

Nina Sørmo Moe
Maren Nærland
Miriam Eikrem Nussbaum

Løsninger for øydrift med fornybare energikilder i Arktis

Isfjord Radio, bakkemontert solcelleanlegg og vertikale vindturbiner

Mai 2023

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk

Bacheloroppgave

2023



Nina Sørmo Moe
Maren Nærland
Miriam Eikrem Nussbaum

Løsninger for øydrift med fornybare energikilder i Arktis

Isfjord Radio, bakkemontert solcelleanlegg og vertikale vindturbiner

Bacheloroppgave
Mai 2023

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Løsninger for øydrift med fornybare energikilder i Arktis

Isfjord Radio, bakkemontert solcelleanlegg og vertikale vindturbiner

Nina Sørmo Moe, Miriam Eikrem Nussbaum og Maren Nærland

Gradering: Åpen

Bachelor i ingeniørfag, fornybar energi

Innlevert: 19.05.23

Veileder: Alemayehu Gebremedhin

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Oppgavens tittel: Løsninger for øydrift med fornybare energikilder i Arktis	Dato: 19.05.23		
	Antall sider: 81		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave:	x
Navn: Nina Sørmo Moe, Miriam Eikrem Nussbaum og Maren Nærland			
Veileder: Alemayehu Gebremedhin			
Eksterne faglige kontakter/veiledere: Sjur Narten Christiansen (Kverneland Energi)			

Sammendrag:

Oppvarmingen i Arktis har de siste 40 årene vært dobbelt så høy sammenlignet med resten av verden. Klimaendringene fører til lokale og globale konsekvenser for natur og dyreliv. Dette i kombinasjon med energiomleggingen på Svalbard stiller krav til fornybare energiløsninger. Denne oppgaven undersøker hvordan sol- og vindkraft i kombinasjon med batterilagring kan bidra til dieselreduksjon fra aggregat på Isfjord Radio.

Problemstillingene omhandler optimalisering av et bakkemontert solcelleanlegg med hensyn på unngåelse av snøakkumulering, batterilagring, VAWT, økonomisk vs. klimamessig lønnsomhet og FNs bærekraftsmål. De blir besvart basert på resultatene fra tre ulike scenarier. Studien har en kvantitativ tilnærming der data består av utdelt materiale fra oppdragsgiver og offentlige kilder. Litteratur er hentet fra tidligere forskning og teori. For analyse ble programvarene PVsyst og MatLab benyttet.

For å unngå snøakkumulering bør solcellepanelene stå parallelt med vindretningen. Dette tilsvarer en asimutvinkel på -42° på Isfjord Radio. For scenario 1, bakkemontert solcelleanlegg på 198 kWp, er den mest optimale helningsvinkelen 20° . For scenario 2, scenario 1 med batterilagring, er den mest optimale helningsvinkelen 40° . For scenario 3, scenario 2 med vindkraft, vil installasjon av VAWT fungere som en komplementær bidragsyter for solkraft. Produksjonen bidrar til å dekke deler av forbruket i mørketiden. Dieselforbruket på Isfjord Radio kan på det meste reduseres med 39 242 L/år, som tilsvarer et kutt i klimagassutslipp på 32,9 %.

Resultatene fra NNV viste at ingen scenarier er økonomisk lønnsomme, men dersom det er mulig bør ikke økonomiske hensyn gå foran miljø- og samfunnsmessige gevinster. Resultatene indikerer at vind- og solkraft har positive innvirkninger på lokalt miljø og ren energiproduksjon. Dette bidrar til å nå bærekraftsmål 7 og 13. Likevel kan det gå på bekostning av bærekraftsmål 12 og 15. Fornybar energi kan negativt påvirke dyreliv og natur som ved arealbeslag og inngrep i jordsmonn. Sol- og vindkraft i Arktis krever innovative løsninger som «lukkede» VAWT og solcellepaneler løftet opp fra bakken. Omlegging til fornybar energi krever også ansvarlig forbruk og produksjon av komponenter.

Stikkord:

Øydriftssamfunn i Arktis
Bakkemontert solcelleanlegg
Vertikale vindturbiner
Klimagassutslipp
Drivstoffreduksjon

Forkortelser

AC - Vekselstrøm

DC - Likestrøm

D&V - Drift og vedlikehold

HAWT - Horisontalakslet vindturbin

LCOE - Energikostnad over levetiden

LCOS - Lagringskostnad over levetiden

MPPT - Maksimal effektpunktsproing

NKS - Norsk Klimaservicesenter

NNV - Netto nåverdi

NOK - Norsk krone

NV - Nåverdi

NVE - Norges vassdrags- og energidirektorat

PV - Fotovoltaisk

PR - Ytelsesforhold

SNL - Store Norske Leksikon

SNSK - Store Norske Spitsbergen Kullkompani

SOC - Ladetilstand

STC - Standard testbestingelser

TF - Transposisjonsfaktor

USD - Amerikansk dollar

VAWT - Vertikalakslet vindturbin

Symbolliste

Symbol	Enhet	Forklaring
E	$[kWh]$	Energiproduksjon
E_{Avail}	$[kWh/h]$	Tilgjengelig produsert solenergi (etter vekselretter- og vekselstrømstap)
E_{FrGrid}	$[kWh/h]$	Energi trekt fra overliggende nett til internt forbruk
E_{Grid}	$[kWh/h]$	Overskuddsenergien injisert til oversliggende nett (etter vekselretter- og vekselstrømstap)
E_{Solar}	$[kWh/h]$	Produsert solenergi som er forbrukt internt
E_{User}	$[kWh/h]$	Forbruket (lasten til forbruker)
SFC	$[g/kWh]$	Spesifikt drivstofforbruk
V	$[L]$	Volum
ρ	$[g/L]$	Tetthet

Forord

Denne bacheloroppgaven representerer siste del av bachelor i ingeniørfag, fornybar energi, ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Den tar for seg et casestudie for Isfjord Radio på Svalbard i Arktis. Isfjord Radio er et hotell og stasjon for kritisk kommunikasjonsinfrastruktur. Det driftes i øydrift og er for tiden i en energiomleggingsprosess for å erstatte diesellaggregat med fornybare energikilder. Gruppen hadde kontakt med oppdragsgiver allerede i november 2022, men oppgaven ble for fullt utarbeidet våren 2023.

Fortrinnsvis vil vi takke Kverneland Energi og spesielt ekstern veileder Sjur Narten Christiansen for tidsbruk, dokumenter og faglig innspill. Vi vil også takke vår interne veileder Alemayehu Gebremedhin for tilgjengelighet og tilbakemeldinger under oppgaveperioden.

Gjøvik, Mai 2023

Nina S. Moe

Nina Sørmo Moe

Miriam E. Nussbaum

Miriam Eikrem Nussbaum

Maren Nærland

Maren Nærland

Abstract

The warming in the Arctic has been twice as high in the last 40 years compared to the rest of the world. Climate change leads to local and global consequences for nature and wildlife. This, in combination with the energy transition on Svalbard, requires renewable energy solutions. This thesis investigates how solar and wind power in combination with battery storage can contribute to diesel reduction from generators at Isfjord Radio.

The issues concern the optimization of a ground-mounted solar panel system with regard to the avoidance of snow accumulation, battery storage, VAWT, economic vs. climate-related profitability and the UN's sustainability goals. They are answered based on the results from three different scenarios. The study has a quantitative approach where data consists of distributed material from the client and public sources. Literature is taken from previous research and theory. The software PVsyst and MatLab were used for analysis.

To avoid snow accumulation, the solar panels should be parallel to the wind direction. This corresponds to an azimuth angle of -42° at Isfjord Radio. For scenario 1, ground-mounted solar system of 198 kWp, the most optimal tilt angle is 20° . For scenario 2, scenario 1 with battery storage, the most optimal tilt angle is 40° . For scenario 3, scenario 2 with wind power, installation of VAWT will act as a complementary contributor to solar power. The production helps to cover part of the consumption during the polar night. Diesel consumption at Isfjord Radio can at most be reduced by 39,242 L/year, which corresponds to a cut in greenhouse gas emissions of 32.9 %.

The results from NNV showed that no scenarios are economically profitable. If possible, financial considerations should not come before environmental and social gains. The results indicate that wind and solar power have positive impacts on the local environment and clean energy production. This contributes to achieving sustainability goals 7 and 13. Nevertheless, it may come at the expense of sustainability goals 12 and 15. Renewable energy can negatively affect wildlife and nature, such as land confiscation and soil encroachment. Solar and wind power in the Arctic requires innovative solutions such as "closed" VAWT and solar panels lifted from the ground. Conversion to renewable energy also requires responsible consumption and production of components.

Innholdsfortegnelse

Forkortelser	II
Symbolliste	III
Forord	IV
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	IX
Figurliste	X
Tabelliste	XII
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.1.1 Bærekraft	2
1.1.2 Tidligere studier	3
1.2 Mål og omfang	5
1.2.1 Avgrensninger og rammer	5
1.2.2 Problemstillinger og scenario	6
1.3 Arbeidets struktur	7
2 Teori	9
2.1 Diesellaggregat	9
2.2 Solenergi	10
2.3 Solceller	11
2.3.1 Virkemåte	11
2.3.2 Komponenter i et solcelleanlegg	13
2.3.3 Systemtap	13
2.3.4 Bakkemontering	15
2.4 Optimalisering av solcelleanlegg	15
2.4.1 Horisontlinjetegning	16
2.4.2 Analysing av parametere i PVsyst	17

2.5	Batterilagringsystem	18
2.5.1	Relevante parametre	18
2.6	Vindenergi	19
2.6.1	Snødrift	19
2.7	Vindturbin	20
2.7.1	Horisontalakslet	20
2.7.2	Vertikalakslet	21
2.7.3	Plassering av vindturbiner	22
2.7.4	Forventet produksjon	23
2.8	Etiske aspekter	23
2.9	Klimagassutslipp	24
2.10	Økonomi	25
2.10.1	Nåverdiberegninger	25
2.10.2	Energi- og lagringskostnader over levetiden	26
3	Casestudie	28
3.1	Isfjord Radio	28
3.1.1	Energiomleggingen til nå	29
3.1.2	Konsekvensutredning	29
3.2	Vær, klima og landskap	31
3.2.1	Solstråling	31
3.2.2	Vind	32
3.2.3	Temperatur	33
3.2.4	Nedbør, albedo og snøakkumulering	34
3.3	Risikovurdering	35
3.4	Spesifikasjoner	35
3.4.1	Energiforbruk	35
3.4.2	Dieselaggregat	35
3.4.3	Solcelleanlegg	36
3.4.4	Batterier	38
3.4.5	Vindenergi	38
3.4.6	Det elektriske anlegget	39
3.4.7	Eksisterende styringssystem	39

3.4.8	Kostnadsestimater	40
4	Metode	42
4.1	Forskningsmetode	42
4.2	Dokument- og datainnsamling	43
4.3	Verifisering og validitet	43
4.3.1	Validering av PVsyst	43
4.3.2	Verifisering av beregningsmetode for VAWT	44
4.4	Analyse	47
4.4.1	Forbehandling av forbruksdata	47
4.4.2	Scenario 1	47
4.4.3	Scenario 2	51
4.4.4	Scenario 3	53
4.4.5	Beregning dieselforbruk	55
4.4.6	Beregninger klimagassutslipp	55
4.4.7	Beregninger økonomi	56
5	Resultater	59
5.1	Scenario 1	59
5.2	Scenario 2	61
5.3	Scenario 3	63
5.4	Dieselforbruk	65
5.5	Klimagassutslipp	65
5.6	Økonomi	66
6	Diskusjon og analyse	68
6.1	Scenario 1	68
6.2	Scenario 2	69
6.3	Scenario 3	70
6.4	Klimagassutslipp	71
6.5	Økonomi	72
6.6	Miljø- og samfunnsmessige drøftinger	74
6.7	Feilkilder	75
6.8	Videre arbeid	79

7 Konklusjon	80
Referanser	82
Vedlegg	96

Figurliste

1.1	<i>FNs bærekraftsmål [1]</i>	3
1.2	<i>Flytskjema av arbeidsprosessen</i>	8
2.1	<i>Solstråling i W/m^2 som funksjon av tid. Arealet under kurven i oransje representerer solinnstrålingen i J/m^2 [2].</i>	10
2.2	<i>Komponenter i et solcellepanel [3]</i>	11
2.3	<i>Skjematisk figur av en solcellemodul bestående av N_{pm} grener i parallell og N_{sm} celler i serie [2].</i>	12
2.4	<i>I-V-kurve for en solcelle [4]</i>	14
2.5	<i>Helning- og asimutvinkel [5]</i>	16
2.6	<i>Generell horisontlinjetegning i PVsyst [6]</i>	17
2.7	<i>Systemoppførsel for et nett-tilknyttet solcelleanlegg [7]</i>	18
2.8	<i>Former for snødrift. Kryp (creep) til venstre, saltasjon (saltation) i midten og suspensjon (suspension) til høyre [8].</i>	20
2.9	<i>Illustrasjon av horisontalakslet vindturbin med komponenter [9].</i>	21
2.10	<i>Illustrasjon av ulike typer VAWT. Savonius (a), eggeformet darrieus (b), H-formet darrieus (c) og helix-formet (d) [10].</i>	22
3.1	<i>Isfjord Radio og området rundt [11]</i>	28
3.2	<i>Kart over Kapp Linné fuglereservat [12].</i>	30
3.3	<i>Global horisontal solstråling [W/m^2] (Vedlegg A)</i>	31
3.4	<i>Utklipp av terrenget rundt Isfjord Radio. Markert avstand fra plasseringen til det planlagte bakkemonterte anlegget og de to største fjellene i nærheten [11].</i>	32
3.5	<i>Vindmålinger fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].</i>	32
3.6	<i>Vindrose med frekvensfordeling for Isfjord Radio i perioden 1.2022-1.2023 [14]</i>	33
3.7	<i>Temperaturmålinger fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].</i>	33
3.8	<i>Nedbør fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].</i>	34
3.9	<i>Årlig energiforbruk gitt i timesverdier for Isfjord Radio i 2022 (Vedlegg A).</i>	35
3.10	<i>Satellittbilde over Isfjord Radio og område 2.</i>	36

3.11	<i>Trina Solar 550 Wp med tilhørende dimensjoner [15].</i>	37
3.12	<i>I-V- og P-V-kurve for Trina Solar 550 Wp ved ulik solstråling [15].</i>	37
3.13	<i>Savonius LS Helix 3.0 fra LuvSide [16]</i>	38
3.14	<i>Generelt eksempel på samhandling mellom generator og batteri med et gitt forbruk [17].</i>	39
4.1	<i>Flytskjema for metode</i>	42
4.2	<i>Den eksperimentelt bestemte effektkurven for stasjonær tilstand med steg på 1.</i>	46
4.3	<i>Energiproduksjon for mai 2015 ved hjelp av forskjellige metoder.</i>	46
4.4	<i>Frekvensen av vindretninger i 2022 på Isfjord Radio.</i>	48
4.5	<i>Plassering av solcelleanlegget i området 2. Hver rute er 5x5 m.</i>	50
4.6	<i>Frekvensen av vindhastigheter i 2022 på Isfjord Radio.</i>	53
5.1	<i>Sammenligning av helningsvinkel på 20°, 40° og 55° over ett år.</i>	59
5.2	<i>Sammenligning av horisontlinjetegning for helning på 40° og 20°.</i>	60
5.3	<i>Sammenligning av tilgjengelig solproduksjon for helning på 20° og 40°, inkludert forbruket.</i>	60
5.4	<i>Forbruk og E_{Solar} for 40° og 20° med og uten batterilagring på 403,2 kWp.</i>	62
5.5	<i>Forbruk og produksjon fra 5 og 10 vindturbiner.</i>	63
5.6	<i>Vind- og solproduksjon for 5 og 10 turbiner med og uten batterilagring.</i>	64
5.7	<i>Stolpediagram over dieselforbruk for 75% drift i L/år for 2022 og scenario 1, 2 og 3.</i>	65
5.8	<i>Stolpediagram over klimagassutslipp i tonn CO₂-ekv/år for 2022 og scenario 1, 2 og 3 fordelt over energikilder.</i>	66
5.9	<i>Netto nåverdi for scenario 1, 2 og 3.</i>	66

Tabelliste

3.1	<i>Prisestimater</i>	40
4.1	<i>Estimert og faktisk produksjon fra et eksisterende anlegg i månedesverdier.</i>	44
4.2	<i>Årsverdier for helningsimulering med asimut -42°, 198 kWp</i>	50
5.1	<i>Årsverdier for asimutsimulering for 40° og 20° helning, 198 kWp</i>	61
5.2	<i>Ulike parameter for helning 40° og 20° før og etter installering av batteri. Solcelleanlegget har asimut -42° og 198 kWp.</i>	63
5.3	<i>Ulike parameter før og etter installering av 5 og 10 vindturbiner</i>	64
5.4	<i>Kontantstrøm per år for de ulike scenarioene</i>	67
5.5	<i>Energi- og lagringskostnad over levetiden for ulike teknologier</i>	67

1 Innledning

I dette kapitlet presenteres bakgrunn og motivasjon for oppgaven, etterfulgt av mål og omfang. Derunder gjøres det rede for avgrensningene og rammene som er satt for prosjektoppgaven. Videre presenteres de sentrale problemstillingene som er utarbeidet, som skal besvares på bakgrunn av tre ulike scenarioer. Til slutt presenteres strukturen bak arbeidet.

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Siden 1980 har oppvarmingen i Arktis vært dobbelt så høy sammenlignet med resten av verden [18]. Arktis er i stor grad dekket av snø og is som har høy refleksjonsevne mot solstrålene, og dermed holder klimaet kjølig. Når snø og is smelter stiger temperaturen hurtigere. Isbreer som smelter fører til økt havnivå samtidig som Arktis minker i omfang og volum. Dette vil føre til store konsekvenser og endrede livsvilkår for mange dyrearter [19]. Blant annet vil isbjørn få problemer med jakt og å fø opp ungene sine.

I tillegg til lokale konsekvenser av oppvarmingen, viser nyere forskning en sammenheng mellom smelting av havis og økende temperaturer globalt. Det betyr at oppvarmingen av Arktis indirekte kan knyttes til ekstremvær i Nord-Amerika, Europa og Asia [19]. På bakgrunn av dette er det viktig å stoppe lokale bidrag til klimaendringene. Per dags dato driftes Svalbard på fossile energikilder som kullkraft og diesel. I 2021 kunngjorde regjeringen at kullkraftverket på Svalbard skal erstattes med mer klimavennlige løsninger [20].

Energiomleggingen er lettere sagt enn gjort, da en slik omlegging stiller andre krav til energisikkerhet og forsyning. Flere av lokalsamfunnene har ikke helårsbosetting og de har dårlig infrastruktur. Mange driftes i øydrift, som defineres som et mikronett uten tilknytning til eksternt nett [21]. Dette gjør det ekstra viktig med lokal energiforsyning. I tillegg bør det begrenses til fornybare energikilder så langt det lar seg gjøre med hensyn på FNs bærekraftsmål.

Forfatterne bak oppgaven var høsten 2022 i kontakt med Kverneland Energi og ble presentert for et pilotprosjekt med fornybare energikilder på Isfjord Radio, Svalbard. Kverneland Energi er et teknologiselskap som utvikler løsninger for fornybar energiproduksjon.

De har høy satsning på reduksjon i bruk av fossile brennstoff ved hjelp av teknologi, og har høy kompetanse innenfor energisystemer for lokasjoner med mikronett og øydrift [22]. Pilotprosjektet ved Isfjord Radio handlet i første omgang om å innføre et styrings-system som effektiviserer bruken av dieselaggregat ved hjelp av batterilagring, samt å benytte overskuddsvarmen aggregatene produserer til termisk oppvarming. Planen nå er å implementere bakke- og takmontert solkraft og vindkraft. Krevende værforhold gjør at implementering av fornybare energikilder er utfordrende, og det er mange hensyn som må tas i betraktning.

1.1.1 Bærekraft

I 1987 ble rapporten «vår felles fremtid» utgitt av Verdenskommisjonen for miljø og utvikling. Kommisjonen blir omtalt som Brundtland-kommisjonen, der målet var å finne løsninger på fattigdoms- og miljøproblemet [1]. Rapporten ga for første gang internasjonal oppmerksomhet på bærekraftig utvikling. Bærekraftig utvikling handler om at utvikling skal imøtekomme dagens behov uten å ødelegge mulighetene for fremtidige generasjoner. Bærekraftig utvikling har også fokus på de tre dimensjonene klima og miljø, økonomi og sosiale forhold. For denne oppgaven vil bærekraftsdimensjonen klima og miljø være sentral. Dagens klimaendringer krever at samfunnene vi lever i må endres, og det er først og fremst menneskeskapte klimagassutslipp fra brenning av olje, kull og gass som må kuttes [1].

I 2015 ble FNs 17 bærekraftsmål vedtatt, og disse er verdens viktigste verktøy for en bærekraftig utvikling [1]. Målet er å bekjempe fattigdom og ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030. I Norge er allerede mange av målene oppfylt, som for eksempel god helse og livskvalitet, god utdanning og anstendig arbeid og økonomisk vekst.



Figur 1.1: FNs bærekraftsmål [1]

Likevel er det rimelig å påstå at Norge i dag har dårlige prioriteringer når det kommer til utnyttelse av naturressurser fremfor å bevare økosystem og naturmangfold. Norge har et høyt kjøttkonsum som fører til utslipp av metangass, det eksporteres store mengder olje og gass og det produseres mye avfall som ikke resirkuleres. Alt dette resulterer i at Norge har problemer med å oppnå bærekraftsmål 13 «stoppe klimaendringer» [1]. Dette fører til at det foreligger en prekær omleggingsprosess.

Bærekraftsmål nummer 7, «ren energi til alle» er et annet sentralt bærekraftsmål mot å stoppe klimaendringene. Energien skal være pålitelig, bærekraftig og moderne til en overkommelig pris [23]. For å sikre ren energi gjennom fornybar teknologi, er utviklingen avhengig av bærekraftige forbruks- og produksjonsmønstre. Dette inngår i mål 12, «Ansvarlig forbruk og produksjon». Her beskrives viktigheten av å minske ressursbruk og tilhørende miljø- og klimakonsekvenser ved produksjon og distribusjon av en vare [23]. Løsningen på klimaendringene er ikke alene avhengig av ren og ansvarlig forsyning av energi. Det er også nødvendig å ivareta økosystemer og reversere og stanse tap av biologisk mangfold. Dette refererer til mål 15, «Livet på land» [23].

1.1.2 Tidligere studier

I over hundre år har Store Norske Spitsbergen Kullkompani (SNSK) vært det sentrale energiselskapet på Svalbard [20]. De har utvinnet kull fra gruvene og driftet Svalbards største kraftverk, et dieselmotorkraftverk på 22 MW. Det finnes allerede over 1 500 samfunn som

driftes i øydrift i Arktis og Antarktis, som på sikt skal erstatte fossil energiproduksjon. SNSK jobber med å teste, verifisere og videreutvikle fornybare energiløsninger for arktiske forhold [20].

Universitetet i Bergen gjennomførte i 2020 et casestudie med utvikling av en kortsiktig stokastisk energimodell for Longyearbyen [24]. TIMES er et modelleringsrammeverk for å utvikle modeller av lokale, nasjonale og globale energisystemer. Stokastisk modellering i TIMES går ut på å ta hensyn til usikkerheten knyttet til ulike parametre brukt til å optimalisere energisystemet. I dette tilfellet ble den kortsiktige usikkerheten til syv stokastiske variabler modellert. Alle syv parametrene korresponderte med energiproduksjon fra solceller og vindturbiner, samt data på varme- og elektrisitetsbehov. Studien konkluderte med at Longyearbyen har potensiale til å driftes på fornybare energikilder der vind- og solkraft er kritiske og komplementære bidragsyttere [24]. På den andre siden vil et isolert system basert på lokale fornybare energikilder kreve høy installert kapasitet, samt store kostnader. Ved å tillate en begrenset andel fossil energiforsyning kan kostnadene reduseres betraktelig i tillegg til at systemets robusthet økes. Slik vil det fortsatt oppnås stor reduksjon i klimagassutslipp sammenlignet med et system som utelukkende driftes på fossile energikilder [24].

Klima i Arktis er spesielt, og snø kan ha en innvirkning på energiutbyttet av solcelleanlegg. I 2022 undersøkte Frimannslund et al. parametere på snøfonnakkumulering og energiutbytte for solkraftverk i polare klima [25]. Det kom frem at solkraftverkene er betydelig påvirket av de lokale værforholdene med hensyn på snø og vind. En strategi for å unngå snøfonner på panelene er å øke høyden over bakken, samt øke systemets størrelse. Dette vil ha ubetydelig eller positiv innvirkning på energiutbyttet til systemet. I tillegg kan systemet optimaliseres med hensyn på helning- og asimutvinkel, samt radavstanden mellom panelene. En mulighet for å unngå snøfonndannelse er for eksempel å justere asimutvinkelen slik at panelene står parallelt på vindretningen. Ulempen er at asimutvinkelen muligens ikke vil være optimal i forhold til solstråling og energiutbyttet kan bli tilsvarende redusert [25].

1.2 Mål og omfang

1.2.1 Avgrensninger og rammer

Prosjektoppgaven var opp til forfatterne å definere, basert på dokumentasjon av energiomleggingsprosessen på Isfjord Radio. Oppdragsgiver er ikke avhengig av resultatene fra oppgaven, men vil kunne benytte resultatene i fremtidige prosjekter dersom forfatterne finner forbedringspotensialer eller noe av interesse.

Prosjektet på Isfjord Radio er i denne oppgaven begrenset til det bakkemonterte solcelleanlegget, batterisystemet og vindkraft. Optimalisering av det bakkemonterte solcelleanlegget ble gjort basert på allerede planlagt installert effekt og solcelletype bestemt av oppdragsgiver. Det er også tatt utgangspunkt i det eksisterende batterisystemet på Isfjord Radio. For batterisystemet har gruppen kun tilgang til installert kapasitet, C-rate og ladenivå. Batterisystemet i denne oppgaven er derfor forenklet til å kun lagre overskuddsproduksjon fra fornybare energikilder. Grunnet dyrelivet og naturen i nærheten av Isfjord Radio er det gitt avslag på de horisontalakslede vindturbinene SNSK ønsket [26]. Vindkraft vurderes derfor uavhengig av oppdragsgiver.

I energiomleggingsprosessen på Isfjord Radio vil det også installeres solceller på tak og fasader. Siden bygningene er vernet blir dette bestemt ut fra vernets tålegrense, og ikke ingeniørfaglige vurderinger. På bakgrunn av dette blir ikke solceller på tak og fasade tatt hensyn til i oppgaven.

Forfatterne hadde ikke tilgang på spesifikasjoner knyttet til det eksisterende elektriske anlegget på Isfjord Radio. Det eneste som var kjent var spenningsnivå og enkelte eksisterende komponenter. Dette medførte at tap i kabler og transformatorer for enkelthetskyld ble neglisjert i beregningene. Det elektriske anlegget til vindturbinene er ikke inkludert i omfanget til denne oppgaven.

Ifølge oppdragsgiver er batterisystemet og aggregatene en del av et eksisterende styringsystem. Styringssystemet ble vurdert som utenfor rammen til oppgaven. Aggregatene i denne oppgaven benyttes kun til å forsyne resterende energibehov som ikke dekkes av fornybare energikilder og batteri.

Foruten dieselpris var SNSK restriktive med å dele nøyaktige tall knyttet til økonomi, og

ville kun vært tilgjengelig ved signering av taushetsavtale (NDA). Dette var ikke ønskelig, og derfor er alle verdier i økonomiberegningene basert på estimater funnet på internett. Disse er dermed ikke direkte knyttet til prosjektet. Det er oppgitt fra oppdragsgiver at det ikke er et krav om at systemet skal være økonomisk lønnsomt for å kunne gjennomføres. Det er forventet at systemet blir ulønnsomt.

I denne oppgaven er solfraksjon definert som andelen produsert fornybar energi, inkludert overskuddsenergi som kan lagres på batteriet, som går til å dekke forbruket. I tillegg er snøakkumulering definert som oppsamling av snø.

1.2.2 Problemstillinger og scenario

Hensikten med oppgaven er å se på løsninger for øydrift med fornybare energikilder på Isfjord Radio. Dette med bakgrunn i omleggingen fra drift med dieselaggregater til ren energiforsyning med batterilagringsystem. I lys av dette er det utviklet fire problemstillinger:

- Hvilke optimaliseringer for solcelleanlegget gir best solfraksjon, med og uten batterilagring, med hensyn på snøakkumulering?
- Hvordan kan implementering av vertikale vindturbiner bidra til ytterligere økning i fornybar energiproduksjon etter installasjon av solkraft og batterilagring?
- Hvor mye kan dieselforbruket reduseres med sol-, vindkraft og batterilagring, og hva blir lønnsomheten i et klimaperspektiv vs. et økonomisk perspektiv?
- Hvordan kan omleggingen fra fossil til fornybar energiforsyning i Arktis bidra til å nå FNs bærekraftsmål?

Problemstillingene vil bli besvart på bakgrunn i resultater fra tre følgende scenarioer:

1. Bakkemontert solcelleanlegg
2. Bakkemontert solcelleanlegg og batterilagring
3. Bakkemontert solcelleanlegg, batterilagring og vertikale vindturbiner

Scenario 1 tar for seg et allerede planlagt bakkemontert solcelleanlegg på Isfjord Radio.

Som tidligere nevnt viser studier at solcelleanlegg er betydelig påvirket av snø og vind. Hensikten er derfor å optimalisere solcelleanlegget i PVsyst for å dekke forbruket med solproduksjon i høyest mulig grad. Dette med hensyn på faktorer som å unngå snøakkumulering på panelene.

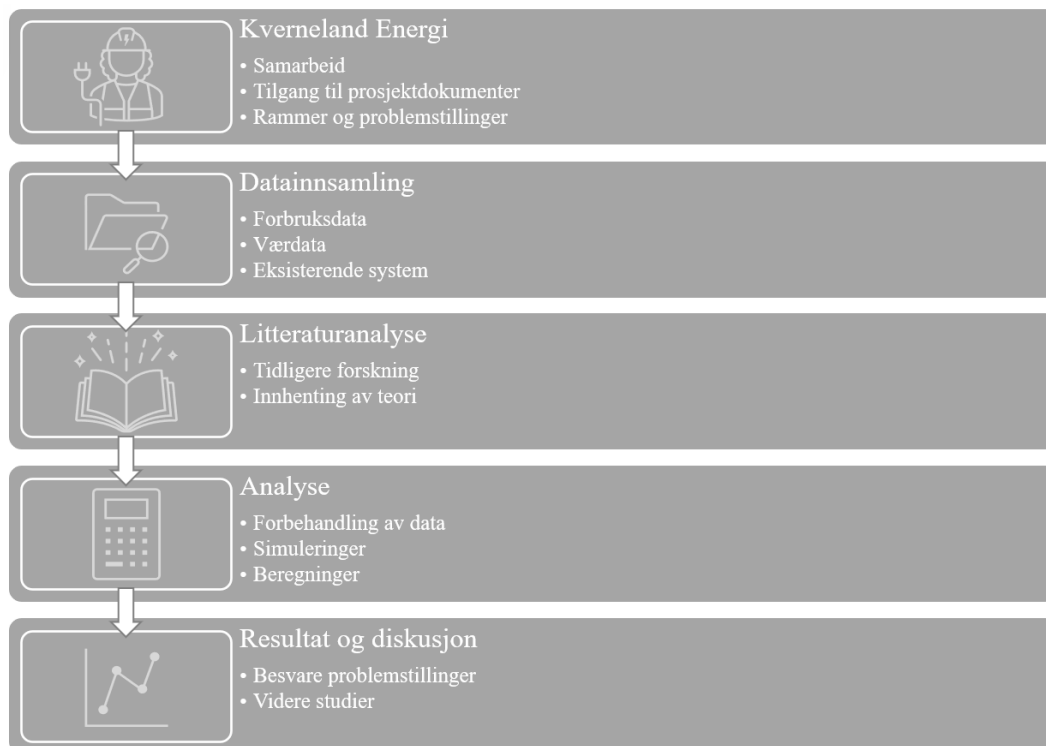
Scenario 2 tar for seg det bakkemonterte solcelleanlegget med batterilagring. Solcelleanlegget optimaliseres med hensyn på lagringsmulighet av overskuddsproduksjon. Batterisystemet er allerede installert på Isfjord Radio. Hensikten med scenarioet er å lagre eventuell overskuddsenergi fra solcelleanlegget, slik at det ytterligere kan redusere dieselforbruket fra aggregatene.

Scenario 3 tar for seg implementering av vertikale vindturbiner i kombinasjon med det bakkemonterte solcelleanlegget og batterisystemet fra scenario 2. Vertikale vindturbiner har tradisjonelt sett lav installert effekt. Hensikten er derfor å undersøke om vertikale vindturbiner, i kombinasjon med scenario 2, kan produsere energi til å dekke forbruket i mørketiden.

For alle scenarioene blir det til slutt gjort økonomiske og klimamessige evalueringer. Hensikten er å drøfte hvordan scenarioene kan bidra til lønnsomhet sett i et klimaperspektiv vs. et økonomisk perspektiv.

1.3 Arbeidets struktur

For å beskrive arbeidsprosessen og dens struktur, er det utarbeidet et flytskjema. Dette er presentert i figur 1.2.



Figur 1.2: Flytskjema av arbeidsprosessen

2 Teori

Understående kapittel gjør rede for relevant teori som er benyttet for å besvare problemstillingene. Først presenteres teori bak diesellaggregat, solenergi og solceller. Videre i kapitlet presenteres batterilagringssystem, etterfulgt av vindenergi og vindturbiner. Den siste delen av kapitlet fremstiller etiske aspekter relatert til kraftproduksjon, samt relevant teori til klimagassutslipp og økonomi.

2.1 Diesellaggregat

Et diesellaggregat brukes til strømforsyning og består av en motor som driver en generator. Diesel er et fossilt drivstoff som har en tetthet på ca. 840 g/L [27] [28].

Motoren i diesellaggregatet er en selvtennende forbrenningsmotor med diesel som drivstoff. Den tilføres diesel fra en pumpe som er koblet til drivstofftanken. Ved antenning i motorens forbrenningskammer skapes en eksplosjon. Eksplosjonen fører til ekspansjon som driver et stempel. Stempelets bevegelse opp og ned overføres via et veivsystem slik at den lineære bevegelsen blir til rotasjonsbevegelse i motoren [29]. Dette danner mekanisk energi i form av rotasjonsenergi som overføres til generatoren.

Generatoren er en elektrisk maskin som omdanner den mekaniske energien til elektrisk energi i form av vekselstrøm (AC) basert på elektromagnetisk induksjon [30]. Den må produsere energi som tilsvarer det den påkoblede lasten trenger, samt elektriske og mekaniske tap i maskinen [31].

For å beregne drivstofforbruket i liter for et diesellaggregat benyttes formel 1. Formelen gjelder for en konstant last med tilhørende spesifikt drivstofforbruk (SFC).

$$V = \frac{E \cdot SFC}{\rho} \quad (1)$$

V = Volum [L]

E = Energiproduksjon [kWh]

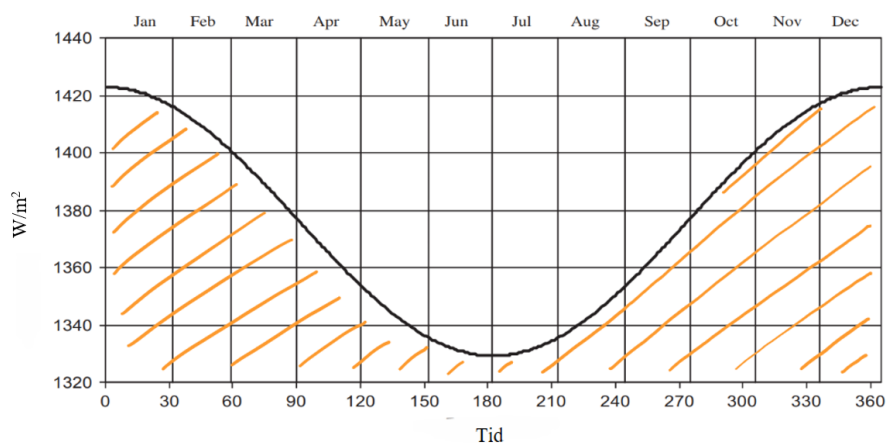
SFC = Spesifikt drivstofforbruk [kg/kWh]

ρ = Tetthet [kg/L]

2.2 Solenergi

Sola er jordas primære energikilde, som ved kjernefysisk fusjon genererer energi av hydrogenkjerner til helium. Energien treffer jorda i form av solstråling som støtter nesten alt liv på jorda via naturlige og syntetiske prosesser, som fotosyntesen [32][2].

I den andre utgaven til Kalogiro av boken *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, beskrives stråling som frekvensen av strålingsenergi som faller på en overflate per overflateenhet. Stråling har enhet W/m^2 [2]. Innstråling er integrasjonen av strålingen over en gitt tid med enhet J/m^2 eller Wh/m^2 , altså arealet under kurven for solstråling som funksjon av tid [2].



Figur 2.1: Solstråling i W/m^2 som funksjon av tid. Arealet under kurven i oransje representerer solinnstrålingen i J/m^2 [2].

På jordoverflaten treffer to typer solstråling: diffus og direkte. Førstnevnte er solstråling som treffer jordens overflate etter å ha blitt absorbert, reflektert eller spredd av partikler i atmosfæren [2]. Slike partikler kan for eksempel være vann- eller støvpartikler, og refleksjon kan skje i atmosfæren eller av skyer. Direkte solstråling er stråling som passerer gjennom atmosfæren i en rett linje uten å bli påvirket av eksterne forstyrrelser. Den totale solstrålingen som treffer jordens overflate er dermed summen av direkte og diffus, også kalt den globale solstrålingen [2]. Dette er solstrålingen som et solcellepanel kan ta opp.

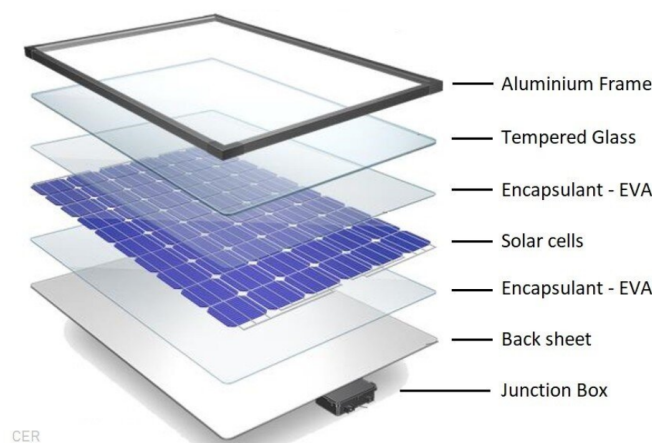
Albedo og transposisjonsfaktor (TF) er viktige faktorer relatert til solstråling. Albedo er en faktor mellom 0 og 1 som forteller hvor stor refleksjon en overflate har av solstrålene som treffer den. For eksempel har svart jord en albedo på 0,1, dyrka mark 0,2, skitten snø

0,4 og nysnø 0,9 [33]. TF er forholdet mellom solstråling på en skråstilt kontra horisontal flate. Forholdet sier noe om hva du tjener eller taper på å ha en helning på et panel [34].

2.3 Solceller

På markedet i dag finnes det tre typer solceller: monokrystallinske, polykrystallinske og tynnfilm. De to førstnevnte er de vanligste og er ofte bygget opp av krystallinsk silisium, som vi si at de består én krystall eller flere individuelle krystaller [35].

Hovedsaklig består et solcellepanel av komponentene vist i figur 2.2. Øverste del, aluminiumsrammen, beskytter panelet mot eksterne krefter og er laget for å montere panelet på en solid måte. Deretter ligger herdet glass for å ytterligere beskytte panelet mot temperaturutfordringer og mekanisk belastning. Det slitesterke innkapslingsmiddelet EVA pakker inn solcellene, og benyttes for å beskytte panelet mot fuktighet og skitt. Det gir samtidig støtdemping mot for eksempel hagl. Baksidesjiktet fungerer som ytre hud og gir mekanisk beskyttelse og elektrisk isolasjon. Dette er laget av forskjellige polymerer eller plaster. På baksiden av panelet ligger den svarte boksen, koblingsboksen, der cellene kobles sammen [3].



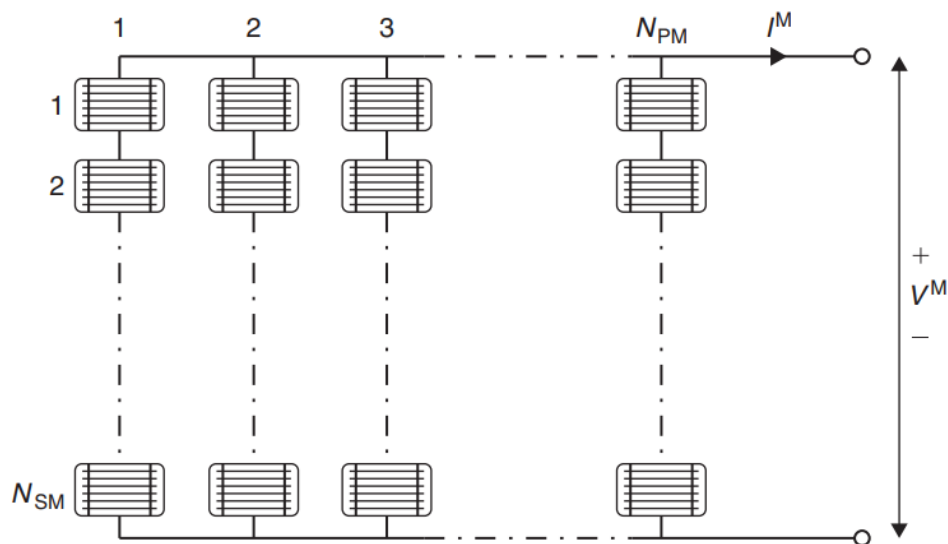
Figur 2.2: Komponenter i et solcellepanel [3]

2.3.1 Virkemåte

En silisiumbasert solcelle består typisk av en silisiumplate som er delt i to deler. Silisium er et halvledermateriale. Den øveste delen tilsettes fosfor og den nederste tilsettes bor for å kontrollere ledningsevnen. Det øverste laget blir da negativt dopet (har overskudd av

elektroner) og det nederste laget blir positivt dopet (har underskudd av elektroner) [2]. Mellom delene vil det dannes en slags barriere på grunn av ladningsforskjellen mellom sjiktene. Energien fra et lysfoton fra sola slår løs elektroner fra positiv side. Spenningen over barrieren gjør at elektronene vil bevege seg fra positiv side til negativ side. Det vil da oppstå underskudd av elektroner på den positive siden. Elektronene kommer seg kun tilbake til positiv side via en sluttet krets. Når dette skjer gjentatte ganger genereres det strøm [2].

Spenningen til én solcelle ligger på ca. 0,5 V, som er svært lavt. Et solcellepanel består derfor av et antall parallelle grener, der hver gren har et antall solceller koblet i serie for å gi en brukbar driftspenning [2]. Figur 2.3 viser hvordan en solcellemodul er bygget opp av mange solceller i serie- og parallellkobling.



Figur 2.3: Skjematisk figur av en solcellemodul bestående av N_{pm} grener i parallell og N_{sm} celler i serie [2].

Den installerte effekten til et solcellepanel er oppgitt i kWp. Dette er den maksimale effekten (peak) panelet produserer ved standard testbetingelser (STC) [2]. STC er gitt ved solstråling $1\,000\text{ W/m}^2$ og celledetemperatur 25 °C [15]. Det betyr at dersom solstrålingen på et gitt område er lavere enn $1\,000\text{ W/m}^2$, vil ikke panelet produsere den oppgitte effekten. I Norge forventes et tap på 1-2 kWp per 10 kWp installert effekt [36].

2.3.2 Komponenter i et solcelleanlegg

Et solcelleanlegg er bygget opp av seriekoblede solcellemoduler som er koblet i flere strenger. Strengene er parallellkoblet. Oppbyggingen av solcellen i figur 2.3 kan derfor sammenliknes med oppbyggingen av et solcelleanlegg. Andre komponenter i et solcelleanlegg er vekselretter, laderegulator, og lastkomponent. Lastkomponenten er kilden solcelleanlegget forsyner.

En vekselretter benyttes for å omforme likestrømmen (DC) som solcellene produserer til AC som nettet og lasten benytter. De har levetid på ca. 10 til 20 år. Vekselretteren benyttes også for å sikre at solcelleanlegget driftes optimalt. I nordisk klima er det vanlig å underdimensjonere vekselretteren 15 % til 20 %, da solcelleanleggene sjelden driftes på maks effekt [37]. I praksis betyr dette at solcelleanlegget er overdimensjonert fordi panelenes installerte effekt oppgitt i databladet er ved STC.

En MPPT-laderegulator (maximum power point tracking) søker etter og justerer den spenningen og strømmen fra panelene som genererer størst effekt, uavhengig av tid på dagen og værforhold [38]. Det finnes flere typer og metoder for bruk av MPPT. For MPPT innebygd i vekselretter vil skygge på én eller flere paneler i samme streng føre til redusert produksjon for hele strengen [39].

Anlegget har bruk for festeanordninger tilpasset lokale forhold, og om det er tak- eller bakkemontering. Det er også nødvendig med strømkabler for å koble sammen panelene, samt elektrisk tilkobling fra vekselretter til sikringskap og eventuell tilkobling på eksternt nett [40].

2.3.3 Systemtap

Ved dimensjonering av solcelleanlegg tas det forbehold om flere faktorer som bidrar til tap i systemet. Skygge er den største bidragsyteren til tap. Skygger oppstår når trær, bygninger, fjell etc. helt eller delvis dekker til solcellene [41].

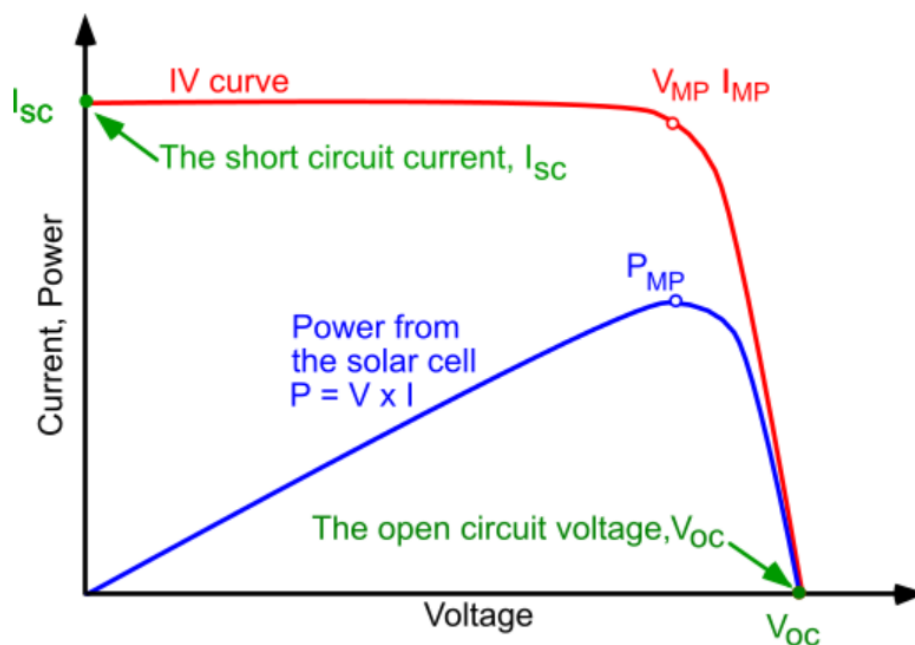
Tilsmussing er en annen grunn til systemtap og oppstår når støv, fugleekskrement, snø og annen forurensning legger seg på panelene. Tilsmussingen reduserer mengden absorbert solinnstråling fra panelene, og dermed også mengden produsert strøm [41]. Hvor mye tilsmussing panelene får avhenger av lokalt klima. Regn kan bidra til å minske tapene fra

tilsmussingen, spesielt hvis panelene har nok helning til at regnet renner av. I industri-standard for ytelsesparametere i solcelleanlegg er typisk tap fra tilsmussing 5 %, men kan variere mellom 2 % og 25 % [42].

Refleksjonstap, også kalt IAM-tap (Incidence Angle Modifier), skjer når beskyttelseslaget utenpå solcellene reflekterer vekk noe av solstrålingen [41]. Refleksjonstapet avhenger blant annet av materialegenskapene til beskyttelseslaget og helning til solcellene.

Termiske tap oppstår når temperaturen til solcellemodulene endrer seg [41]. En økning i temperaturen fører til redusert spenning og effektivitet, og hvor stor påvirkning temperaturen har avhenger av type solcellemodul og dens kvalitet [43].

Vekselsrettert tap vil oppstå når solcellene i perioder opererer utenfor I-V-kurven [41]. En I-V-kurve, vist i figur 2.4, er en kurve med spenning (V) på x-aksen og strøm (I) på y-aksen. I-V-kurven viser hvilket område solcellen opererer for maksimal effektproduksjon [4]. Som nevnt tidligere søker laderegulatoren i vekselretteren etter å driftes ved maksimal effekt, P_{MP} . Ved å dimensjonere vekselretteren etter systemets størrelse og lokasjon kan mye av tapet unngås.



Figur 2.4: I-V-kurve for en solcelle [4]

2.3.4 Bakkemontering

Solcelleanlegg kan være fastmontert eller bevegelige. De er vanligvis på tak, fasader eller frittstående. Fastmontert system er ofte optimalisert for maks energiproduksjon gjennom året, eller når forbruket er høyest. Bevegelige systemer er solcelleanlegg der panelene følger solen gjennom dagen og året. Dette gjør at systemet får høyere produksjon enn et fastmontert anlegg. Et bevegelig system er derimot dyrere, da de krever mer vedlikehold og utskifting av komponenter [44].

For å avdekke grunnforhold ved planlagt bakkemontering, er det nødvendig med geotekniske undersøkelser for å avgjøre hvilke type fundamentering anlegget skal ha. Fundamentet er avgjørende da det skal overføre vekten av anlegget og kreftene det utsettes for ned til grunnen [45]. Viktige faktorer er blant annet jordsmonn, bæreevne og påvirkning av eksterne krefter som vindkast og snø [44].

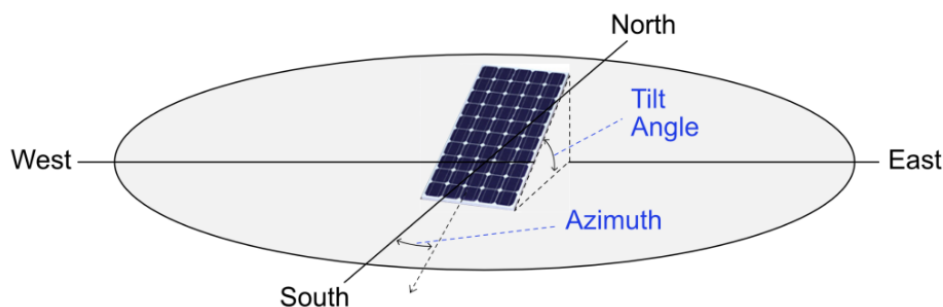
Det finnes tre vanlige metoder for fundamentering av bakkemonterte solcelleanlegg: jordskruer, pæler og ballasterte system. Jordskruer blir skrudd ned, og pæler blir slått ned i bakken. I disse tilfellene er det tilnærmet mulig å reversere inngrepet. I områder med berg kan det være nødvendig å bore hull til pælene. Ved lav kvalitet på jordsmonnet kan det også være nødvendig å støpe pælene helt eller delvis fast i grunnen. Ved boring og støpt fundament blir inngrepet irreversibelt og kostnadene øker. Ballasterte system har ingen penetrering av underlag da fundamentet ligger oppå bakken, men systemet er mer kostbart enn jordskruer og pæler. Løsningen er reversibel [44].

2.4 Optimalisering av solcelleanlegg

Optimaliseringen av orienteringen til et solcelleanlegg avhenger av lokasjon og formål. For eksempel kan det for et nett-tilknyttet anlegg med fast salgspris av overskuddsenergi, være ønskelig å maksimere årlig produksjon. For et anlegg i øydrift kan det være ønskelig med jevn produksjon eller maksimere produksjonen når forbruket er høyest. Andre faktorer som kan påvirke optimaliseringen er skyggelegging og hyppig væraterferd [46].

Ved installasjon av solcelleanlegg er det flere sentrale vinkler. Solas asimutvinkel [$^{\circ}$] er vinkelen til solstrålene målt i horisontalplanet. For den nordlige halvkule måles vinkelen fra rett sør, da sør er 0° og negativ vinkel går mot øst [47]. For best utnyttelse av

solstrålingen er det viktig å ha mest optimal helningsvinkel på panelene. Helningsvinkelen $[\circ]$ er vinkelen mellom den skråstilte flaten og horisontplanet [2][48].

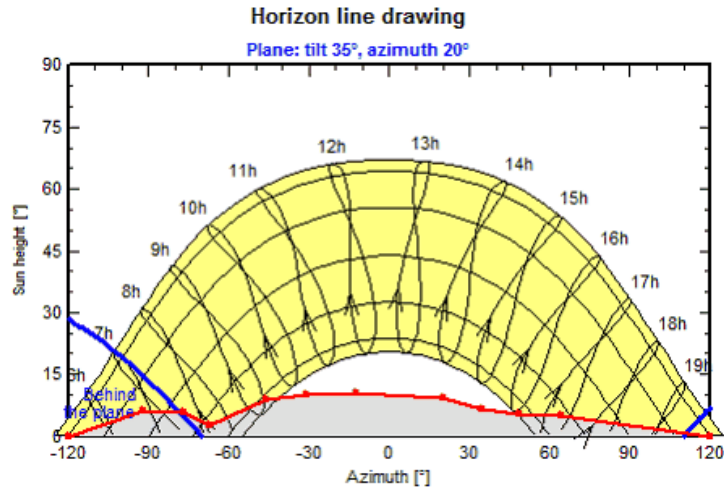


Figur 2.5: Helning- og asimutvinkel [5]

En metode for å finne den best egnede orienteringen til solcellepanel, er å benytte den orienteringen som gir høyest TF for perioden produksjonen skal maksimeres over [46]. I de tilfellene det er ønskelig å optimalisere andre parametere, kan det gjennomføres følsomhetsanalyse med hensyn på helning og asimut. Andre parametre kan være solfraksjon. I PVsyst er solfraksjon [-] forholdet mellom produsert energi som forbrukes internt (E_{Solar}) og forbruket. Det sier noe om hvilken grad solcelleanlegget bidrar til å dekke forbruket [7].

2.4.1 Horisontlinjetegning

Horisontlinjetegninger som vist i figur 2.6, brukes til å se solens bevegelser for en gitt lokasjon gjennom et år. Denne tolkes på følgende måte: Den nederste sorte buen er vintersolverv, og den øverste er sommersolverv. På den nordlige halvkule treffer sommersolverv mellom 20. og 22. juni og vintersolverv enten 21. eller 22. desember [49]. Da står sola på sin henholdsvis nordligste og sørligste posisjon gjennom året i forhold til jorden [2]. De blå linjene viser delene av solbanen som er bak solcellepanelet, altså der solcellepanelet ikke mottar direkte solstråling. Det gråbelagte området er skyggelegging grunnet objekter langt unna, som for eksempel fjell. Her mottar heller ikke solcellepanelet direkte solstråling. For skyggelegging grunnet objekter langt unna, er det viktig med presis lokasjon da en liten endring i lengde- og breddegrad kan utgjøre store forskjeller [50].



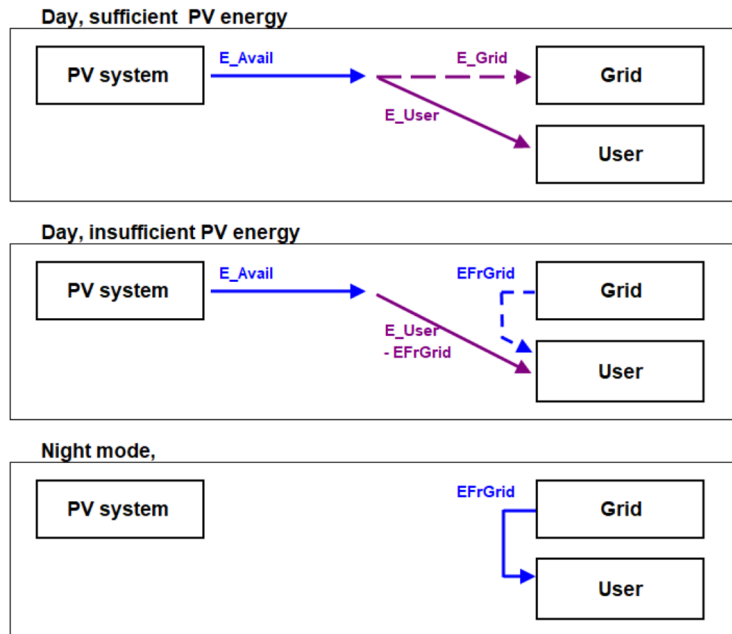
Figur 2.6: Generell horisontlinjetegning i PVsyst [6]

2.4.2 Analysering av parametere i PVsyst

Verktøyet som benyttes for å optimalisere solcelleanlegget i denne oppgaven er nettilknyttet anlegg i PVsyst. I neste avsnitt presenteres parametre og relevante sammenhenger.

E_{Avail} er tilgjengelig produsert solenergi (etter vekselretter- og vekselstrømstap). E_{User} er energibehovet til forbrukeren. E_{Grid} er overskuddsenergien injisert til oversliggende nett, etter vekselretter- og vekselstrømstap. E_{FrGrid} er energien som trekkes fra overliggende nett for internt forbruk når solcelleproduksjonen ikke er tilstrekkelig. E_{Solar} er definert som E_{User} minus E_{FrGrid} , det vil si solcelleproduksjonen som forbrukes internt [7].

Figur 2.7 viser ulike situasjoner for et nett-tilknyttet solcelleanlegg i PVsyst. Øverst illustreres en situasjon der hele forbruket dekkes av solenergi, og overskuddsenergi sendes ut på eksternt nett. I midten illustreres en situasjon der det ikke produseres nok energi til å dekke hele forbruket. Manglende produksjon blir tilført fra eksternt nett. Nederst illustreres en situasjon der hele forbruket blir dekket av ekstert nett [7].



Figur 2.7: Systemoppførsel for et nett-tilknyttet solcelleanlegg [7]

2.5 Batterilagringsystem

Batterilagringsystemer er stasjonær lagring av elektrisk energi. Systemene består ofte av flere batterimoduler som er koblet sammen i serie- eller parallellkoblinger. Batterilagringsystemer gir fordeler som større fleksibilitet og skalerbarhet, da det muliggjør lagring av kraftproduksjon fra uregulerbare fornybare energikilder [51].

Batterilagringsystemer består vanligvis av oppladbare batterier, også kalt sekundærbatterier. Det betyr at energiomformingen i batteriet er reversibel [52]. De vanligste oppladbare batteriteknologiene er blyakkumulator, litium-ionebatterier (Li-ion) og nikkel-metallhydrid batterier (Ni-MH) [53].

2.5.1 Relevante parametre

Relevante parameter for batterilagring er C-rate og SOC (ladetilstand). C-raten til et batteri angir hvor hurtig batteriet kan utlade et fulladet batteri, og fullade et tomt batteri. En C-rate på 1C betyr at det kan opp- eller utlades på én time [52]. Batteriets levetid, og evnen til å bevare sin opprinnelige kapasitet, påvirkes av blant annet av i hvilken grad batteriet blir opp- og utladet. Dette kalles batteriets SOC, som beskriver i hvilken grad batteriet blir opp- og utladet i forhold til sin totale kapasitet. For eksempel vil et 100 kWh

batteri med en 25 % - 75 % SOC lades mellom 25 kWh og 75 kWh. Minimumsprosenten blir betegnet som SOC-min og maksimumsprosenten blir betegnet som SOC-maks. Levetiden til et litium basert batteri er lengst dersom det lades mellom 65 % og 75 %. Lading mellom 25 % og 85 % vil gi dårligere levetid, men samtidig bedre utnyttelse av batteriet [52]. Et batterisystem som benyttes til å lagre energiproduksjon kan generelt holdes fulladet i én til fem dager [54].

2.6 Vindenergi

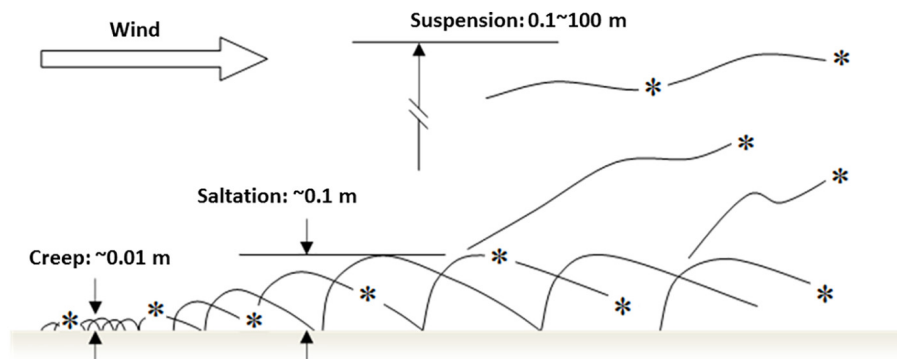
Vind er bevegelsesenergi. Det er luft i bevegelse som følge av horisontale forskjeller i temperatur og lufttrykk [55] [56]. Vindenergi stammer fra solenergi, da temperatur og trykk styres av solens innstråling på jorda. Vinden er størst når temperaturforskjellene er størst, for eksempel om natten langs kysten når bakken er kald og havet er temperert. Vindhastighet måles i m/s eller knop [56]. For å fremstille hvilken retning og styrke på vinden som er mest vanlig for et område, kan det lages en vindrose der vindretningen er gitt i vinkelgrader fra nord [57].

2.6.1 Snødrift

Bevegelsesenergien i vinden kan drive massetransport av snø i form av snødrift, eller dannelse av snøfonn ved at vinden blåser i nedbørsøyeblikket [8]. Snødrift vil si at snø transporteres med vinden, og det kan sammenliknes med sanddrift-fenomener i ørkenområder. Snødrift er relatert til vind ved vindhastigheter over 5 m/s [58][59]. Problemer tilknyttet snødrift forekommer gjerne i retningen av den gjeldende vinden. Ifølge Katlein i rapporten «Physics of Snow drift» blir ofte effektene av snødrift undervurdert, også av fagfolk, for eksempel ved prosjektering av ny infrastruktur [58].

Snødrift kan skje på tre måter, som vist i figur 2.8. Her illustreres også typisk svevehøyde for snøpartiklene ved ulik form for snødrift [8]. Til venstre i figuren illustreres kryp. Enkelt forklart kryper snøpartiklene bortover overflaten, da vinden er for svak til å forflytte partiklene. I midten av figuren illustreres saltasjon. Dette er når vinden løfter snøpartiklene opp av overflaten i korte tidsperioder. De holder seg ikke svevende over lengre tid da gravitasjonskraften er for stor. Når snøpartiklene treffer overflaten igjen fører dette til at nye snøpartikler rives løs og kastes opp i luften. På denne måten opprettholdes

saltasjon som massetransport. Til høyre i figuren illustreres suspensjon. Den forekommer ved turbulente virvler der snøpartikler løftes opp og blir svevende i luften over lengre tid [8].



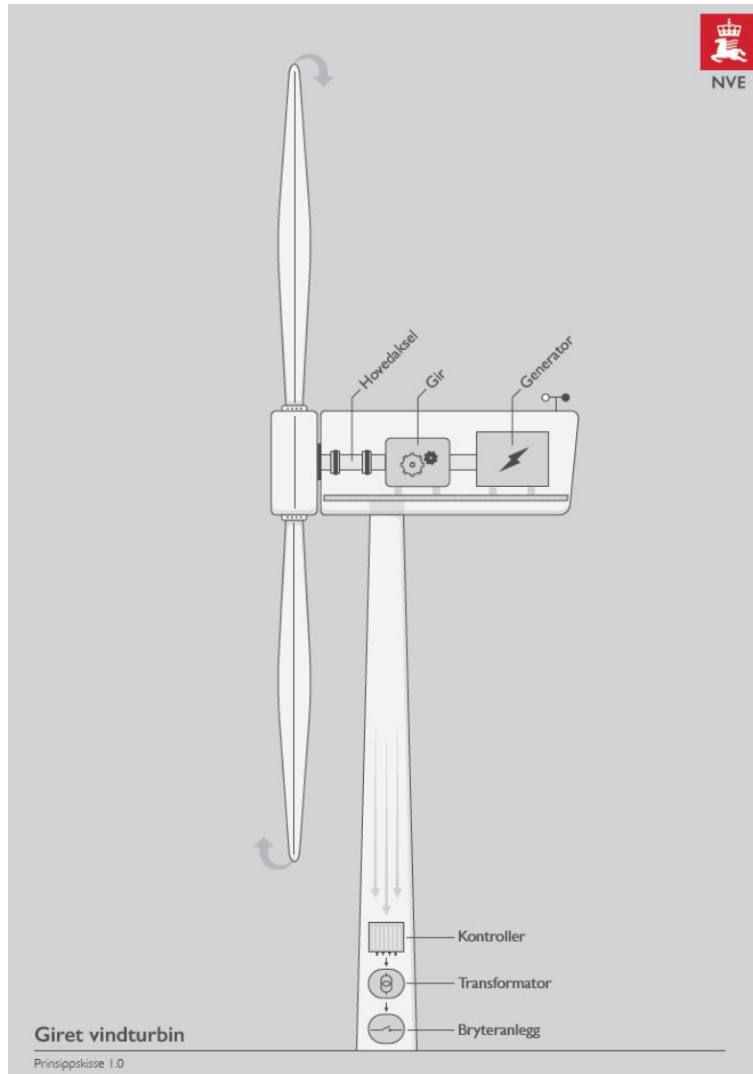
Figur 2.8: Former for snødrift. Kryp (creep) til venstre, saltasjon (saltation) i midten og suspensjon (suspension) til høyre [8].

2.7 Vindturbin

Bevegelsesenergien fra vinden kan omformes til elektrisk energi i et kraftverk, nærmere bestemt en vindturbin [60]. Generelt virker en vindturbin ved at luft i bevegelse tvinger rotorbladene til å dreie. Dette skaper mekanisk energi i form av rotasjonsenergi i turbinen som overføres til generatoren via drivakselen [9]. Dette fører igjen til omdreining i generatoren og det produseres elektrisk energi [30]. Det finnes både vertikalakslet vindturbin (VAWT) og horisontalakslet vindturbin (HAWT).

2.7.1 Horisontalakslet

HAWT er den vanligste typen vindturbin [9]. Denne består vanligvis av tre rotorblader festet på en horisontal aksel. Som vist i figur 2.9, er akselen, gir og generator plassert på toppen av installasjonen i et generatorhus. Kontroller, transformator og bryteranlegg er plassert på bakkenivå [9]. En HAWT har gjerne en hale som justerer turbinen mot vindretningen for maksimal utnyttelse [9]. Det finnes ulike varianter, for eksempel uten gir.



Figur 2.9: Illustrasjon av horisontalakslet vindturbin med komponenter [9].

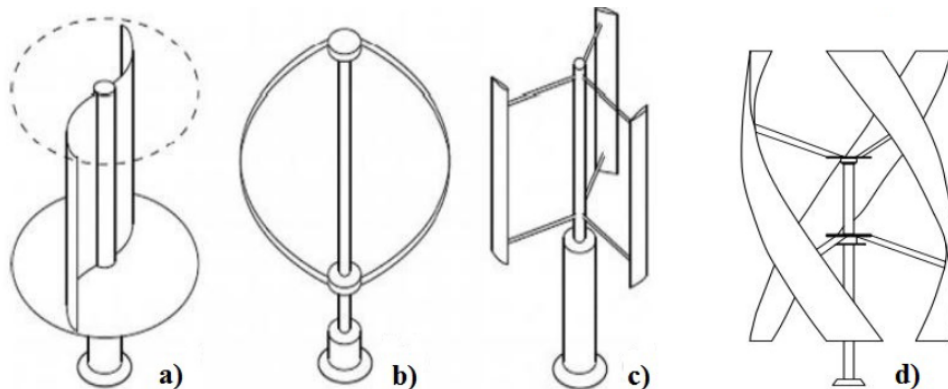
Fordelen med HAWT er at de har tilgang til sterk vind da tårnet er plassert høyt oppe [61]. Dette gjør at vindturbinen har høy effektivitet og kan produsere mye strøm. Under ideelle vindforhold kan effektfaktoren være opp til 45 % [62]. Ulempen er at de er vanskelige og dyre å vedlikeholde, de er svært synlige på store avstander og forstyrrer landskapet. Det kan også feste seg is som kastes av bladene og utgjør fare for mennesker og dyr på vinterstid i Norge [61].

2.7.2 Vertikalakslet

I en VAWT roterer rotorbladene rundt en drivaksel som er plassert vertikalt i stedet for horisontalt. VAWT kan deles inn i de to kategoriene savonius og darrieus [10].

Savonius-turbinen (a) vist i figur 2.10 er drag-basert og konstruert med halv sylindris-

ke (krummede) rotorblader. Turbintypen kan ha to eller flere rotorblader. Utformingen til rotorbladene gjør at vind på konveks krumning («baksiden» av bladene) gir mindre dragkraft. Konkav krumning («fresiden» av bladene) opplever mer dragkraft når de beveger seg med vinden [63]. Darrieus turbinen (b-d) vist i figur 2.10, er løft- og dragbasert og konstruert med rette eller buede rotorblader [63]. Helix-formet (spiralformet) VAWT gir vinden en god inngrepsflate fra alle retninger og rotasjonsvinkel [64]. Vinden får rotorbladene til å dreie rundt akselen.



Figur 2.10: Illustrasjon av ulike typer VAWT. Savonius (a), eggeformet darrieus (b), H-formet darrieus (c) og helix-formet (d) [10].

Fordelen med VAWT er at turbinen ikke trenger å være rettet mot vinden, da den kan ta opp vindstrømmer fra alle retninger [63]. Dette er en fordel på lokasjoner der vinden ofte skifter retning [61]. Turbintypen er også billigere å installere, og de kan ha generator og girboks nær bakken som gjør de lettere å vedlikeholde. Savonius-turbinen er «lukket» rundt akselen som gjør den tryggere for dyreliv, spesielt fugler. Turbinene er lite sjenerende da de lager mindre støy enn HAWT [65].

Ulempene er at VAWT ofte har mindre installert effekt, samt at vindhastighetene nær bakken er lavere. De genererer derfor mye mindre elektrisitet enn HAWT [61]. Ifølge Sintef har savonius VAWT effektfaktor, C_p , på 11 % til 14 % [66]. Effektfaktoren finnes ved å dividere den målte effekten på teoretisk effekt [66].

2.7.3 Plassering av vindturbiner

For et anlegg med flere turbiner er det ønskelig å unngå at vinden forverres for bakenliggende turbiner. Det er derfor viktig med vurdering av plassering. Med forverret vind menes mer turbulent eller lavere hastighet. Ifølge LuvSide er det vanlig praksis å plassere

HAWT 5 ganger diameteren fra hverandre på tvers av vindretningen, og 10 ganger diameteren fra hverandre langs vindretningen [67]. For VAWT er det vanlig praksis å plassere turbinene 4 til 6 ganger diameteren fra hverandre. Dette er fordi VAWT fungerer bedre i turbulent vind [67][68].

Frittstående vindturbiner bør først og fremst plasseres på en lokasjon med tilstrekkelig gjennomsnittsvind. Hvis dette er oppfylt må den mest optimale plasseringen i forhold til terrenget vurderes. Plasseringen bør være på toppen av en glatt bakke, åpne flate terreng eller i et fjellgap som intensiverer vinden. Generelt øker også vindhastigheten med høyden, og plassering av vindturbinene i høyden ved hjelp av mast kan være å foretrekke [69].

2.7.4 Forventet produksjon

Effektkurven til en vindturbin viser den elektriske effekten turbinen kan produsere ved forskjellige vindhastigheter ved nav-høyde [65]. Virkningsgraden til turbinen er derfor inkludert i effektkurven. Energiomformingen i en vindturbin starter og stopper ved en bestemt vindhastighet, som benevnes som henholdsvis cut-in og cut-off.

Når vindhastigheter på en spesifikk lokasjon og effektkurven til valgt vindturbin er kjent, kan energiproduksjonen estimeres. Det kan gjøres ved å lineært interpolere for vindhastigheter som ikke er oppgitt i effektkurven. Interpolering er en matematisk metode for å estimere verdier av en funksjon som ligger mellom to kjente verdier. Lineær interpolering antar at kurven mellom de to kjente verdiene er en rett linje [70].

2.8 Ethiske aspekter

Teknologien i dag er ofte utviklet med hensyn på tilgjengelige ressurser, bærekraft og natur. Til tross for at kraftproduksjon fra fornybare energikilder er et forsøk på å redusere de miljømessige påvirkningene mennesker har på jorden, flytter påvirkningene seg på tvers av tid, rom og strømninger [71]. Formålet med etikken er å studere hvordan man bør handle, og hva som kan være konsekvensene av handlingene vi gjør [72]. Konsekvensene for miljø og samfunn kan bli klargjort i en konsekvensutredning, som bidrar til å formidle hvilke hensyn som må tas når et tiltak planlegges [73].

Utbygging av kraftproduksjon gir inngrep i natur- og/eller kulturlandskap. Det kreves ny

infrastruktur som er arealkrevende og påvirker det biologiske mangfoldet og deres økosystem. Etablering av vindkraft- og solcelleanlegg medfører visuell påvirkning av verdifulle landskap-, friluft- og reiselivsområder [74]. Vindturbinene kan være en trussel for fugler ved at fuglene kræsjer i rotorbladene, eller ved generell forstyrrelse av fuglenes habitat. Dette gjelder også bakkemonterte solcelleanlegg, som kan forstyrre ville dyr som isbjørn og reinsdyr. Ifølge en rapport om bakkemonterte solkraftverk i Norge, vurderes likevel bakkemonterte solcelleanlegg å være et mildere naturinngrep sammenlignet med annen fornybar kraftproduksjon [44]. For både vindturbiner og solcelleanlegg er det viktig med en fundamenteringsløsning som påvirker jordsmonnet i minst mulig grad samtidig som bæreevnen opprettholdes.

Vedrørende ressursforbruk er produksjon av fornybar teknologi avhengig av store mengder metaller og mineraler. Norge og EU forbruker 20 % av verdens mineraler, men produserer kun 3 % selv. Fornybar teknologi krever utvinning av geologiske ressurser som ikke er fornybare, som kvarts, kobber, kalkstein og andre sjeldne jordartsmetaller. I tillegg er de fleste viktige mineralene energikrevende å utvinne [75]. Mange metaller og spesielle jordarter er også begrenset til land med usunne arbeidsforhold, som har lite fokus på miljøvennlig forvaltning og lokal natur [76].

2.9 Klimagassutslipp

Levert energi fra batterier og energiproduksjon fra solceller og vindturbiner fører ikke direkte til klimagassutslipp. Indirekte forekommer utslipp ved komponentenes produksjon, distribusjon, installering og avvikling. Klimagassutslipp er utslipp til luft av gasser som karbondioksid (CO_2), metan (CH_4), lystgass (N_2O), vanndamp (H_2O) og ulike fluorgasser [77]. Disse gassene absorberes i atmosfæren og bidrar til drivhuseffekten. De inngår derfor også som drivhusgasser. Alle gassene har ulik levetid i atmosfæren og ulike bidrag til global oppvarming. Gassene beregnes derfor om til CO_2 -ekvivalenter (ekv) for å direkte sammenlikne utslippene [78].

Silva og Raadal gjennomførte i 2019 en livssyklusanalyse for utslipp knyttet til drivhusgasser fra fornybare og ikke-fornybare energikilder. Analysen viste at kraftproduksjon fra kull gjennom levetiden har et gjennomsnittlig utslipp på 0,9489 kg CO_2 -ekv/kWh, hovedsakelig grunnet forbrenning. Fornybare teknologier som solceller og landbaserte vindturbiner

har gjennom levetiden et gjennomsnittlig utslipp på henholdsvis 0,0509 kg CO₂-ekv/kWh og 0,0144 kg CO₂-ekv/kWh [79].

Romare og Dahllöf publiserte i 2017 en studie om energiforbruk og klimagassutslipp fra litium-ion batterier. Her gir produksjonsfasen et klimagassutslipp på 150-200 kg CO₂-ekv per installerte kWh [80]. Studien medberegner ikke bruksfase. Ved forbrenning i dieselmotorer forekommer utslipp av avgasser i form av sotpartikler. Dette er i hovedsak nitrogenoksider (NO_x) og hydrokarboner [29]. Ifølge Miljødirektoratet har diesel en utslippsfaktor på 0,265 kg CO₂/kWh. Dette er kun CO₂ og ikke CO₂-ekv, da faktoren ikke inkluderer utslipp av CH₄ og N₂O. Disse gir et påslag på henholdsvis 0,5 % og 1,5 % [28].

Utslipptet av CO₂ i 2020 for levert strøm i Norge, var 8 g CO₂/kWh. I resten av EU var utslippet ca. 300 g CO₂/kWh [81]. Kina, der mye av jordartsmetallene har sin produksjon, hadde et utslipp på 537,4 g CO₂/kWh [75][82].

2.10 Økonomi

I tillegg til å evaluere klima- og miljøpåvirkninger ved et nytt prosjekt, er de økonomiske aspektene en viktig del av investeringsanalysen. En investeringsanalyse er et verktøy for å bestemme om en investering skal gjennomføres eller ikke [83]. Et slikt verktøy er for eksempel nåverdiberegninger. For å sammenlikne de økonomiske aspektene ved ulike fornybare teknologier, kan energikostnader over levetiden (LCOE) beregnes [84]. Det samme gjelder lagringskostnader over levetiden (LCOS) for energilagringssystemer [85].

2.10.1 Nåverdiberegninger

Begrepet nåverdi (NV) refererer til tidsverdien av en pengesum. En pengesum er mer verdt nå, enn den samme pengesummen frem i tid [83]. NV beregnes ved hjelp av en diskonteringsrente r_t . Diskonteringsrenten brukes for å justere for inflasjon og risiko, og kalles også avkastningskrav, kalkulasjonsrente eller forventet avkastning [83].

Netto nåverdi (NNV) er NV inkludert investeringen, k_0 . Torvatn et al. definerer en investering som å bruke ressurser som arbeidstid og penger i dag for å skaffe seg bedre ressurser for fremtidig drift [83]. Formel 2 viser beregning av NNV. Positiv NNV indike-

rer at investeringsprosjektet er lønnsomt.

$$NNV = -k_0 + \sum_{t=1}^N \frac{k_t}{(1+r_t)^t} \quad (2)$$

NNV = Netto nåverdi [kr]

k_0 = Investeringskostnad [kr]

k_t = Kontantstrømmen i år t (inntekter minus kostnader) [kr]

r_t = Diskonteringsrente [%]

N = Perioder

Antallet perioder N er vanligvis måneder eller år. Investeringskostnaden k_0 er en negativ kontantstrøm i periode «0». k_t er kontantstrømmen som forekommer i periode t , og kan være både positiv og negativ. Denne inkluderer blant annet vedlikeholdskostnader og inntjeninger for gitt periode [83]. Det er vanlig å definere kostnader som negative verdier og inntekter som positive verdier.

2.10.2 Energi- og lagringskostnader over levetiden

LCOE er gjennomsnittlig kostnad per enhet elektrisitet som er generert over en antatt levetid. Dette inkluderer alle kostnader knyttet til å bygge og drifte teknologien. For å beregne LCOE divideres total kostnaden over levetiden, på all elektrisitet generert i løpet av levetiden [86]. LCOE er en grunnleggende beregning i vurdering av et nytt prosjekt for energiproduksjon [86].

NVE publiserer anslag for LCOE for forskjellige teknologier i NOK/kWh. For bakkemonterte solcelleanlegg og landbaserte vindturbiner, er den totale energikostnaden estimert til henholdsvis 0,4884 NOK/kWh og 0,2994 NOK/kWh. Til sammenlikning er den totale energikostnaden til kullkraft 0,6873 NOK/kWh. Verdiene er for 2021. NVE formidler at energikostnaden vil variere i stor grad fra kraftverk til kraftverk [84].

Prinsippet for LCOS er det samme som for LCOE. Beregningen gjøres på liknende måte da total kostnaden over levetiden divideres på lagret energi gjennom levetiden [85]. I et studie om energikostnader knyttet til storskala elektrokjemisk energilagring i Kina, kom det frem at batterier med litiumjernfosfat (LiFePO_4) har en LCOS på 1,44 NOK/kWh.

Dette gjaldt for et batterisystem med 240 MWh kapasitet [87]. LiFePO_4 har lavere energitetthet enn andre batterier med litium-ion-kjemier, noe som vil si at det kan lagre mindre energi på samme volum med energivare [88][89].

3 Casestudie

I følgende kapittel presenteres Isfjord Radio, herunder energiomleggingsprosessen til nå og konsekvensutredning. Deretter gjøres det rede for vær, klima og landskap på gitt lokasjon. Til slutt presenteres en kortfattet risikovurdering og relevante spesifikasjoner til Isfjord Radio og prosjektet.

3.1 Isfjord Radio

Isfjord Radio, presentert i figur 3.1, ligger 90 km fra Longyearbyen på vestkysten av Spitsbergen på Svalbard. Stasjonen ligger på $78,05^\circ$ nordlig breddegrad og $13,63^\circ$ østlig lengdegrad. Det er SNSK som forvalter stasjonen, og stasjonen innehar blant annet kritisk kommunikasjonsinfrastruktur for Svalbard og Nord-Atlanteren. Isfjord Radio er et mikronett som driftes som øydrift.

SNSK leier ut mesteparten av den gamle radiostasjonen til Basecamp Explorer Spitsbergen [90]. De driver det som hotell og reiselivsdestinasjon. Hotellet har åpent fra februar til september. Det finnes ingen tradisjonelle veier til hotellet. Om sommeren benyttes båt som fremkomstmiddel, og om vinteren benyttes hundeslede, snøscooter eller helikopter [91].



Figur 3.1: Isfjord Radio og området rundt [11]

3.1.1 Energiomleggingen til nå

Energiforsyningen på Isfjord Radio har hovedsaklig vært tre dieselaggregat med et samlet forbruk på ca. 190 000 L diesel i året [92]. Energiomleggingsprosessen som nå pågår har som langsiktig mål å erstatte dieselforbruket 100 % med fornybare energikilder.

Første fase av energiomleggingsprosessen ble gjennomført sommeren 2021. Det ble installert 403,2 kWh med energilagring i batterier og 12 stykker 1 000 L varmtvannstanker for termisk lagring [93]. Dette fungerer i hybriddrift med dieselaggregatene, og det er levert en 270 kVA transformator for systemet [26]. Det termiske lageret benytter varmegjenvinning fra aggregatene, samt at det er en el-kjel for spisslast og backup. Det ble også installert et lite solcelleanlegg på en badstue på 2 kWp. Systemet reduserte det årlige dieselforbruket til 123 951 L. Dette inkluderer diesel til aggregatene og en traktor.

3.1.2 Konsekvensutredning

Naturen i Arktiske strøk er sårbar for direkte påvirkning, da spesielt med tanke på langvarige forstyrrelser i jordsmonn og vegetasjon. Den korte vekstsesongen og de lave temperaturene gjør at naturen bruker lang tid på å tilpasse seg endringer [74].

På Svalbard består dyrelivet av få fuglearter og pattedyr som gjør de særskilt sårbare for endringer. Dette er blant annet hekkefugl, svalbardrein og isbjørn [94]. Isbjørnen er fredet, og hannbjørnene kan ha en kroppslengde opp til 2,6 meter [95]. Det er også flere vernede områder i nærheten av Isfjord Radio. Ett av disse er Kapp Linné fuglereservat, et viktig område for arter av hekkefugl, vist i figur 3.2. I tillegg har fuglereservatet en viktig funksjon som raste- og myteområde for andre arter av vann- og våtmarksfugl [93].



Figur 3.2: Kart over Kapp Linné fuglereservat [12].

I forkant av energiomleggingsprosessen på Isfjord Radio, ble det utarbeidet en konsekvensutredning av Multiconsult på vegne av SNSK. I denne ble det påpekt at beslag på naturareal vil ha direkte og indirekte effekt for dyr og vegetasjon som er rødlistet [93]. På bakgrunn av dette foreligger det krav om nødvendige tiltak for å unngå skade på vegetasjon og dyreliv.

Samlet sett ble bakkemonterte solceller ansett å ha noe negativ innvirkning på fauna, vegetasjon og landskap. Dette ble underbygget av moderne studier som viser at solkraftanlegg kan påvirke naturmangfold, friluft- og kulturområder [74]. Forebyggende tiltak vil være pælefundamentering, slik at de kan fjernes i fremtiden. Disse vil også installeres i et område som allerede består av kraftledninger, kjøretraseer, bygninger og teknisk infrastruktur.

I forbindelse med vindkraft ble det i konsekvensutredningen konkludert med at dette ga middels til stor negativ konsekvens på blant annet fauna, vegetasjon og landskap. Dette gjaldt tre mindre (3x100 kW) eller én stor (275 kW) HAWT. Hovedproblemet var at turbinen(e) ble tenkt fastsatt 1,5 km fra Kapp Linné fuglereservat. Ifølge sysselmesteren på Svalbard vil en vindturbin lokalisert i dette området føre til fare for skade på trekkfugler i tillegg til å forringe et viktig leveområde for trekkfugl i Isfjorden [26]. I perioder kan opptil 40 000 havhest trekke inn og ut av Isfjorden hver time, som utgjør stor kollisjonsfare med vindturbinen dersom den plasseres i området. Som avbøtende tiltak ble det foreslått å male rotorbladene og deler av tårnet. Det ble også vurdert muligheter for bruk av utstyr som automatisk stopper vindturbinen når det er mye fugl i området.

I tillegg til negativ påvirkning på det biologiske mangfoldet vil vindturbin(er) være svært synlig på lang avstand. Den fører til forstyrrelser i landskap som er sårbart for høyreiste strukturer, og som bryter med landskapets karakter. Det er i tillegg knyttet usikkerhet til effekten rundt de nevnte avbøtende tiltakene. I vurderingen om etablering av vindturbin ble det på bakgrunn av fuglereservatet lagt avgjørende vekt på tap av et viktig leveområde for mange fuglearter, samt tap av fugleliv. For andre tiltak bør det vurderes VAWT fremfor HAWT. Det er ikke nevnt noe om VAWT i søknad om konsesjon for vindturbin eller i konsekvensutredningen.

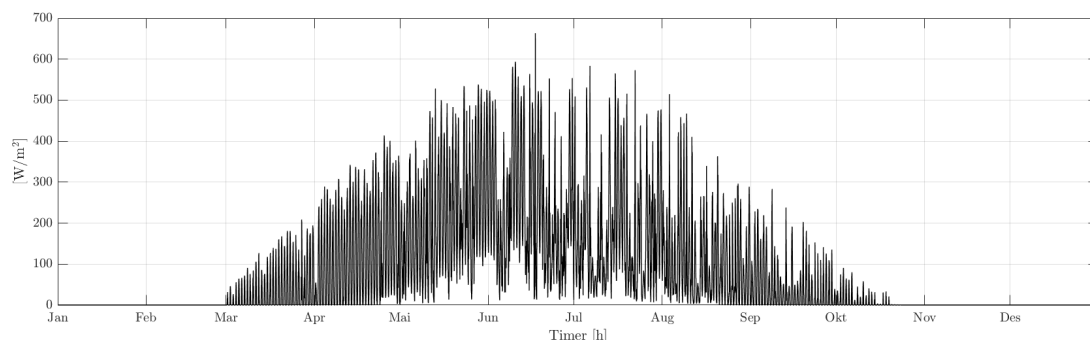
3.2 Vær, klima og landskap

Værforholdene på Svalbard er skiftene og kan til tider være ekstreme. Området er preget av mye tåke og skyer [96][97].

3.2.1 Solstråling

På Isfjord Radio er det midnattssol og mørketid. Midnattssol betyr at det er sol over horisonten hele døgnet, og på Svalbard er dette fra omtrent 19. april til 23. august [98]. I motsetning vil ikke solen komme over horisonten i løpet av døgnet i mørketiden [99]. Dette er fra omtrent 26. oktober til 16. februar [100]. Etter mørketiden vil dagene gradvis bli lengre og lysere, frem til midnattssol.

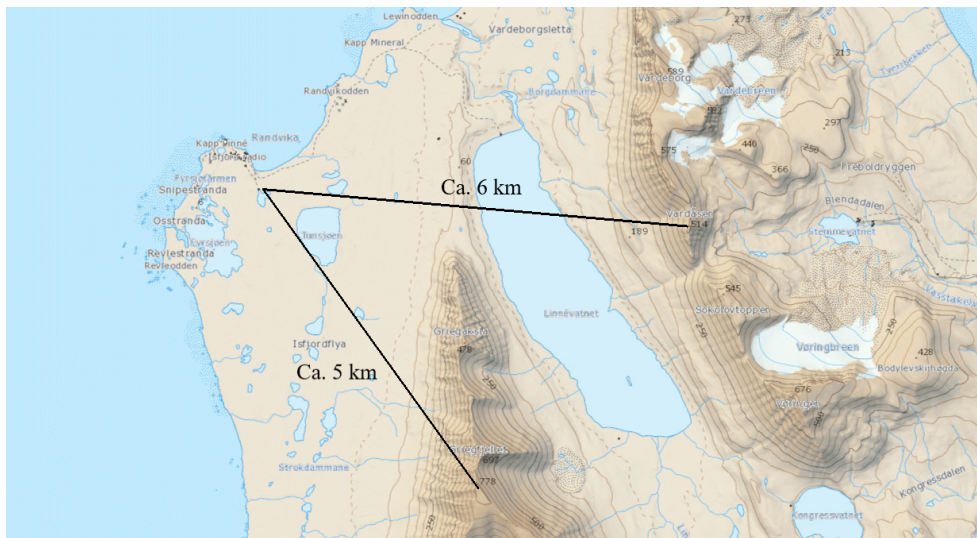
Den globale horisontale solstrålingen på Isfjord radio er vist i figur 3.3. Den første målingen er 1. mars kl. 09, og den siste målingen er 23. oktober kl. 12.



Figur 3.3: Global horisontal solstråling [W/m²] (Vedlegg A)

Isfjord Radio ligger ved kysten 5 moh., og landskapet består av flatt terreng. I området rundt er det to store fjell som kan påvirke skyggekast på solcelleanlegget [11]. Fjellene,

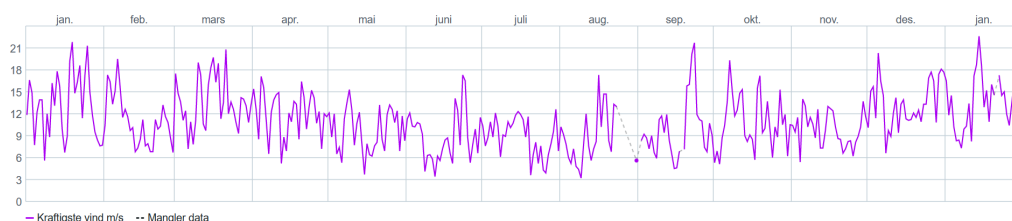
samt avstanden til det planlagte solcelleanlegget, er presentert i figur 3.4. Fjellene er henholdsvis 514 moh. og 778 moh., i sør-østlig retning.



Figur 3.4: Utklipp av terrenget rundt Isfjord Radio. Markert avstand fra plasseringen til det planlagte bakkemonterte anlegget og de to største fjellene i nærheten [11].

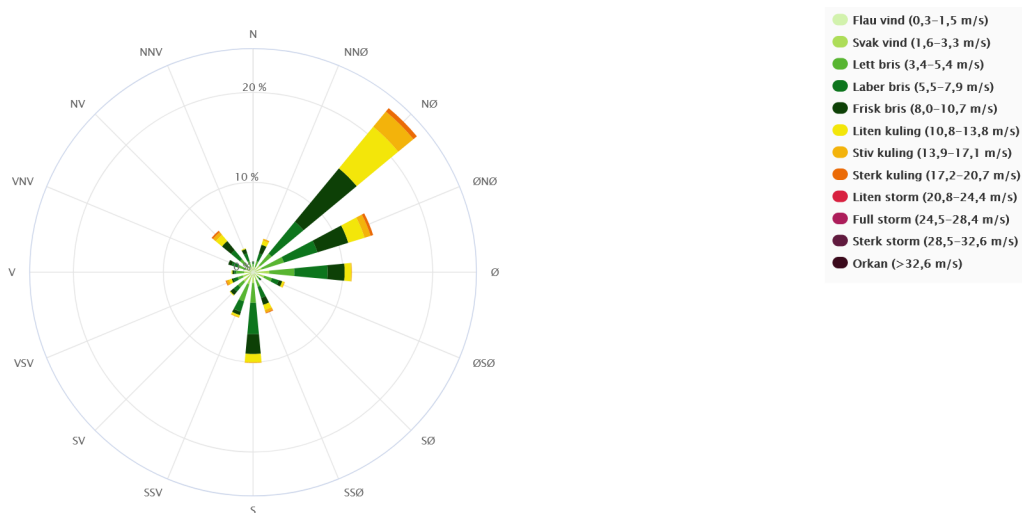
3.2.2 Vind

Svalbard er svært vindutsatt, og påvirkes av de polare østavindene. På grunn av endring i terreng på øyene, forandrer både vindstyrke og vindretning seg fort [96]. Årlige vindmålinger med kraftigste vind fra Isfjord Radio er presentert i figur 3.5. Gjennomsnittsvinden i 2022 er ifølge NKS 7 m/s, og 7,6 m/s i perioden 02.2015 til 12.2019. På grunn av det flate terrenget er vinden preget av lite turbulens [101][93]. Det kraftigste vindkastet de siste 13 månedene var på 36,7 m/s [13].



Figur 3.5: Vindmålinger fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].

Vindrose for Isfjord Radio i perioden januar 2022 til januar 2023 er hentet fra NKS og presentert i figur 3.6. Figuren viser at typetallet, altså den hyppigste forekommende vindretningen, er nord-øst. Dette typetallet gjelder også for oktober til mars [14].

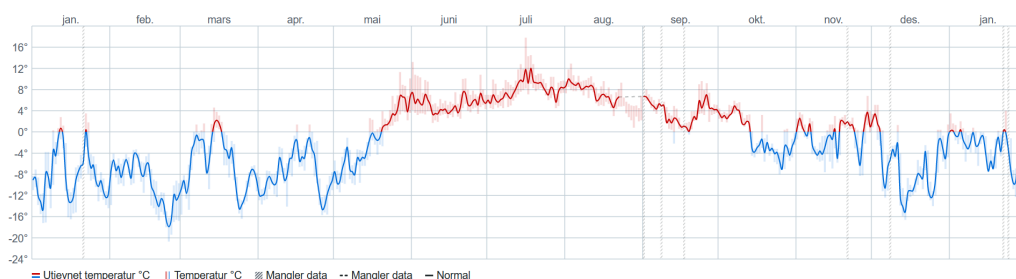


Figur 3.6: Vindrose med frekvensfordeling for Isfjord Radio i perioden 1.2022-1.2023 [14]

3.2.3 Temperatur

Klima på Svalbard klassifiseres som tundraklima. Dette kjennetegnes ved at middeltemperaturen for varmeste måned ligger mellom 0°C og 10°C [102]. På grunn av det kalde klima er bakken permanent frosset, også kalt permafrost. Dette betyr at kun ca. 1 meter av det øverste jordlaget tiner om sommeren [97].

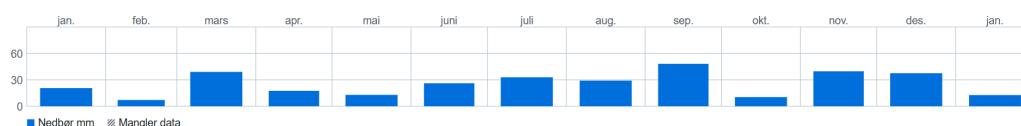
Figur 3.7 viser at de største temperaturskiftene hovedsaklig skjer i mai og oktober. Fra juni til september er den gjennomsnittlige temperaturen over 0°C , mens de resterende månedene er temperaturen under. Ifølge PVsyst er gjennomsnittlig omgivelsestemperatur fra år 1992 til 2014 på Isfjord Radio lik $-7,82^{\circ}\text{C}$ [103]. Den laveste registrerte minimums- og maksimumstemperaturen ved Isfjord radio de siste 20 årene er henholdsvis $-24,5^{\circ}\text{C}$ og 20°C [93].



Figur 3.7: Temperaturmålinger fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].

3.2.4 Nedbør, albedo og snøakkumulering

Målinger fra den metrologiske stasjonen på Isfjord Radio i 2022 viste at den totale nedbørsmengden var 321 mm [13]. Ytterligere statistikk er presentert i figur 3.8. På bakgrunn av temperaturmålingene beskrevet over, er det rimelig å anta at nedbør i perioden fra januar til mai og oktober til desember kommer i form av snø.



Figur 3.8: Nedbør fra Isfjord Radio målestasjon for januar 2022 - januar 2023 [13].

Vinden har stor innvirkning på snødriften, og dermed albedo ved stasjonen. Snøen driver i vinden og danner snøfonner, samtidig som områder kan være tilnærmet snøfrie. I følge NKS er store eller hele deler av bakken på Svalbard Lufthavn dekket med snø fra oktober til mai [104]. Snødybden varierer i denne perioden. Fra oktober til januar er det ca. 4 cm med snø, mens fra februar til mai/juni varierer snødybden fra 10 til 30 cm. I en snødriftsanalyse for Isfjord Radio utarbeidet av Potac i 2022 (tilsendt av oppdragsgiver), ble det brukt gjennomsnittlig snødybde på 30 cm som grunnverdi [105]. På bakgrunn av variasjon i hvor store deler av bakken som er dekket med snø, samt usikkerhet rundt hvor skitten denne snøen blir, er det i denne oppgaven antatt en albedo på 0,6 fra oktober til mai, og 0,2 fra juni til september.

Snødriftsanalysen til Potac tar også for seg snøakkumulering rundt solcellepaneler på Isfjord Radio. Grunnet den totale snøtransporten er det vurdert høy risiko for oppbygging av snøfonner. I analysen ble det gjort en rekke simuleringer ved hjelp av numerisk modellering, og resultatene viste at kantene til panelene på lo-siden mot øst påvirker oppbygging av snøfonner i perioden september til mai. Med hovedvindretning fra nordøst og sørvendte panelrader vil det forventes snøfonndannelse. For å unngå dette er det viktig med gap mellom paneler og bakke for å skape mindre luftmotstand til snøpartiklene, samt panelorientering relativ til den hyppigste vindretningen. Det kan også forventes stor snøfonn på le-siden av anlegget på ca. 2,7 meter.

3.3 Risikovurdering

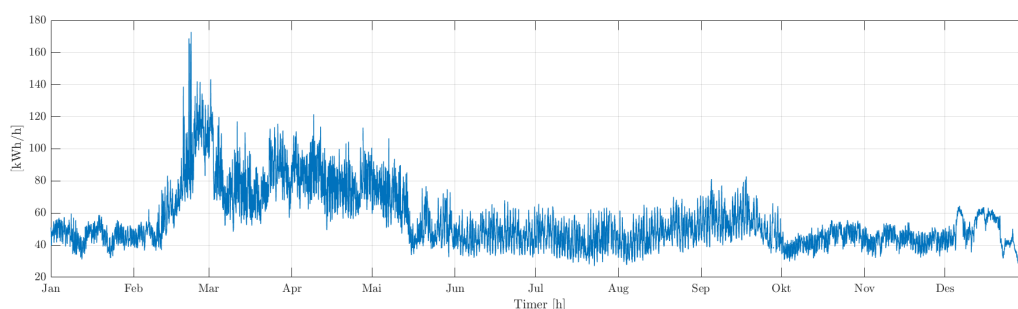
På Isfjord Radio er det kritisk kommunikasjonsinfrastruktur, og det er viktig at det til enhver tid er tilgjengelig stabil og sikker forsyning. Sol- og vindkraft er uregulerbar kraft, og kan kun benyttes når den produseres. Ved å inkludere batterisystem blir den produserte energien delvis regulerbar, men vil ikke kunne sammenlignes med ren regulerbar kraft. Det kan også oppstå midlertidig havari eller liknende på systemene. På bakgrunn av dette vil alle tre aggregatene bli stående på Isfjord Radio i fremtiden, uavhengig av mengde fornybar energiforsyning.

3.4 Spesifikasjoner

Vedrørende metode- og diskusjonsdelen for oppgaven, er det nødvendig med spesifikasjoner tilknyttet energiforbruk, aggregat, sol- og vindanlegg, batterier, det elektrisk anlegget og styresystemet ved Isfjord Radio. Det er også nødvendig med økonomiske estimater for økonomiberegninger.

3.4.1 Energiforbruk

Energiforbruket til Isfjord Radio i 2022 er presentert i figur 3.9. Høyeste og laveste forbruk i løpet av året er henholdsvis er 172,8 kWh/h og 27 kWh/h. I snitt er forbruket på 54,87 kWh/h.



Figur 3.9: Årlig energiforbruk gitt i timesverdier for Isfjord Radio i 2022 (Vedlegg A).

3.4.2 Diesellaggregat

Spesifikt for Isfjord Radio er tre diesellaggregat tilgjengelig, hver har en nominell effekt på 198 kW. Generatorlasten er 75 %, det vil si kapasiteten aggregatet søker etter å operere under ladning av batteri. Motoren til de tre diesellaggregatene er av typen BF6M1015. De

har et spesifikt drivstofforbruk på 209 g/kWh, 207 g/kWh og 209 g/kWh ved henholdsvis 100 %, 75 % og 50 % drift. De tre aggregatene rulleres ved bruk.

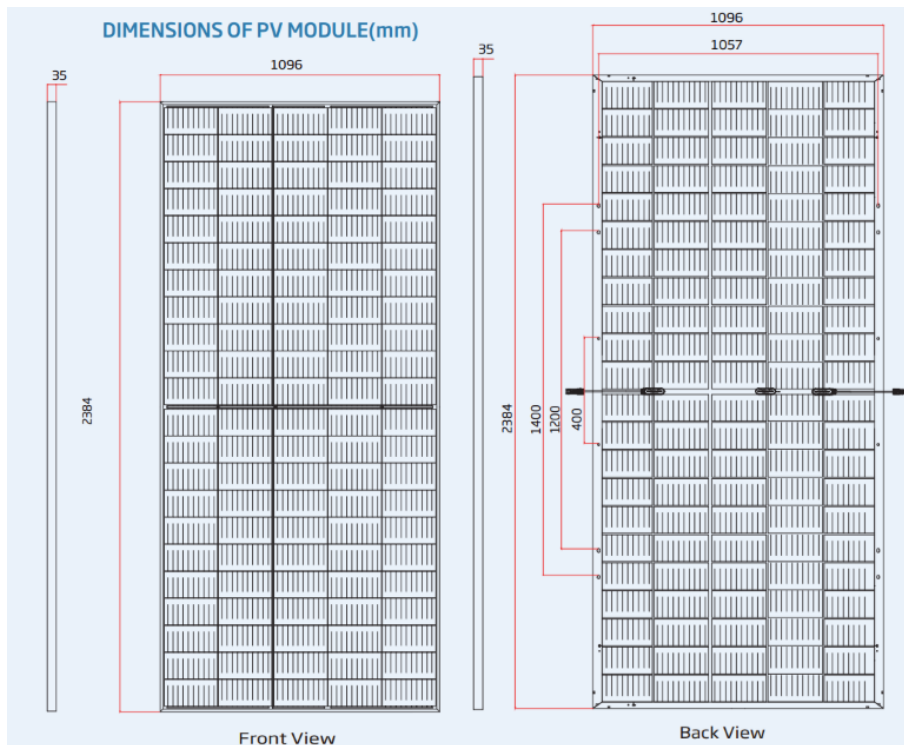
3.4.3 Solcelleanlegg

Området det er gitt konsesjon for montering av det bakkemonterte solcelleanlegget blir kalt område 2 og er presentert i figur 3.10.



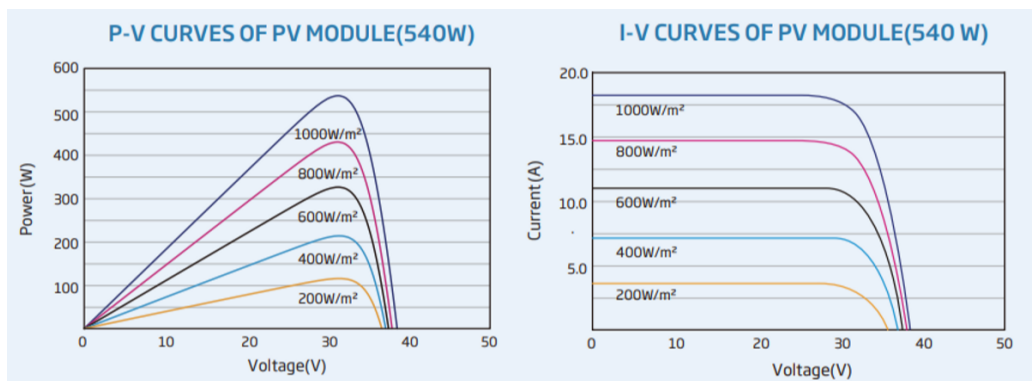
Figur 3.10: Satellittbilde over Isfjord Radio og område 2.

Solcellepanelene for oppgaven er basert på oppdragsgiver sitt valg av Trina Solar sine 550 Wp 27 V Vertex paneler. Modulene er av monokrystallinsk type og har en teoretisk effekt på 530 - 550 W. Modulene har en virkningsgrad på 21 % [15]. Figur 3.11 viser dimensjonene til modulene.



Figur 3.11: Trina Solar 550 Wp med tilhørende dimensjoner [15].

Solcellene har en P-V- og I-V-kurve vist i figur 3.12.



Figur 3.12: I-V- og P-V-kurve for Trina Solar 550 Wp ved ulik solstråling [15].

Oppdragsgiver har brukt vekselretter Kaco new energy 165 kW, 960-1300 V, 50/60 Hz Blueplanet 165 TL3-INT. Systemet har ikke egen laderegulator, men én MPPT som er innebygd i vekselretteren.

Solcelleanlegget skal være fast- og bakkemontert med pælfundamentering [26]. Pælene skal stå ca. 3 meter under bakken. De siste 1,2 meterne er fast berg og pælene støpes fast i berget. På bagrunn av dette borres det hull på forhånd til pælene.

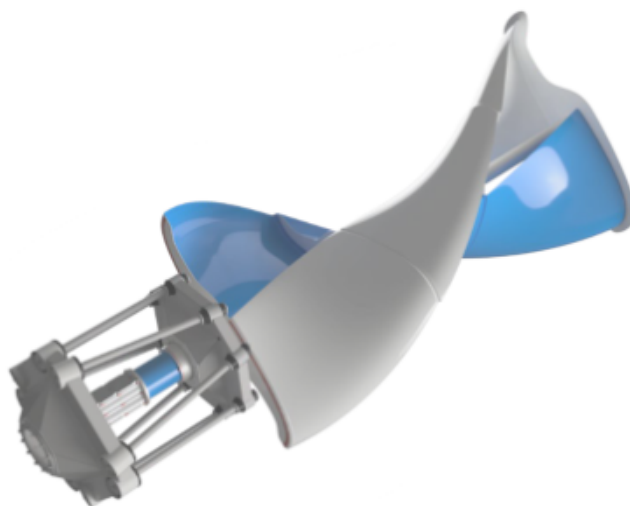
3.4.4 Batterier

Batterianlegget har til sammen har en total kapasitet på 403,2 kWh. Dette fordelt på 84 batterimoduler i 8 batteriskap. Batteriene er Tesvolt TS HV 70 litium-ione-batterier med en vekselretter på 240 kW. SOC min til batteriet er 20 % og SOC maks til batteriet er 90 %. Batteriene har en C-rate på 1.

3.4.5 Vindenergi

Valgt VAWT er LuvSide savonius LS Helix 3.0, vist i figur 3.13. Den er helix-designet og i stand til å operere ved lave vindhastigheter. Turbinen skal være frittstående, og er bygget for å være enkel å vedlikeholde. Rotorbladene er 4,2 meter høye og har en diameter på 2,2 meter. Med mast er total høyde over bakken 10 eller 15 meter. Fundamentet ligger ned til 1,5 meter under bakken [16].

LuvSide leverer sine vindturbinener med alle nødvendige elektriske komponenter, inkludert vekselretter samt mast og fundament ved frittstående anlegg [16]. Turbinene er utstyrt med en sikkerhetsmekanisme, overbelastningskobling, som sikrer mekaniske komponenter fra skade ved hurtig roterende rotor. Det vil si at rotoren og generatoren kobles fra hverandre når generatoren skrus av [106].



Figur 3.13: Savonius LS Helix 3.0 fra LuvSide [16]

Effektkurven tilhørende LS Helix 3.0 er konfidensiell og tilsendt fra produsenten på e-post. Målingene ble gjort i en vindtunnel. Offisielle verdier er 3 kW ved 16 m/s og 5

kW ved 20 m/s. Turbinen har cut-in og cut-off ved henholdsvis 4 m/s og 20 m/s, og er stormsikre opp til 50 m/s [16]. LuvSide formidler i en e-post at C_p for savonius VAWT er 10 % til 12 %.

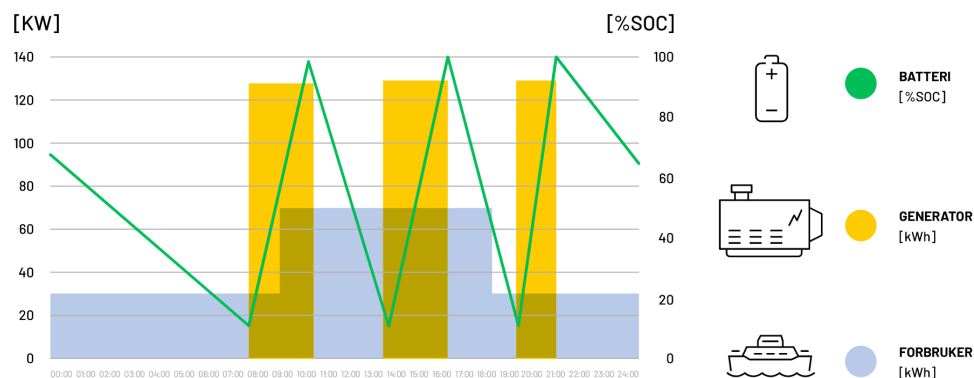
3.4.6 Det elektriske anlegget

Det bakkemonterte solcelleanlegg har 10 strenger med 36 paneler i serie, og kobles til en vekselretter som har én MPPT. Det vil si at hver streng optimaliseres hver for seg. Vekselretteren inverterer 1 500 V DC til 690 V AC.

Mellom det bakkemonterte solcelleanlegget og batterisystemet er det en 690/400 V transformator. Mellom batterisystemet og lasten er det en 400/230 V transformator. Aggregatene er plassert på siden med 230 V. Dette er fordi Isfjord Radio driftes på 230 V IT-nett og batterisystemet driftes på 400 V TN-nett.

3.4.7 Eksisterende styringssystem

Isfjord Radio har et styringssystem som styrer samhandlingen mellom aggregatene og batteriene. Styringssystemet søker etter å redusere dieselforbruket ved å drifte aggregatene på lasten som gir høyest virkningsgrad. Effekten som ikke forbrukes av lasten går til å lade batteriene. Når batteriet er ved SOC maks slås aggregatet av, og batteriene blir utladet til SOC min. Figur 3.14 viser en generell illustrasjon av hvordan batteri og aggregat samhandler for å dekke et gitt forbruk.



Figur 3.14: Generelt eksempel på samhandling mellom generator og batteri med et gitt forbruk [17].

3.4.8 Kostnadsestimater

Under presenter kostnadsestimater for økonomi. Det er kun dieselpriisen som er knyttet til det faktiske anlegget. I tabell 3.1 presenteres komponentene til anlegget samt deres prisestimer for investering.

Tabell 3.1
Prisestimer

Komponent	Pris	Enhet	Kilde
Solcellepanel	2 500	NOK/m ²	[107]
Stativ solcellepanel	5 695	NOK/48 panel	[108]
Kabler	6 · 735	NOK/48 panel	[108]
Vekselretter sol	52 252	NOK/stk	[109]
Batteriskap	39 491	EURO/48 kWp	[110]
Vekselretter batteri	52 252	NOK/stk	[109]
Vindturbin	33 920	NOK/stk	[111]
Vekselretter vind	12 200	NOK/stk	[112]

Diskonteringsrenten er satt til å være 4 % [113]. Levetiden er 30 år for solceller og batterier basert på deres respektive datablad. Levetiden til en vekselretter er estimert til å være 15 år [37]. For småskala vindturbiner er levetiden normalt 20-25 år [114].

Det er usikkert hvor mye det koster for pæler til bakkemontering, samt boring i berg, transport- og installasjonskostnader. I kontakt med oppdragsgiver kommer det frem at dette er svært kostbart. Det er for eksempel oppgitt at det brukt mye tid på å designe konstruksjonen for å redusere antall pælehull og materialbruk med hensyn på kostnader. Som en referanse for denne oppgaven er Paradise Energy Solutions sitt estimat av et bakkemontert solcelleanlegg benyttet. For 200 kWp installert effekt koster det ca. 506 400 USD totalt [115]. Det er også knyttet usikkerhet til installasjonskostnader av vindturbiner, som mast, sikringer, kabler, elektrikerarbeid m.m. Ifølge Stephanie Cole fra The Roundup, kan total investeringskostnad til småskala vindturbiner bli mellom 2 000 og 5 000 USD per kW installert effekt [116].

Kostnader knyttet til drift- og vedlikehold (D&V) for solceller er antatt å være 19 000 kr gjennom anleggets levetid [117]. For batteri er dette estimert til 60 USD/år, definert for batterisystemer med kapasitet mindre enn 1 MW [118]. D&V-kostnad for vindturbiner er antatt 200 USD/år [116]. I tillegg vil det komme en besparelse i dieselforbruk etter hvor

mye forbruket reduseres i de ulike scenarioene. Dieselpriisen er 9,7 NOK/L per mai 2023, men er forventet å gå opp i juli 2023. Valutakursene som er benyttet, hentet 05.05.23, er 10,6133 NOK/USD og 11,6895 NOK/EURO [119].

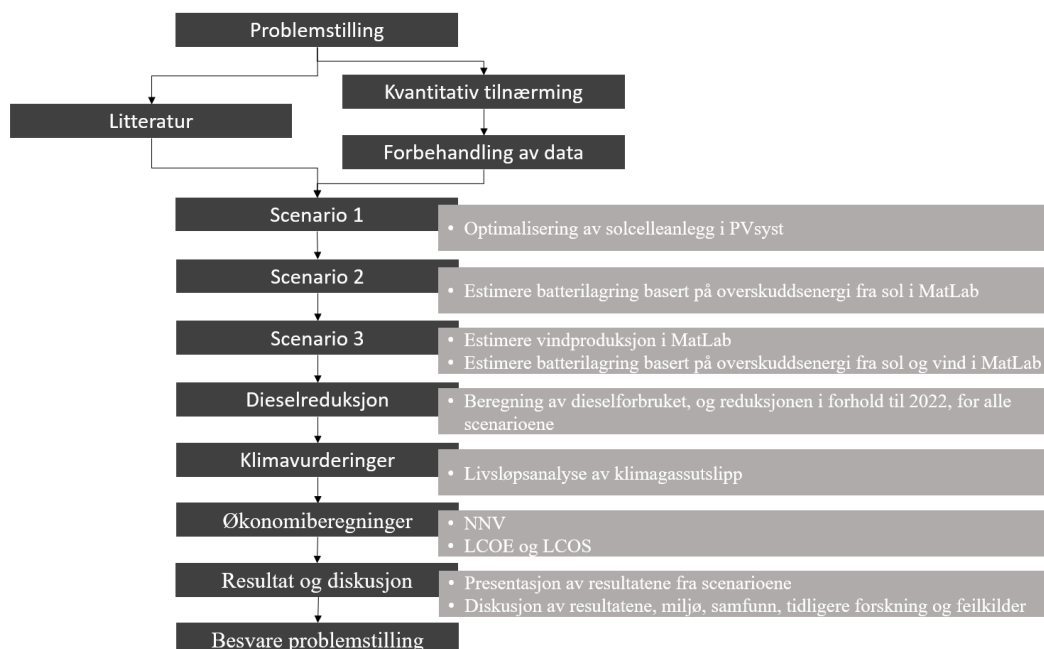
4 Metode

For å besvare problemstillingen er utdelt materiale fra oppdragsgiver, datainnsamling fra offentlige kilder, tidligere forskning, litteratur og teori benyttet. I dette kapitlet blir først forskningsmetode og flytskjema presentert. Etter dette blir det redegjort for datainnsamling og videre undersøkes analysens validitet. I analysedelen beskrives metodene brukt for å hente ut ønskede resultater til å besvare problemstillingene.

4.1 Forskningsmetode

Oppgaven bruker en kvantitativ tilnærming for å besvare problemstillingene. I kvantitative studier relatert til forskning og teknologi brukes ofte matematiske, statistiske og dataanalytiske metoder [120]. Disse metodene brukes for å samle, håndtere, tolke og forutse ulike teknologiske egenskaper, funksjoner og utvikling. Beregningsverktøyene PVsyst og MatLab er brukt for analysene i de ulike scenarioene. I tillegg er det benyttet litteratur for å verifisere de kvantitative metodene i analyse, og for å underbygge beslutninger tatt i prosessen.

Fremgangsmåten for å besvare problemstillingene er presentert i flytskjema i figur 4.1.



Figur 4.1: Flytskjema for metode

4.2 Dokument- og datainnsamling

Gjennom prosjektperioden er det gjennomført dokumentgjennomgang av tilsendte materialer fra oppdragsgiver og innhentede materialer fra andre informasjonskilder. Dokumentgjennomgangen baserte seg i hovedsak på informasjon om energiomleggingsprosessen. Dokumenter som ikke er tilgjengelig på internett er følgende:

- *Isfjord Radio - Oppstartsmøte prosjektering solcellepark*. Pptx. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Hybridsystem Isfjord Radio Brukermanual*. Pdf. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Tid, batterieffekt, ladetilstand, energiforbruk, generatoreffekter*. Xlsx. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Befaringsnotat fundamentering*. Pdf. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Isfjord Radio - Ny energiløsning - FDV*. Pdf. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Snødriftsanalyse*. Pdf. Tilsendt fra oppdragsgiver.
- *Kopie von Leistungskurve 4 m hoher Rotor mit 2,2 m Durchmesser*. Xlsx. Tilsendt på e-post fra Rolf Hoffmann fra LuvSide.
- *Solcelleanlegg på Nærbø*. Pdf. Tilsendt fra oppdragsgiver.

Xlsx-filen fra oppdragsgiver med tid, batterieffekt, ladetilstand, energiforbruk og generatoreffekter ble åpnet i Excel og navngitt «Rapport Isfjord Radio 2022 - forbruk, generator og batteri (ORIGINAL)».

4.3 Verifisering og validitet

For å sikre at resultatene fra analysen er pålitelige, ble resultatene fra PVsyst validitets sjekket.

4.3.1 Validering av PVsyst

For å optimalisere, simulere og analysere solcelleanlegget i scenario 1, ble programvaren PVsyst versjon 7.3 benyttet. Validitet for simulering i PVsyst ble gjort ved at gruppen

fikk tilgang til et eksisterende solcelleanlegg fra oppdragsgiver, der faktisk årsproduksjon i 2022 og relevante parametere var tilgjengelig. Anlegget ligger på Nærbø i Hå kommune. Eksakt lokasjon er konfidensiell for oppgaven.

Eksakt lokasjon ble lagt inn i PVsyst. Videre ble det lagt inn rett orientering, fastmontert på tak og helningsvinkel 22° samt asimut på -33° . Deretter ble riktig type moduler lagt inn, med en installert effekt på 69,3 kWp. Dette er fordelt på 220 moduler og to vekselrettere av samme type. Det ble lagt inn fjernskygge i horisontlinjetegning, i tillegg til albedo og tilsmussingstap. Albedo ble satt til 0,2 på bakgrunn av jordsmonn og tilsmussingstap ble satt til 5 %. Resten av parameterne ble neglisjert, da det kun var interessant å se på estimert energiproduksjon fra solcelleanlegget. Avvikene er presentert i tabell 4.1. For noen perioder er avvikene relativt store, men totalproduksjonen er tilnærmet korrekt. Faktisk totalproduksjon er noe større enn estimert. Dette kan komme av at solstrålingen i 2022 var bedre enn gjennomsnittetsdata fra PVsyst eller at standard elektrisk tap i PVsyst er høyere enn faktisk. Avvikene vurderes som akseptable.

Tabell 4.1

Estimert og faktisk produksjon fra et eksisterende anlegg i månedesverdier.

Måned	Estimert [MWh]	Faktisk [MWh]	Avvik [%]
Januar	0,84	0,86	-2,4
Februar	2,29	1,99	13,1
Mars	5,54	6,91	-24,7
April	7,87	9,37	-19,1
Mai	10,00	9,57	4,3
Juni	10,15	9,26	8,8
Juli	9,18	9,39	-2,3
August	7,42	8,87	-19,5
September	5,70	6,04	-6,0
Oktober	3,03	2,88	5,0
November	1,17	1,43	-22,2
Desember	0,57	0,92	-61,4
Totalt	63,76	67,49	-5,9

4.3.2 Verifisering av beregningsmetode for VAWT

Sustainable Technologies Evaluation Program utførte i 2015 en studie som analyserte ytelsen til en 700 W VAWT [121]. Typen VAWT var en kombinasjon av darrieus og savonius.

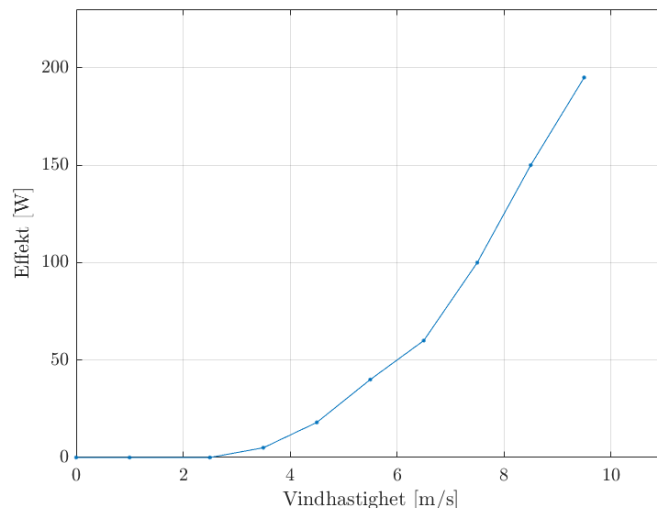
Studien gikk ut på å sammenligne produsentens effektkurve opp mot en eksperimentelt bestemt effektkurve. Testingen foregikk i felt, og ikke i vindtunnel. Derfor ble effekter generert når vindhastigheten var stabil i minst ti sekunder brukt til å lage en stasjonær effektkurve. Det ble også gjort faktiske målinger for energiproduksjon (før tap i vekselretter). Det kom frem i studien at effektkurven fra produsent ikke leverte det den lovet. Det viste seg også at vekselrettertapet når det ikke var produksjon i ongrid-systemet, var større en selve produksjonen [121].

Studien ble utført i fra mai til juni. I denne verifiseringen er det kun tatt utgangspunkt i mai 2015. Det manglet målinger tilsvarende ca. 4 dager [121]. I verifiseringen var det ønskelig å undersøke beregningsmetoden for vindenergi, gitt at effektkurven er korrekt. Effektkurven i studien fra 2015 liknet på effektkurven til LuvSide i form. Det ble tatt utgangspunkt i gjennomsnittlig vind i mai og den eksperimentelt bestemte effektkurven for stasjonær tilstand. Deretter ble produksjonen beregnet i MatLab basert på lineær interpolering. Resultatet ble sammenlignet med faktisk målt energiproduksjon.

Det ble opprettet et MatLab-script og gjennomsnittlige vindhastigheter for mai, samt gitt frekvens ble notert. MatLab-scriptet er presentert i vedlegg B. Deretter ble den eksperimentelt bestemte effektkurven for stasjonær tilstand for vindhastigheter mellom 0,5 m/s og 9,5 m/s notert med steg på 1. Det vil si de gjennomsnittlige vindhastighetene som oppsto i mai, og for samme steglengde som LuvSide.

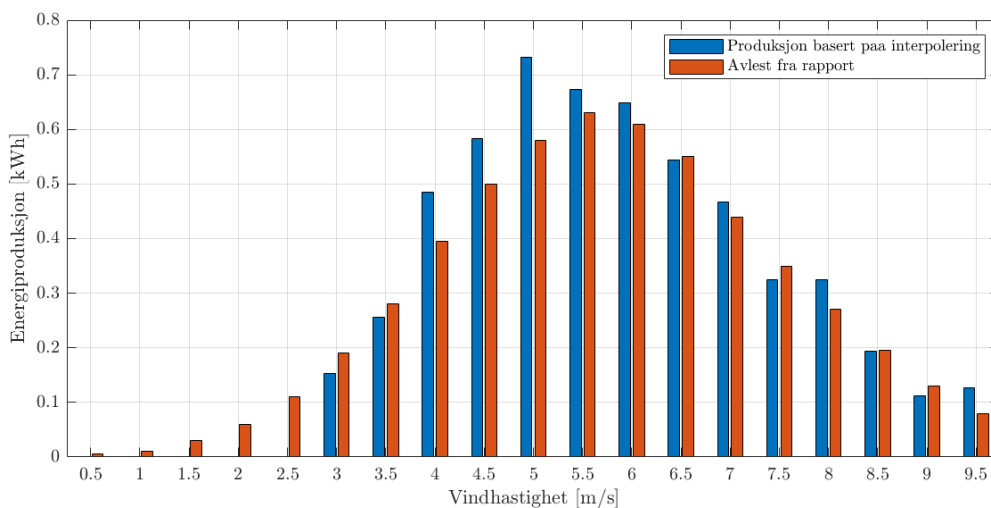
Alle verdiene benyttet i MatLab-scriptet ble lest av stolpediagram med forbehold om feil. Likevel var gjennomsnittsvinden ifølge rapporten 2,56 m/s og avlest gjennomsnittsvind var 2,561 m/s. I tillegg var totalproduksjonen i rapporten 5,6 kWh/mnd og avlest totalproduksjon 5,56 kWh/mnd. Totalproduksjon gjaldt for vindhastigheter mellom 0,5 m/s og 13,5 m/s. Det oppstod sjeldent vindhastigheter over 9,5 m/s, og disse er derfor ikke inkludert i stolpediagrammet for gjennomsnittlige vindhastigheter i studien. Det ble videre kun benyttet målt produksjon mellom 0,5 m/s og 9,5 m/s.

I figur 4.2 er den eksperimentelt bestemte effektkurven for stasjonær tilstand presentert.



Figur 4.2: Den eksperimentelt bestemte effektkurven for stasjonær tilstand med steg på 1.

I figur 4.2 presenteres estimert produksjon basert på interpolering, samt faktisk målt produksjon fra rapporten, for hver vindhastighet. Basert på interpolering ble totalproduksjonen for vindhastigheter mellom 0,5 m/s og 9,5 m/s estimert til 5,622 kWh/mnd. Den faktisk avleste produksjon ble 5,415 kWh/mnd.



Figur 4.3: Energiproduksjon for mai 2015 ved hjelp av forskjellige metoder.

Avviket ble total 0,207 kWh/mnd. Dette er vurdert som akseptabelt, og kan for eksempel skyldes avlesningsfeil. Effektkurven har ikke avlest verdi for 4 m/s, det vil si at det er interpolert fra 3,5 m/s til 4,5 m/s. Her er estimert produksjon høyere enn faktisk. Derimot er det tilsvarende avvik for 4,5 m/s. Avviket for 5 m/s skyldes interpolering, da effekten her ikke var lineært mellom 4,5 m/s og 5,5 m/s i studien.

4.4 Analyse

4.4.1 Forbehandling av forbruksdata

For å kunne bruke forbruksdataene for videre analyse, ble dataene forbehandlet i Excel. Det ble laget en ny csv-fil av originalfilen fra oppdragsgiver. Denne inkluderte kun tid og forbruk. Den første tiden ble slettet, da den gjaldt for 2021. Filen manglet to tidsmålinger.

For å finne de manglende datoene ble det først lagt inn en kolonne med alle datoene for alle hele timer i 2022. Videre ble sammenligne-funksjonen brukt. Den tar inn søkeverdi, søkematrise og type. Søkeverdi undersøker om verdien finnes i søkematriksen og type er typen verdi som søkes etter: 0 (nøyaktig treff), -1 (større enn) og 1 (mindre enn) [122]. Søkeverdi ble valgt til første dato i den fullstendige dato-listen og søkematriksen var den ufullstendige dato-listen. Type ble valgt til null. Når den var kalkulert ble det samme gjort for alle datoene i den fullstendige dato-listen. Tidspunktene som manglet var én timesmåling den 30.10.22 og én den 31.12.22. Disse ble deretter inkludert i den ufullstendige datolisten, og sortert til riktig rekkefølge.

For å få en fullstendig csv-fil med 8 760 målinger ble alle tomme ruter i forbrukskolonnen erstattet med «-». Det ble gjort 30 endringer, som indikerer at det manglet ytterligere 28 målinger. Det ble benyttet «-» for å beholde de tomme rutene for å forhindre at MatLab senere forkorter listen, og fjerner rutene uten innhold. Ved bruk av «-» blir målingen beholdt på rett sted, men som «Not a Number». På denne måten har alle filene lik lengde. I tillegg ble det lagt til to rader helt øverst for å tilfredstille kravet til PVsyst. PVsyst har krav om at den øverste raden spesifiserer dato- og lastkolonnene, og den nest øverste spesifiserer enheten til lasten i klammeparentes.

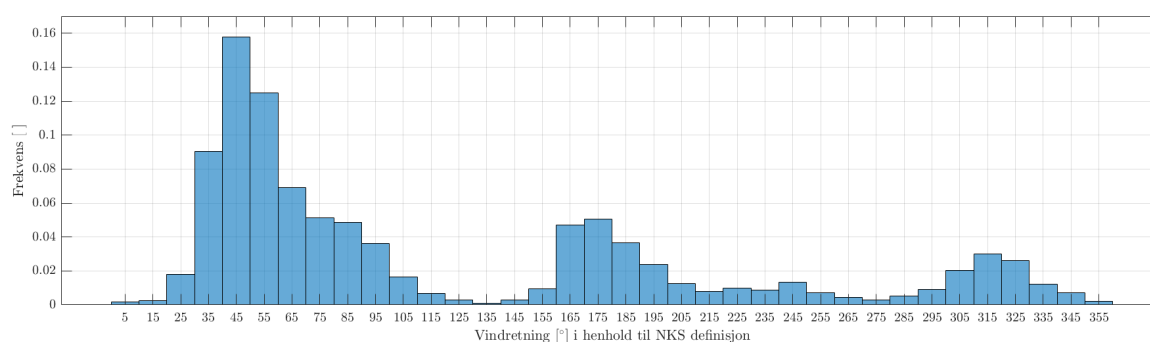
4.4.2 Scenario 1

Optimalisering av solcelleanlegg

Det var ønskelig å sette retningen på solcellepanelene parallelt med vindretningen, slik at vinden blåser snøen mellom radene, og ikke over panelene. I kapittel 3.2.2 kom det frem av vindrosen at det blåser oftest fra nordøst. For å undersøke nøyaktig hvilken vinkel som skal brukes, ble vindretningen på Isfjord Radio i 2022 analysert. Csv-filen fra NKS med middelvind og vindretning ble hentet direkte inn i et nytt MatLab-script. Presentert i

vedlegg C. NKS definerer nord som 0° og øst som 90° [101].

Det ble laget to kolonner i MatLab, én med middelvind og én med vindretning. Det ble laget en variabel som hentet ut vindhastigheter som var større eller lik 5 med tilhørende vindretning. Dette ble gjort på bakgrunn av snøtransport med vind, beskrevet i kapittel 2.6.1. Videre ble typetallet beregnet, altså den vindretningen som forekommer hyppigst. Den hyppigste vindretningen ble 48° . Det ble også beregnet hvor ofte i prosent det blåser i denne retningen, samt mellom 38° og 58° . Hyppigheten var henholdsvis 1,77 % og 30,16 %. Histogrammet i figur 4.4 viser frekvensen av alle vindretningene.



Figur 4.4: Frekvensen av vindretninger i 2022 på Isfjord Radio.

PVsyst benytter databasen Meteonorm 8.1, som har målinger for solstråling fra 1992 til 2014 i nærheten av Isfjord Radio. Nærmeste målestasjon i Meteonorm fra Isfjord Radio er Barentsburg, som ligger ca. 14 km øst for Isfjord Radio. Da benytter Meteonorm en blanding av data fra målestasjon og satellittinformasjon fra Isfjord Radio [123]. Siden lokasjonen ikke har reelle metrologiske målinger lager PVsyst et generisk år for Isfjord Radio, som baseres på gjennomsnittsverdier [103].

Det ble opprettet en on-grid-analyse i programmet for å kunne skille mellom produksjon fra solcelleanlegget og det allerede eksisterende interne nettet. For funksjonen «Meteo File» ble koordinatene til område 2 ved Isfjord Radio lagt inn. Det ble opprettet en ny fil i systemet basert på breddegrad 78.058718° N og lengdegrad 13.630373° Ø. Deretter ble albedo på 0,6 fra oktober til mai, og 0,2 fra juni til september ble lagt inn under prosjektinnstillinger.

Videre ble orienteringen til solcellepanelene valgt. Det ble valgt fastmonterte solceller, og optimaliseringen ble gjort basert på sommermånedene (apr-sept) grunnet mørketid

i vintermånedene. PVsyst definerer sør som 0° og negativ retning går mot øst. Dette tilsvarer asimut -42° i PVSyst, basert på definisjonen til NKS og at hyppigst vindretning der kommer fra 48° . På denne måten blir også panelene rettet så mye mot sør som mulig. Optimal helningsvinkel ble i første omgang bestemt basert på vinkelen som ga størst TF i orienteringsverktøyet. Denne var 55° .

Videre ble det lagt inn en planlagt effekt på 198 kWp og solcellemodulene Trina Solar 550 Wp 27 V si-mono TSM-DE-19-550Wp Vertex ble valgt, samt vekselretteren Kaco new energy 165 kW, 960-1300 V, 50/60 Hz Blueplanet 165 TL3-INT. Ved å dele effekten til vekselretteren på installert effekt for solcelleanlegget, kommer det frem at vekselretteren er underdimensjonert med 17 %. Det ble valgt å ha 36 moduler i serie og 10 strenger. Det ble oppgitt at solcellearealet ble 941 m^2 og det er totalt 360 panel.

For detaljerte tap ble fritt monterte moduler med luftsirkulasjon valgt. Årlig faktor for tilsmussingstap ble satt til å være 10 % fra oktober til april, og 5 % fra mai til september. IAM-tap, refleksjonstap og ohmske tap er satt til standardinnstilling. Forbruksdata for Isfjord Radio ble lagt inn som timesverdier fra csv-fil. For å inkludere fjernskyggen fra fjellene rundt ble «horizon from Meteororm web service» valgt. Dette gir horisonten, inkludert fjernskygge, til det angitte området.

For moduloppsett ble det importert områdekart over Isfjord Radio. Kartet ble skalert til rett målestokk på 100 meter. Deretter ble det valgt én modul i høyden, 72 i lengden og 5 kolonner. Dette gir to strenger per rad. I tillegg vil mer en 72 i lengden ikke få plass i områdeplanen for område 2. Helning og asimut blir satt til 55° og -48° , som beskrevet over. Orienteringen til panelet ble satt til portrett for å spare plass.

For å plassere radene rett i forhold til områdeplanen ble «misalign», forskyvning av radene, satt til -3 meter. Avstanden mellom radene ble satt til 10 meter. Det vil si at det er 10 meter mellom fremsiden av panelene på en rad, til fremsiden på panelene til neste rad. Skyggesimulering ble kjørt for sommersolverv, 21.06.22, for å sjekke skyggekast. Med valgte parametre er det sol på panelene mellom kl. 03:00 og 17:15, med 0 % skyggetap i tidsrommet. Videre ble alle modulene koplet sammen ved hjelp av automatisk attribusjon. I figur 4.5 vises plasseringen av solcelleanlegget i område 2. Hver rute er $5 \times 5 \text{ m}$. Fargene visualiserer hvilke paneler som er koplet sammen i streng. Det røde området i

figuren er veiledede, og ikke absolutt.



Figur 4.5: Plassering av solcelleanlegget i området 2. Hver rute er 5x5 m.

Videre ble det gjennomført en følsomhetsanalyse for helningsvinkler med asimut -42° . Helningsvinklene varierte fra 5° til 55° . Resultatene for hver simulering ble hentet ut, og E_{Avail} , solfraksjon, E_{solar} og E_{grid} ble ført i tabell 4.2.

Tabell 4.2

Årsverdier for helningssimulering med asimut -42° , 198 kWp

Helning [$^\circ$]	E_{Avail} [kWh]	Solfraksjon [%]	E_{Solar} [kWh]	E_{grid} [kWh]
5	114 759	20,42	97 832	16 927
10	118 251	20,41	97 783	20 469
15	122 122	20,46	98 026	24 096
20	125 907	20,52	98 283	27 624
25	129 179	20,50	98 223	30 955
30	131 723	20,41	97 749	33 975
35	133 451	20,23	96 905	36 546
40	134 364	20,00	95 815	38 549
45	134 345	19,71	94 410	39 935
55	133 645	19,38	92 837	40 808
55	132 201	19,02	91 134	41 067

For å undersøke om det er E_{Avail} eller E_{Solar} det skal legges mest vekt på under valg av endelig helning, ble disse sett nærmere på i MatLab, presentert i vedlegg D. E_{Avail} og

E_{Solar} for helning 20° og 40° ble lagret i en csv-fil i timesverdier. Csv-filene ble lastet inn i MatLab. Det ble laget variabel for E_{Avail} og E_{Solar} for hver helning. Variablene ble deretter lagt sammen til månedsverdier. I tillegg ble det samme gjort for en helning på 55° , for å undersøke månedsproduksjon i starten og slutten av solperioden.

Basert på resultatene for helning 40° og 20° , var det ønskelig å utføre følsomhetsanalyse for asimutvinkler med disse helningsvinklene. Dette for å undersøke hvor stor effekt det har å ta hensyn til vindretningen med tanke på snødrift, kontra et mer sørvendt anlegg. Alt var likt som ovenfor bortsett fra at «misalign» ble satt til 0 meter, helning var konstant på 40° eller 20° og asimut ble justert fra -40° til 25° , med steg på 5° . For hver simulering ble relevante resultat notert.

For å beregne gapet mellom bakke og panel ble lengden til panelet på 2,384 meter, definert i kapittel 3.4.3, brukt. Gapet ble beregnet ved å ta tiltatt totalhøyde (2,5 meter) minus lengden til panelet ganget med sinus av helningen.

4.4.3 Scenario 2

Solproduksjon med batterilagring

For å estimere mulig batterilagring av solenergi, ble det lagret en fil med timesverdier for E_{Solar} , E_{FrGrid} , E_{Grid} , forbruket og solfraksjon fra PVsyst. Videre ble det opprettet et nytt script i MatLab. Presentert i vedlegg E. Dataene ble importert og alle variablene ble lagret som en vektor. Det ble lagt til én null i starten av alle vektorene grunnet en svakhet i koden. For enkelthetsskyld ble alle negative verdier i E_{Grid} neglisjert.

E_{Grid} er overskuddsenergien som kan lagres på batteriet, og E_{FrGrid} er energi levert av aggregatet som kan trekkes fra batteriet. Potensielt ladbar energi til batteriet, «ladbart», ble definert som E_{Grid} minus E_{FrGrid} . Disse to har aldri verdier samtidig, da forbruket ved overskudd er dekt. Det vil si at negative verdier trekkes fra batteriet og positive verdier lader batteriet.

Videre ble batterikapasiteten til batteriet, SOC-min og SOC-maks satt lik 403,2 kWh, 20 % og 90 %. Batterikapasiteten som kan lagres på batteriet, «kWp», ble beregnet til å være 282,24 kWh. Deretter ble det laget en for-løkke som gir ut batteristatusen («Batteri»), energi som fortsatt er overskudd («tap_ overlading») og energi som fortsatt må dekkes av

generatoren («tap_underlading»). Batteristatusen ble for enkelthetsskyld definert til å gå fra 0 til 282,24 kWh. Når batteristatusen er lik 282,24 kWh vil overskuddsenergien som fortsatt produseres gå til «tap_overlading», og når batteristatusen er lik 0 kWh vil generatorbruken som fortsatt er nødvendig for å dekke forbruket gå til «tap_underlading».

For å verifisere resultatene så langt, ble de nye variablene brukt til å lage de gamle. Det vil si at variablene som ble produsert av kodene, ble brukt til å kontrollere om de ble det samme som de originale. Dersom variablene blir det samme, indikerer dette at ingen verdier har gått tapt i koden. Kontrollen ble gjort ved å lage en for-løkke som tar ut endringen i batteristatus, «delta_ladning». De negative verdiene indikerer hvor mye batteriet blir utladet, og de positive verdiene indikerer hvor mye batteriet blir oppladet. Den nye versjonen av den originale E_{Grid} er lik økningen i ladingen, pluss det nye overskuddet «tap_overlading». Den nye versjonen av EFrGrid er lik reduksjonen i ladningen, pluss det som fortsatt må dekkes av generatoren «tap_underlading». De nye versjonene ble like som originalene. Verifiseringen ble gjort i årsverdier, så for å undersøke timesverdiene ble det også laget en tabell for å få oversikt over vektorene, og sjekke at de nye og gamle vektorene samhandler som tiltenkt.

Overskudd, energi levert av aggregat og solfraksjon før og nå, samt E_{Solar} før og med batterilagring, ble beregnet og lagt inn i en tabell. E_{Solar} med batterilagring ble beregnet ved å ta de positive verdiene i E_{Grid} minus det som fortsatt er overskudd. Tapet som ble neglisjert, ved å kun ta utgangspunkt i de positive verdiene i E_{Grid} , ble også beregnet. Dette er energiforbruket som fortsatt må dekkes av aggregatet eller batteriet.

I tillegg ble det laget en vektor for å vurdere antall timer batteriet er fulladet. Dette ble gjort ved å finne indeksene til alle tidspunkt hvor batteriet er ved SOC maks. Deretter ble den derivert for å finne alle stigningstall som er 1, det vil si hvor to indekser er etterfølgende. Antallet enere etter hverandre er antall timer batteriet er fulladet pluss én time. Det vil si at hvis det er to enere etterhverandre er batteriet fulladet i tre timer.

Til slutt ble den totale solproduksjonen, oppladning av batteri og det totale generatorforbruket i årsverdier lagret i en csv-fil for videre bruk i klimagassberegninger, dieselreduksjon og økonomi. Dette ble gjort før og etter installering av batteri, for både 40° og 20° helning.

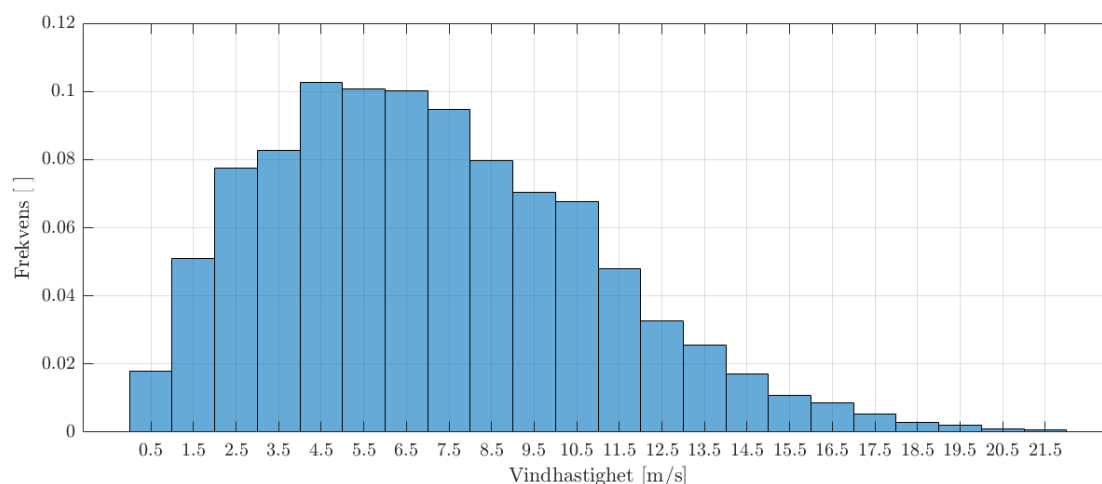
4.4.4 Scenario 3

Forbehandling av vinddata

Csv-filen med middelvind-data i timesverdier fra Isfjord Radio ble åpnet i Excel. Den siste målingen ble slettet, da den gjaldt for 01.01.23. Det manglet 217 målinger fra 2022 og dataene ble ryddet på samme måte som for forbruksdata, beskrevet i kapittel 4.4.1. Målingene som manglet var én fra januar, 169 fra august, 11 fra september, 8 fra oktober, 14 fra november og 14 fra desember.

Estimering av vindproduksjon

For å vurdere om det er hensiktsmessig med vindenergi på Isfjord Radio, ble det laget et histogram i MatLab som viser frekvensen til forskjellige vindhastigheter presentert i figur 4.6. Dette ble gjort i samme MatLab-script som undersøkelsen av hvilken retning solcellepanelene skal stå for å unngå snøoppsamling. Presentert i vedlegg C.



Figur 4.6: Frekvensen av vindhastigheter i 2022 på Isfjord Radio.

Det ble opprettet et nytt MatLab-script for beregninger av kraftproduksjon fra vindturbiner, presentert i vedlegg F. Det ble lest inn csv-fil med timesverdier for forbruksdata og vind for Isfjord Radio.

Videre ble effektkurven til LS Helix 3.0 lagt inn for vindhastigheter mellom 0 og 30 m/s. Dette ble gjort for å forsikre at alle vindhastigheter fra Isfjord Radio ble tatt med, selv om det er ikke er produksjon ved alle vindhastigheter.

For vindhastigheter større enn cut-off ble det lagt til én vindhastighet som var 0,00001

større enn cut-off. Dette ble gjort for å sørge for at alle vindhastigheter mellom der turbinen produserer og ikke produserer energi blir interpolert til null. Antallet desimaler er mer enn desimaler som er i vinddata-filen.

For å beregne forventet energiproduksjon for hver vindmåling i timesverdier, ble det benyttet lineær interpolering mellom de forskjellige effektene som funksjon av faktisk vindhastighet. Deretter ble dette ganget med antall turbiner. Den estimerte forventede årsproduksjonen ble funnet ved å summere produksjonsvektoren. For å interpolere ble den innebygde funksjonen «interp1» i MatLab benyttet. Den tar inn vektor med vindhastighet tilhørende effektkurve, effektene i effektkurven og faktisk vindhastighet for alle timene i 2022. Funksjonen benytter lineær interpoleringsmetode dersom ikke annet spesifiseres [124].

Til slutt ble det valgt å plote forbruk mot vindproduksjon for 5 og 10 turbiner. Filene med vindproduksjon for 5 og 10 turbiner ble lagret i timesverdier for videre analyse. Ved beregning av sum eller gjennomsnitt ble funksjonen «omitnan» brukt.

Vind- og solproduksjon med batterilagring

Det ble laget et ny versjon av MatLab-scriptet som ble benyttet for å estimere batterilagring og solproduksjon. Dette er presentert i vedlegg G. I tillegg til batteri og sol ble også timesverdier av vindproduksjonen hentet inn. NaN-verdiene ble erstattet med null og det ble lagt til én null i starten av vektoren på samme måte som tidligere. Overskuddet, underskuddet og egenproduksjonen ble nå beregnet ved andre parametere.

Overskuddet før ble definert som de positive verdiene av E_{Avail} pluss vindproduksjon minus forbruk. Underskuddet før ble definert som de positive verdiene av EfrGrid minus vindproduksjon. Egenproduksjon til internt forbruk før ble definert som E_{Avail} pluss vindproduksjon minus underskuddet før. Ladbart ble definert som overskuddet før minus underskuddet før. Antall timer batteriet var fulladet ble gjort på samme måte som i scenario 2.

Til slutt ble den totale solproduksjonen, det totale generatorforbruket, den totale vindproduksjonen og den totale oppladningen av batteriet i årsverdier lagret i en csv-fil for videre bruk i dieselreduksjon, klimagassberegninger og økonomi.

4.4.5 Beregning dieselforbruk

Beregninger av dieselforbruk ble gjort i MatLab. Scriptet er vedlagt i vedlegg I. Først ble tettheten til diesel lagt inn, samt spesifikt drivstofforbruk ved 75 % drift. Energi levert fra aggregat ble lest inn for alle scenarioene. Drivstofforbruket ble beregnet med formel 1. Dette ble gjort for alle scenarioer. Til slutt ble drivstofforbruket plottet i et søylediagram.

4.4.6 Beregninger klimagassutslipp

Beregninger av klimagassutslipp ble gjort i MatLab. Scriptet er vedlagt i vedlegg H. Utslipp fra batteriene ble beregnet til å være konstant per år basert på en utslippsfaktor per kWh installert kapasitet. Derimot har per kWh energi levert av diesel, sol- og vindenergi egne utslippsfaktorer.

Først ble batteriets installerte kapasitet og levetid lagt inn, samt produksjonsprosessens faktor for klimagassutslipp per installerte effekt. Utslippet ble beregnet ved å multiplisere installert kapasitet med utslippsfaktoren, og deretter delt på levetid for å få et gjennomsnittlig og konstant utslipp per år. Det er denne verdien som legges på totalt utslipp videre i de ulike scenariene, da utslippene oppgis i tonn CO₂-ekv/år.

2022

Xlsx-filen «Rapport Isfjord Radio 2022 - forbruk, generator og batteri (ORIGINAL)» ble lagret som csv-fil og lest inn i MatLab. Deretter ble kolonne 8 og 10 hentet ut, som er energiforbruk for henholdsvis aggregat 1 og 2. Kolonnene ble lagt sammen og summert for å få ut total energiproduksjon fra aggregatene i 2022. Klimagassutslippet for 2022 ble beregnet ved å multiplisere årlig energiproduksjon med utslippsfaktoren til diesel.

Scenario 1

Energiproduksjon fra solcelleanlegg med 20° helning og aggregatforbruket før inkludering av batterilagring fra kapittel 4.4.3 ble lest inn. Klimagassutslippet ble beregnet ved å multiplisere solcelleproduksjonen og aggregatforbruket med utslippsfaktor for henholdsvis solceller og diesel. Til slutt ble dette summert til totalt utslipp for scenarioet. Denne metoden ble gjentatt identisk for verdiene ved 40° helning på solcelleanlegget.

Scenario 2

Energiproduksjon fra solcelleanlegg med 20° helning og aggregatforbruket etter inklu-

dering av batteri fra kapittel 4.4.3 ble lest inn. Klimagassutslippet ble beregnet ved å multiplisere solcelle- og aggregatproduksjonen med utslippsfaktorer for henholdsvis solceller og diesel. Til slutt ble dette summert og utslippet for batterier ble lagt til for totalt utslipp for scenarioet. Metoden ble gjentatt for verdiene med 40° helning på solcelleanlegget.

Scenario 3

Energiproduksjon fra solcelleanlegg med 40° helning, aggregatforbruket og vindproduksjonen for 5 turbiner etter inkludering av batteri fra kapittel 4.4.4 ble lest inn. Klimagassutslippet ble beregnet ved å multiplisere produksjonen fra solceller, aggregater og vindturbiner med utslippsfaktorer for henholdsvis solceller, diesel og vindturbiner. Til slutt ble dette summert og utslippet fra batterier ble lagt til for totalt utslipp for scenarioet. Metoden ble gjentatt for verdiene med 10 vindturbiner.

For sammenligning ble klimagassberegningene for 2022 og de ulike scenarioene plottet i et søylediagram.

4.4.7 Beregninger økonomi

Nåverdiberegninger

Beregninger av nåverdi og nettonåverdi for de tre scenarioene ble gjort i MatLab. Scriptet er vedlagt i vedlegg J. Først ble alle investerings- og vedlikeholdskostnader lagt til, samt levetid og diskonteringsrente. I tillegg ble valutakursen for USD og EURO til NOK spesifisert.

Prisen for solcellepanelene er basert på at det er installert 941 m². Ett solcellestativ kan holde 48 panel, og det derfor behov for 8 stativ (rundet opp) for det bakkemonterte solcelleanlegget med totalt 360 panel. Det er behov for 6 kabler per stativ, det vil si totalt 48 stk. Det er totalt én vekselretter for det bakkemonterte solcelleanlegget. Andre investeringskostnader er beregnet basert på total kostnad for et bakkemontert solcelleanlegg med 200 kWp, minus investeringskostnadene knyttet til solcelleanlegget listet i tabell 3.1. Vedlikeholdskostnadene for solcelleanlegget per år er estimert basert på levetiden.

Investeringskostnadene for batteri er basert på at det er 48 kWp i hvert batteriskap. Det vil si at det er behov for 9 batteriskap (rundet opp) for å få en kapasitet på 403,2 kWh.

Det er også én vekselretter for batterisystemet.

Prisen for vindturbinene er basert på 5 og 10 turbiner. Det er også antatt én vekselretter for vindanlegget. Andre investeringskostnader for vindturbiner ble beregnet ved å ta antatt totalpris per installert effekt ganget installert effekt minus investeringskostnadene knyttet til vindturbinene listet i tabell 3.1. Totalpris per installert effekt ble satt til 3 500 USD.

Inntjeningen per år i for de ulike kontantstrømmene er basert på dieselreduksjonen for gitt scenario. Dieselreduksjonen er hentet fra MatLab beregningene gjort i kapittel 4.4.5.

Netto nåverdi ble beregnet for hvert scenario ved hjelp av formel 2. Den ble beregnet over 30 år for alle scenarioene. For alle scenarioene ble det lagt til en ny investering for vekselretterne etter 15 år. For scenario 3 ble det også lagt til en ny investering for vindturbinene etter 20 år. Verdiene for netto nåverdi ble plottet i et søylediagram, og alle investeringskostnadene ble notert.

Energi- og lagringskostnader over levetiden

Beregninger av LCOE og LCOS ble gjort i MatLab, presentert i vedlegg K. De samme variablene brukt for beregning av klimagassutslipp i kapittel 4.4.6, inkludert energien tilført batteriene, ble lest inn. Koden bygger videre på nåverdiberegningene.

Pris på vekselretteren til solcelleanlegget og batterisystemet ble multiplisert med 2. Dette på grunn av vekselretterens levetid på 15 år, og beregningene ble utført for levetiden til solcelleanlegget og batterisystemet på 30 år. For vindturbinene ble prisen på vekselretteren multiplisert med 1,25 grunnet turbinenes levetid på 20 år og vekselretterens levetid på 15 år.

Nåværende verdi på totalkostnaden til de ulike teknologiene over levetiden ble beregnet. Totalkostnaden for solcelleanlegg og batteri ble beregnet til å være summen av investerings- og vedlikeholdskostnader multiplisert med levetiden. Dette er fordi vedlikeholdskostnadene er årlige verdier. For vindturbinene ble totalkostnaden beregnet til å være summen av investerings- og vedlikeholdskostnader multiplisert med antallet vindturbiner og levetid av samme grunn som sol og batteri.

LCOE ble beregnet. For solcelleanlegget ble totalkostnaden over levetiden dividert på

energiproduksjonen og multiplisert med levetiden til anlegget. Dette for henholdsvis 20° og 40° helningsvinkel. LCOE for 5 stk 10 stk vindturbiner ble beregnet på samme måte.

Til slutt ble LCOS for batterisystemet beregnet. Først for både 20° og 40° helningsvinkel på solcellepanel. Totalkostnaden for batterianlegget ble dividert på levert energi av batteriet og multiplisert med levetiden. LCOS for batterisystemet med 40° helningsvinkel på panel, samt 5 og 10 vindturbiner ble deretter beregnet på samme måte for respektive kostnads- og produksjonsverdier og levetid.

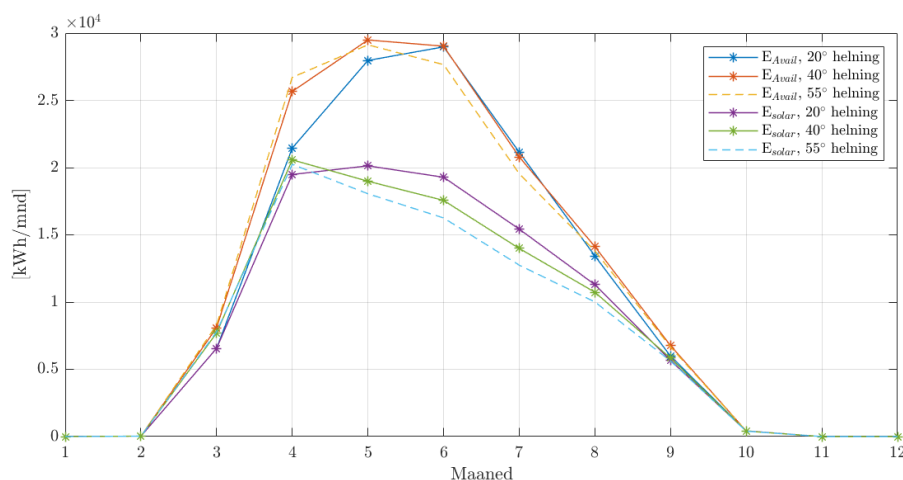
5 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatene. Først presenteres resultatet fra optimaliserings-simuleringene for scenario 1, etterfulgt av scenario 2 og 3. Videre presenteres resultater for dieselreduksjonen og klimagassutslipp tilknyttet de ulike scenarioene. Til slutt presenteres resultatene fra de økonomiske beregningene.

5.1 Scenario 1

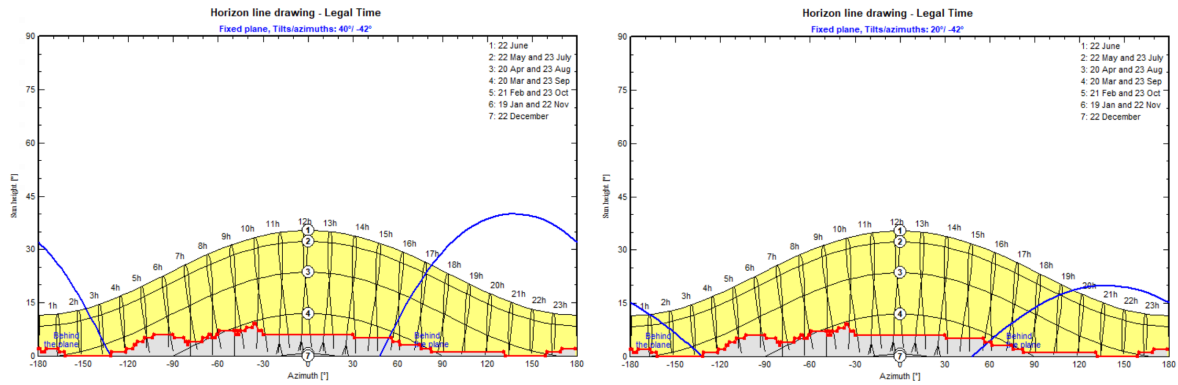
Optimalisering av bakkemontert solcelleanlegg

Tabell 4.2 fra metodedelen viste at en helning på 20° gir størst solfraksjon og E_{Solar} , og en helning på 40° gir mest tilgjengelig produsert solenergi. Figur 5.1 viser en sammenligning mellom 20° og 40° , der 20° har jevnere solproduksjon som går til å dekke forbruket, mens 40° har jevnere tilgjengelig solproduksjon. Figuren viser også en helning på 55° .



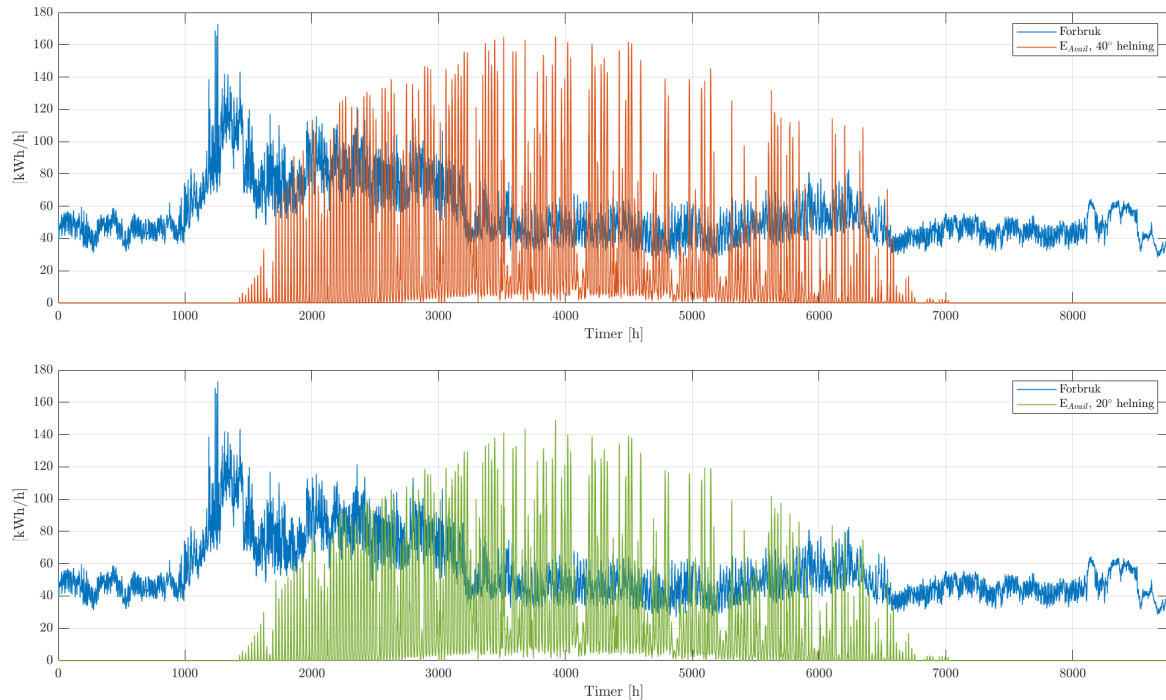
Figur 5.1: Sammenligning av helningsvinkel på 20° , 40° og 55° over ett år.

Horisontlinjetegningene i figur 5.2 viser at 40° helning den 22. juni vil ha sol på panelene fra ca. kl. 02.30 til 17.15, og 20° helning vil ha sol på panelene fra ca. kl. 01.00 til 19.30.



Figur 5.2: Sammenligning av horisontlinjetegning for helning på 40° og 20° .

Figur 5.3 viser at tilgjengelig solenergi for 40° helning har flere og større topper.



Figur 5.3: Sammenligning av tilgjengelig solproduksjon for helning på 20° og 40° , inkludert forbruket.

Tabell 5.1 viser resultatene i årsverdier av følsomhetsanalysen med ulike asimutsimuleringer for helning 20° og 40° . Asimut 5° gir best E_{Avail} og asimut 20° gir best E_{solar} for begge helninger.

Tabell 5.1

Årsverdier for asimutsimulering for 40° og 20° helning, 198 kWp

Asimut/Helning [°]	E_{Avail} [kWh]	Solfraksjon [%]	E_{solar} [kWh]	E_{grid} [kWh]
5/40	142 165	21,21	101 613	40 552
20/40	141 257	21,30	102 042	39 216
5/20	131 402	21,43	102 661	28 742
20/20	130 792	21,49	102 939	27 853

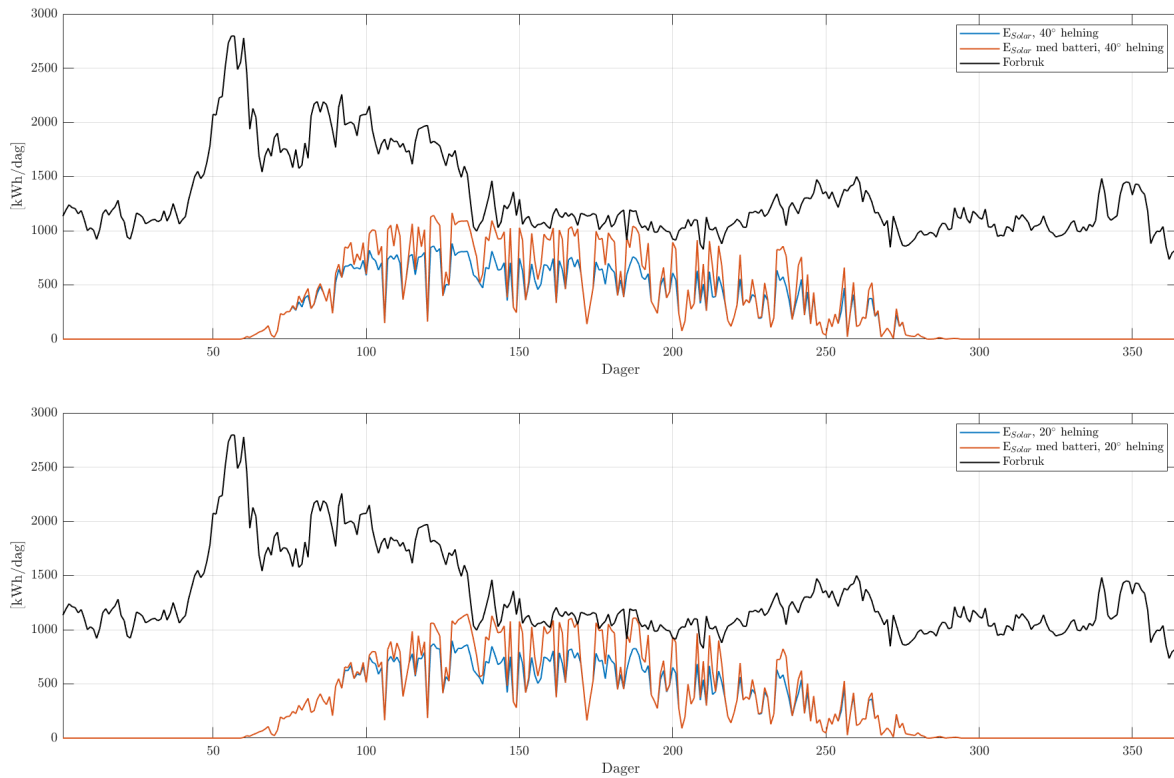
Det ble besluttet å fortsette med asimut -42° for de neste scenarioene. Solfraksjonen for denne asimuten er 20,52 og 20,00 for henholdsvis 20° og 40° helning. Tilgjengelig produsert energi er henholdvis 125 907 kWh/år og 134 364 kWh/år.

Ved en totalhøyde på 2,5 meter vil en helning på 40° gi et gap fra panelene til bakken på én meter, og 20° vil gi et gap på 1,7 meter.

5.2 Scenario 2

Solproduksjon med batterilagring

Figur 5.4 viser sammenligning av 40° og 20° helning med og uten batterikapasitet på 403,2 kWh. Helning 40° dekker forbruket bedre på våren og 20° dekker forbruket bedre på sommeren.



Figur 5.4: Forbruk og E_{Solar} for 40° og 20° med og uten batterilagring på $403,2 \text{ kWp}$.

Tapet som ble neglisjert i form av negative verdier i E_{Grid} ble $46,31 \text{ kWh/år}$ for 40° og $45,89 \text{ kWh/år}$ for 20° .

Tabell 5.2 viser ulike parametere for scenario 1 og scenario 2, altså helning 20° og 40° før og etter installering av batteri. Energi trukket fra aggregat går ned med $23,857 \text{ MWh/år}$ for helning på 40° etter innføring av batteri. I tillegg øker solfraksjonen. Energi levert av aggregat er nå lavest med en helning på 40° sammenlignet med 20° .

Tabell 5.2

Ulrike parameter for helning 40° og 20° før og etter installering av batteri. Solcelleanlegget har asimut -42° og 198 kWp.

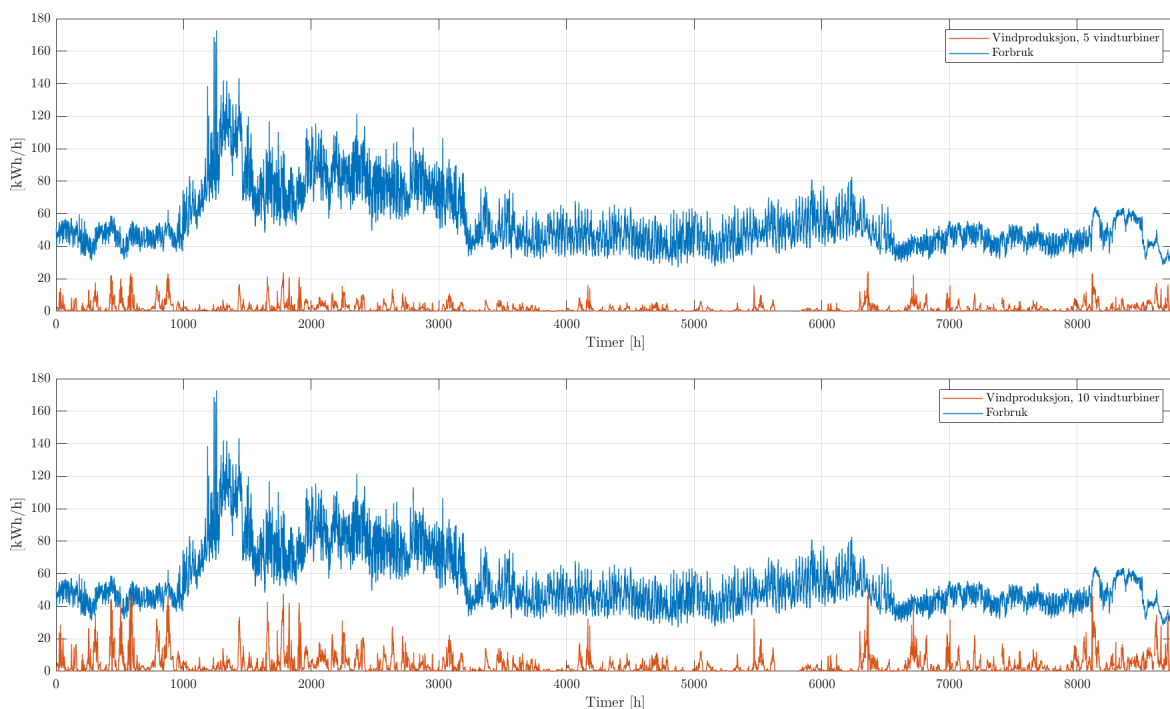
Parameter	Helning	U/bat	M/bat	Endring
Overskudd [MWh/år]	40°	38,6	14,74	-23,86
Energi levert av aggregat [MWh/år]	40°	383,22	359,36	-23,86
Egenproduksjon forbrukt internt [MWh/år]	40°	95,82	119,67	23,85
Solfraksjon [%]	40°	20	24,98	4,98
Overskudd [MWh/år]	20°	27,67	9,08	-18,59
Energi levert av aggregat [MWh/år]	20°	380,75	362,16	-18,59
Egenproduksjon forbrukt internt [MWh/år]	20°	98,28	116,88	18,6
Solfraksjon [%]	20°	20,52	24,4	3,88

Den lengste perioden batteriene er oppladet er 8 timer for begge helningsvinklene.

5.3 Scenario 3

Estimering av vindproduksjon

Figur 5.5 viser produksjonen fra vindturbinene sammenlignet med forbruket. 10 turbiner gir en årsproduksjon på 35,84 MWh og gjennom året gir turbinene en overproduksjon på 17,81 kWh. 5 turbiner gir en årsproduksjon på 17,91 MWh.



Figur 5.5: Forbruk og produksjon fra 5 og 10 vindturbiner.

Vind- og solproduksjon med batterilagring

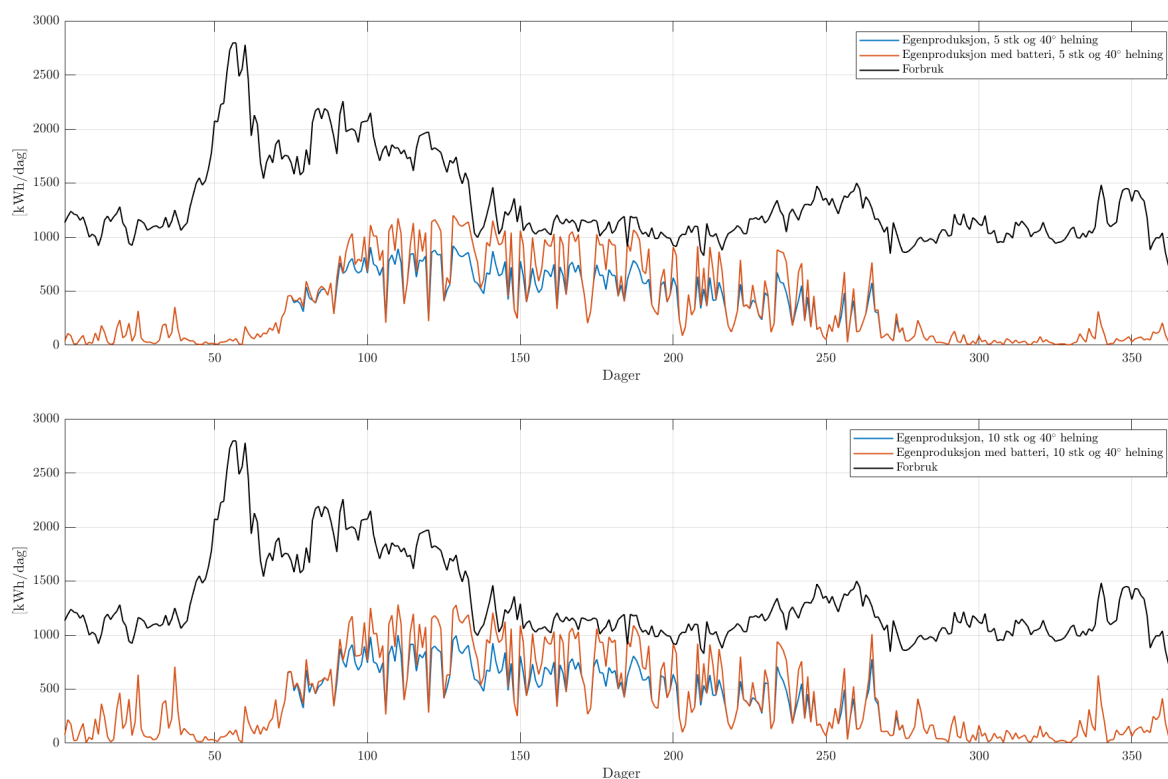
Tabell 5.3 viser ulike parametere for systemet fra scenario 2 og scenario 3, altså før og etter installasjon av vindturbiner. Solcelleanlegget har en helning på 40° og asimut -42° .

Tabell 5.3

Ulike parameter før og etter installering av 5 og 10 vindturbiner

Parameter	Turbiner [stk]	U/vind	M/vind	Endring
Overskudd [MWh/år]	5	14,74	15,46	0,72
Energi levert av aggregat [MWh/år]	5	359,36	342,18	-17,18
Egenproduksjon forbrukt internt [MWh/år]	5	119,67	136,86	17,19
Solfraksjon [%]	5	24,98	28,57	3,59
Overskudd [MWh/år]	10	14,74	16,24	1,50
Energi levert av aggregat [MWh/år]	10	359,36	325,04	-34,32
Egenproduksjon forbrukt internt [MWh/år]	10	119,67	154,09	34,34
Solfraksjon [%]	10	24,98	32,15	7,17

Figur 5.6 viser systemet med vind- og solproduksjon med batterilagring ved helning 40° og asimut -42° sammenlignet med forbruk.

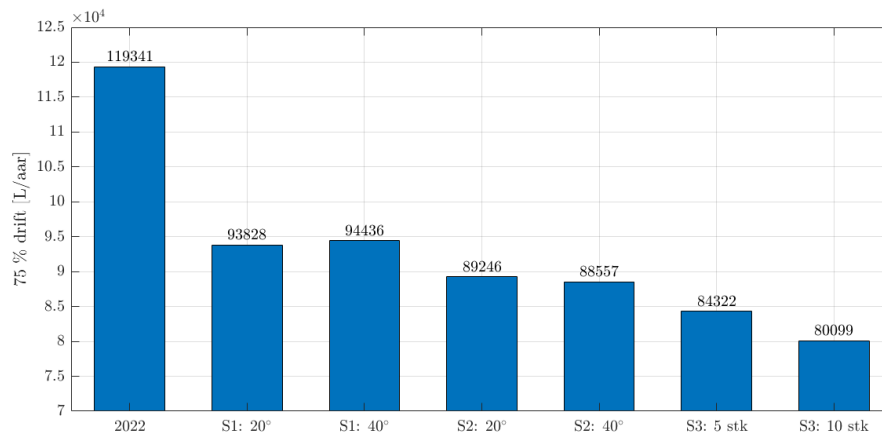


Figur 5.6: Vind- og solproduksjon for 5 og 10 turbiner med og uten batterilagring.

Det lengste batteriet er oppladet er fortsatt 8 timer for begge antallene av vindturbiner.

5.4 Dieselforbruk

Figur 5.7 viser stolpediagram over dieselforbruket ved 75 % drift av aggregatet for 2022 og de ulike scenarioene. Søylen for 2022 representerer dieselforbruket relatert til systemet ved Isfjord Radio før implementering av fornybare energikilder. Av scenarioene er høyeste dieselforbruk i scenario 1 med 40° helning på solcelleanlegget, og det laveste i scenario 3 med produksjon fra 10 vindturbiner.

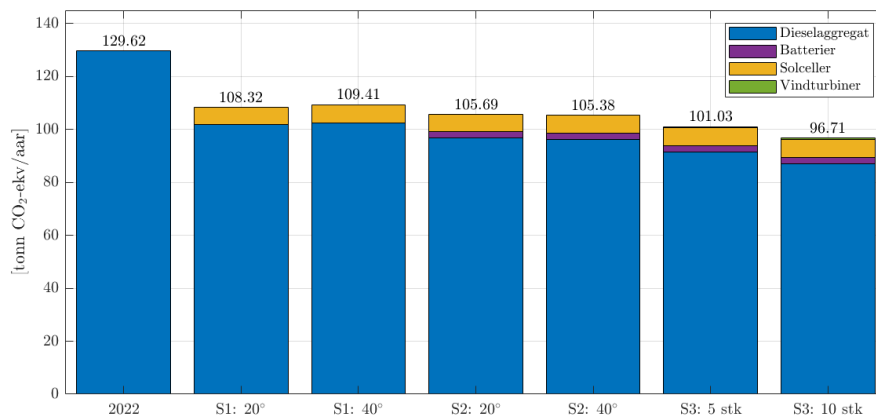


Figur 5.7: Stolpediagram over dieselforbruk for 75% drift i L/år for 2022 og scenario 1, 2 og 3.

Reduksjonen er fra venstre til høyre i figur 5.7 sammenlignet med 2022 henholdvis 21,4 %, 20,9 %, 25,2 %, 25,8 %, 29,3 % og 32,9 %.

5.5 Klimagassutslipp

Figur 5.8 viser et stolpediagram over klimagassutslipp i tonn CO₂-ekv/år for 2022 og de ulike scenarioene. Av de tre scenarioene er det scenario 1 med solcelleanlegg med helning 40° som har høyest utslipp, og scenario 3 med 10 vindturbiner som har det laveste. For batteriene ble det årlige gjennomsnittlige klimagassutslippet beregnet til å være 2 352 kg CO₂-ekv.

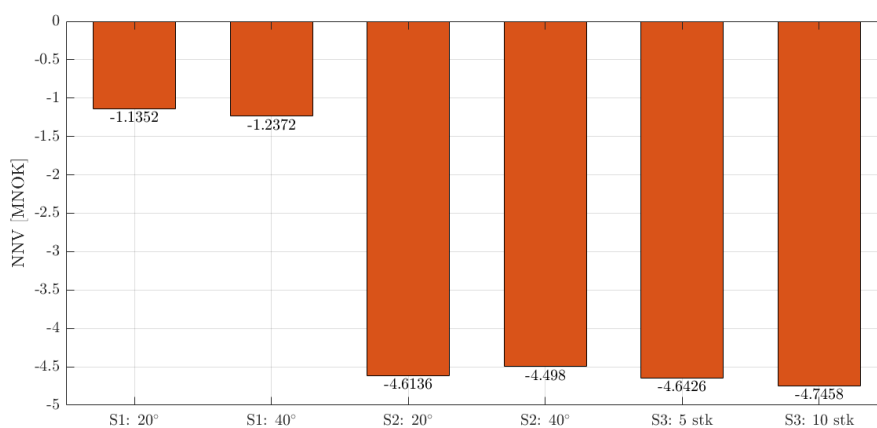


Figur 5.8: Stolpediagram over klimagassutslipp i tonn CO₂-ekv/år for 2022 og scenario 1, 2 og 3 fordelt over energikilder.

5.6 Økonomi

Nåverdiberegninger

Netto nåverdi for de forskjellige scenarioene er presentert i figur 5.9. Alle scenarioene er gjort for 30 år, med reinvestering av vindturbiner etter 20 år i scenario 3. Investeringskostnadene for solcelleanlegget ble 5 374 600 NOK, batterianlegget ble 4 206 900 NOK og vindanlegget ble 557 200 NOK og 1 114 400 NOK for henholdsvis 5 og 10 turbiner.



Figur 5.9: Netto nåverdi for scenario 1, 2 og 3.

Kontantstrøm per år for alle scenarioene er presentert i tabell 5.4.

Tabell 5.4

Kontantstrøm per år for de ulike scenarioene

Scenario	Kontantstrøm [NOK]
Scenario 1 for helning 20°	246 840
Scenario 1 for helning 40°	240 950
Scenario 2 for helning 20°	290 650
Scenario 2 for helning 40°	297 330
Scenario 3 for helning 40° og 5 turbiner	336 290
Scenario 3 for helning 40° og 10 turbiner	377 250

Energi- og lagringskostnader over levetiden

I tabell 5.5 presenteres verdier for LCOE og LCOS basert på investering- og vedlikeholdskostnader benyttet i netto nåverdiberegninger.

Tabell 5.5

Energi- og lagringskostnad over levetiden for ulike teknologier

Teknologi	LCOE [NOK/kWh]
Solcelleanlegg, helning 20°	1,44
Solcelleanlegg, helning 40°	1,35
Vindturbiner	1,49
Teknologi	LCOS [NOK/kWh]
Batterisystemet for solprod. helning 20°	7,67
Batterisystemet for solprod. helning 40°	5,98
Batterisystemet for solprod. helning 40° og vindprod. 5 turbiner	5,83
Batterisystemet for solprod. helning 40° og vindprod. 10 turbiner	5,68

6 Diskusjon og analyse

I dette kapittelet diskuteres og analyseres resultatene presentert i kapittel 5 opp mot problemstillingene. Først diskuteres resultater for scenarioene, deretter klimagassutslipp og økonomi. Til slutt blir det gjort miljø- og samfunnsmessige drøftinger knyttet til FN's bærekraftsmål.

6.1 Scenario 1

Hensikten med scenario 1 var å optimalisere solcelleanlegget for å dekke forbruket med solproduksjon i høyest mulig grad. Dette med hensyn på å unngå snøakkumulering.

Optimalisering av bakkemontert solcelleanlegg

I utgangspunktet estimerte PVsyst at en helning på 55° i metodedelen var mest optimalt. Dette kan komme av at fjernskygge fra fjellet i øst i horisontlinjetegningen, ikke inkluderes i optimaliseringen til PVsyst. Fjernskygge vil hindre lav sol på panelene i starten og slutten av månedene med sol. En helning på 55° kunne vært å foretrekke dersom produksjonen i starten og slutten solperioden hadde blitt merkverdig større. Derimot viser figur 5.1 at en brattere helning ikke gir mer jevn produksjon.

Resultatene viser at med asimut -42° gir helning 40° mest tilgjengelig produsert energi. Likevel er et av hovedmålene for oppgaven å redusere dieselforbruket, og solfraksjon blir derfor ansett viktigere enn tilgjengelig energi i dette tilfellet. Resultatene fra følsomhetsanalysen viser at en helning på 20° gir størst solfraksjon sammenlignet med 40° . Horisontlinjetegningene ved solverv viser at en helning på 20° gir 3 timer og 15 minutter mer soltid på panelene sammenlignet med 40° , som underbygger høyere solfraksjon for 20° . På den andre siden kan snø bli liggende på panelene grunnet det lave helningen, samt at tapet fra tilsmussing kan øke da regnvannet ikke renner like godt av panelene. På bakgrunn av solfraksjon er det likevel rimelig å anta at den beste løsningen for systemet er en helning på 20° , selv om det kan gi en høyere risiko for snø- og tilsmussingstap som nevnt i teori om systemtap i kapittel 2.3.3.

Sysselmesteren har gitt en høydebegrensning på 2,5 meter fra bakken til toppen av panelene. Med en helning på 20° gir dette et åpent gap under panelene på 1,7 meter, kontra 1 meter for 40° , som bør hindre store mengder snøakkumulering. Likevel er det antatt

at snøfonnene kan bli opp mot 2,7 meter, som er høyere enn totalhøyden til anlegget. På den andre siden ble simuleringene til Potac (2022), som ga snøfonner på 2,7 meter, gjort med et gap på 1 meter, ikke 1,7 meter. Det er derfor rimelig å anta at en eventuell snøfonndannelse ikke blir like stor med 1,7 meters gap gitt ved 20° helning.

Videre indikerer følsomhetsanalysen for asimut at en asimut på 20° fremfor -42° gir 5 % høyere solfraksjon ved helning 20°. Dette kan komme av at fjellene kaster skygge fra øst. På den andre siden vil ikke en asimut på 20° i praksis være optimal med hensyn på snødrift og snøakkumulering, noe PVsyst ikke tar hensyn til. For at panelene skal stå mer sørvendt med asimut 20°, kan ikke tapet grunnet snødrift være mer enn 5 %. Altså må det reelle energiutbyttet til 20° overgå energiutbyttet til -42°. Snødriftsanalysen til Potac viser at det er stor sannsynlighet for snøfonndannelse ved et sørvent anlegg på Isfjord Radio. Dersom panelene skulle stått med asimut 20°, må systemets størrelse ifølge Frimannslund et al. fra kapittel 1.1.2, økes for å kompensere for snøtap. Dette vil igjen gå på bekostning av systemkostnadene. På bakgrunn av dette ble det besluttet at en asimut -42° er best med hensyn på snøakkumulering, og blir derfor brukt for de neste scenarioene.

6.2 Scenario 2

Hensikten med scenario 2 var å lagre overskuddsenergien fra solcelleanlegget i scenario 1 for å ytterligere redusere dieselforbruket på Isfjord Radio.

Optimalisering av bakkemontert solcelleanlegg

For scenario 2 viser resultatene at det er helningsvinkel 40° som gir størst og mest økning i solfraksjon sammenlignet med scenario 1. Dette er antakelig fordi 40° har mest tilgjengelig produsert energi, som i kombinasjon med batterilagring gir høyest solfraksjon. Figur 5.4 viser også at batteriene ved 40° bidrar til en jevnere årsproduksjon enn 20°, og det er større produksjon på høsten og våren.

I tabell 5.2 kommer det frem at det fortsatt er overskuddsproduksjon i systemet for begge helningsvinkler. Det indikerer at en økning i installert batterikapasitet ville vært gunstig. På den andre siden er det rimelig å anta at dette vil medføre større kostnader enn nytten ved å lagre nåværende overskuddsproduksjon. Batteriene kan ikke lagre energien over

lengre perioder, og det kan derfor tenkes at større batterikapasitet ikke vil bidra til økt dekke av forbruk inn i vintermånedene.

Det kom frem i resultatet at det lengste batteriet er oppladet er 8 timer. I kapittel 2.5 om batteri, kommer det frem at et batteri kan holdes oppladet i minst ett døgn. Det forventes dermed ikke store utslag i resultatene knyttet til tap ved å holde batteriet oppladet utover dette.

6.3 Scenario 3

Hensikten med scenario 3 var å undersøke om VAWT i kombinasjon med scenario 2 kan produsere energi til å dekke forbruket i mørketiden.

Estimering av vindproduksjon

Figur 5.5 viser at det er nødvendig med 10 turbiner for å i det hele tatt møte forbruket i perioder. Det kommer også tydelig frem av trenden i produksjonen at denne er høyest i mørketiden, noe som samsvarer med teorien beskrevet i kapittel 2.6.

På bakgrunn av teorien i kapittel 2.7.3, antas det at 5 VAWT kan ta opp et areal på ca. 140 m² dersom de er plassert på én rad. Med andre ord vurderes området lite arealkrevende sammenliknet med det bakkemonterte solcelleanlegget. Likevel er det verdt å nevne at økning i antall turbiner også øker arealbruken betraktelig. For eksempel vil 10 VAWT fordelt på to rader ta opp ca. 1 100 m², noe som kan anses som betydelig mer arealkrevende. Likevel er arealbeslaget til det bakkemonterte solcelleanlegget fortsatt større, dersom man tar hensyn til radavstanden til solcelleanlegget.

Produksjonen fra vindturbinene benyttet i beregningene er basert på målinger for 2022. Gjennomsnittsvinden, beskrevet i kapittel 3.2.2, er 0,6 m/s lavere enn snittet fra 2015 til 2019. Dette indikerer at produksjonen i praksis kan bli høyere enn estimert. På den andre siden kom det frem i verifisering av beregningsmetoden, kapittel 4.3.2, at den estimerte produksjonen var noe høyere enn den faktiske. Dersom snittvinden i praksis er høyere samtidig som faktisk produksjon er lavere, er det rimelig å anta at resultatene stemmer godt med virkeligheten.

Vind- og solproduksjon med batterilagring

Systemet i scenario 3 gir det laveste forbruket av energi fra aggregat, både ved implementering av 5 og 10 vindturbiner. Verdiene i tabell 5.3 viser at produksjon for 5 og 10 turbiner gir forbedring for alle parametre. Den minimale differansen mellom energi levert av aggregat og energiproduksjon forbrukt internt, anses i dette scenario å være på grunn av avrundingsfeil i samspillet mellom PVsyst og koden i Matlab.

Solfraksjonen i systemet for henholdsvis 5 og 10 turbiner ble 14 % og 29 % større enn systemet uten. Overproduksjonen ble henholdsvis 5 % og 10 % større. Dette indikerer at mesteparten av vindproduksjonen kan forbrukes internt, samt at det kunne vært gunstig å utforske muligheten for installasjon av flere VAWT.

I casestudiet fra Universitetet i Bergen (2020) ble det vurdert at vind- og solenergi kan fungere som komplementære bidragsyttere i Arktis. Produksjonen fra vindturbinene bidrar i denne oppgaven til økt dekningsgrad av fornybar energi i mørketiden. Det kan dermed argumenteres for at vind- og solenergi ved Isfjord Radio er komplementære bidragsyttere, og bør kombineres for best mulig dekke av forbruk.

6.4 Klimagassutslipp

Alle scenarioene lyktes med å redusere klimagassutslippet sammenliknet med 2022, som vist i figur 5.8. Der kommer det tydelig frem at diesel er den største kilden til klimagassutslippene, også i kombinasjon med fornybar energi.

Scenario 3 har totalt den største reduksjonen i klimagassutslipp med installasjon av 10 turbiner. Utslippet ble redusert med 32,91 tonn CO₂ per år sammenliknet med 2022. Sammenliknet med scenario 2 med 40° helning, er årlig utslipp redusert med 8,67 tonn CO₂. Resultatene indikerer at installasjon av flere vindturbiner ytterligere kan redusere klimagassutslippene.

Sett i det store bildet gir implementering av sol- og vindkraft lite utslipp knyttet til teknologien i forhold til diesel. Dette antas å være på bakgrunn av utslippsfaktoren for levert energi, da bakkemonterte solceller har ca. 80 % lavere klimagassutslipp sammenliknet med diesel, og landbaserte vindturbiner ca. 94 %. Ifølge resultatene ser det ut som solenergi har mye høyere utslipp enn vind. Noe av dette kan forklares med at vindproduksjonen

kun er 21 % av den totale fornybare energiproduksjonen.

Det finnes flere faktorer som antas å øke eller redusere klimagassutslippene knyttet til de ulike scenarioene. For eksempel har produksjonen av enkelte komponenter energikrevende prosesser. I tillegg har ulike produksjonslokasjoner ulik energimiks, som beskrevet i kapittel 2.9. For eksempel har Norge et utslipp som tilsvarer kun 2,27 % av utslippet til resten av EU, og 1,49 % av Kina. Det vil si at en bestemt prosess kan få betraktelig lavere utslipp dersom det foregår i Norge sammenlignet med Kina.

Det er rimelig å anta at også lokale forhold og distribusjon av komponenter kan gi store variasjoner i klimagassutslipp. Eksempelvis gjør den geografiske beliggenheten til Isfjord Radio at utslipp knyttet til transport anses å være høyere enn ved mer urbane områder. Det er lange avstander og transportmulighetene går på fossilt drivstoff. Installasjon av det bakkemonterte solcelleanlegget var blant annet avhengig av borerigg som ble transportert inn til lokasjonen. Andre materialer og personell nødvendig for installasjon antar å føre med seg betraktelige klimagassutslipp som følge av transporten.

6.5 Økonomi

Nåverdiberegninger

Som vist i figur 5.9 ble ingen av investeringene lønnsomme gjennom de respektive scenarioenes levetid. Dette samsvarer med forskningen til UiB (2020) på fornybare energikilder i Longyearbyen. Studien estimerte at et isolert system basert på fornybare energikilder vil kreve store kostnader.

I scenario 1 er det ca. 9 % dyrere å installere et solcelleanlegg med 40° helning kontra 20°. Dette selv om solfraksjonen kun er 2,6 % høyere med 20°. Dette indikerer at dieselreduksjonen har stor påvirkning. Dersom det kun skal installeres et solcelleanlegg har helningsvinkel stor påvirkning på de økonomiske resultatene. På den andre siden kan det være dyrere å installere én helning fremfor en annen, noe som ikke er tatt hensyn til i beregningene av netto nåverdi.

Resultatene indikerer at solcelleanlegget er den rimeligste investeringen. Batteriene i scenario 2 gjør investeringen fire ganger så dyr sammenlignet med scenario 1. Det kan dermed være rimelig å si at dieselreduksjonen fra scenario 1 til scenario 2 ikke kan forsvare in-

vesteringskostnadene til batteriene fra et rent økonomisk perspektiv. Dersom det likevel investeres i batteriløsningen i scenario 2, bør det også investeres i vindturbiner. Kontantstrømmen med vindturbiner er stor nok til at NNV blir tilnærmet lik for scenario 2 og 3. Økning i kontantstrøm kan begrunnes med at inntjeningen på dieselreduksjon i scenario 3 er nevneverdig større enn vedlikeholdskostnadene for vind.

Det er også interessant hvordan netto nåverdi for 5 og 10 vindturbiner blir tilnærmet lik, selv om investeringskostnaden er dobbelt så stor for 10 turbiner kontra 5. Det kan tyde på at vindturbinene fungerer bra nok til at det lønner seg å investere i så mange turbiner som mulig, med forbehold om at dieselforbruket fortsetter å reduseres.

Energi- og lagringskostnader over levetiden

Generelt viser resultatene for LCOE og LCOS i tabell 5.5 høyere kostnader enn de teoretiske verdiene beskrevet i kapittel 2.10.2. Den prosentvise økningen sammenliknet med NVEs anslag for bakkemontert solcelleanlegg med 20° og 40° helningsvinkel er henholdsvis 195 % og 176 %. Vindturbiner har en prosentvis økning på 398 %. Den kraftige prosentvise økningen kan underbygges av at LCOE varierer i stor grad fra kraftverk til kraftverk. I tillegg er NVEs estimat antatt å gjelde for horisontale vindturbiner. Dette kan gjøre at sammenlikningsgrunnlaget ikke stemmer helt, da vertikale vindturbiner ofte genererer mindre energi og har lavere C_p . I tillegg er det i praksis rimelig å anta at 10 vindturbiner kan gi en mindre LCOE enn 5. Dette er fordi kostnader knyttet til anlegget ikke nødvendigvis vil øke proporsjonalt med antall turbiner.

Resultatene for LCOS knyttet til batterisystemet presentert i tabell 5.5 samsvarer med teorien i kapittel 2.10.2, med tanke på at de viser betraktelig høyere verdier sammenliknet med LCOE for vindturbiner og solcelleanlegg. På den andre siden er batterilagringen gunstig med tanke på regulerbarhet og lagring av overskuddsproduksjon som ellers ville gått tapt. Det fremkommer også av resultatene at kun 0,15 NOK/kWh skiller batterisystemet med sol-og vindproduksjon fra henholdsvis 10 og 5 vindturbiner. Med andre ord indikerer også LCOS at det lønner seg å installere flere vindturbiner i det lange løp.

Det er noen faktorer som gjør at LCOS for batterisystemet er antatt å være litt lavere enn resultatene viser. For det første er batteriene på Isfjord Radio av typen litium-ione. Dette gjør at verdien antas å være litt lavere da litium-ione har høyere energitetthet enn

LiFePO₄. For det andre har beregningene knyttet til sol- og vindproduksjon på Isfjord Radio tatt utgangspunkt i total mengde produsert energi, altså inkludert overskuddsenergi. Dette gjør at den virkelige energiprisen for forbrukeren vil bli dyrere. Batterisystemet i oppgaven er kun benyttet for å lagre overskuddsproduksjon, mens i virkeligheten optimaliserer de også driften til aggregatene. Batterisystemet vil derfor i praksis bli brukt i større grad. Dette gjør at den leverte energien fra batterisystemet blir høyere, og LOCS vil bli lavere.

6.6 Miljø- og samfunnsmessige drøftinger

Av hensyn til oppvarmingen i Arktis samt energiomleggingsfasen, vil det være nødvendig med implementering av fornybare energikilder. I tillegg til å nå bærekraftsmål 7, ren energi til alle, kan fornybar energi bidra til bærekraftsmål 13, stoppe klimaendringer. Dersom det er mulig bør ikke økonomiske hensyn overgå de klimamessige gevinstene fornybar energi kan ha. Resultatene i denne oppgaven indikerer at det er mulig med fornybar energi i Arktis. Likevel kan det være vanskelig å drifte systemer 100 % på fornybar energi. UiB (2020) indikerte i den stokastiske energimodellen fra Longyearbyen, at et isolert system basert på fornybare energikilder vil kreve høy installert kapasitet og store kostnader. I denne oppgaven ble det implementert vind- og solkraft tilsvarende 213-228 kW, og likvel gjenstår mye for å få et tilnærmet fornybart-drevet system. I tillegg har øydriftssystemet på Isfjord Radio kritisk infrastruktur som gjør det avhengig av stabil energiforsyning. Diesellaggregatene utgjør stor sikkerhet for driften, men implementering av fornybar produksjon er nødvendig for å redusere utslippene.

Selv om implementering av fornybare energikilder kan bidra til bærekraftsmål 7 og 13, kan det gå på bekostning av bærekraftsmål 12, ansvarlig forbruk og produksjon. For eksempel kan ikke komponenter til fornybare teknologi forsvare ansvarlig forbruk og produksjon dersom de produseres i land som driftes på fossil energi. I tillegg krever fornybar teknologi utvinning av ikke-fornybare ressurser. Det betyr at selv om fornybar teknologi kan bidra til forbedringer lokalt, kan det være at problemet forskyves til produksjonsfasen. Dersom energiforsyning skal foregå med fornybare energikilder må det være bærekraftig og ansvarlig produsert. I tillegg må teknologien være resirkulerbar.

Spesifikt for Isfjord Radio ble det i konsekvensutredningen i kapittel 3.1.2, antatt at

inngrepene ville føre til forstyrrelser på biologisk mangfold, jordsmonn og vegetasjon. Dette betyr at implementeringen kan gå på bekostning av bærekraftsmål 15, livet på land. Derimot vil pælefundamentering på det bakkemonterte solcelleanlegget føre til at systemet kan fjernes på en enkel og skånsom måte. På den andre siden er den nederste delen av fundamentet boret og støpt ned i berget, og er derfor en irreversibel prosess. Likevel er det jordsmonnet over berget og opp til bakkens overflate som anses å være viktigst å bevare. Det vil derfor være essensielt å finne en liknende løsning for fundamentet til vindturbinene for å unngå unødvendige inngrep i naturen. Med tanke på at Kapp Linnè fuglereservat er nærliggende til Isfjord Radio, anses valget av VAWT som svært positivt sammenlignet med HAWT. Turbinen har en «lukket» utforming som gjør at fuglene ikke tror de kan fly gjennom den. Derimot kan det ikke garanteres at fuglene ikke vil påvirkes av VAWT som følge av forstyrrelse i habitat. Dette kan i verste fall føre til endring i levemønsteret og dermed fuglenes muligheter for hekking.

Det åpne landskapet rundt Isfjord Radio gjør at området er sårbart for visuell forurensning og støy, spesielt med tanke på reiseliv. Turbinene LS Helix 3.0 har som beskrevet en høyde på 10 eller 15 meter over bakken og vil sees på lange avstander. Turbinen kan også lakeres i annen farge for å blendes bedre i terrenget. Det er også rimelig å anta at støynivået er begrenset, da VAWT støyer mindre enn HAWT. Høyden til solcelleanlegget anses derimot ikke som problematisk da dette kun er 2,5 m over bakken. Likevel krever anlegget et stort areal og vil derfor kunne vurderes som forstyrrende i landskapet. I tillegg kan 2,5 meter være akkurat lavt nok til at isbjørn kan ødelegge solcellene. Dersom anleggets størrelse blir problematisk i praksis, er det mulig å installere et bevegelig solsystem fremfor et fastmontert. Likevel vil et slikt system føre med seg økte installasjons- og vedlikeholdskostnader som ikke kan forsvares i et økonomisk perspektiv.

6.7 Feilkilder

Det tas forbehold om potensielle feil eller mangler som har forekommet gjennom prosjektet. Dette kan ha påvirket resultatene i form av feiltolkning eller beregninger. Det kan også være faktafeil i teorien eller casestudiet presentert i kapittel 2 og 3. Det har vært ønskelig å kun benytte pålitelige kilder som leksikon, fagbøker, fagfelleverderte artikler og rapporter. I følgende underkapitler presenteres potensielle feilkilder og svakheter

i prosjektet.

Solsimulering

I PVsyst er det ikke lagt til avstand fra panelene til bakken. Dette var ikke tilgjengelig som funksjon i PVsyst. Dette kan skape feil antatt resultat fra simuleringen.

Angående skygge og avstand mellom panelene er simuleringen gjort for sommersolverv. På sommersolverv står sola høyt på himmelen sammenlignet med andre datoer, som kan bety at skyggekastene til panelene er større enn antatt.

Det er ikke inkludert korrekte elektriske tap i PVsyst. I virkeligheten skal energien gjennom flere tapsledd som ledninger, to transformatorer og potensielt en vekselretter i batterisystemet før det når lasten. Det er lite sannsynlig at dette tapet samsvarer med standardinnstillingene i PVsyst.

Batterilagring

Koden i MatLab for batterilagring er spesifikt designet til systemets batterier og dens kapasitet og C-rate. Det eneste som er vurdert er kWh inn og ut, andre tap er neglisjert. Dermed kan energilagringstjenesten bli lavere i virkeligheten.

I praksis kan lagring på batteriene gå over eller under SOC-grensene. I MatLab-koden brukt for systemets batterier er ikke dette tatt hensyn til. På bakgrunn av dette er det mulig at det i praksis kan lagres mer eller mindre energi enn resultatene viser.

Batterisystemet vil i virkeligheten bli brukt til å optimalisere aggregatet i tillegg til å lagre overskuddsenergi. Styringssystemet skal i teorien passe på at det er nok lagringskapasitet på batteriet til å lade så mye overskuddsenergi som mulig, men det kan oppstå situasjoner hvor batteriet er ladet fra aggregatet slik det ikke er plass til like mye overskuddsproduksjon som anslått i denne oppgaven.

Vindberegninger

Forventet produksjon fra vindturbin ble beregnet med kode i MatLab. Metoden har en svakhet der det tas utgangspunkt i at målt vindhastighet holdes konstant i én time. Den tar også utgangspunkt i at vinden er laminær (jevn). Dette er ikke alltid tilfelle, da vinden kan også være turbulent (virvlete). Dette er vanligst i områder med trær og bygninger som hindrer fri flyt for vinden, men også andre vindturbiner i nærheten kan bidra til

mer turbulent strømming. Dette vil føre til at vindturbinene er mindre effektive. Andre svakheter er at det er ukjent i hvilken navhøyde NKS har utført vindmålingene, samt avstand fra målestasjonen på Isfjord Radio til faktisk lokasjon.

De elektriske tilleggskomponentene til vindturbinene, som laderegulator og vekselretter, er ikke inkludert i energiproduksjonen eller valgt. Andre tapsledd som ledninger og transformator tap er heller ikke inkludert, da dette ikke var en del av omfanget til oppgaven. Det er derimot verdt å nevne at den faktiske vindproduksjonen vil bli lavere enn beregnet i denne oppgaven. I verifiseringen, i kapittel 4.3.2, kom det frem at det er nødvendig å ta hensyn til tap i vekselretter som følge av perioder uten produksjon. Dette er for å vurdere den faktiske energiproduksjonen.

LuvSide hadde ikke oppgitt driftstemperatur og tåletemperatur for vindturbinene. Før en eventuell installasjon må det undersøkes at de er innenfor maks- og minimumstemperatur på Isfjord Radio, presentert i kapittel 3.2.3.

Beregninger for dieselaggregat

Dieselforbruket er estimert for en konstant drift på 75 %. Dette er det mest ideelle tilfellet, og det er derfor sannsynlig at dieselforbruket i liter vil være større i virkeligheten. Det er lite sannsynlig at aggregatene driftes optimalt og samtidig klarer å levere nødvendig energi til enhver tid. Faktisk dieselforbruk i 2022 var 123 951 L, presentert i kapittel 3.1.1, og ble i denne oppgaven estimert til 119 341 L. Derimot inkluderte faktisk dieselforbruk også forbruket til en traktor på lokasjonen. Det er ukjent hvor mye den benyttet, og avviket kan dermed ikke fastslås.

Klimagassberegninger

Det er verdt å nevne at utslippsfaktorene presentert i kapittel 2.9 kan være unøyaktige i forhold til realistiske verdier. Som beskrevet er slike faktorer avhengig av lokale forhold og energiopphav for korrekte verdier.

Utslippsfaktoren for vindturbiner på levert energi antatt å gjelde for HAWT da det ikke er spesifisert i studien til Silva og Raadal (2019) hvilke type det gjelder. Dersom dette er tilfelle er det rimelig å anta at utslippsfaktoren kunne vært annerledes.

Det knyttes også usikkerhet til utslippsfaktoren for batteriene. Verdien er basert på studiet

til Romare og Dahllöf (2017) om livsløpsvurderinger av Li-ione-batter. Disse batteriene brukes for «light-duty vehicles», som er lette kjøretøy under 3,5 tonn, og ikke batterier brukt i energilagringssystem.

Batteriene var en del av det eksisterende styringssystemet som ikke er tatt hensyn til i denne oppgaven. For oppgavens struktur ble det derfor valgt å kun ta utgangspunkt i dieselforbruk knyttet til klimagassutslipp fra 2022.

Økonomiberegninger

Grunnet manglende informasjon om investerings- og vedlikeholdskostnader knyttet spesifikt til prosjektet, var det nødvendig å finne estimater via andre kilder. Estimatenes kan derfor i stor grad avvike fra virkeligheten.

Estimert investering til solcelleanlegget, batterisystemet og vindturbinene kan avvike fra virkeligheten. Det kan være at investeringen på solcelleanlegget er overvurdert mens investeringen på vindturbinene er undervurdert. Dersom dette er tilfellet kan netto nåverdi for scenario 3 bli mer ulønnsom enn det resultatene tilsier. Andre faktorer som kan påvirke de økonomiske resultatene er at det ikke er tatt hensyn til mulig reduksjon i kontantstrøm i år 20 ved reinvestering av vindturbiner. I tillegg er det heller ikke tatt hensyn til at systemene vil aldres, og dermed vil inntjeningen som følge av dieselreduksjon mest sannsynlig bli lavere med tiden. Kostnader som ikke er medberegnet er kost og losji for fagfolk til installasjon. Det samme gjelder for vedlikeholdsarbeid, og kostnader knyttet til transport. Til referanse tok det i følge oppdragsgiver 11 timer med tråkkemaskin å frakte solcelleanlegget til Isfjord Radio fra Longyearbyen. Det er heller ikke tatt hensyn til vedlikeholdskostnader for aggregatene. Det antas at disse reduseres med driften.

Kostnadene til batterisystemet er tatt utgangspunkt i et system med 48 kWp per skap. Det vil si at batterikostnaden gjelder for 432 kWp, og ikke 403,2 kWp som faktisk er installert. Det samme gjelder for solcelleanlegget. Totalkostnaden gjelder for et anlegg med 200 kWp som er antatt som innafor, derimot er systemkostnadene for 384 panel og ikke 360.

Det er også antatt at vindturbinene kun trenger én vekselretter uavhengig av antall turbiner. I praksis kan det være at systemet trenger én vekselretter per turbin. Under beregning av LCOE og LCOS ble prisen på vekselretteren til vindturbinene ganget med

1,25. Denne skulle blitt ganget med 1,33, da 5 år tilsvarer én tredjedel av prisen til vekselretteren ikke én fjerdedel. Feilen skylles menneskelig svikt, og LCOE/LCOS vil bli litt høyere i virkeligheten.

Det er heller ikke inkludert eller vurdert om det finnes eventuelle støtteordninger ved implementering av fornybare energikilder ved Isfjord Radio.

6.8 Videre arbeid

For videre arbeid mot en sikker og fornybar energiforsyning på Isfjord Radio, og andre samfunn i øydrift, vurderes det med bakgrunn i resultatene at en ytterligere implementering av sol- og vindkraft kan være aktuelt. Siden aggregatene sannsynligvis ikke kan fjernes permanent, bør det vurderes å erstatte diesel med biodiesel da dette anses som karbonnøytralt.

På bakgrunn av at sol- og vindkraft er uregulerbare kilder, anses grønn hydrogen som en ytterligere bidragsyter til fornybar energiforsyning. Statkraft formidler på sine hjemmesider at de har foreslått kraftverk basert på brenselceller på Svalbard [125]. Dersom hydrogenteknologien kan implementeres på Isfjord Radio, vil dette kunne kompensere til sol- og vindproduksjonen.

7 Konklusjon

For å unngå snøakkumulering bør solcellepanelene stå parallelt med vindretningen i alle scenarioene. På Isfjord Radio tilsvarer dette en asimutvinkel på -42° . For scenario 1, bakkemontert solcelleanlegg på 198 kWp, er den mest optimale helningsvinkelen 20° . Dette gir en solfraksjon på 20,52 %. For scenario 2, scenario 1 med batterilagring, er den mest optimale helningsvinkelen 40° . Dette gir en solfraksjon på 24,98 %.

For scenario 3, scenario 2 med vindkraft, vil installasjon av VAWT fungere som en komplementær bidragsyter for solkraft ved Isfjord Radio. Produksjonen bidrar til å dekke deler av forbruket i mørketiden. 10 VAWT gir en solfraksjon på 32,15 %.

Scenario 1, 2 og 3 kan redusere dieselforbruket med henholdsvis 25 513 L/år, 30 784 L/år og 39 242 L/år. I et klimaperspektiv kan scenario 3 bidra til å kutte klimagassutslippene med 32,91 tonn CO₂-ekv/år. Dette er en reduksjon på 32,9 % sammenlignet med et system med kun dieselaggregat.

Fra et rent økonomisk perspektiv kan ikke dieselreduksjonen fra scenario 1 til scenario 2 forsvare de høye investeringskostnadene til batteriene. Dersom det likvel investeres i et batterisystem, bør det også investeres i VAWT da dette gir tilnærmet lik NNV. Beregning av LCOS gir også den laveste kostnaden i scenario 3 ved produksjon fra 10 VAWT. Denne ble 5,68 NOK/kWh. LCOE for bakkemontert solcelleanlegg og VAWT har høye kostnader sammenliknet med teoretiske estimat. Energikostnaden ble henholdsvis 1,35 NOK/kWh og 1,49 NOK/kWh.

Dersom investor har mulighet bør ikke økonomiske hensyn gå foran miljø- og samfunnsmessige gevinster. Resultatene i oppgaven indikerer at implementering av vind- og solkraft har positive innvirkninger på lokalt miljø og ren energiproduksjon. Dette bidrar til å nå bærekraftsmål 7 og 13. Likevel kan det gå på bekostning av bærekraftsmål 12 og 15. Fornybar energi kan negativt påvirke dyreliv og natur som ved arealbeslag og inngrep i jordsmonn. Implementering av sol- og vindkraft i Arktis krever derfor innovative løsninger som «lukkede» VAWT og solcellepaneler løftet opp fra bakken. I tillegg krever omlegging til fornybar energi ansvarlig forbruk og produksjon av komponenter.

For videre arbeid bør hydrogenteknologi vurderes som ytterligere energiforsyning på Is-

fjord Radio. I tillegg kan økt installert effekt med sol- og vindkraft være gunstig for å dekke større deler av forbruket med fornybar energi. Grunnet kritisk infrastruktur kan ikke diesellaggregatene fjernes, og muligheten for overgang til biodiesel bør undersøkes.

Referanser

- [1] FN-sambandet. Bærekraftig utvikling [Internett]; 2021 [oppdatert 28.10.2021; hentet 12.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>.
- [2] Kalogiro SA. Solar Energy Engineering Processes and Systems - Second Edition. Oxford, UK: Elsevier Inc; 2014.
- [3] Svarc J. Solar Panel Construction [Internett]; 2020 [hentet 14.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>.
- [4] Honsberg CB, Bowden SG. IV curve [Internett]. Photovoltaics Education Website; 2019 [hentet 24.03.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>.
- [5] Solar Design Guide. Which Direction Should Your Solar Panels Face? [Internett]; u.å [hentet 28.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://solarDesignGuide.com/solar-panel-tilt-and-azimuth/>.
- [6] PVsyst. Project design: Tutorial [Internett]; u.å [hentet 11.05.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/index.html?project_tutorial.htm.
- [7] PVsyst. Self consumption [Internett]; u.å [hentet 22.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/self_consumption.htm.
- [8] Tominaga Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives [Internett]. Japan: ScienceDirect; 2018 [hentet 12.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X17302343>.
- [9] Norges vassdrags- og energidirektorat. Kraftproduksjon fra vindturbiner [Internett]; 2019 [oppdatert 26.01.2023 ; hentet 27.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kraftproduksjon-fra-vindturbiner/>.
- [10] ;.

- [11] Norsk Polarinstitutt. Svalbardkartet [Internett]; u.å [hentet 03.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://geokart.npolar.no/Html5Viewer/index.html?viewer=Svalbardkartet>.
- [12] Sysselmesteren. Kapp Linné fuglereservat [Internett]; u.å [hentet 12.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.sysselmesteren.no/siteassets/kart/temakart/naturvern-omrader/fuglereservat/kapp-linne-fuglereservat.pdf>.
- [13] Yr. Historikk siste 13 måneder [Internett]; 2022 [hentet 04.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/nb/historikk/tabell/5-99790/Norge/Svalbard/Svalbard/Isfjord%20radio?q=siste-13-måned>.
- [14] Norsk Klimaservicesenter. Vindrose for Isfjord Radio (SN99790) i perioden 1.2022-1.2023 [Internett]; u.å [hentet 16.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://seklima.met.no/windrose/?timeresolution=custom_period&from=2022-01&to=2023-01&locationid=SN99790.
- [15] Trina Solar. Trina Solar Attachment B. Technical Specification Sheets [Internett]; u.å [hentet 24.03.2023]. Tilgjengelig fra: https://sam.nrel.gov/media/kunena/attachments/101478/2020_PA1_Datasheet_Vertex_DEG19C.20.pdf.
- [16] LuvSide. Helix 3.0 [Internett]; u.å [hentet 12.05.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.luvside.de/app/uploads/20230512_LS_Helix-3.0-DataSheet_en-de-1.pdf.
- [17] Kverneland Energi. Batterisystemer [Internett]; u.å [hentet 01.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://kvernelandenergi.no/losninger/batterisystem/>.
- [18] Norsk Polarinstitutt. Klimaendringer i Arktis [Internett]; u.å [oppdatert 15.05.2018; hentet 10.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.npolar.no/tema/klimaendringer-arktis/>.
- [19] Miljøstatus. Klima i Arktis [Internett]; u.å [oppdatert 28.04.2023; hentet 10.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/polaromradene/arktisklima-i-arktisklima/>.
- [20] Store Norske Spitsbergen Kullkompani. Omstilling til fornybar energi i Arktis [Internett]; u.å [hentet 13.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.snsk.no/energi/o>

m-energi.

- [21] Lillebo M. Mikronett [Internett]. Store Norske Leksikon; 2020 [oppdatert 20.11.2022; hentet 26.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/mikronett>.
- [22] Kverneland Energi. Om Kverneland Energi [Internett]; u.å [hentet 25.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://kvernelandenergi.no/om-oss/>.
- [23] Gi Barna Håp. FNs Bærekraftsmål [Internett]; u.å [hentet 15.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://gibarnaahaap.no/fns-baerekraftsmal>.
- [24] Ringkjøb HK, Haugan PM, Nybø A. Transitioning remote Arctic settlements to renewable energy systems - A modelling study of Longyearbyen, Svalbard. Applied Energy; 2020 [hentet 17.04.2023]. 258: S114079. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919317660>.
- [25] Frimannslund I, Thiis T, Ferreira AD, Thorud B. Impact of solar power plant design parameters on snowdrift accumulation and energy yield. Cold Regions Science and Technology; 2022 [hentet 14.05.2023]. 201(2): S103613. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X2200132X>.
- [26] Heggelund K, Karlstad L. Svar på søknad om etablering av sol- og vindkraft på Isfjord Radio [Internett]. Longyearbyen: Sysselmasteren på Svalbard; 2022 [hentet 26.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.sysselmasteren.no/siteassets/miljoovern/svar-pa-soknad-om-etablering-av-sol--og-vindkraft-pa-isfjord-radio-.pdf>.
- [27] Lundberg NH. Diesel [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 30.06.2020; hentet 03.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/diesel>.
- [28] Miljødirektoratet. Tabeller for omregning fra energivare til utslipp [Internett]; u.å [oppdatert 13.10.2020; hentet 01.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabeller-for-omregning-fra-energivarer-til-kwh/>.
- [29] Sarsten A, Øyvind Ellingsdalen. Dieselmotor [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 14.10.2021; hentet 03.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/dieselmotor>.

- [30] Hofstad K. Generator (elektrisk maskin) [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 16.09.2020; hentet 24.03.2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/generator_-_elektrisk_maskin.
- [31] Saugstad K, Gunvaldsen I. Elektrisk maskin [Internett]; 2009 [oppdatert 11.10.2022 ; hentet 03.05.2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/elektrisk_maskin.
- [32] Hofstad K. Solenergi [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 04.01.2023; hentet 23.03.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solenergi>.
- [33] Gjeltén HM. Albedoeffekt [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 31.08.2022 ; hentet 04.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/albedoeffekt>.
- [34] PVsyst. Transposition factor [Internett]; u.å [hentet 17.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/transposition_factor.htm.
- [35] Mæhlum L, Rosvold KA. Solceller [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 30.12.2022 ; hentet 27.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solceller>.
- [36] Skildrud VC. Lønnsomhet og tilbakebetalingstid for solceller [Internett]. Otovo; 2023 [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/lonnsomhet-og-tilbakebetalingstid-for-solceller/>.
- [37] Hamid MN. Vekselretter til solcelleanlegg - slik fungerer det [Internett]. Otovo; 2022 [hentet 21.03.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/vekselretter-slik-fungerer-det/>.
- [38] Svarc J. MPPT Solar Charge Controllers Explained [Internett]; 2022 [hentet 24.03.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers>.
- [39] Hamid HM. Pv power optimizer for optimal strømproduksjon [Internett]. Otovo; 2022 [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/optimizer-for-optimal-stromproduksjon/>.
- [40] Hamid MN. Slik virker et solcelleanlegg [Internett]. Otovo; 2022 [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/slik-virker-et-s>

olcelleanlegg/.

- [41] Bentsen KR. Sammenligning av reell energiproduksjon fra PV-anlegg og estimater fra PVsyst, samt lønnsomhetsvurdering av PV-anlegg i Norge [Masteroppgave]; 2014 [hentet 30.03.2023]. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/221671/Bentsen%2C%20Kristin%20Rove%202014.pdf>.
- [42] PVsyst. Soiling loss [Internett]; u.å [hentet 24.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/soiling_loss.htm.
- [43] Energipluss. Solceller i Norge - solenergi effektivt i norsk klima [Internett]; u.å [hentet 14.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://energipluss.com/solceller-norge-effektivt/>.
- [44] Evensen T, Thorud B, Stave J, Skog K, Galaaen J, Smelvær I et al . Bakkemonterte solkraftverk i Norge - prosess og beste praksis [Internett]. Solenergiklyngen; u.å [hentet 14.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.solenergiklyngen.no/wp-content/uploads/2022/11/Bakkemonterte-solkraftverk-i-Norge.pdf>.
- [45] Thue JV. Fundament [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 16.07.2019; hentet 14.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fundament>.
- [46] PVsyst. Orientation optimization [Internett]; u.å [hentet 17.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/index.html?orientation_optimisation.htm.
- [47] PVsyst. Plane azimuth [Internett]; u.å [hentet 22.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/index.html?plane_azimuth.htm.
- [48] PVsyst. Plane tilt [Internett]; u.å [hentet 22.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/plane_tilt.htm.
- [49] Aksnes K, Dybdahl A. Sommersolverv [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 22.04.2022; hentet 15.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sommersolverv>.
- [50] PVsyst. PVsyst 7 _ Horizon [Internett]; 2022 [hentet 13.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=5htnRyntTSS>.

- [51] Siemens Energy. Battery energy storage [Internett]; u.å [hentet 24.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/storage-solutions/battery-energy-storage.html>.
- [52] Burheim OS. Engineering Energy Storage. Academic Press Inc; 2017.
- [53] Rosvold KA. Oppladbare batterier [Internett]. Store norske leksikon; 2015 [oppdatert 01.01.2020; hentet 24.04.2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/oppladbare_batterier.
- [54] Curran F. How long can solar energy be stored? [Internett]; 2021 [oppdatert 02.11.2021 ; hentet 04.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://greenhouse.solar/how-long-can-solar-energy-be-stored/>.
- [55] Hofstad K. Vindenergi [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 19.08.2022; hentet 27.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vindenergi>.
- [56] Dannevig P, Harstveit K. Vind [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 12.10.2022 ; hentet 04.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vind>.
- [57] Meteorologisk institutt. Vindrose [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 29.04.2021; hentet 16.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vindrose>.
- [58] Katlein C. Physics of Snow drift [Internett]. University Centre in Svalbard; 2009 [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <http://katlein.de/wp-content/uploads/2017/09/Physics-of-Snow-drift---Personal-Report-Christian-Katlein-AT301.pdf>.
- [59] Söderström E, Peak Innovation, Auganæs S, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Snøgjerder for skianlegg - Guide for mer effektiv innsamling av snø med snøgjerder [Internett]. Snörik; 2020 [hentet 12.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.godeidrettsanlegg.no/sites/default/files/bilder/Rapport%20sn%C3%B8gjerder%20norsk.pdf>.
- [60] Hofstad K. Vindkraftverk [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 25.01.2023; hentet 27.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vindkraftverk>.

- [61] Bhatia SC. Advanced Renewable Energy Systems [Internett]. Woodhead Publishing India; 2014 [hentet 24.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422693500292>.
- [62] Sidelnikova M, Weir DE, Groth LH, Nybakke K, Stensby KE, Langseth B, et al.. Kostnader i energisektoren [Internett]. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat; 2015 [hentet 12.05.2023]. 2/2015 del 1. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_02a.pdf.
- [63] Ali MH. Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed. International Journal of Modern Engineering Research; 2013 [hentet 24.03.2023]. 3(5): S2978-86. Tilgjengelig fra: http://www.ijmer.com/papers/Vol3_Issue5/CJ3529782986.pdf.
- [64] Tjiu W, Marnoto T, Sohif M, Ruslan MH, Sopian KB. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. Renewable Energy; 2015 [hentet 12.05.2023]. 75: S50-67. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/publication/266799978_Darrieus_vertical_axis_wind_turbine_for_power_generation_I_Assessment_of_Darrieus_VAWT_configurations.
- [65] Eddahmani A, Dr Darhmaoui H, Dr Sheikh N. Savonius vertical wind turbine: design, simulation, and physical testing [Internett]. School of Science and Engineering; 2017 [hentet 24.03.2023]. Tilgjengelig fra: <http://www.aui.ma/sse-capstone-repository/pdf/spring-2017/SavoniusVerticalWindTurbine-DesignSimulationandPhysicalTesting.pdf>.
- [66] Haase M, Skeie K, Tronstad TV. Building integrated vertical wind turbines [Internett]. Oslo: SINTEF Academic Press; 2012 [hentet 18.04.2023]. 19. Tilgjengelig fra: https://www.sintefbok.no/book/download/988/vinfopubutgivelsersintef_fag_researchsintef_fag_nr_19_building_integrated_wind_turbinesnettsfag_19pdf.
- [67] LuvSide. 7 advantages of vertical axis wind turbines (VAWT) [Internett]; 2020 [hentet 11.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.luvside.de/en/vawt-advantages/>.

- [68] Pookpunt S, Ongsakul W. Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients. *Renewable Energy*; 2013 [hentet 18.05.2023]. 55: S266-76. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112007604>.
- [69] U S Energy Information Administration. Wind explained. Where wind power is harnessed [Internett]; u.å [oppdatert 20.04.23 ; hentet 18.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/where-wind-power-is-harnessed.php>.
- [70] Aarnes JF, Aubert KE. Interpolasjon (matematikk) [Internett]. Store Norske Leksikon; 2012 [oppdatert 22.01.2023 ; hentet 12.05.2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/interpolasjon_-_matematikk.
- [71] Bakshi BR. Sustainable Engineering, principles and practice. Cambridge: Cambridge University Press; 2019.
- [72] Sagdahl MS. Etikk [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 21.01.2023; hentet 12.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/etikk>.
- [73] Regjeringen. Konsekvensutredninger [Internett]; u.å [oppdatert 14.02.2023; hentet 30.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/konsekvensutredninger/id2076809/>.
- [74] Fiksen K, Borsche T, Grøndahl R, Jarstein S, Ramm B et al . Alternativer for framtidig energiforsyning på Svalbard [Internett]. Oslo: Thema consulting group og Multiconsult; 2018 [hentet 26.01.2023]. 2018-09. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/cdaceb5f6b5e4fb1aa4e5e151a87859a/thema-og-multiconsult---energiforsyningen-pa-svalbard.pdf>.
- [75] Carstens H, Hesthammer J. God grunn til å frykte metall- og mineralmangel til elektrifiseringen [Nettartikkel]. Oslo: Dagens Næringsliv; 2019 [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.dn.no/innlegg/energi/ressursforvaltning/metaller/god-grunn-til-a-frykte-metall-og-mineralmangel-til-elektrifiseringen/2-1-686825>.
- [76] Godske B. «Skittent, farlig og skadelig»: Forskere advarer om jakten på metaller og sjeldne jordarter til grønne teknologier [Nettartikkel]. Oslo: Teknisk Ukeblad; 2020

- [hentet 26.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/skittent-farlig-og-skadelig-forskere-advarer-om-jakten-pa-metaller-og-sjeldne-jordarter-til-gronn-e-teknologier/482466>.
- [77] Olerud K, Lahn B. Klimagassutslipp [Internett]. Store Norske Leksikon; 2015 [oppdatert 10.01.2023; hentet 30.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klimagassutslipp>.
- [78] Olerud K, Lahn B. CO₂-ekvivalenter [Internett]. Store Norske Leksikon; 2015 [oppdatert 09.01.2020; hentet 30.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/CO2-ekvivalenter>.
- [79] Silva M, Raadal HL. Life cycle GHG emissions of renewable and non-renewable electricity generation technologies [Internett]. Ostfold Research; 2019 [hentet 26.04.2023]. OR.23.19. Tilgjengelig fra: https://reinvestproject.eu/wp-content/uploads/2019/11/OR_RE-INVEST_Life-cycle-GHG-emissions-of-renewable-and-non-renewable-electricity.pdf.
- [80] Romare M, Dahllöf L. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries [Internett]. IVL Swedish Environmental Research Institute; 2017 [hentet 30.04.2023]. C 243. Tilgjengelig fra: <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-.pdf>.
- [81] Norges vassdrags- og energidirektorat. Lavt klimagassutslipp knyttet til norsk strømforbruk i 2020 [Internett]; 2021 [oppdatert 02.07.2021; hentet 30.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/lavt-klimagassutslipp-knyttet-til-norsk-stromforbruk-i-2020/>.
- [82] Climate Transparency. Climate transparency report: comparing G20 climate action towards net zero [Internett]; 2021 [hentet 30.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/10/CT2021China.pdf>.
- [83] Torvatn T, Rolfsen M, Heggernes TA, Sørheim R. Teknologiledelse - for ingeniørstudenter. Bergen: Vigmostad & Bjørke AS; 2016.

- [84] Norges vassdrags- og energidirektorat. Kostnader for kraftproduksjon [Internett]; u.å [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/analyser-og-statistikk/kostnader-for-kraftproduksjon/>.
- [85] Melnikov V, Nesterenko G, Potapenko A, Lebedev D. Calculation of the Levelised Cost of Electrical Energy Storage for Short-Duration Application. LCOS Sensitivity Analysis. EAI Endorsed Transactions; 2018 [hentet 08.05.2023]. 6(21): e2. Tilgjengelig fra: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/939>.
- [86] Corporate Finance Institute. Levelized Cost of Energy (LCOE) [Internett]; 2023 [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/>.
- [87] Xu Y, Pei J, Cui L, Liu P, Ma T. The Levelized Cost of Storage of Electrochemical Energy Storage Technologies in China. Frontiers in Energy Research; 2022 [hentet 08.05.2023]. 10: Tilgjengelig fra: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.873800>.
- [88] BSLBATT. Litiumjernfosfat vs litiumion: forskjeller og fordeler [Internett]; 2020 [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.lithium-battery-factory.com/no/lithium-iron-phosphate-vs-lithium-ion/>.
- [89] Hoftsad K. Energitetthet [Internett]. Store Norske Leksikon; 2022 [oppdatert 12.11.2013; hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energitetthet>.
- [90] Store Norske Spitsbergen Kullkompani. Vi eier og utvikler boliger og nærings-eiendom i Longyearbyen [Internett]; u.å [hentet 26.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.snsk.no/eiendom/isfjord-radio>.
- [91] Basecamp Explorer. En utpost i Arktis [Internett]; u.å [hentet 26.01.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.basecampexplorer.com/no/svalbard/basecamper/isfjord-radio/>.
- [92] Enova. Isfjord Radio - Fullskala innovativ energi- og klimateknologi [Internett]; u.å [hentet 17.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.enova.no/om-enova/om-organis>

asjonen/teknologiportefoljen/isfjord-radio---fullskala-innovativ-energi--og-klimateteknologi/.

- [93] Arnesen G, Johnsborg HB, Langeid T, Mork K, Stylegar FAH. Ny energiforsyning til Isfjord Radio [Internett]. Multiconsult; 2021 [hentet 27.01.2023]. 10219059-01-RIM-RAP-001. Tilgjengelig fra: <https://www.sysselmesteren.no/contentassets/c072547d641d4928b8f5d3224e42941b/vedlegg---konsekvensutredning-ny-energi-isfjord-radio.pdf>.
- [94] Overrein Ø. Svalbards dyreliv [Internett]. Norsk Polarinstitutt; u.å [hentet 15.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://cruise-handbook.npolar.no/no/svalbard/wildlife.html>.
- [95] Rueness EK. Isbjørn [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 22.01.2023; hentet 15.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/isbjørn>.
- [96] Dannevig P. Klima på Svalbard [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 24.09.2018 ; hentet 03.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/Klima_på_Svalbard.
- [97] Sysselmesteren på Svalbard. Sikkerhet på Svalbard [Internett]; 2019 [hentet 03.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.sysselmesteren.no/contentassets/5f359e34e35d43a7a29f36064eaebc1c/folder_sysselmannen_svalbard_a5_norsk.pdf.
- [98] Delphin ILA. Midnattssol [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 31.10.2018 ; hentet 04.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/midnattssol>.
- [99] Aksnes K, Hammerstrøm M. Mørketid [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 17.02.2022 ; hentet 04.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/mørketid>.
- [100] Thuesen NP, Barr S. Svalbard [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 08.09.2022 ; hentet 03.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Svalbard>.
- [101] Norsk Klimaservicesenter. Observasjoner og værstatistikk [Internett]; u.å [hentet 2023]. Tilgjengelig fra: <https://seklima.met.no/observations/>.

- [102] Harstveit K. Tundraklima [Internett]. Store Norske Leksikon; 2009 [oppdatert 12.02.2021 ; hentet 03.02.2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/tundraklima>.
- [103] PVsyst. Generic Year 1990 [Internett]; u.å [hentet 23.03.2023]. Tilgjengelig fra: https://www.pvsyst.com/help/generic_year.htm.
- [104] Norsk Klimaservicesenter. Observasjoner og værstatistikk [Internett]; 2023 [hentet 23.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://seklima.met.no/days/snow_coverage_type_surface_snow_thickness/custom_period/SN99840/nb/2021-01-01T00:00:00+01:00;2022-12-31T23:59:59+01:00.
- [105] Potac J. Snødriftsanalyse; 2022. Tilgjengelig fra oppdragsgiver.
- [106] LuvSide. LS Helix 3.0 Next-Generation Savonius Rotor [Internett]; u.å [hentet 12.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.luvside.de/en/3-0-helix-wind-turbine/>.
- [107] Solsmart. Hva koster solcellepanel? Pris i 2023 [Internett]; 2023 [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.solsmart.no/pris/solcellepanel>.
- [108] Sparelys. Solcelleanlegg Bakke - Gigant [Internett]; u.å [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.sparelys.no/solcelleanlegg-bakke-gigant>.
- [109] Gold Solarian. 165 kW KACO inverter [Internett]; u.å [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://goldsolarian.com/product/165-kw-kaco-inverter/>.
- [110] Perma Batteries. TESVOLT TS 48V batteries [Internett]; u.å [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.perma-batteries.com/en/product/batteries-tesvolt-ts/>.
- [111] Koetsier J. New 6-Bladed Vertical Axis Wind Turbines Can Power Your Off-Grid Home For 30 Years Safely [Nettartikkel]. Washington: Forbes; 2020 [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.forbes.com/sites/johnkoetsier/2020/08/10/new-6-bladed-vertical-axis-wind-turbines-can-power-your-off-grid-home-for-30-years-safely/>.
- [112] Tesup. Atlas 7 kW 'Effektiv' Vertikal Vindturbin [Internett]; u.å [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.tesup-norge.com/product-page/atlas7-vindturbin-e>

lektriskkjøretøy-Norge.

- [113] Tveiten KBV. Solceller i lavspenningsnettet [Internett]. Norges vassdrags- og energidirektorat; 2019. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/media/15051/sommerprosjekt-2019.pdf>.
- [114] Revheim PP. Muligheter for småskala vindkraft i Møre og Romsdal [Internett]. Nasjonalt Vindenergisenter AS; 2017 [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://nves.no/site/wp-content/uploads/2019/07/Sm%C3%A5skala-vindkraft-i-M%C3%B8re-og-Romsdal.pdf>.
- [115] Paradise Energy Solutions. What's the Cost of a Ground Mount Solar Panel System? [Internett]; 2023 [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.paradise-solarenergy.com/blog/whats-the-cost-of-a-ground-mount-solar-panels>.
- [116] Cole S. How Much Does a Home Wind Turbine Cost? [Internett]; u.å [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://theroundup.org/home-wind-turbine-cost/>.
- [117] Forbrukertorget. Solcellepanel: Alt du trenger å vite [Internett]; 2023 [hentet 05.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://forbrukertorget.no/solcellepanel/hva-er-solcellepanel>.
- [118] Brinsmead TS, Graham PW, Hayward JA, Ratnam EL, Reedman L. Future energy storage trends. CSIRO; 2015 [hentet 08.05.2023]. EP155039. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/publication/282737404_Future_energy_storage_trends_An_assessment_of_the_economic_viability_potential_uptake_and_impacts_of_electrical_energy_storage_on_the_NEM_2015-2035.
- [119] Norges bank. Valutakurser [Internett]; u.å [hentet 08.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.norges-bank.no/tema/Statistikk/Valutakurser/>.
- [120] Van Raan AFJ. Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology [Internett]. North-Holland: Elsevier Science Publishers; 1988. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444705372500052>.
- [121] Sustainable Technologies Evaluation Program. Performance Evaluation of a 700 Watt Vertical Axis Wind Turbine [Internett]; 2015 [hentet 14.05.2023]. Tilgjengelig

fra: https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2016/08/700VAWT_TechBrief_Jan2016.pdf.

[122] Microsoft. Sammenligne (funksjon) [Internett]; u.å [hentet 14.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://support.microsoft.com/nb-no/office/sammenligne-funksjon-e8dffd45-c762-47d6-bf89-533f4a37673a>.

[123] Meteonorm. Handbook part II: Theory [Internett]. Bern: Meteotest; 2021 [hentet 24.02.2023]. Tilgjengelig fra: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81_theory.pdf.

[124] MathWorks. interp1 [Internett]; u.å [hentet 12.04.2023]. Tilgjengelig fra: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/interp1.html#d124e806565>.

[125] Holsen B. Hydrogen: Et nytt marked i oppbygging [Internett]; u.å [hentet 15.05.2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraft.no/nyheter/nyheter-og-pressemeldinger/2023/hydrogen-et-nytt-marked-i-oppbygging/>.

Vedlegg

Vedlegg A - Matlab-script for solstråling- og forbruk-graf brukt i case

Vedlegg B - Matlab-script for verifisering av vindproduksjon

Vedlegg C - Matlab-script for vindretning og middelvind

Vedlegg D - Matlab-script for simulering for 20°, 40° og 55° helning for det bakkemonterte solcelleanlegget

Vedlegg E - Matlab-script for simulering for 20° og 40° helning med batterilagring

Vedlegg F - Matlab-script for estimering av vindproduksjon

Vedlegg G - Matlab-script for simulering for sol- og vindproduksjon med batterilagring

Vedlegg H - Matlab-script for klimagassberegninger og plotting av søylediagram

Vedlegg I - Matlab-script for beregninger av dieselforbruk og plotting av søylediagram

Vedlegg J - Matlab-script for beregninger av netto nåverdi

Vedlegg K - Matlab-script for beregninger av LCOE og LCOS

Vedlegg A

```
1 clc, clear, close all
2
3 %HENTE INN DATA:
4
5 data_sol = readtable('GLOBALHOR_Isfjord_Radio.csv') ; %Generisk år
6 time_globalhorr = table2array(data_sol(1:end, 2)) ;
7 time_globalhorr = split(time_globalhorr, ";") ;
8 globalhorr = str2double(strrep(time_globalhorr(1:end, 2), ',', '.')) ; %[W/m2]
9
10 data_load = readtable('forbruk_W_isfjord_ordinal_2022.csv') ; %ÅR 2022
11 load = table2array(data_load(:, 2)) .* 10^-3 ; %[kW]
12
13 %FIGUR AV SOLSTRAALING I TIMESVERDIER TIL BRUK I CASE:
14
15 n_aar = 1:length(globalhorr) ; %[h]
16 t_per_mnd = 24.*[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31] ;
17
18 Jan = 0 ;
19 Feb = sum(t_per_mnd(1)) ;
20 Mar = sum(t_per_mnd(1:2)) ;
21 Apr = sum(t_per_mnd(1:3)) ;
22 Mai = sum(t_per_mnd(1:4)) ;
23 Jun = sum(t_per_mnd(1:5)) ;
24 Jul = sum(t_per_mnd(1:6)) ;
25 Aug = sum(t_per_mnd(1:7)) ;
26 Sep = sum(t_per_mnd(1:8)) ;
27 Okt = sum(t_per_mnd(1:9)) ;
28 Nov = sum(t_per_mnd(1:10)) ;
29 Des = sum(t_per_mnd(1:11)) ;
30
31 timer_mnd = [Jan, Feb, Mar, Apr, Mai, Jun, Jul, Aug, Sep, Okt, Nov, Des] ;
32 mnd = ["Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "Mai", "Jun", "Jul", "Aug", "Sep", "Okt", "Nov", "Des"];
33
34 fig1 = figure(1);
35 set(gcf, 'Position', [0 50 1500 360], 'color', 'w')
36 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
37 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
38 plot_globalhorr_aar = plot(n_aar, globalhorr, '-k', 'LineWidth', 0.7);
39 xlim([0 length(globalhorr)])
40 xticks(timer_mnd)
41 xticklabels(mnd)
42 xlabel('Timer [h]', 'Interpreter', 'latex')
43 ylabel('[W/m$^2$]', 'Interpreter', 'latex')
44 grid on;
45
46 %FIGUR AV FORBRUKET I TIMESVERDIER TIL BRUK I CASE:
47
48 fig2 = figure(2);
49 set(gcf, 'Position', [0 480 1500 360], 'color', 'w')
50 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
51 plot_load_aar = plot(n_aar, load, '-', 'LineWidth', 0.7);
52 grid on;
53 xlim([0 length(load)])
54 xticks(timer_mnd)
55 xticklabels(mnd)
56 xlabel('Timer [h]', 'Interpreter', 'latex')
57 ylabel('[kW/h]', 'Interpreter', 'latex')
```

Vedlegg B

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 % Avlest effektverdier, 700 VAWT:
5
6     P_ek_pseudo_steg1 = [0,0,0,5,18,40,60,100,150,195] ; %[W]
7     v_ek_pseudo_steg1 = [0,1,2.5,3.5,4.5,5.5,6.5,7.5,8.5,9.5] ; %[m/s]
8
9
10 % Plotting av effektkurver:
11
12     fig1 = figure(1);
13
14     set(gcf, 'Position', [0 480 550 400], 'color', 'w')
15     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
16     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
17     plot(v_ek_pseudo_steg1, P_ek_pseudo_steg1, '-.');
18     xlabel('Vindhastighet [m/s]', 'Interpreter', 'latex')
19     ylabel('Effekt [W]', 'Interpreter', 'latex')
20     xlim([0 11])
21     ylim([0 230])
22     grid on;
23
24
25 %Frekvense av vindhastighetene og vindhastigheter i mai 2015:
26
27     faktor_frekk = [19.4,8.9,10.3,10.5,10,9.4,7.9,6.5,5,3.9,2.6,2, ...
28                   1.4,0.9,0.5,0.4,0.2,0.1,0.1]' ./ 100; % [ ]
29
30     vind_frekk = [0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5,7,7.5,8, ...
31                 8.5,9,9.5]' ; % [m/s]
32
33     %Sjekker at faktor_frekkens tilsvarende 1 (100 %)
34     sjekk_sum_faktor = sum(faktor_frekk) ;
35
36     %Antall timer det blåser en gitt hastighet i vind_frekkens:
37     %Mai har 31 dager, men mangler målinger fra 4 dager
38     antall_timer = faktor_frekk .* (31-4) .* 24 ;% [h]
39
40     %Sjekker snittvind mot oppgitt i rapport (2.56 m/s i mai 2015):
41     snitt_vind = sum(faktor_frekk .* vind_frekk) ./ sum(faktor_frekk) ;
42
43
44 %Vindproduksjon basert på frekvensen av vindhastigheter i mai 2015:
45
46     prod_pseudo_steg1 = interp1(v_ek_pseudo_steg1,P_ek_pseudo_steg1,vind_frekk) ...
47         .* antall_timer .* 10^-3 ; %[kWh/vindhast]
48     sum_prod_pseudo_steg1 = sum(prod_pseudo_steg1) ; %[kWh/mnd] for mai 2015
49
50
51     %Kun verdier innenfor 0.5 m/s til 9.5 m/s
52     prod_maalt = [0.005,0.01,0.03,0.06,0.11,0.19,0.28, ...
53                 0.395,0.5,0.58,0.63,0.61,0.55,0.44, ...
54                 0.35,0.27,0.195,0.13,0.08] ; %[kWh/vindhast]
55     sum_prod_maalt = sum(prod_maalt) ; %[kWh/mnd] for mai 2015
56
57     %Avleste verdier fra 0.5 m/s til 13.5 m/s (ALLE):
58     prod_maalt_ALLE = [0.005,0.01,0.03,0.06,0.11,0.19,0.28,0.395, ...
59                       0.5,0.58,0.63,0.61,0.55,0.44,0.35,0.27, ...
```

```

60             0.195,0.13,0.08,0.06,0.035,0.025,0.01, ...
61             0.005,0.003,0.002,0.001] ; %[kWh/vindhast]
62     sum_prod_maalt_ALLE = sum(prod_maalt_ALLE) ; %[kWh/mnd] for mai 2015
63
64
65 %Oversiktstabell for totalproduksjonen mai 2015
66
67     tab_verdi = round([sum_prod_pseudo_steg1 sum_prod_maalt],3) ;
68     tab_navn = {' Pseudo [kWh/mnd]','Maalt [kWh/mnd]'} ;
69     tab_oversikt = table(tab_navn',tab_verdi','VariableNames',{'type','Verdi[KW]'})
70
71
72 %Søylediagram av produksjon for vindhastighetene i mai 2015
73
74 x = vind_frekk ;
75 y_akse = [prod_pseudo_steg1' ; prod_maalt] ; %[kWh/vindhast]
76
77     fig2 = figure(2);
78
79     set(gcf, 'Position', [0 40 900 400], 'color', 'w');
80     set(gca, 'TickLabelInterpreter','latex')
81     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
82     b = bar(x,y_akse);
83     xlabel('Vindhastighet [m/s]','Interpreter','latex')
84     ylabel('Energiproduksjon [kWh]','Interpreter','latex')
85     xticks(x)
86     legend('Produksjon basert paa interpolering', ...
87           'Avlest fra rapport','Interpreter','latex')
88     grid on;

```

Vedlegg C

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 % Henter ut data:
5
6     data_vind = readtable('vind_vindretning_isfjord_2022.csv') ; %ÅR 2022
7     middelvind = table2array(data_vind(1:end-1, 5))           ;
8     middelvind = str2double(strrep(middelvind, ',', '.'))     ; %[m/s]
9
10    vindretning = table2array(data_vind(1:end-1, 4))          ; %[grade iht NKS]
11
12 % Vindretninger og -hastigheter for middelvind større enn eller lik 5 m/s:
13
14     idx = middelvind >= 5 ;
15
16     middelvind_vindretning_storre_enn_5 = [middelvind(idx), vindretning(idx)] ;
17
18     vindretning_storre_enn_5 = middelvind_vindretning_storre_enn_5(:,2) ;
19
20 % Typetall (mode) vindretning:
21
22     typetall_vindretning_storre_enn_5 = mode(vindretning_storre_enn_5, 'all') ;
23     typetall_vindretning = mode(vindretning, 'all') ;
24
25 % Prosent med typetall vindretning:
26
27     antall_lik_48 = vindretning_storre_enn_5(vindretning_storre_enn_5 == 48) ;
28
29     antall_mellom_38_og_58 = vindretning_storre_enn_5( ...
30         vindretning_storre_enn_5 >= 38 & ...
31         vindretning_storre_enn_5 <= 58);
32
33     prosent_lik_48 = (length(antall_lik_48)/ ...
34         length(vindretning_storre_enn_5))*100 %[%]
35
36     prosent_mellom_38_og_58 = (length(antall_mellom_38_og_58)/ ...
37         length(vindretning_storre_enn_5))*100 %[%]
38
39 % Test prosentberegning med histogram:
40
41     antall_mellom_40_og_50 = vindretning_storre_enn_5( ...
42         vindretning_storre_enn_5 >= 40 & ...
43         vindretning_storre_enn_5 < 50) ;
44
45     prosent_mellom_40_og_50 = (length(antall_mellom_40_og_50)/ ...
46         length(vindretning_storre_enn_5))*100 ;%[%]
47
48 % Histogram som viser frekvensen av vindhastigheter og -retninger:
49
50     fig1 = figure(1);
51
52     set(gcf, 'Position', [0 490 950 360], 'color', 'w')
53     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
54     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
55
56     histogram(middelvind,22,'Normalization', 'probability')
57     xticks(0.5:1:21.5)
58     xlabel('Vindhastighet [m/s]', 'Interpreter', 'latex')
59     ylabel('Frekvens [ ]', 'Interpreter', 'latex')
```

```

60     grid on
61
62     fig2 = figure(2);
63
64     set(gcf, 'Position', [0 50 1500 360], 'color', 'w')
65     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
66     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
67
68     histogram(vindretning_storre_enn_5, 36, 'Normalization', 'probability')
69     xticks(5:10:355)
70     ylim([0 0.17])
71     xlabel('Vindretning [ $^\circ$ ] i henhold til NKS definisjon', ...
72           'Interpreter', 'latex')
73     ylabel('Frekvens [ ]', 'Interpreter', 'latex')
74     grid on
75

```


Vedlegg D

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 % Henter ut data:
5
6     data_tilt_20 = readtable('20_-42_tilt_serie.csv') ; %Generisk år, 20 tilt
7     E_solar_20 = table2array(data_tilt_20(:,2))       ; %[kW], 20 tilt
8     E_Avail_20 = table2array(data_tilt_20(:,5))       ; %[kW], 20 tilt
9
10    data_tilt_40 = readtable('40_-42_tilt_serie.csv') ; %Generisk år, 40 tilt
11    E_solar_40 = table2array(data_tilt_40(:,2))       ; %[kW], 40 tilt
12    E_Avail_40 = table2array(data_tilt_40(:,5))       ; %[kW], 40 tilt
13
14    data_tilt_55 = readtable('55_-42_tilt_serie.csv') ; %Generisk år, 55 tilt
15    E_solar_55 = table2array(data_tilt_55(:,2))       ; %[kW], 55 tilt
16    E_Avail_55 = table2array(data_tilt_55(:,5))       ; %[kW], 55 tilt
17
18    data_load = readtable('forbruk_W_isfjord_ordinal_2022.csv') ; %ÅR 2022
19    load = table2array(data_load(:, 2)) .* 10^-3         ; %[kW]
20
21
22 % Figur av forbruk og E_Avail som funksjon av tiden i timer:
23
24     n_time = 1:length(load) ;
25
26     fig1 = figure(1);
27
28     set(gcf, 'Position', [0 490 1500 360], 'color', 'w')
29     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
30     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
31
32     plot(n_time, load, '-', 'LineWidth', 0.7);
33     hold on
34     plot(n_time, E_Avail_40, '-', 'LineWidth', 0.7);
35
36     xlim([0 length(load)])
37     xlabel('Timer [h]', 'Interpreter', 'latex')
38     ylabel('[kWh/h]', 'Interpreter', 'latex')
39     legend('Forbruk', 'E$_{Avail}$, 40$^{\circ}$ helning', ...
40           'Interpreter', 'latex')
41     grid on ;
42
43     fig2 = figure(2);
44
45     set(gcf, 'Position', [0 50 1500 360], 'color', 'w')
46     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
47     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
48
49     plot(n_time, load, '-', 'LineWidth', 0.7);
50     hold on
51     plot(n_time, E_Avail_20, '-', 'LineWidth', 0.7, 'Color', ...
52           [0.4660 0.6740 0.1880]);
53
54     xlim([0 length(load)])
55     xlabel('Timer [h]', 'Interpreter', 'latex')
56     ylabel('[kWh/h]', 'Interpreter', 'latex')
57     legend('Forbruk', 'E$_{Avail}$, 20$^{\circ}$ helning', ...
58           'Interpreter', 'latex')
59     grid on ;
```

```

60
61
62 % Figur av forbruk, E_Avail og E_solar som funksjon av tiden i mnd:
63
64 E_solar_20_12p = sum(reshape(E_solar_20, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
65 E_solar_40_12p = sum(reshape(E_solar_40, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
66 E_solar_55_12p = sum(reshape(E_solar_55, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
67 E_Avail_20_12p = sum(reshape(E_Avail_20, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
68 E_Avail_40_12p = sum(reshape(E_Avail_40, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
69 E_Avail_55_12p = sum(reshape(E_Avail_55, 730, []), 1) ;% [kWh/mnd]
70
71 n_mnd = 1:length(E_solar_40_12p) ;
72
73 fig3 = figure(3);
74
75 set(gcf, 'Position', [10 50 550 400], 'color', 'w')
76 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
77 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
78
79 plot(n_mnd, E_Avail_20_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
80 hold on
81 plot(n_mnd, E_Avail_40_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
82 plot(n_mnd, E_Avail_55_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
83 plot(n_mnd, E_solar_20_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
84 plot(n_mnd, E_solar_40_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
85 plot(n_mnd, E_solar_55_12p, '*-', 'LineWidth', 0.7);
86 xlim([1 12])
87 xlabel('Maaned', 'Interpreter', 'latex')
88 ylabel('[kWh/mnd]', 'Interpreter', 'latex')
89 legend('E$_{Avail}$, 20$^{\circ}$ helning',...
90        'E$_{Avail}$, 40$^{\circ}$ helning',...
91        'E$_{Avail}$, 55$^{\circ}$ helning', ...
92        'E$_{solar}$, 20$^{\circ}$ helning', ...
93        'E$_{solar}$, 40$^{\circ}$ helning', ...
94        'E$_{solar}$, 55$^{\circ}$ helning', ...
95        'Interpreter', 'latex')
96 grid on ;

```

Vedlegg E

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 %INFO:
5
6     % HVIS DET SKAL ENDRES TILT: TRENGER KUN ENDRE 'data' OG NAVN PÅ FILER
7     % SOM LAGRES OG LEGEND TIL PLOT
8
9     % HVIS BATTERIKAPASITET SKAL ENDRE: TRENGER KUN ENDRE 'Batteri_kapasitet'
10
11
12 %HENTER INN DATA OG SORTERER DEM:
13
14     data = readtable('40_-42_tilt_serier.csv') ; %Generisk år
15     E_Grid = [0 ; table2array(data(:,4))] ; % [kW]
16     E_Grid_pos = [0 ; max(table2array(data(:,4)),0)] ; % [kW], KUN + VERDIER
17     EfrGrid = [0 ; table2array(data(:,3))] ; % [kW]
18
19     E_Solar = [0 ; table2array(data(:,2))] ; % [kW]
20     E_user = [0 ; table2array(data(:,6))] ; % [kW]
21
22     % Legger til 0 i starten på vektorene som hentes inn pga svakhet i koden.
23     % Starter index i for-løkken på 2, enklere enn å fikse det.
24     % Har neglisjert negative verdier i E_Grid, er tap hos solcelleanlegget
25     % som må dekkes. Forenkling.
26
27     %EKSEMPEL FOR TEST/ILLUSTRASJON:
28
29     %E_Grid_pos = [0 50 100 100 0 0 0 0 0 400 400 0 0 100 0 100]' ;
30     %EfrGrid = [0 0 0 0 0 100 100 200 100 0 0 200 100 0 100 0]' ;
31     %E_Solar = [0 0 0 0 0 50 200 300 50 0 0 100 200 0 200 0]' ;
32
33     ladbart = E_Grid_pos - EfrGrid ; % [kW]
34
35
36 %BATTERISPESIFIKASJONER:
37
38     Batterie_kapasitet = 403.2 ; % [kWh]
39     SOC_min = 0.2 ; % [ ] min utladning i faktor
40     SOC_maks = 0.9 ; % [ ] maks utladning i faktor
41
42     kWp = SOC_maks*Batterie_kapasitet - SOC_min*Batterie_kapasitet ; % [kWp]
43
44
45 %LADBARHET TIL BATTERI: LADER OPP OG UT BATTERI
46
47     batteri = zeros(1,length(ladbart)) ; % [kW], etter for-løkke
48     tap_overlading = zeros(1,length(ladbart)) ; % [kW], etter for-løkke
49     tap_underlading = zeros(1,length(ladbart)) ; % [kW], etter for-løkke
50
51     for i = 2:length(ladbart)
52         if ladbart(i) >= 0 % (OPPLADNING)
53             if batteri(i-1) + ladbart(i) > kWp
54                 tap_overlading(i) = batteri(i-1) + ladbart(i) - kWp;
55                 batteri(i) = kWp;
56             else
57                 batteri(i) = batteri(i-1) + ladbart(i);
58             end
59         else % (UTLADNING)
```

```

60         if batteri(i-1) + ladbart(i) < 0
61             tap_underlading(i) = abs(batteri(i-1) + ladbart(i));
62             batteri(i) = 0;
63         else
64             batteri(i) = batteri(i-1) + ladbart(i);
65         end
66     end
67 end
68
69
70 %SJEKK: (BRUKE DE NYE VARIABLENE TIL Å FÅ DE GAMLE)
71
72 %Vektor som inneholder endring til batteri.
73
74     delta_lading = zeros(1, length(batteri)-1);
75
76     for i = 2:length(batteri)
77         delta = batteri(i) - batteri(i-1);
78         delta_lading(i-1) = delta ;
79     end
80
81 %Mengden batteri øker:
82
83     oknig_lading = max(delta_lading,0) ;%[kW]
84
85 %Mengden batteri reduseres:
86
87     reduksjon_lading = abs(min(delta_lading,0)) ;%[kW]
88
89 %Sjekker at før er lik etter:
90
91 % Sjekken fungerer kun hvis E_Grid_pos(i) og EfrGrid(i) ikke inneholder
92 % tall samtidig, men det skal den aldri gjør heller da E_Grid_pos er
93 % overskudd (forbruket er dekt).
94
95     ny_gammel_E_Grid_pos = sum(oknig_lading) + sum(tap_overlading) ;
96     gammel_E_Grid_pos = sum(E_Grid_pos) ;
97
98     gammel_E_Grid_pos_lik_ny_hvis_1 = ny_gammel_E_Grid_pos == ...
99                                     gammel_E_Grid_pos
100
101     ny_gammel_EfrGrid = round(sum(reduksjon_lading) + ...
102                               sum(tap_underlading),4) ;
103     gammel_EfrGrid = round(sum(EfrGrid),4) ;
104
105     gammel_EfrGrid_lik_ny_hvis_1 = ny_gammel_EfrGrid == gammel_EfrGrid
106
107
108 %OVERSIKT OVER BATTERISTATUS, OVER- OG UNDERLADING:
109
110     oversikt_batteri = array2table([E_Grid_pos, EfrGrid, ladbart,batteri', ...
111                                     tap_overlading',tap_underlading'], 'VariableNames', ...
112                                     {'Egridpos','EfrGrid','ladbart','batteri', ...
113                                     'overlading','underlading'}) ;
114
115
116 %REDUKSJON I FORBRUK, ØKNING I "SOLFRAC".
117
118     % Det nye overskuddet er 'tap_overlading', og det gamle er 'E_Grid_pos'.

```

```

119
120     sum_overskudd_for = sum(E_Grid_pos)*10^-3      ;% [MWh/y]
121     sum_overskudd_naa = sum(tap_overlading)*10^-3 ;% [MWh/y]
122
123     % Generatorbruk før er 'EfrGrid', og generatorbruk etter er
124     % 'tap_underlading'.
125
126     sum_generatorbruk_for = sum(EfrGrid)*10^-3    ;% [MWh/y]
127     sum_generatorbruk_naa = sum(tap_underlading)*10^-3 ;% [MWh/y]
128
129     % Økning i 'E_Solar' er max(E_Grid_pos,0) minus 'tap_overlading' (det som
130     % batteriet overlader).
131
132     Okning_E_Solar = E_Grid_pos - tap_overlading' ;% [kW]
133     E_Solar_med_batteri = E_Solar + Okning_E_Solar ;% [kW]
134
135     sum_solar_for = sum(E_Solar)*10^-3           ;% [MWh/y]
136     sum_solar_naa = sum(E_Solar_med_batteri)*10^-3 ;% [MWh/y]
137
138     % SolFrac er andelen av sol- eller batterienergi som går til å dekke
139     % forbruket.
140
141     solFrac_for = sum(E_Solar)/sum(E_user)*100    ;% [%]
142     solFrac_naa = sum(E_Solar_med_batteri)/sum(E_user)*100 ;% [%]
143
144
145 % OVERSIKT OVER RELEVANTE PARAMETER:
146
147     parameter_for = round([sum_overskudd_for sum_generatorbruk_for ...
148                           sum_solar_for solFrac_for],3) ;
149     parameter_naa = round([sum_overskudd_naa sum_generatorbruk_naa ...
150                           sum_solar_naa solFrac_naa],3) ;
151     parameter_endring = parameter_naa - parameter_for ;
152
153     parameter_navn = {'Overskudd [MWh/y]', 'Generatorbruk [MWh/y]', ...
154                      'Egenprodusert som går til forbruk [MWh/y]', ...
155                      'Solfraksjon [%]'} ;
156
157     oversikt_parameter = table(parameter_navn', parameter_for', parameter_naa', ...
158                               parameter_endring' , 'VariableNames', ...
159                               {'Parameter', 'Før', 'Nå', 'endring'}) ;
160
161
162 % TAP SOM NEGLISJERES PGA. FORENKLINHEN VED Å KUN TA HENSYN TIL POSITIVE
163 % VERDIER I E_Grid_pos (OVERSKUDET):
164
165     % 'tap_E_Grid_pos' er sum som fortsatt må dekkes av generator eller batteri.
166
167     tap_E_Grid_pos = sum(E_Grid_pos - E_Grid) % [kWh/y]
168
169
170 % GRAF AV FORBRUK, E_SOLAR OG E_SOLAR MED BATTERI I DAGESVERDIER:
171
172     E_Solar_365p = sum(reshape(E_Solar(2:end), 24, [], 1)           ;% [kWh/dag]
173     E_Solar_med_batteri_365p = sum(reshape(E_Solar_med_batteri(2:end), ...
174                                           24, [], 1)                 ;% [kWh/dag]
175     E_user_365p = sum(reshape(E_user(2:end), 24, [], 1)           ;% [kWh/dag]
176
177     n_dag = 1:length(E_Solar_365p) ;

```

```

178
179     fig1 = figure(1);
180
181     set(gcf, 'Position', [0 50 1500 400], 'color', 'w')
182     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
183     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
184
185     plot(n_dag, E_Solar_365p, '-', 'LineWidth', 1);
186     hold on
187     plot(n_dag, E_Solar_med_batteri_365p, '-', 'LineWidth', 1);
188     plot(n_dag, E_user_365p, '-k', 'LineWidth', 1);
189
190     xlim([1 365])
191     xlabel('Dager', 'Interpreter', 'latex')
192     ylabel('[kWh/dag]', 'Interpreter', 'latex')
193     legend('E${Solar}$, 40${\circ}$ helning', ...
194           'E${Solar}$ med batteri, 40${\circ}$ helning', ...
195           'Forbruk', 'Interpreter', 'latex')
196     grid on ;
197
198 % Den lengste perioden batteriet er oppladet.
199
200     i_batteri_fulladet = find(batteri == kWp)';
201
202     %En 1 i delta_fulladet er fulladet i to timer, mens to lere
203     %er fulladet i tre timer osv.
204
205     delta_fulladet = diff(i_batteri_fulladet) ;
206
207
208 % LAGRE TABELLER FOR OVERSIKT:
209
210     %writetable(oversikt_parameter, 'oversikt_parameter_tilt40_azimutneg42.xls')
211
212
213 % LAGRE CSV-FIL FOR ANDRE BEREGNINGER:
214
215     E_Avail = [0 ; table2array(data(:,5))] ; %[kW]
216
217     sol_sum_s1 = sum(E_Avail) ; %[kWh/år]
218     sol_sum_s2 = sol_sum_s1 ; %[kWh/år]
219
220     gen_sum_s1 = sum(EfrGrid) ; %[kWh/år]
221     gen_sum_s2 = sum(tap_underlading) ; %[kWh/år]
222
223     bat_sum_s1 = 0 ; %[kWh/år]
224     bat_sum_s2 = sum(oknig_lading) ; %[kWh/år]
225
226     sol_gen_bat_s1 = [sol_sum_s1, gen_sum_s1, bat_sum_s1] ; %[kWh/år]
227     sol_gen_bat_s2 = [sol_sum_s2, gen_sum_s2, bat_sum_s2] ; %[kWh/år]
228
229     %writematrix(sol_gen_bat_s1', 's1_40_sol_gen_bat.csv')
230     %writematrix(sol_gen_bat_s2', 's2_40_sol_gen_bat.csv')
231

```



```

60
61     vindprod_test = interp1(v_effektkurve, P_effektkurve, 20.0001) ; %[kW]
62
63     % Sjekker overproduksjonen
64
65     overprod_vind = sum(max(vindprod - load,0))
66
67
68 % Totalproduksjon for året:
69
70     sumproduksjon_vind_MWh = sum(vindprod,'omitnan') .* 1e-3 %[MWh/år]
71
72
73 % Figur av vindproduksjon og forbruk i timesverdier
74
75     n_aar = 1:length(load) ;
76
77     fig2 = figure(2);
78
79     set(gcf, 'Position', [0 50 1500 360], 'color', 'w')
80     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
81     set(gca, 'ycolor', 'k')
82
83     plot_load_aar = plot(n_aar, load, '-', 'LineWidth', 0.7);
84     hold on
85     plot_vindprod_aar = plot(n_aar, vindprod, '-', 'LineWidth', 0.7);
86
87     grid on;
88     xlim([0 8760])
89     xlabel('Timer [h]', 'Interpreter', 'latex')
90     ylabel('[kWh/h]', 'Interpreter', 'latex')
91     legend([plot_vindprod_aar plot_load_aar], ...
92           'Vindproduksjon, 10 vindturbiner', 'Forbruk', 'Interpreter', 'latex')
93
94
95 % Lagrer csv-fil av timesverdier til vindproduksjonen i kW
96
97     %writematrix(vindprod, 'vindprod_timesverdi_10stk_kW.csv')
98

```


Vedlegg G

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 %INFO:
5
6     % HVIS DET SKAL ENDRES TILT: TRENGER KUN ENDRE 'data_sol', NAVN PÅ FILER
7     % SOM LAGRES OG LEGEND TIL PLOT (SAMME GJELDER FOR VINDFIL, 'data_vind')
8
9     % HVIS BATTERIKAPASITET SKAL ENDRE: TRENGER KUN ENDRE 'Batteri_kapasitet'
10
11
12 %HENTER INN DATA OG SORTERER DEM:
13
14     data_sol = readtable('40_-42_tilt_serie.csv')           ; %Generisk år
15     data_vind = readtable('vindprod_timesverdi_10stk_kW.csv') ; % ÅR 2022
16
17     E_Grid = [0 ; table2array(data_sol(:,4))]              ; %[kW]
18     E_Grid_pos = [0 ; max(table2array(data_sol(:,4)),0)] ; %[kW], KUN + VERDIER
19     EfrGrid = [0 ; table2array(data_sol(:,3))]            ; %[kW]
20     E_Solar = [0 ; table2array(data_sol(:,2))]            ; %[kW]
21     E_Avail = [0 ; table2array(data_sol(:,5))]            ; %[kW]
22     E_user = [0 ; table2array(data_sol(:,6))]             ; %[kW]
23     E_vindprod = [0 ; table2array(data_vind)]             ; %[kW] OBS! NAN-VERDIER
24     E_vindprod = fillmissing(E_vindprod, 'constant', 0) ; %[kW] ERST NAN MED 0
25
26     % Legger til 0 i starten på vektorene som hentes inn pga svakhet i koden.
27     % Starter index i for-løkken på 2, enklere enn å fikse det.
28
29
30 %BATTERISPESIFIKASJONER:
31
32     Batteri_kapasitet = 403.2 ; %[kWh]
33     SOC_min = 0.2           ; %[ ] min utlading i faktor
34     SOC_maks = 0.9         ; %[ ] maks utlading i faktor
35
36     kWhp = SOC_maks*Batteri_kapasitet - SOC_min*Batteri_kapasitet ; %[kWh]
37
38
39 %LADBARHET TIL BATTERI: LADER OPP OG UT BATTERI
40
41     overskudd_for = max(E_Avail + E_vindprod - E_user,0) ; %[kW]
42     underskudd_for = max(EfrGrid - E_vindprod,0)         ; %[kW]
43
44     egenprod_for = E_Avail + E_vindprod - overskudd_for ; %[kW]
45
46     ladbart = overskudd_for - underskudd_for              ; %[kW]
47
48     batteri = zeros(1,length(ladbart))                   ; %[kW], etter for-løkke
49     tap_overlading = zeros(1,length(ladbart))           ; %[kW], etter for-løkke
50     tap_underlading = zeros(1,length(ladbart))          ; %[kW], etter for-løkke
51
52     for i = 2:length(ladbart)
53         if ladbart(i) >= 0 % (OPPLADNING)
54             if batteri(i-1) + ladbart(i) > kWhp
55                 tap_overlading(i) = batteri(i-1) + ladbart(i) - kWhp;
56                 batteri(i) = kWhp;
57             else
58                 batteri(i) = batteri(i-1) + ladbart(i);
59             end
60         end
61     end
```

```

60     else %(UTLADNING)
61         if batteri(i-1) + ladbart(i) < 0
62             tap_underlading(i) = abs(batteri(i-1) + ladbart(i));
63             batteri(i) = 0;
64         else
65             batteri(i) = batteri(i-1) + ladbart(i);
66         end
67     end
68 end
69
70
71 %SJEKK: (BRUKE DE NYE VARIABLENE TIL Å FÅ DE GAMLE)
72
73 %Vektor som inneholder endring til batteri.
74
75     delta_lading = zeros(1, length(batteri)-1);
76
77     for i = 2:length(batteri)
78         delta = batteri(i) - batteri(i-1);
79         delta_lading(i-1) = delta ;
80     end
81
82 %Mengden batteri øker:
83
84     oknig_lading = max(delta_lading,0) ;%[kW]
85
86 %Mengden batteri reduseres:
87
88     reduksjon_lading = abs(min(delta_lading,0)) ;%[kW]
89
90 %Sjekker at før er lik etter:
91
92 % Sjekken fungerer kun hvis E_Grid_pos(i) og EfrGrid(i) ikke inneholder
93 % tall samtidig, men det skal den aldri gjør heller da E_Grid_pos er
94 % overskudd (forbruket er dekt).
95
96     ny_gammel_E_Grid_pos = round(sum(oknig_lading) + sum(tap_overlading),4) ;
97     gammel_E_Grid_pos = round(sum(overskudd_for),4) ;
98
99     gammel_E_Grid_pos_lik_ny_hvis_1 = ny_gammel_E_Grid_pos == ...
100     gammel_E_Grid_pos
101
102     ny_gammel_EfrGrid = round(sum(reduksjon_lading) + sum(tap_underlading),4) ;
103     gammel_EfrGrid = round(sum(underskudd_for),4) ;
104
105     gammel_EfrGrid_lik_ny_hvis_1 = ny_gammel_EfrGrid == gammel_EfrGrid
106
107
108 %OVERSIKT OVER BATTERISTATUS, OVER- OG UNDERLADING:
109
110     oversikt_batteri = array2table([overskudd_for, underskudd_for, ladbart, ...
111     batteri',tap_overlading',tap_underlading'], ...
112     'VariableNames', {'overskudd_for', ...
113     'underskudd_for','ladbart','batteri', ...
114     'overlading','underlading'}) ;
115
116
117 %REDUKSJON I FORBRUK, ØKNING I "SOLFRAC".
118

```

```

119 % Det nye overskuddet er 'tap_overlading', og det gamle er 'E_Grid_pos'.
120
121     sum_overskudd_for = sum(overskudd_for)*10^-3 ;% [MWh/y]
122     sum_overskudd_naa = sum(tap_overlading)*10^-3 ;% [MWh/y]
123
124 % Generatorbruk før er 'EfrGrid', og generatorbruk etter er
125 % 'tap_underlading'.
126
127     sum_generatorbruk_for = sum(underskudd_for)*10^-3 ;% [MWh/y]
128     sum_generatorbruk_naa = sum(tap_underlading)*10^-3 ;% [MWh/y]
129
130 % Økning i 'E_Solar' er max(E_Grid_pos,0) minus 'tap_overlading' (det som
131 % batteriet overlader).
132
133     okning_egenprod = overskudd_for - tap_overlading' ;% [kW]
134     Egenprod_med_batteri = egenprod_for + okning_egenprod ;% [kW]
135
136     sum_egenprod_for = sum(egenprod_for)*10^-3 ;% [MWh/y]
137     sum_egenprod_naa = sum(Egenprod_med_batteri)*10^-3 ;% [MWh/y]
138
139 % SolFrac er andelen av sol- eller batterienergi som går til å dekke
140 % forbruket.
141
142     solFrac_for = sum(egenprod_for)/sum(E_user)*100 ;% [%]
143     solFrac_naa = sum(Egenprod_med_batteri)/sum(E_user)*100 ;% [%]
144
145
146 % OVERSIKT OVER RELEVANTE PARAMETER:
147
148     parameter_for = round([sum_overskudd_for sum_generatorbruk_for ...
149         sum_egenprod_for solFrac_for],4) ;
150     parameter_naa = round([sum_overskudd_naa sum_generatorbruk_naa ...
151         sum_egenprod_naa solFrac_naa],4) ;
152     parameter_endring = parameter_naa - parameter_for ;
153
154     parameter_navn = {'Overskudd [MWh/y]', 'Generatorbruk [MWh/y]', ...
155         'Egenprodusert som går til forbruk [MWh/y]', ...
156         'Solfraksjon [%]'} ;
157
158     oversikt_parameter = table(parameter_navn',parameter_for',parameter_naa' ...
159         ,parameter_endring' , 'VariableNames', ...
160         {'Parameter', 'Før', 'Nå', 'endring'}) ;
161
162
163 % DEN LENGSTE PERIODEN BATTERIET ER FULLADET:
164
165     i_batteri_fulladet = find(batteri == kWp)';
166
167     %En 1 i delta_fulladet er fulladet i to timer, mens to lere er
168     %fulladet i tre timer osv.
169
170     delta_fulladet = diff(i_batteri_fulladet) ;
171
172
173 % GRAF AV FORBRUK, E_SOLAR OG E_SOLAR MED BATTERI I DAGESVERDIER:
174
175     Egenprod_365p = sum(reshape(egenprod_for(2:end), 24, []), 1) ;% [kWh/dag]
176     Egenprod_med_batteri_365p = sum(reshape(Egenprod_med_batteri(2:end), ...
177         24, []), 1) ;% [kWh/dag]

```

```

178 E_user_365p = sum(reshape(E_user(2:end), 24, []), 1) ; %[kWh/dag]
179
180 n_dag = 1:length(Egenprod_365p) ;
181
182 fig1 = figure(1);
183
184 set(gcf, 'Position', [0 50 1500 400], 'color', 'w')
185 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
186 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
187
188 plot(n_dag, Egenprod_365p, '-', 'LineWidth', 1);
189 hold on
190 plot(n_dag, Egenprod_med_batteri_365p, '-', 'LineWidth', 1);
191 plot(n_dag, E_user_365p, '-k', 'LineWidth', 1);
192
193 xlim([1 365])
194 xlabel('Dager', 'Interpreter', 'latex')
195 ylabel('[kWh/dag]', 'Interpreter', 'latex')
196 legend('Egenproduksjon, 10 stk og 40$^\circ$ helning', ...
197        'Egenproduksjon med batteri, 10 stk og 40$^\circ$ helning', ...
198        'Forbruk', 'Interpreter', 'latex')
199 grid on ;
200
201
202 % LAGRE TABELLER FOR OVERSIKT:
203
204 %writetable(oversikt_parameter, ...
205 %          'oversikt_parameter_10stk_vindturbiner_tilt40_azimutneg42.xls')
206
207
208 % LAGRE CSV-FIL FOR ANDRE BEREGNINGER:
209
210 sol_sum_s3 = sum(E_Avail) ; %[kWh/år]
211 gen_sum_s3 = sum(tap_underlading) ; %[kWh/år]
212 bat_sum_s3 = sum(oknig_lading) ; %[kWh/år]
213 vind_sum_s3= sum(E_vindprod) ; %[kWh/år]
214
215 sol_gen_vind_bat_s3 = [sol_sum_s3,gen_sum_s3,vind_sum_s3,bat_sum_s3] ; %[kWh/år]
216
217 %writematrix(sol_gen_vind_bat_s3', 's3_40_10_sol_gen_vind_bat.csv')
218
219
220

```

Vedlegg H

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 % Utslipp knyttet til batteri
5 inst_kap_batteri = 403.2; % installert kapasitet [kWh]
6 levetid = 30; % levetid til batterier [år]
7 utslipp_batteri = (150+200)/2; % kg CO2-ekv/installerte kWh
8
9 % Beregne klimagassutslipp
10 utslipp_batteri = (inst_kap_batteri * utslipp_batteri)/ levetid; % kg CO2-ekv/år
11
12 % Utslippsfaktorer for forskjellige kilder
13 utslipp_diesel = 0.265*1.01; % kg CO2-ekv/kWh
14 utslipp_sol = 50.9 * 10^-3; % kg CO2-ekv/kWh
15 utslipp_vind = 14.4 * 10^-3; % kg CO2-ekv/kWh
16
17 %% 2022: Produsert/levert mengde energi
18 % Lese inn data
19 data_2022 = readtable('Rapport_Isfjord_Radio_2022.csv') ; % kW
20 prod_gen_1_2022 = table2array(data_2022(1:end, 8)) ; % kW
21 prod_gen_2_2022 = table2array(data_2022(1:end, 10)) ; % kW
22 prod_gen_2022 = sum(prod_gen_1_2022 + prod_gen_2_2022, 'omitnan'); % kWh/år
23
24 % Beregne klimagassutslipp
25 utslipp_gen_2022 = prod_gen_2022 .* utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
26 utslipp_tot_2022 = utslipp_gen_2022 ; % kg CO2-ekv/år
27
28 %% Scenario 1: Produsert/levert mengde energi
29 % Lese inn data
30 data_20_s1 = readtable('s1_20_sol_gen.csv') ; % kWh/år
31 prod_sol_20_s1 = table2array(data_20_s1(1, 1)) ; % kWh/år
32 prod_gen_20_s1= table2array(data_20_s1(2, 1)) ; % kWh/år
33
34 % Beregne klimagassutslipp
35 utslipp_sol_20_s1 = prod_sol_20_s1 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
36 utslipp_gen_20_s1 = prod_gen_20_s1 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
37 utslipp_tot_20_s1 = utslipp_sol_20_s1 + utslipp_gen_20_s1; % kg CO2-ekv/år
38
39 % Lese inn data
40 data_40_s1 = readtable('s1_40_sol_gen.csv') ; % kWh/år
41 prod_sol_40_s1 = table2array(data_40_s1(1, 1)) ; % kWh/år
42 prod_gen_40_s1= table2array(data_40_s1(2, 1)) ; % kWh/år
43
44 % Beregne klimagassutslipp
45 utslipp_sol_40_s1 = prod_sol_40_s1 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
46 utslipp_gen_40_s1 = prod_gen_40_s1 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
47 utslipp_tot_40_s1 = utslipp_sol_40_s1 + utslipp_gen_40_s1; % kg CO2-ekv/år
48
49 %% Scenario 2: Produsert/levert mengde energi
50 % Lese inn data
51 data_20_s2 = readtable('s2_20_sol_gen.csv') ; % kWh/år
52 prod_sol_20_s2 = table2array(data_20_s2(1, 1)) ; % kWh/år
53 prod_gen_20_s2= table2array(data_20_s2(2, 1)) ; % kWh/år
54
55 % Beregne klimagassutslipp
56 utslipp_sol_20_s2 = prod_sol_20_s2 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
57 utslipp_gen_20_s2 = prod_gen_20_s2 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
58 utslipp_tot_20_s2 = utslipp_sol_20_s2 + utslipp_gen_20_s2...
59 + utslipp_batteri; % kg CO2-ekv/år
```

```

60
61 % Lese inn data
62 data_40_s2 = readtable('s2_40_sol_gen.csv') ; % kWh/år
63 prod_sol_40_s2 = table2array(data_40_s2(1, 1)) ; % kWh/år
64 prod_gen_40_s2= table2array(data_40_s2(2, 1)) ; % kWh/år
65
66 % Beregne klimagassutslipp
67 utslipp_sol_40_s2 = prod_sol_40_s2 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
68 utslipp_gen_40_s2 = prod_gen_40_s2 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
69 utslipp_tot_40_s2 = utslipp_sol_40_s2 + utslipp_gen_40_s2...
70 + utslipp_batteri; % kg CO2-ekv/år
71
72 %% Scenario 3: Produsert/levert mengde energi
73 % Lese inn data
74 data_40_5_s3 = readtable('s3_40_5_sol_gen_vind.csv') ; % kWh/år
75 prod_sol_40_5_s3 = table2array(data_40_5_s3(1, 1)) ; % kWh/år
76 prod_gen_40_5_s3= table2array(data_40_5_s3(2, 1)) ; % kWh/år
77 prod_vind_40_5_s3= table2array(data_40_5_s3(3, 1)) ; % kWh/år
78
79 %Beregne klimagassutslipp
80 utslipp_sol_40_5_s3 = prod_sol_40_5_s3 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
81 utslipp_gen_40_5_s3 = prod_gen_40_5_s3 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
82 utslipp_vind_40_5_s3 = prod_vind_40_5_s3 * utslipp_vind; % kg CO2-ekv/år
83 utslipp_tot_40_5_s3 = utslipp_sol_40_5_s3 + utslipp_gen_40_5_s3...
84 + utslipp_vind_40_5_s3 + utslipp_batteri;% kg CO2-ekv/år
85
86 % Lese inn data
87 data_40_10_s3 = readtable('s3_40_10_sol_gen_vind.csv') ; % kWh/år
88 prod_sol_40_10_s3 = table2array(data_40_10_s3(1, 1)) ; % kWh/år
89 prod_gen_40_10_s3= table2array(data_40_10_s3(2, 1)) ; % kWh/år
90 prod_vind_40_10_s3= table2array(data_40_10_s3(3, 1)) ; % kWh/år
91
92 %Beregne klimagassutslipp
93 utslipp_sol_40_10_s3 = prod_sol_40_10_s3 * utslipp_sol; % kg CO2-ekv/år
94 utslipp_gen_40_10_s3 = prod_gen_40_10_s3 * utslipp_diesel; % kg CO2-ekv/år
95 utslipp_vind_40_10_s3 = prod_vind_40_10_s3 * utslipp_vind; % kg CO2-ekv/år
96 utslipp_tot_40_10_s3 = utslipp_sol_40_10_s3 + utslipp_gen_40_10_s3...
97 + utslipp_vind_40_10_s3 + utslipp_batteri;% kg CO2-ekv/år
98
99 %% Søylediagram over klimagassutslipp
100
101 % Hva som skal plottes
102 y_stack= round([utslipp_gen_2022 utslipp_gen_20_s1 utslipp_gen_40_s1...
103 utslipp_gen_20_s2 utslipp_gen_40_s2 utslipp_gen_40_5_s3...
104 utslipp_gen_40_10_s3 ; 0 0 0 utslipp_batteri...
105 utslipp_batteri utslipp_batteri utslipp_batteri ; ...
106 0 utslipp_sol_20_s1 utslipp_sol_40_s1 utslipp_sol_20_s2...
107 utslipp_sol_40_s2 utslipp_sol_40_5_s3 utslipp_sol_40_10_s3 ; ...
108 0 0 0 0 utslipp_vind_40_5_s3 utslipp_vind_40_10_s3]...
109 .' .* 10^-3),2) % tonn CO2-ekv/år
110
111 y_akse = round([utslipp_tot_2022, utslipp_tot_20_s1, utslipp_tot_40_s1,...
112 utslipp_tot_20_s2, utslipp_tot_40_s2,...
113 utslipp_tot_40_5_s3, utslipp_tot_40_10_s3]...
114 .' .* 10^-3), 2); % tonn CO2-ekv/år
115
116 % Navn til hver søyle
117 ticks_stack = {'2022','S1: 20$^\circ$', 'S1: 40$^\circ$', ...
118 'S2: 20$^\circ$', 'S2: 40$^\circ$', ...

```

```

119         'S3: 5 stk', 'S3: 10 stk' } ;
120
121 X_ticks_stack = categorical(ticks_stack);
122 x_stack = reordercats(X_ticks_stack,ticks_stack);
123
124 fig2 = figure(2);
125
126     set(gcf, 'Position', [0 40 900 400], 'color', 'w');
127     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
128     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
129     b1_test = bar(x_stack, y_akse);
130     hold on
131     b1 = bar(x_stack, y_stack, 'stacked');
132
133
134     legend(b1, {'Dieselaggregat', 'Batterier', 'Solceller', 'Vindturbiner'}, ..
135             'Location', 'northeast', 'Orientation', 'vertical', ...
136             'Interpreter', 'latex');
137     b1(1).FaceColor = [0 0.4470 0.7410];
138     b1(2).FaceColor = [0.4940 0.1840 0.5560];
139     b1(3).FaceColor = [0.9290 0.6940 0.1250];
140     b1(4).FaceColor = [0.4660 0.6740 0.1880];
141
142     xtips1 = b1_test(1).XEndPoints;
143     ytips1 = b1_test(1).YEndPoints;
144     labels1 = string(b1_test(1).YData);
145     text(xtips1, ytips1, labels1, 'HorizontalAlignment', 'center', ...
146         'VerticalAlignment', 'bottom', 'Interpreter', 'latex')
147     ylim([0 145])
148     ylabel('[tonn CO$_2$-ekv/aar]', 'Interpreter', 'latex')
149
150     grid on;
151

```

Vedlegg I

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 %% Parametere
5 rho_diesel = 840; % tetthet [g/L]
6 forbruk_75 = 207; % spesifikt drivstofforbruk ved 75% drift [g/kWh]
7
8 %% 2022
9 % Lese inn data
10 data_2022 = readtable('Rapport_Isfjord_Radio_2022.csv') ; % kW
11 prod_gen_1_2022 = table2array(data_2022(1:end, 8)) ; % kW
12 prod_gen_2_2022 = table2array(data_2022(1:end, 10)) ; % kW
13 prod_gen_2022 = sum(prod_gen_1_2022 + prod_gen_2_2022, 'omitnan'); % kWh/år
14
15 % Forbruk av diesel
16 diesel_vol_75_2022 = (prod_gen_2022 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
17
18 %% Scenario 1
19 % Lese inn data
20 data_20_s1 = readtable('s1_20_sol_gen.csv') ; % kWh/år
21 prod_gen_20_s1= table2array(data_20_s1(2, 1)) ; % kWh/år
22
23 data_40_s1 = readtable('s1_40_sol_gen.csv') ; % kWh/år
24 prod_gen_40_s1= table2array(data_40_s1(2, 1)) ; % kWh/år
25
26 % Dieselforbruk
27 diesel_vol_20_75_s1 = (prod_gen_20_s1 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
28 diesel_vol_40_75_s1 = (prod_gen_40_s1 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
29
30 %% Scenario 2
31 % Lese inn data
32 data_20_s2 = readtable('s2_20_sol_gen.csv') ; % kWh/år
33 prod_gen_20_s2= table2array(data_20_s2(2, 1)) ; % kWh/år
34
35 data_40_s2 = readtable('s2_40_sol_gen.csv') ; % kWh/år
36 prod_gen_40_s2= table2array(data_40_s2(2, 1)) ; % kWh/år
37
38 % Dieselforbruk
39 diesel_vol_20_75_s2 = (prod_gen_20_s2 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
40 diesel_vol_40_75_s2 = (prod_gen_40_s2 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
41
42 %% Scenario 3
43 % Lese inn data
44 data_40_5_s3 = readtable('s3_40_5_sol_gen_vind.csv') ; % kWh/år
45 prod_gen_40_5_s3= table2array(data_40_5_s3(2, 1)) ; % kWh/år
46
47 data_40_10_s3 = readtable('s3_40_10_sol_gen_vind.csv') ; % kWh/år
48 prod_gen_40_10_s3= table2array(data_40_10_s3(2, 1)) ; % kWh/år
49
50 % Dieselforbruk
51 diesel_vol_40_5_75_s3 = (prod_gen_40_5_s3 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
52 diesel_vol_40_10_75_s3 = (prod_gen_40_10_s3 * forbruk_75) / rho_diesel; % L
53
54 %% Søylediagram over dieselreduksjon
55
56 % Hva som skal plottes
57 y_akse = round([diesel_vol_75_2022, ...
58 diesel_vol_20_75_s1, ...
59 diesel_vol_40_75_s1, ...
```



```

60         diesel_vol_20_75_s2,...
61         diesel_vol_40_75_s2,...
62         diesel_vol_40_5_75_s3,...
63         diesel_vol_40_10_75_s3]...
64         .' ),0); % L
65
66 % Navn til hver søyle
67     ticks = {'2022',...
68             'S1: 20$^\circ$',...
69             'S1: 40$^\circ$',...
70             'S2: 20$^\circ$',...
71             'S2: 40$^\circ$',...
72             'S3: 5 stk',...
73             'S3: 10 stk'};
74
75     X_ticks = categorical(ticks);
76     x = reordercats(X_ticks,ticks);
77
78 % Plotte
79     fig2 = figure(2);
80
81     set(gcf, 'Position', [0 40 900 400], 'color', 'w');
82     set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
83     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
84     b1 = bar(x,y_akse);
85
86     xtips1 = b1(1).XEndPoints;
87     ytips1 = b1(1).YEndPoints;
88     labels1 = string(b1(1).YData);
89     text(xtips1,ytips1,labels1,'HorizontalAlignment','center', ...
90          'VerticalAlignment','bottom','Interpreter','latex')
91     ylim([70000 125000])
92     ylabel('75 \% drift [L/aar]','Interpreter','latex')
93
94     grid on;
95     b1(1).BarWidth = 0.6 ;
96     b1(1).FaceColor = [0 0.4470 0.7410];
97
98

```

Vedlegg J

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 %PRISESTIMATER:
5
6 valuta_euro = 11.6895; %valuta per 5.5.23
7 valuta_dollar = 10.6133; %valuta per 5.5.23
8 r = 0.04; %diskonteringsrente
9
10 %levetid
11 t_sol = 30; %år
12 t_batteri = 30; %år
13 t_inverter = 15; %år
14 t_vind = 20; %år
15
16 %sol
17 kvm_solceller = 941; %m2
18 pris_solcelle = 2500; %kr/m2
19
20 antall_stativ = 8; %stk
21 pris_stativ = 5695; %kr/stk
22
23 antall_kabler = 6; %stk
24 pris_kabler = 735; %kr/stk
25
26 pris_inverter_sol = 52252; %kr/stk
27 pris_tot_sol = 506400*valuta_dollar; %kr for bakkemontert anlegg 200 kWp
28
29 %batteri
30 antall_batteriskap = 9; %antall skap
31 pris_skap = 39491*valuta_euro; %kr/skap
32
33 pris_inverter_bat = pris_inverter_sol; %kr/stk
34
35 %vind
36 antall_turbin = 5; %stk
37 pris_turbin = 33920; %kr/stk
38 pris_inverter_vind = 12200; %kr/stk
39 kWp_vindturbin = 3; %kWp/stk
40 pris_tot_vind = 3500*valuta_dollar; %kr investering/kWp
41
42 %kontantstrømmer
43 diesel_2022 = 119341; %*10^4 l/år
44 diesel_S1_20 = 93828; %*10^4 l/år
45 diesel_S1_40 = 94436; %*10^4 l/år
46 diesel_S2_20 = 89246; %*10^4 l/år
47 diesel_S2_40 = 88557; %*10^4 l/år
48 diesel_S3_5 = 84322; %*10^4 l/år
49 diesel_S3_10 = 80099; %*10^4 l/år
50
51 dieselpris_liter = 9.7; %kr/l
52 besparelse_diesel_S1_20 = diesel_2022 - diesel_S1_20; %l/år for scenario 1
53 besparelse_diesel_S1_40 = diesel_2022 - diesel_S1_40; %l/år for scenario 1
54
55 besparelse_diesel_S2_20 = diesel_2022 - diesel_S2_20; %l/år for scenario 2
56 besparelse_diesel_S2_40 = diesel_2022 - diesel_S2_40; %l/år for scenario 2
57
58 besparelse_diesel_S3_5 = diesel_2022 - diesel_S3_5; %l/år for scenario 3
59 besparelse_diesel_S3_10 = diesel_2022 - diesel_S3_10; %l/år for scenario 3
```

```

60
61 vedlikehold_sol = 19000/t_sol;           %kr/år
62 vedlikehold_vind = 200*valuta_dollar; %kr/turbin/år
63 vedlikehold_bat = 60*valuta_dollar;    %kr/år
64
65
66
67 %% Scenario 1
68
69 %Investering
70 investering_u_inst_sol = kvm_solceller*pris_solcelle...
71   + antall_stativ*pris_stativ + antall_kabler*pris_kabler...
72   + pris_inverter_sol; %Inv u/andre inst
73
74 pris_inst_sol = pris_tot_sol - investering_u_inst_sol; %Andre inst
75
76 investering_sol = investering_u_inst_sol + pris_inst_sol %Inv-estimat
77
78 %Kontantstrømmer
79 k_t_S1_20 = zeros(1, t_sol) - vedlikehold_sol...
80   + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S1_20;
81 k_t_S1_40 = zeros(1, t_sol) - vedlikehold_sol...
82   + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S1_40;
83
84 t_S1 = 1:t_sol; %Tidspunkter for kontantstrømmer
85
86 %Beregne nåverdi
87 NV_S1_20 = sum(k_t_S1_20./(1+r).^t_S1);
88 NV_S1_40 = sum(k_t_S1_40./(1+r).^t_S1);
89
90 %Beregne nettonåverdi
91 NNV_S1_20 = - investering_sol + NV_S1_20...
92   - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter;
93 NNV_S1_40 = - investering_sol + NV_S1_40...
94   - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter;
95
96
97 %% Scenario 2
98
99 %Investering
100 investering_bat = antall_batteriskap*pris_skap + pris_inverter_bat
101
102 %Kontantstrømmer
103 k_t_S2_20 = zeros(1, t_batteri) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
104   + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S2_20;
105 k_t_S2_40 = zeros(1, t_batteri) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
106   + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S2_40;
107
108 t_S2 = 1:t_batteri; %Tidspunkter for kontantstrømmer
109
110 %Beregne nåverdi
111 NV_S2_20 = sum(k_t_S2_20./(1+r).^t_S2);
112 NV_S2_40 = sum(k_t_S2_40./(1+r).^t_S2);
113
114 %Beregne nettonåverdi
115 NNV_S2_20 = - investering_sol -investering_bat + NV_S2_20...
116   - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
117   - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter;
118 NNV_S2_40 = - investering_sol -investering_bat + NV_S2_40...

```

```

119         - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
120         - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter;
121
122 %% Scenario 3
123
124 %Investering
125 investering_u_inst_vind_5 = 5*pris_turbin...
126         + pris_inverter_vind; %Inv u/andre inst
127 investering_u_inst_vind_10 = 10*pris_turbin...
128         + pris_inverter_vind; %Inv u/andre inst
129
130 pris_inst_vind_5 = pris_tot_vind*kWp_vindturbin*5 ...
131         - investering_u_inst_vind_5;           %Andre inst
132 pris_inst_vind_10 = pris_tot_vind*kWp_vindturbin*10 ...
133         - investering_u_inst_vind_10;         %Andre inst
134
135 investering_vind_5 = investering_u_inst_vind_5 + pris_inst_vind_5 %Inv-estimat
136 investering_vind_10 = investering_u_inst_vind_10 + pris_inst_vind_10%Inv-estimat
137
138 %Kontantstrømmer
139 k_t_S3_5 = zeros(1, t_vind) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
140         - vedlikehold_vind + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S3_5;
141 k_t_S3_10 = zeros(1, t_vind) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
142         - vedlikehold_vind + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S3_10;
143
144 k_t_S3_5_30 = zeros(1, t_sol) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
145         - vedlikehold_vind + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S3_5;
146 k_t_S3_10_30 = zeros(1, t_sol) - vedlikehold_sol - vedlikehold_bat...
147         - vedlikehold_vind + dieselpris_liter*besparelse_diesel_S3_10;
148
149
150 t_S3 = 1:t_vind; %Tidspunkter for kontantstrømmer
151
152
153 %Beregne nåverdi
154 NV_S3_5 = sum(k_t_S3_5./(1+r).^t_S3);
155 NV_S3_10 = sum(k_t_S3_10./(1+r).^t_S3);
156
157 NV_S3_5_30 = sum(k_t_S3_5_30./(1+r).^t_S2);
158 NV_S3_10_30 = sum(k_t_S3_10_30./(1+r).^t_S2);
159
160 %Beregne nettonåverdi
161 NNV_S3_5 = - investering_sol -investering_bat - investering_vind_5 ...
162         + NV_S3_5 - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
163         - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter ...
164         - pris_inverter_vind/(1+r)^t_inverter;
165 NNV_S3_10 = - investering_sol -investering_bat - investering_vind_10 ...
166         + NV_S3_10 - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
167         - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter ...
168         - pris_inverter_vind/(1+r)^t_inverter;
169
170 NNV_S3_5_30 = - investering_sol -investering_bat - investering_vind_5 ...
171         + NV_S3_5_30 - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
172         - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter ...
173         - pris_inverter_vind/(1+r)^t_inverter ...
174         - investering_vind_5/(1+r)^t_vind;
175
176
177 NNV_S3_10_30 = - investering_sol -investering_bat - investering_vind_10 ...

```

```

178         + NV_S3_10_30 - pris_inverter_sol/(1+r)^t_inverter ...
179         - pris_inverter_bat/(1+r)^t_inverter ...
180         - pris_inverter_vind/(1+r)^t_inverter ...
181         - investering_vind_10/(1+r)^t_vind;
182
183
184 %% plot
185
186 % Hva som skal plottes
187 y_akse = round([NNV_S1_20,...
188               NNV_S1_40,...
189               NNV_S2_20,...
190               NNV_S2_40,...
191               NNV_S3_5_30,...
192               NNV_S3_10_30]...
193               .' ),0).*10^-6; % MNOK
194
195 % Navn til hver søyle
196 ticks = {'S1: 20$^\circ$',...
197          'S1: 40$^\circ$',...
198          'S2: 20$^\circ$',...
199          'S2: 40$^\circ$',...
200          'S3: 5 stk',...
201          'S3: 10 stk'};
202
203 X_ticks = categorical(ticks);
204 x = reordercats(X_ticks,ticks);
205
206 % Plotte
207 fig2 = figure(2);
208
209 set(gcf, 'Position', [0 40 900 400], 'color', 'w');
210 set(gca, 'TickLabelInterpreter', 'latex')
211 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
212 b1 = bar(x,y_akse);
213 xtips1 = b1(1).XEndPoints;
214 ytips1 = b1(1).YEndPoints;
215 labels1 = string(b1(1).YData);
216 text(xtips1,ytips1,labels1,'HorizontalAlignment','center', ...
217      'VerticalAlignment','top','Interpreter','latex')
218 ylim([70000 125000])
219 ylabel('NNV [MNOK]','Interpreter','latex')
220 grid on;
221 b1(1).BarWidth = 0.6 ;
222 b1(1).FaceColor = [0.8500 0.3250 0.0980];

```

Vedlegg K

```
1 clc, clear
2 close all
3
4 % Prisestimator
5 valuta_euro = 11.6895; % valuta per 5.5.23
6 valuta_dollar = 10.6133; % valuta per 5.5.23
7
8 % Levetid
9 t_sol = 30; % år
10 t_bat = 30; % år
11 t_inverter = 15; % år
12 t_vind = 20; % år
13
14 % Sol
15 kvm_solceller = 941; % m2
16 pris_solcelle = 2500; % NOK/m2
17
18 antall_stativ = 8; % stk
19 pris_stativ = 5695; % NOK/stk
20
21 antall_kabler = 6; % stk
22 pris_kabler = 735; % NOK/stk
23
24 pris_inverter_sol = 52252; % NOK/stk
25 pris_tot_sol = 506400 * valuta_dollar; % NOK for bakkemontert anlegg 200 kWp
26
27 % Batteri
28 antall_batteriskap = 9; % antall skap
29 pris_skap = 39491*valuta_euro; % NOK/skap
30
31 pris_inverter_bat = pris_inverter_sol; % NOK/stk
32
33 % Vind
34 antall_turbin = 5; % stk
35 pris_turbin = 33920; % NOK/stk
36 pris_inverter_vind = 12200; % NOK/stk
37 kWp_vindturbin = 3; % kWp/stk
38 pris_tot_vind = 2000 * valuta_dollar; % NOK investering/kWp
39
40 %% Scenario 1
41 % Lese inn data
42 data_20_s1 = readtable('s1_20_sol_gen_bat.csv') ; % kWh/år
43 prod_sol_20_s1 = table2array(data_20_s1(1, 1)) ; % kWh/år
44
45 data_40_s1 = readtable('s1_40_sol_gen_bat.csv') ; % kWh/år
46 prod_sol_40_s1 = table2array(data_40_s1(1, 1)) ; % kWh/år
47
48 %% Scenario 2
49 % Lese inn data
50 data_20_s2 = readtable('s2_20_sol_gen_bat.csv') ; % kWh/år
51 prod_bat_20_s2= table2array(data_20_s2(3, 1)) ; % kWh/år
52
53 data_40_s2 = readtable('s2_40_sol_gen_bat.csv') ; % kWh/år
54 prod_bat_40_s2= table2array(data_40_s2(3, 1)); % kWh/år
55
56 %% Scenario 3
57 % Lese inn data
58 data_40_5_s3 = readtable('s3_40_5_sol_gen_vind_bat.csv') ; % kWh/år
59 prod_vind_40_5_s3= table2array(data_40_5_s3(3, 1)) ; % kWh/år
```

```

60     prod_bat_40_5_s3= table2array(data_40_5_s3(4, 1));           % kWh/år
61
62 data_40_10_s3 = readtable('s3_40_10_sol_gen_vind_bat.csv') ;   % kWh/år
63     prod_vind_40_10_s3= table2array(data_40_10_s3(3, 1)) ;     % kWh/år
64     prod_bat_40_10_s3= table2array(data_40_10_s3(4, 1));       % kWh/år
65
66 %% Vedlikeholdskostnader
67 vedlikehold_sol = 19000/t_sol;           % NOK/år
68 vedlikehold_vind = 200*valuta_dollar; % NOK/turbin/år
69 vedlikehold_bat = 60*valuta_dollar;     % NOK/år
70
71 %% Scenario 1
72 % Investeringskostnad solceller NOK
73 investering_u_inst_sol = kvm_solceller * pris_solcelle...
74                       + antall_stativ * pris_stativ ...
75                       + antall_kabler * pris_kabler...
76                       + pris_inverter_sol;           % inv u/annet
77
78 pris_inst_sol = pris_tot_sol - investering_u_inst_sol;       % annet
79
80 investering_sol = investering_u_inst_sol + pris_inst_sol + pris_inverter_sol; % inv
81
82 %% Scenario 2
83 % Investeringskostnad batteri NOK
84 investering_bat = antall_batteriskap * pris_skap + 2 * pris_inverter_bat; % inv-es
85
86 %% Scenario 3
87 % Investeringskostnad vindturbiner NOK
88 investering_u_inst_vind_5 = 5 * pris_turbin + pris_inverter_vind; % inv u/annet
89 investering_u_inst_vind_10 = 10 * pris_turbin + pris_inverter_vind; % inv u/annet
90
91 pris_inst_vind_5 = pris_tot_vind * kWp_vindturbin * 5 - investering_u_inst_vind_5;
92 pris_inst_vind_10 = pris_tot_vind * kWp_vindturbin * 10 - investering_u_inst_vind_1
93
94 investering_vind_5 = investering_u_inst_vind_5 + pris_inst_vind_5...
95                   + (pris_inverter_vind / 4 );           % inv-estim
96 investering_vind_10 = investering_u_inst_vind_10 + pris_inst_vind_10...
97                   + (pris_inverter_vind / 4 );           % inv-estim
98
99 %% Totale kostnader for teknologier
100 % Solceller (vuderer 20 og 40 likt)
101 kost_tot_sol = investering_sol + (vedlikehold_sol * t_sol); % NOK
102
103 % Batteri
104 kost_tot_bat = investering_bat + (vedlikehold_bat * t_bat); % NOK
105
106 % Vindturbiner
107 kost_tot_vind_5 = investering_vind_5 + (5 * vedlikehold_vind * t_vind); % NOK
108 kost_tot_vind_10 = investering_vind_10 + (10 * vedlikehold_vind * t_vind); % NOK
109
110 %% Beregne LCOE og LCOS for solceller, vindturbiner og batterier
111
112 % LCOE = Nåværende verdi av total kostnad over levetiden ...
113 %       / Nåværende verdi av all elektrisitet generert i løpet av levetiden
114
115 % LCOE solceller (utgangspunkt i produksjon fra scenario 1)
116 lcoe_sol_20_s1 = kost_tot_sol / (prod_sol_20_s1 * t_sol); % NOK/kWh
117 lcoe_sol_40_s1 = kost_tot_sol / (prod_sol_40_s1 * t_sol); % NOK/kWh
118

```

```
119 % LCOE vindturbiner (utgangspunkt i produksjon fra scenario 3)
120 lcoe_vind_40_5_s3 = kost_tot_vind_5 / (prod_vind_40_5_s3 * t_vind); % NOK/kWh
121 lcoe_vind_40_10_s3 = kost_tot_vind_10 / (prod_vind_40_10_s3 * t_vind); % NOK/kWh
122
123 % LCOS batterier scenario 2
124 lcos_bat_20_s2 = kost_tot_bat / (prod_bat_20_s2 * t_bat); % NOK/kWh
125 lcos_bat_40_s2 = kost_tot_bat / (prod_bat_40_s2 * t_bat); % NOK/kWh
126
127 % LCOS batterier scenario 3
128 lcos_bat_40_5_s3 = kost_tot_bat / (prod_bat_40_5_s3 * t_bat); % NOK/kWh
129 lcos_bat_40_10_s3 = kost_tot_bat / (prod_bat_40_10_s3 * t_bat); % NOK/kWh
130
131
132
133
```