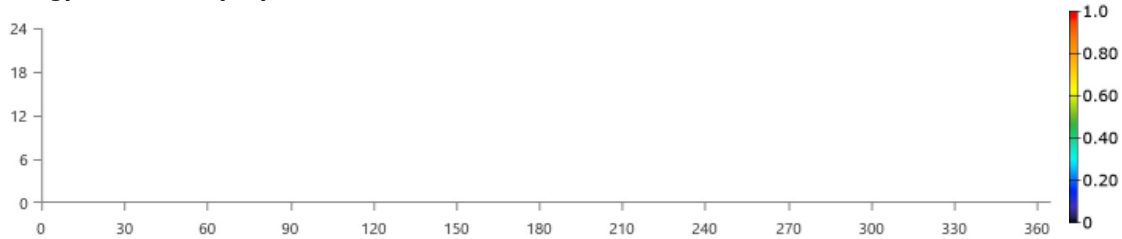
Grid rate: All

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge	Demand Charge
January	256,735	0	256,735	450	kr160,922	kr23,850
February	233,342	0	233,342	450	kr94,690	kr23,850
March	263,103	0	263,103	450	kr142,023	kr18,000
April	247,109	0	247,109	450	kr130,424	kr18,000
May	251,121	0	251,121	450	kr123,501	kr18,000
June	245,142	0	245,142	450	kr121,541	kr18,000
July	239,453	0	239,453	450	kr122,791	kr18,000
August	245,847	0	245,847	450	kr138,363	kr18,000
September	245,016	0	245,016	450	kr145,000	kr18,000
October	268,445	0	268,445	450	kr138,196	kr18,000
November	260,589	0	260,589	450	kr139,623	kr23,850
December	265,201	0	265,201	450	kr150,316	kr23,850
Annual	3,021,103	0	3,021,103	450	kr1.61M	kr239,400

Energy Purchased From Grid (kW)



Energy Sold To Grid (kW)





Converter: Generic large, free converter

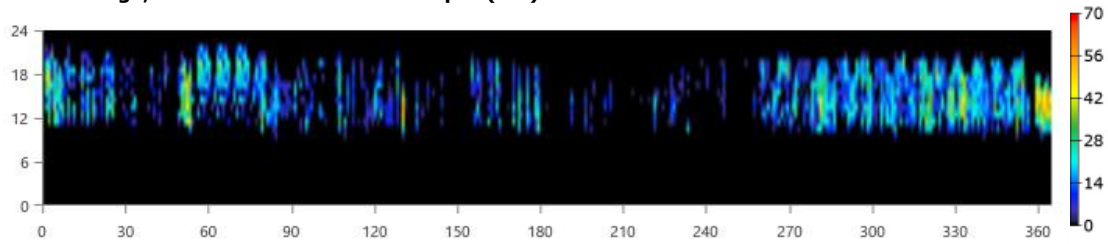
Generic large, free converter Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	1,808	hrs/yr
Energy Out	26,069	kWh/yr
Energy In	27,441	kWh/yr
Losses	1,372	kWh/yr

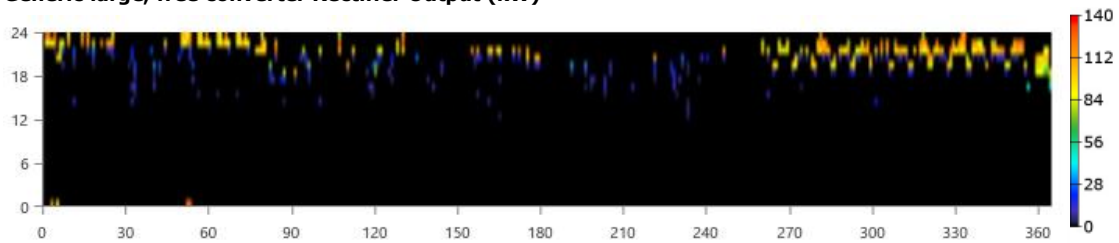
Generic large, free converter Statistics

Quantity	Value	Units
Capacity	9,999,999	kW
Mean Output	2.98	kW
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	63.6	kW
Capacity Factor	0.0000300	%

Generic large, free converter Inverter Output (kW)



Generic large, free converter Rectifier Output (kW)





Storage: LGChem RESU [6.4kWh]

LGChem RESU [6.4kWh] Properties

Quantity	Value	Units
Batteries	59.0	qty.
String Size	1.00	batteries
Strings in Parallel	59.0	strings
Bus Voltage	51.1	V

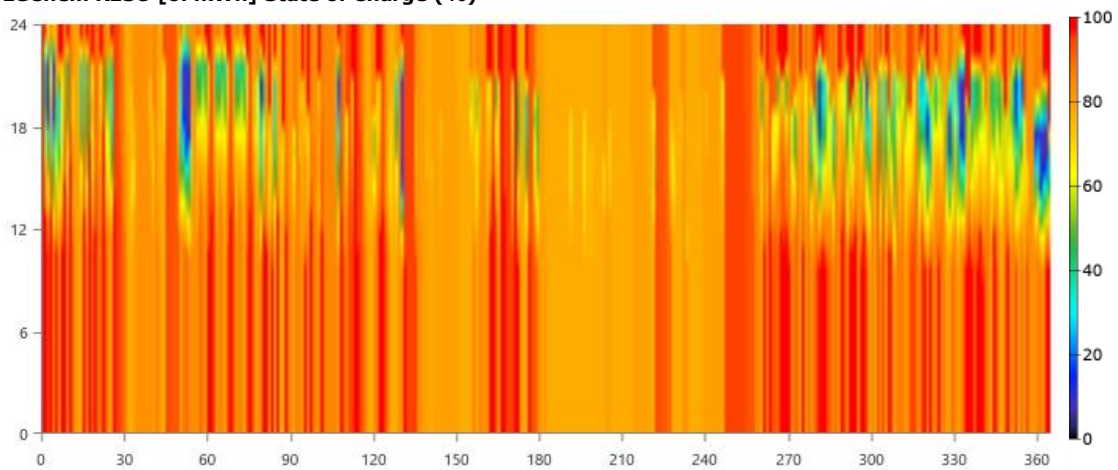
LGChem RESU [6.4kWh] Result Data

Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0.601	kr/kWh
Energy In	28,885	kWh/yr
Energy Out	27,441	kWh/yr
Storage Depletion	0	kWh/yr
Losses	1,444	kWh/yr
Annual Throughput	28,154	kWh/yr

LGChem RESU [6.4kWh] Statistics

Quantity	Value	Units
Autonomy	0.993	hr
Storage Wear Cost	0.738	kr/kWh
Nominal Capacity	380	kWh
Usable Nominal Capacity	342	kWh
Lifetime Throughput	281,537	kWh
Expected Life	10.0	yr

LGChem RESU [6.4kWh] State of Charge (%)



Tillegg E

Simuleringsrapport: Modell med PV og batterilagring



Author: Ingvild Skaftun

Location: Havnegata 12, 7010 Trondheim, Norway (63°26.4'N, 10°24.0'E)

Total Net Present Cost: kr 42,445,320.00

Levelized Cost of Energy (kr/kWh): kr 0.782

Notes: Modell og simulering av elektrisk forbruk på Pirbadet dersom 600 kW PV og 40 batterier installeres. Gridbegrensninger er satt per måned slik at 40 batterier skal levere nødvendig effekt når grid er utilstrekkelig.

Sensitivity variable values for this simulation

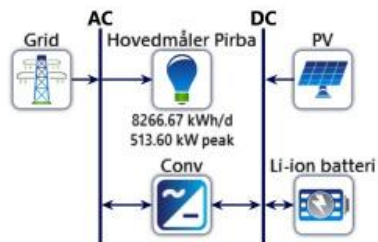
Variable	Value	Unit
Expected Inflation Rate	2.20	%
Nominal Discount Rate	5.00	%



System Architecture

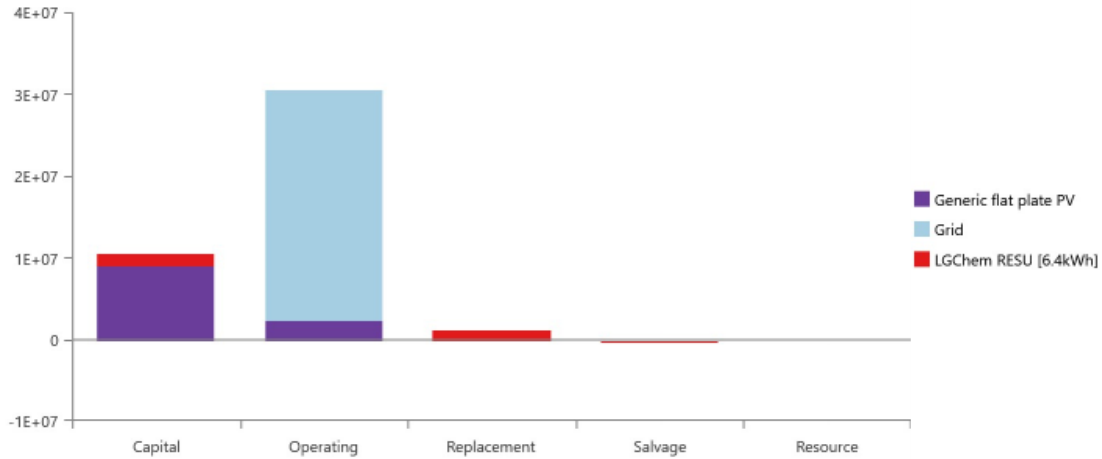
Component	Name	Size	Unit
PV	Generic flat plate PV	600	kW
Storage	LGChem RESU [6.4kWh]	40	strings
System converter	Generic large, free converter	9,999,999	kW
Grid	Grid (Jan:460.000000 Feb:460.000000 Mar:445.000000 Apr:420.000000 May:400.000000 Jun:400.000000 Jul:400.000000 Aug:400.000000 Sep:440.000000 Oct:460.000000 Nov:475.000000 Dec:485.000000 kW)	0	
Dispatch strategy	HOMER Cycle Charging		

Schematic





Cost Summary



Net Present Costs

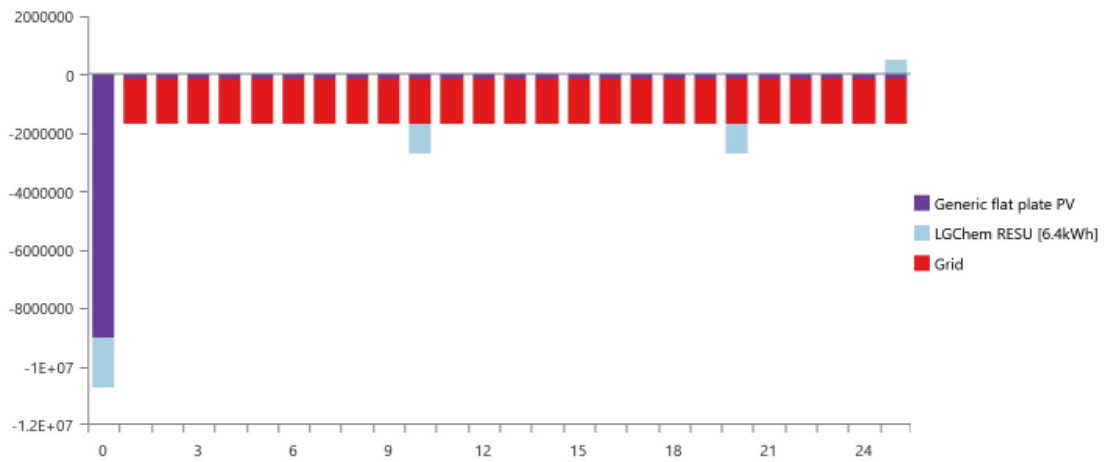
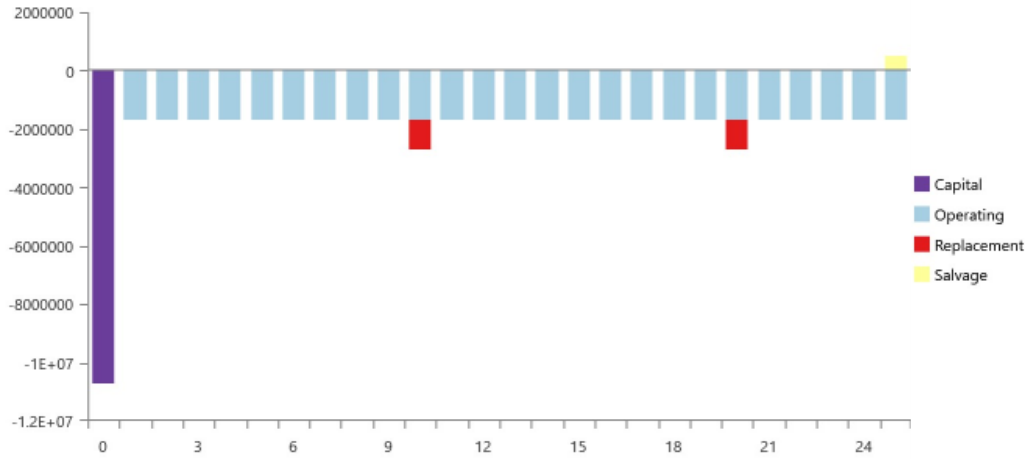
Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Generic flat plate PV	kr9.00M	kr2.42M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr11.4M
Grid	kr0.00	kr28.2M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr28.2M
LGChem RESU [6.4kWh]	kr1.70M	kr0.00	kr1.35M	-kr254,396	kr0.00	kr2.79M
System	kr10.7M	kr30.7M	kr1.35M	-kr254,396	kr0.00	kr42.4M

Annualized Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Generic flat plate PV	kr501,977	kr135,000	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr636,977
Grid	kr0.00	kr1.57M	kr0.00	kr0.00	kr0.00	kr1.57M
LGChem RESU [6.4kWh]	kr94,818	kr0.00	kr75,050	-kr14,189	kr0.00	kr155,679
System	kr596,795	kr1.71M	kr75,050	-kr14,189	kr0.00	kr2.37M



Cash Flow





Electrical Summary

Excess and Unmet

Quantity	Value	Units
Excess Electricity	0	kWh/yr
Unmet Electric Load	143	kWh/yr
Capacity Shortage	3,016	kWh/yr

Production Summary

Component	Production (kWh/yr)	Percent
Generic flat plate PV	544,931	17.8
Grid Purchases	2,510,856	82.2
Total	3,055,787	100

Consumption Summary

Component	Consumption (kWh/yr)	Percent
AC Primary Load	3,017,191	99.7
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Grid Sales	9,708	0.321
Total	3,026,898	100

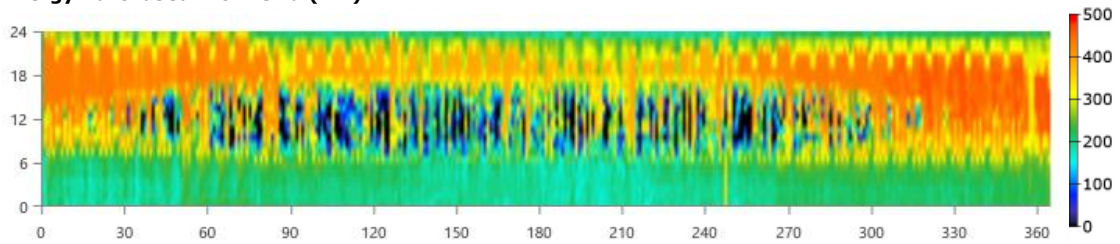


Grid: Grid

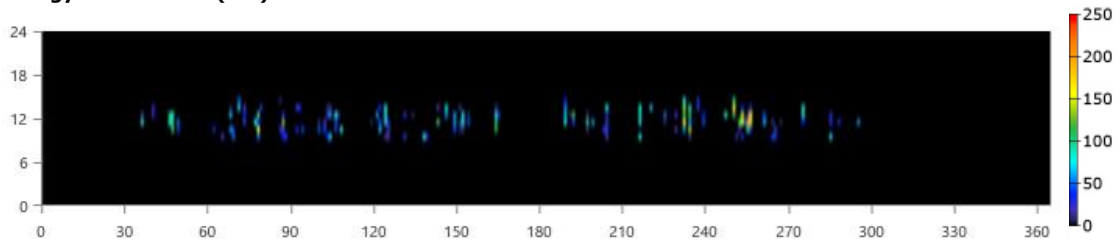
Grid rate: All

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge	Demand Charge
January	249,747	0	249,747	460	kr156,541	kr24,380
February	206,698	768	205,930	460	kr83,878	kr24,380
March	211,643	1,282	210,361	445	kr114,245	kr17,800
April	183,186	774	182,412	420	kr96,686	kr16,800
May	178,768	1,219	177,550	400	kr87,918	kr16,000
June	179,001	629	178,372	400	kr88,749	kr16,000
July	176,637	869	175,768	400	kr90,579	kr16,000
August	187,540	1,676	185,863	400	kr105,547	kr16,000
September	191,357	2,051	189,307	440	kr113,245	kr17,600
October	232,996	440	232,556	460	kr119,946	kr18,400
November	250,398	0	250,398	475	kr134,163	kr25,175
December	262,885	0	262,885	485	kr149,003	kr25,705
Annual	2,510,856	9,708	2,501,148	485	kr1.34M	kr234,240

Energy Purchased From Grid (kW)



Energy Sold To Grid (kW)



Tillegg F

Prosjektoppgave

Denne masteroppgaven bygger videre på deler av en prosjektoppgave, “Effektforbruk ved svømmeanlegg (Pirbadet)” av Ingvild Skaftun, gjennomført høsten 2018 ved Institutt for teknisk kybernetikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Grunnet endret krav til innlevering av masteroppgave, er ikke prosjektoppgaven lagt ved denne masteroppgaven.

Dersom det er et ønske å lese prosjektoppgaven, kan Institutt for teknisk kybernetikk kontaktes. Forfatter (Ingvild Skaftun) gir herved tillatelse til at prosjektoppgaven kan deles videre.


Ingvild Skaftun

