

Forord

Denne rapporten er resultatet av masteroppgave for undertegnede våren i femte klasse ved Energi og Miljø ved NTNU. Arbeidet er en videreføring av prosjektoppgaven som ble gjennomført høsten 2007. Oppgaven har blitt veiledet av Per Finden og Øystein Ulleberg fra Institutt for energiteknikk (IFE), som også er involvert i det overordnede prosjektet Troll Energi, i regi av Norsk Polarinstitut (NPI).

Jeg vil rette en stor takk til veilederne mine, til David Pointing som fikk meg med på konferanse på Grønland, og til alle andre som har vært behjelpelige i arbeidet med oppgaven.

Trondheim 11.juni 2008

Marte Gammelsæter

Sammendrag

Denne rapporten undersøker muligheten for å introdusere fornybar energiproduksjon i det autonome energisystemet på forskningsstasjonen Troll i Antarktis. Per i dag er stasjonen forsynt med energi fra en dieselgenerator. Denne er overdimensjonert for lasten på Troll, og sliter allerede med driftsproblemer av den årsak. Ønsket om å introdusere fornybar energi kommer fra Miljøverndepartementet og Norsk Polarinstittutt, og springer ut av både energiøkonomiske og miljømessige hensyn.

I rapporten simuleres energisystemet på Troll for flere konfigurasjoner med fornybart energitilskudd fra sol og vindenergi, både enkeltvis og i kombinasjon. Modellene er bygget opp, og simuleringen utført med energisimuleringsprogrammet TRNSYS. Modellene er størst mulig grad bygget opp av komponenter med spesifikke data for konkrete, anbefalte teknologier som er vurdert som relevante for Troll. Modellene er også basert på målte data for vindhastighet og solinnstråling fra Troll. Målte data for energiforbruket for stasjonen foreligger i svært liten grad, og det har derfor blitt gjennomført en lastestimering på bakgrunn av Norsk Standard, samt kunnskap om bygningsmassen på Troll. Slik systemet på Troll er i dag, er det nødvendig å skifte ut dieselgeneratoren for å kunne dra nytte av et tilskudd fra fornybar energi. I simuleringene brukes en Low Load Diesel (LLD) generator, som kan kjøre på belastninger ned mot 5 % over lengre tid, uten driftsproblemer. På den måten er det mulig å utnytte en svært høy andel fornybar energi når denne er tilgjengelig.

Resultatene viser at de gjennomsnittelige vindhastigheten på Troll er noe lav i forhold til det man anbefaler for å investere i vindturbiner. Likevel gir en konfigurasjon med flere små vindturbiner et jevnt bidrag over året. For solenergi er den innstrålte effekten svært god over store deler av året. Unntaket er tre måneder med mørketid, hvor det ikke er noe solenergi tilgjengelig. Likevel gir solenergi et betraktelig større energibidrag totalt enn det man får fra tilsvarende mengde installert effekt for vindturbiner. En kombinasjon av de to kildene gir nødvendigvis det største bidraget. Denne løsningen anbefales likevel ikke, ettersom det vil komplisere energisystemet ytterligere. Det er svært viktig å velge enkle, solide løsninger for å begrense driftsproblemer i et svært isolert område.

De økonomiske beregningene viser at alle konfigurasjonene som har blitt studert er økonomisk lønnsomme. Også der viser det seg at solenergi er den beste løsningen, som vil generere den største besparelsen i dieselutgifter. Sannsynligvis vil dessuten lønnsomheten av en investering i fornybar energi bare øke ettersom verden for tiden opplever en sterk økning i oljeprisen. I tillegg til å være en god investering fra et økonomisk standpunkt, gir en investering i fornybar energi betydelige miljøbesparelser i form av reduserte CO₂-utslipp, samt en positiv miljøprofil utad for NPI.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	iii
Innholdsfortegnelse	v
Kapittel 1 Innledning	1
Kapittel 2 Bakgrunn	3
2.1 Antarktis.....	3
2.2.1 Troll.....	4
2.2.2 Eksisterende energisystem og energibehov på Troll	6
Kapittel 3 Tidligere arbeid	11
3.1 Prosjektoppgave.....	11
3.2 Målearbeid ved Troll.....	11
Kapittel 4 Teknologi	13
4.1 Samspill mellom dieselgenerator og fornybar energi	13
4.2 Lagring av energi	14
4.3 Low load diesel	15
4.4 Vindturbiner	17
4.4.1 Sammensetningen av en vindturbin	18
4.4.2 Energiproduksjon.....	20
4.4.3 Spesielle utfordringer	20
4.4.4 Aktuelle turbiner	21
4.4.5 Valg av turbin	22
4.5 Solenergiteknologi	22
4.5.1 Solceller	22
4.5.2 Solfangere	24
4.5.3 Spesielle utfordringer	25
4.5 Sammenfatning av teori	26
Kapittel 5 Ressursgrunnlag for fornybar energi, og klimatiske forhold ved Troll 29	
Kapittel 6 Modellering og simulering	33
6.1 Simuleringsverktøy	33
6.2 Matematisk beskrivelse av de viktigste komponentene.....	33
6.2.1 Dieselgeneratoren Type 120	34
6.2.2 Vindturbinmodell Type 90.....	35
6.2.3 Solfangermodellen Type 71	38
6.2.4 Solcellemodell Type 180	40
6.3 Estimering av energiforbruk ved Troll	42
6.3.1 Estimering av elektrisk last.....	42
6.3.1.1 Resultater lastestimering.....	44
6.3.2 TRNSYS bygningsmodell	45
6.3.2.1 Resultater termisk lastestimering.....	46

6.4	Aktuelle løsninger på Troll	47
6.4.1	Energisystemet på Troll per i dag	48
6.4.2	Vindturbiner som fornybar energikilde	48
6.4.3	Solceller som fornybar energikilde	49
6.4.4	Vindturbiner og solceller i kombinasjon	50
6.4.5	Solfanger for varmeproduksjon	51
6.5	Utfordringer og feilkilder knyttet til modelleringen	53
6.5.1	Modelleringsproblemer	53
6.5.2	Feilkilder i modellene	54
Kapittel 7 Resultater		57
7.1	Energisystemet på Troll per i dag	57
7.2	Vindturbiner som fornybar energikilde	59
7.3	Solceller som fornybar energikilde	60
7.4	Solceller og vindturbiner i kombinasjon	61
7.5	Solfanger for varmeproduksjon	62
7.6	Sammenfatning av resultater	63
Kapittel 8 Økonomisk analyse		65
Kapittel 9 Analyse		71
Kapittel 10 Konklusjon og videre arbeid		75
10.1	Måloppnåelse	75
10.2	Forslag til videre arbeid	76
Referanser		79
Liste over vedlegg:		
Vedlegg nr 1: Simuleringsdata for vindturbinmodell		
Vedlegg nr 2: Simuleringsdata for solcellemodell		
Vedlegg nr 3: Simuleringsdata for solcelle + vindmøllemodellen		
Vedlegg nr 4: Simuleringsdata for solfangerkomponenten		
Vedlegg nr 5: Plantegning hovedbygning		
Vedlegg nr 6: Elektrisk lastestimering		
Vedlegg nr 7: Datagrunnlag termisk lastestimering		
Vedlegg nr 8: Prisoverslag		

Figur nr	Tittel	Side
2.1	Troll	4
2.2	Kart over Troll	5
2.3	Energiproduksjon på Troll	7
2.4	Månedsgjennomsnitt last	7
2.5	Dieseltønner fraktes til Troll	9
4.1	Samproduksjon av fornybar energi med diesellaggregat	14
4.2	LLD vs standard diesel	16
4.3	Ytelse for LLD-dieselgenerator	17
4.4	Solcelleekvivalentkrets	24
5.1	Månedsmiddeltemperatur ved Troll	29
5.2	Innstrålt effekt døgnsnitt	30
5.3	Vindhastigheter målt ved Troll	31
6.1	Kontrollvolummodell av vindturbin	36
6.2	Solcelleekvivalentkrets TRNSYS	40
6.3	Estimert lastprofil for Troll Høysesong	44
6.4	Estimert lastprofil for Troll Lavsesong	44
6.5	Estimert årsprofil for lasten ved Troll	45
6.6	Estimert varmebehov påTroll	47
6.7	Modell av eksisterende energisystem på Troll	48
6.8	Modell av energisystemet på Troll med vind som fornybar energikilde	49
6.9	Modell av energisystemet på Troll med sol som fornybar energikilde	50
6.10	Modell av energisystemet på Troll med sol og vind som fornybar energikilde	51
6.11	Modell av energisystem med vindturbin og solfanger	52
6.12	Modell av energisystem med solceller og solfanger	52
7.1	Varmeproduksjon fra eksisterende dieselgenerator for overgangen mellom høy og lavsesong	58
7.2	Varmeproduksjon fra LLD-dieselgenerator for overgangen mellom høy og lavsesong	58
7.3	Effekt fra vindturbiner (9 m mast)	59
7.4	Effekt fra solceller (216 m ²)	61
7.5	Fornybar energi ved tilfelle 2(8 turb, 216m ²) i tabell 7.4	62

Tabell nr	Tittel	Side
2.1	Oversikt over bygninger ved Troll	6
2.2	Oversikt over energikrevende installasjoner ved Troll	6
3.1	Parametere for energikartlegging ved Troll	12
6.1	Variabler i matematisk modell av dieselgenerator	34
6.2	Variabler i matematisk modell av vindmølle	35
6.3	Variabler i matematisk modell av solceller	38
6.4	Variabler i matematisk modell av solfanger	40
6.5	Oversikt over innhold i hovedbygningen på Troll	43
7.1	Resultater fra simulering av energisystemet per i dag	57

7.2	Resultater for vind (9 m mast)	59
7.3	Resultater for vind (15 m mast)	60
7.4	Resultater fra simulering med solceller	60
7.5	Resultater for sol og vind (15m mast)	61
7.6	Varmeproduksjon fra dieselgenerator for forskjellige konfigurasjoner av energisystemet	62
7.7	Oppsummering av beste resultat for dieselbesparelse	63
8.1	Energipris for forskjellige systemer	65
8.2	Økonomiske beregninger for vindturbiner	66
8.3	Økonomiske beregninger for solceller	66
8.4	Økonomiske beregninger for LLD	66
8.5	Økonomiske beregninger for solceller og vindturbiner i kombinasjon	66
8.6	Besparelser for vindturbin med 20 % økning i dieselpris	67
8.7	Besparelser for solceller med 20 % økning i dieselpris	67
8.8	Besparelser for LLD med 20 % økning i dieselpris	67
8.9	Besparelser for vind og sol i kombinasjon med 20 % økning i dieselpris	67
8.10	NPV og IRR for vindturbiner	68
8.11	NPV og IRR for solceller	68
8.12	NPV og IRR for sol og vind i kombinasjon	68

Kapittel 1 Innledning

Denne rapporten tar for seg problemstillingene knyttet til energiforsyningen, og sammensetningen av energisystemet på den norske forskningsstasjonen Troll i Antarktis. Troll har eksistert som forskningsstasjon siden 1989, og ble utvidet til helårsstasjon i 2004. Hensikten med rapporten er å undersøke mulighetene for å introdusere fornybare energikilder som et supplement til den eksisterende dieselfyrtte generatoren, for på den måten å spare både brenselutgifter, og redusere utslipp av klimagasser i et sårbart område. Det er et ønske både fra Norsk Polarinstittutt(NPI), og fra Miljøverndepartementet som har bevilget pengene til utbyggingen av Troll, at Norge skal være en foregangsnaasjon på miljøvennlig virksomhet i Antarktis. Introduksjon av fornybar energiforsyning er et tiltak som vil ha stor betydning for utslippene av klimagasser ved Troll, i tillegg til å ha en svært god signaleffekt. Per i dag finnes fornybar energi som en del av energisystemet på flere av de nærmere sytti basene i Antarktis, men det er bare australske Mawson Station hvor bidraget er substansielt. I tillegg er belgiske Princess Elizabeth Station under oppføring, hvor målet er at all energi skal forsynes fra fornybare energikilder. Antarktis er et område hvor konsekvensene av klimaendringene vil merkes svært raskt.

Erfaringene fra et slikt prosjekt i Antarktis kan man bringe videre til andre steder i verden. Selv om Antarktis er i en særklasse med sitt ekstreme klima og svært isolerte beliggenhet, finnes det mange andre steder i verden hvor man sliter med lignende utfordringer, nemlig en sikker energiforsyning i isolerte strøk. Å bygge distribusjonsnett ut til alle disse samfunnene er ofte svært dyrt, og leveringskvaliteten blir veldig dårlig med hyppige strømbrudd. Mange steder har løsningen vært dieselfyrtte generatorer som har produsert strøm lokalt. Flere av disse områdene ligger slik til at de har gode fornybare ressurser som vind og sol tilgjengelig. Driftserfaring, og vilje til å teste ut isolerte systemer basert på fornybar energi i Antarktis, vil gjøre terskelen for å satse i nye områder lavere.

Flere aktører er involvert i arbeidet med Troll, deriblant Norsk Polarinstittutt, Statsbygg, Institutt for Energiteknikk(IFE) og Troms Kraft. Denne rapporten er resultatet av en masteroppgave gjennomført i regi av IFE, som en del av prosjekteringen. Rapporten tar for seg aktuelle teknologier for implementering ved Troll, samt beskrivelser av tilgjengelig ressursgrunnlag, og simulering av energisystemet på bakgrunn av dette.

Mål for oppgaven:

På bakgrunn av oppgaveteksten er følgende mål satt for oppgaven. Hovedmålet er å analysere effekten av å introdusere fornybare energikilder for å redusere forbruket av diesel, og hvordan det kan la seg gjennomføre. Det skal uføres ved å besvare følgende delmål:

- Redegjøre for arbeid gjennomført i prosjektoppgave og av andre aktører
- Redegjøre for aktuelle energiteknologier
- Redegjøre for klimatiske forhold og ressursgrunnlag for fornybar energi

- Estimere termisk og elektrisk energiforbruk for Troll
- Modellere og simulere for aktuelle konfigurasjoner av energisystemet
- Gjøre en økonomisk analyse av de aktuelle konfigurasjonene
- Presentere beste løsning ut i fra simuleringer og analyser

Rammer for oppgaven:

- Modellering og simulering skal gjennomføres i TRNSYS
- Målinger og annet arbeid på Troll gjennomføres i regi av andre aktører. Avhengig av deres arbeid og hjelpelighet.

Metode for gjennomføring av oppgaven:

- Et litteraturstudium skal gjennomføres med tanke på å undersøke aktuelle teknologier for bruk i autonome energiforsyningsanlegg i arktisk klima.
- Modellene skal oppdateres for å i størst mulig grad inkludere spesifikke data for ytelse fra forskjellige komponenter som blant annet solceller og vindturbiner, samt målte inputdata fra Troll.
- Der måledata ikke er tilgjengelig skal de nødvendige tallene estimeres for å gi en best mulig indikasjon på nivået.
- På bakgrunn av simuleringer og økonomiske beregninger skal det anbefales en løsning for energisystemet på Troll.

Organisering av rapporten:

Først presenteres problemstillingen samt situasjonen på Troll i dag. Deretter presenteres tidligere arbeid utført med tanke på oppgradering av energisystemet på Troll. Ulike aktuelle teknologier for autonome energisystemer redegjøres for, samt ressursgrunnlaget for fornybar energi i området. Modeller for forskjellige mulige konfigurasjoner av energisystemet bygges opp på bakgrunn av de tidligere gjennomgåtte teknologiløsningene. På bakgrunn av resultatet fra simuleringene og økonomiske beregninger foretas et valg av anbefalt løsning for energisystemet på Troll.

Kapittel 2 Bakgrunn

Dette kapittelet tar for seg bakgrunnen for den forskningsbaserte aktiviteten i Antarktis, samt forholdene på Troll.

2.1 Antarktis

Antarktis skiller seg tydelig ut fra alle de andre kontinentene. Klimaet er noe av det hardeste på jorda, snittemperaturen kryper ikke over null selv i sommerhalvåret. 99 % av kontinentet er dekket av snø og is til en hver tid [1]. Om vinteren er farvannene rundt Antarktis fulle av drivis, noe som gjør det svært risikabelt å ferdes der. Alt dette har bidratt til at menneskene opp igjennom historien ikke har satt det samme preget på denne delen av verden som de har gjort over alt ellers. Til tross for de ugjestmilde forholdene har menneskene likevel funnet veien helt sør på jordkloden. Først på 1800tallet ble de første bekreftede oppdagelsene av Antarktis gjort. Det er ikke funnet noen tegn på at det har vært innfødte bosetninger i Antarktis [2]. På 1800 og 1900tallet var hvalfangst en viktig næringsvei som lokket mange til Sørishavet. Mange større forskningsekspedisjoner ble også gjennomført på denne tiden. Likevel var det ikke før etter signeringen av The Antarctic Treaty i 1959, som sa at Antarktis skal være tilgjengelig for alle som har signert traktaten til å utføre fredelige forskningsaktiviteter [3], at det virkelig ble fart i sakene. Opprinnelig signerte tolv land traktaten, etter hvert har dette tallet steget til førtifem. Forskning i Antarktis har gitt, og gir fremdeles, mange svar blant annet om klimaet på jorda i et historisk perspektiv. I isen ligger informasjon lagret fra tusen år tilbake i tid. Denne informasjonen prøver forskerne nå å hente fram blant annet gjennom kjerneboringen i isen. Per i dag finnes det 64 baser på det Antarktiske kontinentet [4] som driver forskning på forskjellige tema.

Det er strenge regler for drift i Antarktis, man må begrense inngrepene i det sårbare klimaet. Konsekvensene av utbygging må vurderes nøye. Alt som fraktes inn, må fraktes tilbake igjen når man er ferdig med det. Frakt er særlig komplisert ettersom Antarktis mangler så godt som all infrastruktur vi kjenner fra den siviliserte verden. Dette legger føringer på hva som er lov, og hva som er lønnsomt i forbindelse med utbygging av basene. Da man begynte å bygge de permanente forskningsstasjonene i Antarktis på starten av 60-tallet var det stort sett bare en mulig løsning for å sikre energiforsyningen. Lokale dieselaggregat som forsynte den aktuelle stasjonen, var den mest økonomiske og praktiske måten å gjøre det på. Avstandene er alt for store til å forsvare noen form for samproduksjon.

I dag er fremdeles lokal energiproduksjon fra fossile brensel den vanligste løsningen. Forskjellen er at nå finnes det andre teknologier, og den høye literprisen på diesel man opplever i Antarktis burde være et sterkt incentiv til å vurdere andre muligheter. Utviklingen man har sett på oljeprisene det siste året vil sannsynligvis bare fortsette, noe som vil øke verdien av en investering i fornybar energi. I tillegg har miljølovgivningen i Antarktis blitt strengere med introduksjonen av Madridprotokollen i 1991 [5]. Der ble retningslinjene for mest mulig miljøvennlig drift i Antarktis felt ned. Der stilles det krav til å begrense alle typer forurensning,

både i forhold til luftkvalitet, lyd og visuell forurensning. Energiforsyning og valg av teknologi, faller inn under dette, og må dermed vurderes ut fra protokollen.

Siden starten av 60-tallet har det blitt forsket mye på fornybare energikilder. Både vindmøller og solceller er per i dag kjent teknologi, og brukes til energiproduksjon over hele verden. En av årsakene til at ikke produksjonen er høyere, er at energiprisen fra slike fornybare kilder ofte ikke kan konkurrere med energiprisen fra vannkraft, kull og gass [6]. Økonomien i slike prosjekter er best i strøk med spredt bosetning, der man ikke kan forsvare å bygge ut dyre kraftlinjer. Ulempen er at både vind og sol er flyktige energiressurser. Hvis det ikke blåser, vil man ikke få noe energi fra en vindmølle. Tilsvarende gjelder også for solceller. Ettersom kontinuerlig energiforsyning er nødvendig, trenger man en reserveløsning i tillegg til fornybar energi. Batterier, eller andre måter å lagre overskuddsenergi på er en mulighet. Det krever et grundig dimensjonert system slik at man til en hver tid er garantert at man har nok lagret energi til å dekke behovet. Det vanligste er å dekke underskuddet med dieselgenerator. Fornybare energikilder er blitt introdusert ved flere baser i Antarktis, noen bare på forskningsnivå, mens andre dekker store andeler av den totale energiforsyningen.

2.2.1 Troll



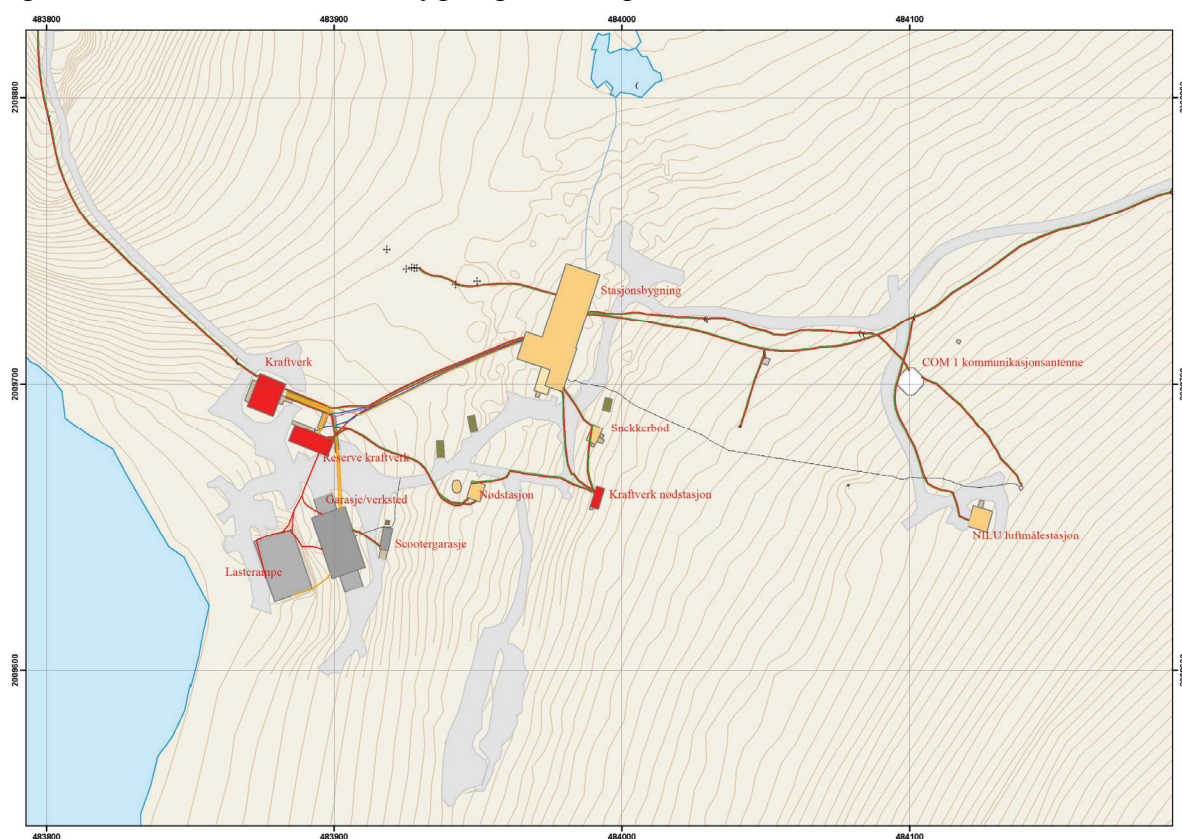
© Stein Tronstad, Norsk Polarinstittutt

Figur 2.1: Troll

Den norske forskningsstasjonen Troll befinner seg i Antarktis, nærmere bestemt på 72° sør, 2° øst og 1270 moh. Se figur 2.1. Stasjonen ligger 23 mil fra kysten, og det er 28 mil til nærmeste nabo [7]. Troll har kapasitet til å huse omtrent førti personer i sommersesongen, og åtte i vintersesongen. Aktivitetene innebefatter blant annet

meteorologiske registreringer, geologiske undersøkelser, og studier av flora og fauna. I 2004 ble stasjonen utvidet fra å være bemannet kun i løpet av den antarktiske sommersesongen, til å bli en helårs forskningsstasjon. I den sammenhengen ble det gjort store endringer og utbygginger ved Troll for å kunne dekke behovene ved helårs aktivitet. På slutten av 2007 var Troll utgangspunktet for en stor norsk-amerikansk sydpolekspedisjon hvor målet var å bore iskjerner i nye områder av Dronning Maud Land for å finne ny informasjon om klimaet på jorda [8].

Figur 2.2 viser en oversikt over bygningsmassen på Troll.



Figur 2.2: Kart over Troll [9]

Troll eies av Statsbygg, men leies og driftes av Norsk Polarinstitutt. Anlegget består av flere bygg som er satt sammen av containermoduler, for å lette byggearbeidene i det harde klimaet. Blant de viktigste byggene er hovedbygget på over 400m², samt flere mindre som garasjer, laboratorier og aggregatthuss. En mer inngående oversikt finnes i tabell 2.1. Troll har også driftsansvar for installasjoner som en meteorologisk målestasjon, en stasjon som måler luftkvalitet, en satellittantenne fra KSAT og en kommunikasjonsantenne.

Tabell nr 2.1: Oversikt over bygninger ved Troll [10]

Bygning	Grunnflate	I bruk	Oppvarming
Hovedbygg	445 m ² (+ 99 m ² sommer st.)	Ja	Ja fjernvarme + el
Snekkerverksted		Ja	Ja
Nødstasjon	33 m ²	I nødsfall	
Aggregat sommerst.		Nei	Ja, elektrisk 2000W
Garasje		Ja	Ja
Scootergarasje	21 m ²	Ja	Ja, elektrisk 2000W
Reserveaggregat		Ja	Ja
Aggregat	59 m ²	Ja	Nei, kjøling
Lager		Ja	Ja
Labcontainer	7,3 m ²	Ja	Ja

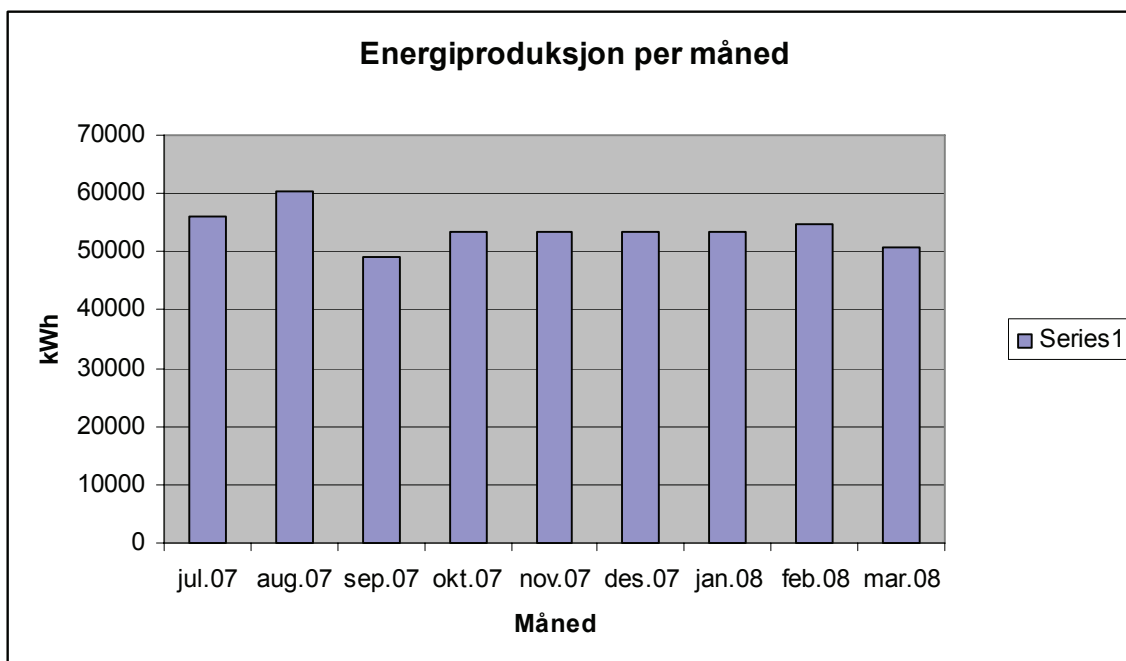
2.2.2 Eksisterende energisystem og energibehov på Troll

Energisystemet på Troll er en av de mest sentrale funksjonene, og hovedtema for denne rapporten. I tillegg til kontinuerlig drift av de ovennevnte større installasjonene, krever stasjonen elektrisitet og oppvarming i flere av byggene for å sikre kontinuerlig drift. En oversikt over de mest kraftkrevende enkeltinstallasjonene finnes i tabell 2.2. Etter utbyggingen i 2004 ble også dieselaggregatet skiftet ut. Fra januar 2007 har stasjonen blitt forsynt med energi fra et 260 kW dieselaggregat [11]. Det finnes to slike aggregater på Troll for å sikre forsyningen hvis problemer skulle oppstå med ett av dem. Aggregatene kjøres halvparten av tiden hver. To tidligere aggregater finnes også ved Troll, disse fungerer fremdeles som back up løsning. Det største av disse, som er den forrige hovedforsyningen på Troll er på 65 kW.

Tabell nr 2.2: Oversikt over energikrevende installasjoner ved Troll[11]

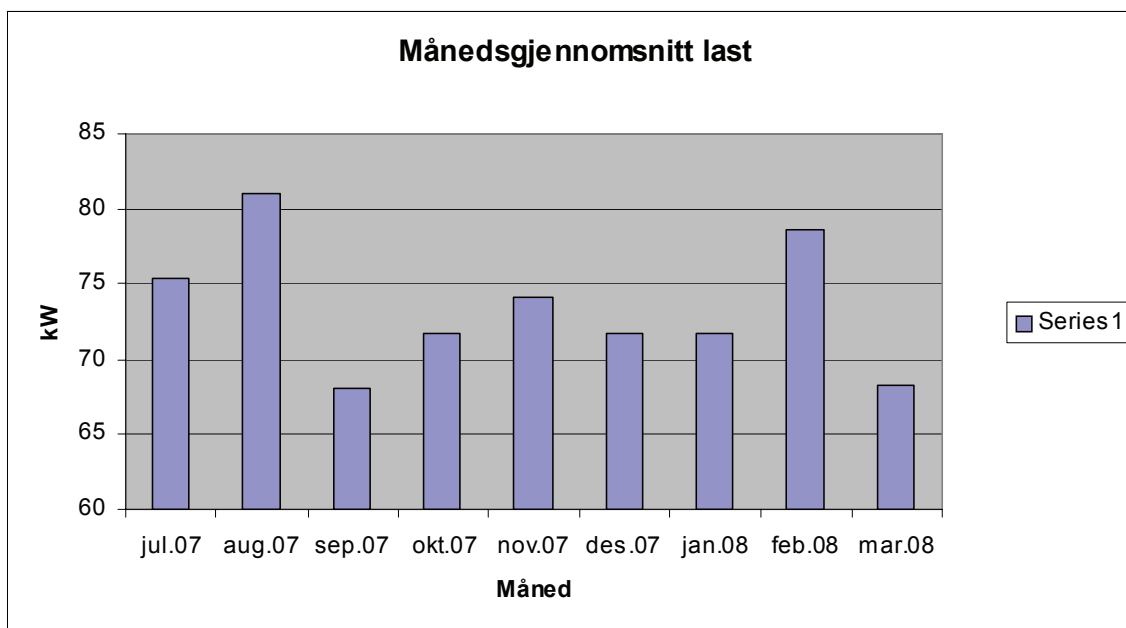
Installasjon	Effekt
KSAT (Satelittantenne) + UPS(Batteribank)	26,0kW
NILU (Luftmålinger)	4,5kW
Com1 (Kommunikasjonsantenne)	4,0kW
BAS (British Antarctic Survey)	35,0kW
Meteorologisk mast	Svært lite
Totalt	69,5kW

Per i dag foreligger det begrenset informasjon om energiforbruket på Troll. Noe data foreligger likevel om energiproduksjonen fra dieselgeneratoren. Siden systemet er såpass lite og isolert kan vi regne med et rimelig godt samsvar mellom produsert energi og det faktiske forbruket. Produksjonen registreres kumulativt og leses av hver måned på Troll. Månedlig produksjon kan sees i figur 2.3.



Figur 2.3: Energiproduksjon på Troll[11]

Disse dataene blir svært grove, men de bidrar med et grunnlag som angir hvordan nivået vil være ved mer grundige registreringer. Ytterligere målinger av energiforbruk og produksjon ved Troll skal gjennomføres i regi av Norseac [12], og skulle startet opp våren 2008. Disse målingene vil være svært nyttige, og gi mye viktig kunnskap om energisystemet ved Troll. Resultatene vil dessverre ikke komme denne rapporten til gode. For å gi en indikasjon på lasten ved Troll har dataene for kumulert produksjon blitt behandlet ytterligere. Resultatet foreligger i figur 2.4.



Figur 2.4: Månedsgjennomsnittslast

Figur 2.4 viser månedlig kumulert produksjon delt på antall timer i den aktuelle måneden. Hensikten med figuren er å gi en indikasjon på lasten ved Troll. Variasjonene fra måned til måned er for store til at det kan avskrives som normale sesongvariasjoner, og det må derfor stilles spørsmålsteget ved riktigheten. Likevel er dette omtrent det eneste datagrunnlaget som foreligger om energiforbruket på Troll, og tallene kan derfor gi en verdifull indikasjon på hvor nivået vil ligge når bedre målinger foreligger. Det man vet om driften på Troll er at aktiviteten mangedobles i sommersesongen, fra desember til mars. I den samme perioden stiger gjennomsnittstemperaturen utendørs, og man kan oppleve passiv oppvarming av bygningsmassen fra sola. De to siste faktorene vil sannsynligvis redusere behovet for oppvarming noe. Behovet for el til de større installasjonene vil være uforandret over sesongen. Behovet for el til bygningsmassen vil neppe øke veldig mye som følge av økt aktivitet, ettersom flesteparten innløsjes i telt. Noe økt press vil man sannsynligvis oppleve i laboratorier, og på varmtvannsbehov.

En annen ting som er verdt å merke seg er at tallene fra tabell 2.2, stemmer dårlig overens med figur 2.4. Tallene fra tabell 2.2 er faste laster som er uavhengige av aktiviteten ved stasjonen. Hvis disse tallene stemmer, tilsier figur 2.4 at det er perioder med så godt som ingen belastning fra driften av bygningsmassen, noe som er svært usannsynlig. Som det tydelig kommer fram her er det knyttet mye usikkerhet til energiforbruket ved Troll. De tallene som foreligger kan kun brukes som en indikasjon på nivået på energiforbruket. Det er svært viktig å få et bedre og mer detaljert datagrunnlag for energibehovet på Troll på bordet før man tar en endelig avgjørelse.

Store deler av varmforsyningen kommer fra spillvarme fra aggregatets kjølevann, som distribueres som vannbåren varme til oppvarmingsformål. Varme trengs også til å produsere alt vann som behøves ettersom rennende vann ikke finnes ved Troll. Dette smeltes fra is og snø. Spillvarmen fra dieselaggregatet er per i dag tilstrekkelig til å dekke varmebehovet ved Troll [13].

Som man kan få inntrykk av fra figur 2.4 er dieselaggregatet er per i dag overdimensjonert for energibehovet ved Troll. Med en snittlast på mellom 70 og 80kW, vil det si at aggregatet kjører på under 30 % belastning store deler av tida. Det vil si at det driftes på for lav belastning i forhold til optimal drift. Dette har allerede begynt å skape driftsproblemer i form av tette katalysatorer [12].

Figur 2.5 viser hvordan frakt av diesel fra iskanten og inn til Troll foregår.



© Øystein Mikelborg, Norsk Polarinstitutt

Figur 2.5: Dieseltønner fraktes til Troll

Diesel er en stor utgiftspost knyttet til driften av Troll. Diesel går med både til å fyre aggregatet og transportmidler. Literprisen etter å ha fraktet diesel fra fastlandet først med båt, og deretter beltevoan inn til Troll er svært høy. Literprisen ligger omtrent på 27 kr/l [11], og med et årlig forbruk på omtrent 210 000 l/år [10] blir dette en utgift i millionklassen. Den høye dieselpriisen, og det at man allerede etter ett års drift har opplevd driftsproblemer grunnet for lavt belastede generator er sterke incentiver for å gjøre omfattende endringer i energisystemet på Troll. Høye dieselpriiser er med på å forsvare introduksjon av fornybar energi med "gratis" brensel fra et økonomisk perspektiv

Kapittel 3 Tidligere arbeid

Arbeidet mot en grønn stasjon startet med at NPI tok kontakt med IFE, som igjen utførte en forstudie på mulighetene for å introdusere fornybare energikilder som en del av energisystemet på Troll. Deretter ble det utgangspunkt for en prosjektoppgave på NTNU, som nå videreføres i denne masteroppgaven.

3.1 Prosjektoppgave

I prosjektoppgaven [10] ble det redegjort for de aktuelle fornybare energiresursene som er tilgjengelige ved Troll. Hovedsakelig ble det lagt vekt på energi fra sol og vind. I tillegg ble det utført undersøkelser vedrørende energiforbruk og produksjon ved Troll med den nåværende aggregatløsningen. Det ble også identifisert hvilke størrelser som må tallfestes for å kunne komme til en endelig konklusjon i forhold til valg av løsning for fremtidig energiforsyning. For å gi en indikasjon på hvilke besparelser man kan forvente ved å introdusere fornybar energi ble det bygget opp to modeller i simuleringsprogrammet TRNSYS. Disse ble kjørt med foreløpige data for ressursgrunnlag for både sol og vind, samt en jevn last basert på det årlige forbruket i kWh. Med bakgrunn fra disse tallene ble det gjort noen konservative overslag på hva slags besparelser man kan forvente. Med en vindturbin på 50kW kunne man spare drøye 11 000 liter diesel på et år. Tilsvarende tall for et solcellepanel på 31kW var knappe 5000 liter diesel. Resultatet ble at besparelsene var forholdsvis mye større med supplement fra vindgeneratorer enn fra solceller. Dette var ikke uventet ettersom sesongen er kortere for solcellene. Tallene er likevel ikke sammenlignbare, ettersom det ikke forelå målinger av solinnstrålingen for et helt år og høysesongen ikke var inkludert. I tillegg til svakt datagrunnlag, viste det seg i etterkant at noen tall knyttet til forbruk og priser ved Troll var direkte feil. Resultatet er at de økonomiske beregningene ikke kan benyttes i det videre arbeidet, men prosjektoppgaven gir likevel en grov indikasjon på mulige innsparinger i form av dieselforbruk.

I denne masteroppgaven er hensikten å skaffe til veie korrekte, oppdaterte data av tilstrekkelig kvalitet både når det gjelder ressursgrunnlag, produksjon og forbruk av energi ved Troll, til å danne et beslutningsgrunnlag for et framtidig valg av ny teknologi.

Modellene skal videreutvikles slik at de i større grad gjenspeiler det som er den faktiske situasjonen ved Troll. Målet er å gi en mer korrekt analyse for de forskjellige fornybare energikildene, og utarbeide løsninger for høyest mulig utnyttelse av fornybar energi på en måte som lar seg gjennomføre i Antarktis. Deretter skal det utføres en økonomisk analyse av systemet. Miljømessig gevinst skal også kvantifiseres.

3.2 Målearbeid ved Troll

Siden prosjektoppgaven ble ferdigstilt har det blitt utplassert måleutstyr på Troll for å måle en rekke parametere knyttet til energiforbruk og produksjon. En detaljert oversikt over parametere finnes i tabell 3.1. I tillegg er det satt opp en mast for å måle

vind med tanke på å installere vindmøller. Meteorologiske data, som ble brukt i de foreløpige analysene i høst vil ikke gi et helt korrekt bilde av situasjonen. Dessuten foreligger det nå data for innstrålt effekt fra sola for et helt år, noe som vil gi mye bedre bilde av situasjonen hvis man velger å installere solceller.

Tabell 3.1: Parametere for energikartlegging ved Troll [9]

Varme	Elektrisitet
Kjølevarmeproduksjon	Elektrisk produksjon
Eksosvarmeproduksjon	Elforbruk totalt
Varmeforbruk Hovedbygg	Elforbruk hovedbygg
Varmeforbruk Containere	Elforbruk NILU
Varmeforbruk Kraftstasjon 2004	Elforbruk UPS'er
Varmeforbruk snøsmelteanlegg	Elforbruk Nødstasjon
Varmeforbruk garasje	Elforbruk Garasje
	Elforbruk proviantlager
Andre størrelser	Elforbruk Laboratorier
Vannforbruk	Elforbruk Scootergarasje
Dieselforbruk	Kraftstasjon 2000
	Snekkerverksted
	KSAT Com1
	KSAT Total

Vindmålingene kom i gang i årsskiftet 07/08, og vil ble redegjort for i kapittel 5. Når det gjelder energimålingene skulle de ha kommet i gang på samme tid, men ble utsatt på grunn av stor aktivitet ved Troll. I etterkant har man funnet ut at noen av sensorene er levert feil. Sannsynligvis kan man ikke regne med å få ut noen data før om et års tida, da nye sensorer må leveres til Troll i løpet av sesongen 08/09.

Et solid grunnlag av måledata er svært viktig for å kunne danne seg et tilstrekkelig godt bilde av forholdene på Troll. Estimerte data kan gi en antydning om hvordan nivået vil være, men en endelig beslutning om endring av energisystemet på Troll bør gjøres på bakgrunn av måledata.

Kapittel 4 Teknologi

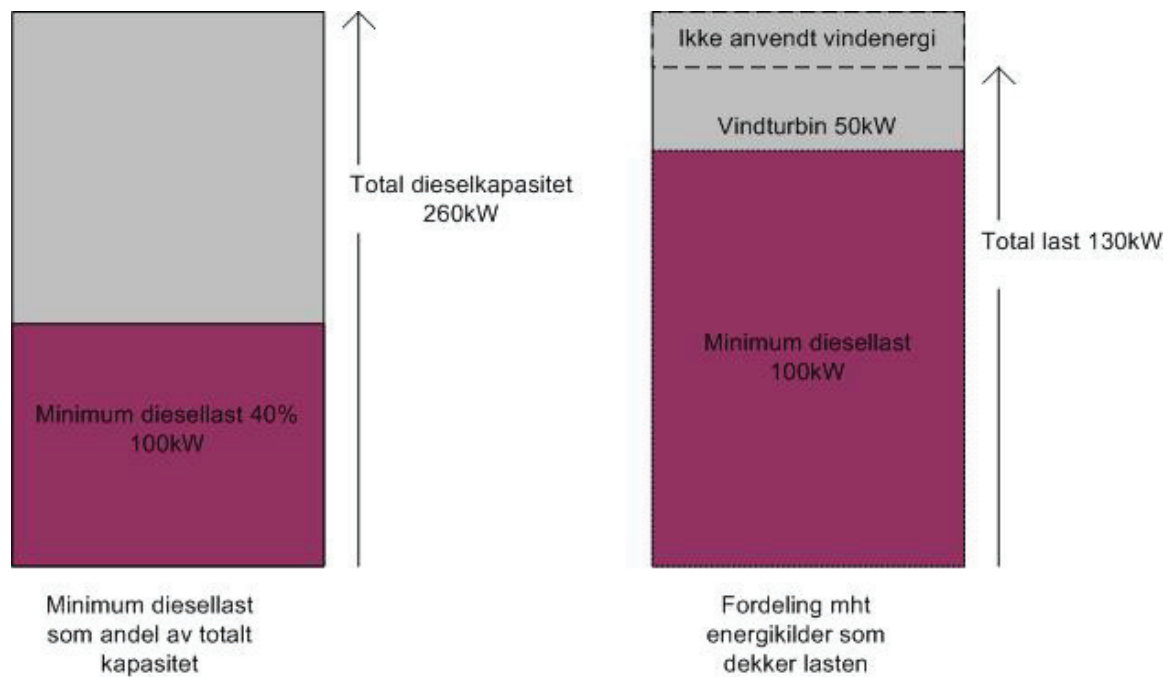
Kvaliteten og stabiliteten på energiforsyningen til Troll er svært viktig. Den isolerte beliggenheten og det barske klimaet gjør at konsekvensene av feil i energiproduksjonen kan få dramatiske konsekvenser. Det er også svært viktig med kontinuerlig forsyning til satellittantennen ved Troll(KSAT). Denne er per i dag sikret med back up fra en batteribank mot kortere avbrudd. Et kriterium som må ligge til grunn for valg av ny energiteknologi ved Troll er driftssikkerhet og lavt behov for vedlikehold. Den daglige driften og vedlikeholdet må kunne utføres av mannskapet på Troll.

4.1 Samspill mellom dieselgenerator og fornybar energi

Som nevnt i kapittel 2.2.2 sikres per i dag energiforsyningen på Troll gjennom to standard dieselaggregater, hver med en ytelse på 260 kW. Disse kjører halvparten av tida hver, for å hele tiden ha en i backup hvis den andre skulle få driftsproblemer. Anlegget ble oppgradert som en del av utbyggingen fra sommer til helårsstasjon. Det tidligere anlegget var på 65kW. Energiforbruket på Troll har ikke økt i takt med oppgraderingen av systemet. Resultatet av dette er at anlegget er svært overdimensjonert for dagens behov ved Troll.

Det er viktig for levetiden til dieselgeneratorer at de driftes innenfor et begrenset ytelsesintervall. Å drifte en dieselgenerator på for høy eller for lav last over lengre perioder vil forkorte levetiden til maskinene betydelig[14] Overdimensjonerte anlegg vil ha større sannsynlighet for å kjøre på for lav belastning. Vanligvis anbefales det ikke å kjøre et aggregat på lavere enn 40 % belastning over tid[14]. Introduksjon av ekstra kapasitet i form av fornybar energi i allerede overdimensjonerte systemer vil kun øke sannsynligheten for at generatorene må kjøre på for lav belastning. Det er svært viktig for et system som kombinerer fornybar energi med dieselaggregat at de to komponentene tilpasses hverandre i størrelse. Utfordringen er at systemet må kunne levere tilstrekkelig energi til enhver tid. Det betyr at hvis man kombinerer vind og diesel i et system, må dieselaggregatet kunne dekke hele lasten for de periodene der vindgeneratoren ikke produserer. Likevel er det ønskelig å utnytte så stor andel av tilgjengelig vind energi som mulig.

Som et eksempel på en slik problemstilling kan man ta for seg et tenkt system. Det har et dieselaggregat på 260kW, som vil si at laveste anbefalte driftsnivå er omtrent 100kW. I tillegg består systemet av en vindturbin med en kapasitet på 50kW. La oss tenke at på et gitt tidspunkt er lasten 130kW, samtidig som vindturbinen produserer for fullt. Som man kan se av figur 4.1, vil man i en slik situasjon ikke kunne utnytte all den tilgjengelige vindenergien dersom man ønsker å kjøre dieselaggregatet innenfor optimalt driftsområde.



Figur 4.1: Samproduksjon av fornybar energi med diesellopparat

Ettersom fornybar energi i form av vind eller sol ikke kan lagres eller kontrolleres, er man prisgitt å utnytte ressursen når den er tilgjengelig. Hvor stor andel av den fornybare energien som kan utnyttes, er avhengig av hvordan man velger å drifte diesellopparatet. Brenselbesparelsene, som er det økonomiske incentivet til å introdusere fornybar energi, vil selvsagt også begrenses av disse restriksjonene. Det er ønskelig når man designer et energisystem som kombinerer diesellopparat med fornybar energi, å kunne utnytte de tilgjengelige fornybare energiresursene så stor andel av tiden som mulig.

4.2 Lagring av energi

Flere løsninger er foreslått for å kunne utnytte en større andel av den fornybare energien i tradisjonelle kombinasjonssystemer. En mulighet er lagring av overskuddsenergi. En annen er å bruke overskuddsenergien til andre formål enn vanlig forbruk i systemet. På den australske Mawson Station dumper de overskuddsenergien i en elektrisk fyrkjel, og på den måten reduserer de brenselforbruket til oppvarming[15]. Mawson Station har oppnådd det som ansees å være en svært høy andel vindenergi, på gjennomsnittlig 34 % over en periode på fire år [16]

Lagring av energi forekommer stort sett naturlig i form av fossile brensler som kull og oljeprodukter, eller vann i innsjøer hvor man utnytter høydeforskjellen til energiproduksjon. Andre lagringsformer har blitt et viktig tema ettersom teknologier for å utnytte nye fornybare energikilder med uforutsigbar ressurstilgang har blitt mer vanlig. Blant de mulighetene som finnes er svinghjul, hvor energien lagres som kinetisk energi i et hurtig roterende hjul [17].

En annen mulighet er kjemisk lagring, for eksempel i batterier. Små batterier er vanligvis brukt i kombinasjon med solceller, blant annet i små systemer som skal levere strøm til hytter. Ved Troll finnes det en batteribank som har til hensikt å sørge for konstant energiforsyning til KSAT [10] i tilfelle dieselaggregatene må stanses for en kortere periode. Det finnes andre batterimoduler, som er blitt implementert med suksess i større isolerte energisystemer basert på kombinasjonen vind/diesel. Dette er vanadium-redoks batterier. Fordelen med disse batteriene er at de har svært rask reaksjonstid både på lading og utlading, og har svært god virkningsgrad [18]. Hensikten med slike batterier er ikke først og fremst lagring over tid. Disse batteriene brukes for korttidslagring, med den hensikt å kondisjonere effekten fra vindturbinene. Effektkurven fra en vindturbin vil være svært takkete, på grunn av hastighetsvariasjoner i vindkastene. Et dieselaggregat vil ikke kunne svare på så raske variasjoner, og noe av overskuddet vil dermed gå tapt. Hensikten med slike batterier er å la batteriene lades opp når effekten fra turbinene er høy, og lades ut når effekten er lav, og på den måten skape et jevnere tilskudd av fornybar energi [18]. På denne måten vil man kunne utnytte en større andel av vinden, og det vil være enklere å implementere en høyere andel vind. Effektivitetsvariasjonene er ikke like store for solceller, og dermed vil det sannsynligvis ikke være like aktuelt med en tilsvarende løsning der.

Kjemisk lagring kan også foregå i form av hydrogenproduksjon fra overskuddsenergi. Hydrogenproduksjon er kjent teknologi, og det produseres store mengder til industriformål hvert år. Hydrogen er et svært rent drivstoff, som kun produserer vanddamp som avgass. Hydrogenet har også den fordelen at det kan brukes både til drivstoff for transport i tillegg til elektrisitetsproduksjon for stasjonære formål. På øya Utsira utenfor Rogaland finnes et storskala hydrogenprosjekt [19]. Ti husstander forsynes med strøm fra to vindmøller. Overskuddet lagres i form av hydrogen som brukes til kraftproduksjon i en hydrogenerator i de periodene vindturbinene ikke produserer. Erfaringene fra Utsira er svært gode, men det gjenstår fremdeles noe før et slikt system er fullstendig konkurransedyktig i forhold til andre løsninger for isolerte områder. Hydrogenproduksjon finnes også på forsøksstadiet på Mawson Station, men hydrogenet brukes foreløpig bare til små applikasjoner [15]. En av utfordringene knyttet til produksjon og lagring av hydrogen er at hydrogen tar svært mye plass. Hensiktsmessig lagring av hydrogen er under svært høyt trykk og lav temperatur. Et annet problem er at hydrogen produseres fra vann. For å få vann tilgjengelig i Antarktis må man først bruke energi på å smelte is eller snø, noe som vil redusere energieffektiviteten i prosessen.

Felles for alle disse teknologiene er at de er nye og under utvikling. En utfordring er også knyttet til store energitap i prosessen. Et svært viktig kriterium for all teknologi som skal installeres i Antarktis bør være at teknologien er gjennomprøvd, solid og ha lavt vedlikeholdsbehov. Derfor bør alle nye installasjoner vurderes nøye ut i fra disse kriteriene. Av samme grunn er ikke storskala energilagring undersøkt videre i denne rapporten.

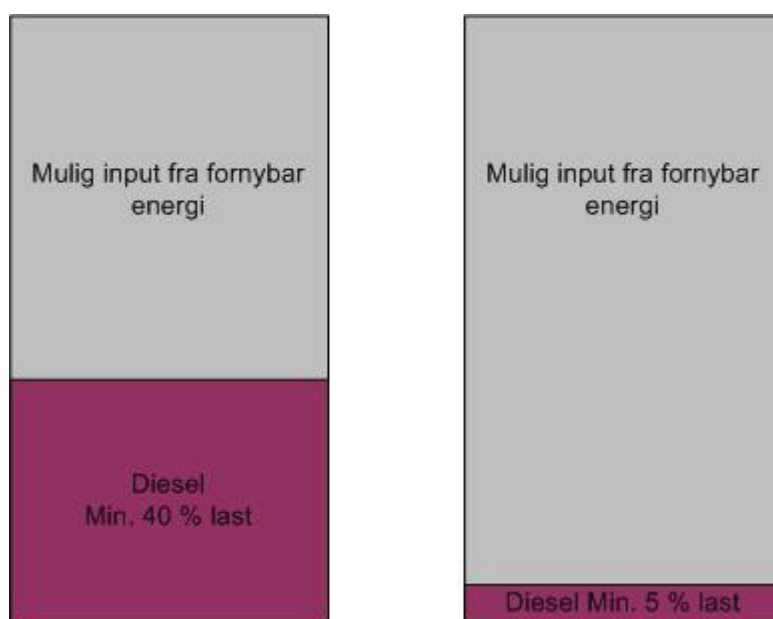
4.3 Low load diesel

To australske firmaer, Verve Energy og Powercorp, har undersøkt muligheten for å utnytte lokale fornybare energiresurser best mulig. På den måten kan de redusere avhengigheten av fossile brensel, og dermed også klimagassutslipp. Forsøkene ble

utført i flere små samfunn på vestkysten av Australia, hvor vindressursene er spesielt gode. Den største barrieren mot en høy andel fornybar energi i disse systemene viste seg å være den svært varierende effekten som leveres fra en vindturbin. En så ustabil kilde er vanskelig å integrere i stor andel i kombinasjon med annen kraftproduksjon. Rask respons fra dieselaggregatet blir nødvendig ved økende vindandel. En annen stor begrensning på andelen fornybar energi som lar seg utnytte er behovet for en spinnende reserve i dieselaggregatet, som må kunne ta over raskt hvis den fornybare energiproduksjonen stanser. Innenfor anbefalte driftsområde for dieselgeneratorer utgjør denne andelen ganske mye.

Fokuset ble lagt på at det nye systemet skulle kunne plasseres i områder hvor teknisk ekspertise ikke nødvendigvis er tilgjengelig til enhver tid [14], med andre ord skulle den tekniske barrieren ikke være noe høyere enn ved tradisjonelle dieselaggregat. Resultatet av arbeidet ble LLD, low load diesel. Dette er en modifisering av tradisjonelle dieselgeneratorer, som gjør det mulig å kjøre på lav last over en lengre periode uten at det har negativ effekt på generatorens levetid. Generatoren har også betydelig raskere reaksjonstid enn tradisjonelle dieselgeneratorer. LLD-generatorer kan kjøres på ned mot 5 % [20] over lengre perioder, og dermed tillate en høy andel fornybar energi i systemet.

Forskjellen mellom LLD og vanlige dieselaggregat illustreres i figur 4.2.



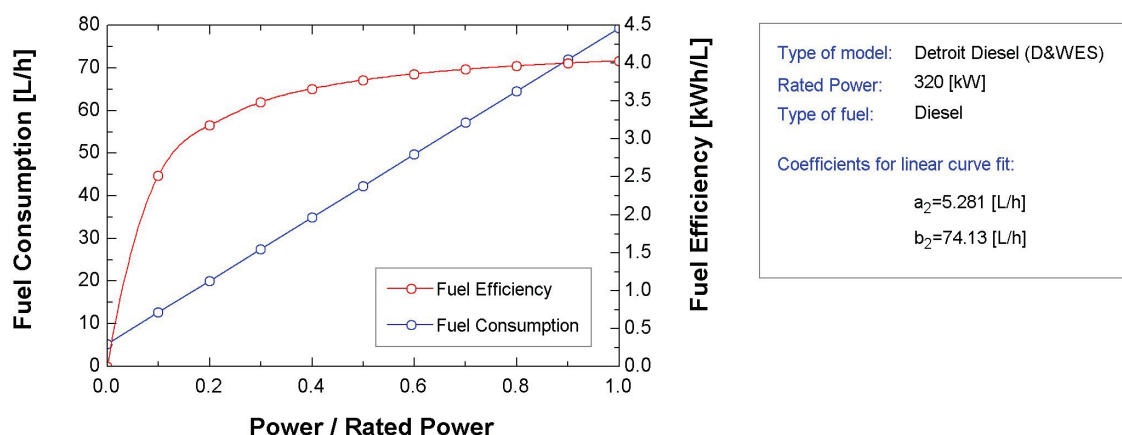
Figur 4.2: LLD vs standard diesel

Modifiseringene innebærer blant annet endringer på brenselsinjeksjonssystemet, kjølesystemet, og kontrollsystemet [20]. For å unngå at systemet kolliderer ved plutselig lastbortfall, må en spesiell dumplast knyttes til systemet [14]. Denne har fått navet Dynamic Grid Interface (DGI), og sørger for å balansere systemet ved tilfeller av lastbortfall eller for høy effekt fra turbinene, ved å dumpe energi inn i kjølesystemet til dieselaggregatet [20]. DGI kan også brukes til spennings og frekvenskontroll.

Resultatene ved bruk av LLD i samkjøring med vindgeneratorer i flere små samfunn på vestkysten av Australia er svært gode. I tradisjonelle vind-dieselsystemer er en vindenergiandel på mellom 10 og 20 % ansett som beste oppnåelige andel sett ut i fra optimale driftsforhold for systemet som en helhet[21]. Med LLD har man oppnådd vindenergiandeler som ligger gjennomsnittlig på over 40 % [20]. Dette vil selvsagt øke brenselbesparelsene kraftig, og dermed også redusere klimagassutslippene tilsvarende.

De minste aggregatene som leveres med LLD-teknologi er på 320 kW [22]. Med andre ord vil det innebære en økning i dieselkapasitet fra det man har på Troll per i dag. Likevel vil dette være en forbedring, da en 320 kW LLD-generator kan kjøre på ned mot 16 kW over lengre perioder.

Figur 4.3 viser data for dieselforbruk og brenseffektivitet for en LLD-generator. Data ble oppgitt i tre punkter for dieselforbruket fra [22], og deretter behandlet i et dataprogram (EES). Der ble det gjennomført en kurvetilpassning på bakgrunn av data for andre dieselgeneratorer, og kurven for brenseffektiviteten generert. Som man kan se av figur 4.3 har LLD-generatoren svært god virkningsgrad for lave belastninger. Det er svært fordelaktig når man ønsker å utnytte en høy andel fornybar energi i systemet.



Figur 4.3: Ytelse for LLD-dieselgenerator

4.4 Vindturbiner

Dette kapitlet tar for seg hvordan en vindturbin fungerer, hvordan den er satt sammen, og hvilke spesielle hensyns man må ta ved bruk i Antarktis. Dette presenteres noen aktuelle turbiner, for det presenteres en sol skal benyttes i simuleringene.

4.4.1 Sammensetningen av en vindturbin

De vanligste grunnleggende vindturbinkarakteristikkene er reguleringsmetode for rotoren, og generatortype. Andre karakteristikk inkluderer blant annet antall rotorblader og om turbinen er oppvinds eller nedvinds.

Hensikten med regulering av rotoren er å unngå skader på turbin og generator ved høye vindhastigheter. Effekten fra en vindmølle er gitt ved følgende uttrykk [23]:

$$P = \omega \cdot T \quad (1)$$

Hvor ω er rotasjonshastigheten, og T er dreiemomentet. Reguleringen av rotoren skjer ved å aktivt redusere dreiemomentet. De vanligste reguleringsmetodene er ”pitch” og ”stall”. ”Stall” er en passiv reguleringsmetode, det vil si at rotorbladene er formet slik at de bremser ved høye vindhastigheter. Til sammenligning er ”pitch” ordnet slik at man kan justere vinkelen på turbinbladene ut i fra vindhastigheten. ”Pitch” er den reguleringsmetoden som gir best effektfaktor for flere vindhastigheter, mens ”stall” – regulerte turbiner er optimalisert for en gitt vindhastighet.

Vindturbiner deles inn i om de har fast eller variabel hastighet. Fast hastighet betyr at rotoren roterer med en gitt hastighet for alle vindhastigheter. Effekten vil dermed variere med vindhastigheten, med mindre man bruker andre tiltak for å motvirke dette. Slike tiltak kan være ”pitch”-regulering av bladene, eller å bruke kraftelektronikk for å behandle effekten. Turbiner med variabel hastighet har høyere effektivitet, fordi de klarer å produsere mer optimalt over flere hastigheter. Turbiner med fast hastighet har et enklere system, med færre deler som dermed gir bedre pålitelighet.

Det er ofte store forskjeller på små og store vindturbiner. De store markedsføres mot selskaper som driver kommersiell kraftproduksjon, og som har råd til å betale mer for bedre utbytte. De mindre turbinene, som brukes i isolerte energisystemer, eller for private husholdninger, har ofte enklere og billigere teknologier for å presse prisene nedover.

Mens de fleste store vindturbiner er oppvinds, altså at en rotasjonsmekanisme styrer turbinen slik at vinden treffer rotorbladene før tårnet, er det vanligere for små turbiner at de er nedvinds. Det innebærer at vinden styrer retningen på turbinen. Dette forenkler mekanikken i turbinen, men gjør også at man vil tape noe effektmessig ettersom luftstrømmen mot turbinen vil bli mer turbulent når den treffer tårnet først.

Det vanligste generatorvalget i vindturbiner er induksjonsgeneratorer. En induksjonsgenerator består av en stator som har vindinger av et elektrisk ledende materiale, og en rotor som vanligvis består av elektrisk ledende metallstenger som sitter fast i en kjerne [44]. En eksiteringsstrøm blir satt på statorviklingene, som produserer et roterende magnetfelt. Hastigheten til magnetfeltet er gitt ved følgende ligning [24]:

$$N_s = 60 \frac{f}{p} \quad (2)$$

Der f er frekvensen på eksiteringsstrømmen, og p er antall magnetiske polpar. Dersom rotoren roterer raskere enn statorfeltet, altså raskere enn synkron hastighet, vil maskinen fungere som en generator. Den vil dermed levere spenning til en last eller et nett tilknyttet statorterminalene. For å oppnå dette kreves det at man har et gir for å øke rotasjonshastigheten fra vindturbinens hastighet på omtrent 30 til 60rpm, til mellom 1200 og 1800 for forskjellige induksjonsgeneratorer.

Det er flere faktorer som gjør induksjonsgeneratoren best egnet for storskala installasjoner, og tilknytning til distribusjonsnett. Blant annet krever induksjonsgeneratorer en ekstern kilde til reaktiv effekt [25], da denne forbruker reaktiv effekt for å sette opp det varierende magnetfeltet i stator. Reaktiv effekt kan trekkes fra sentralnettet, eller forsynes fra et kondensatorbatteri.

Alternativet til induksjonsgenerator er vanligvis en synkrongenerator. En synkrongenerator produserer strøm ved at en ekstern kilde mater DC-strøm inn i feltviklingene på rotor for å sette opp et konstant magnetfelt [25]. I tillegg er det viklinger på stator tilsvarende som i en induksjonsgenerator, som også her setter opp et roterende magnetfelt. En slik konfigurasjon gjør at de to magnetfeltene låser seg og roterer i synkron hastighet. En synkrongenerator opererer på en fast hastighet gitt av frekvensen på statorfeltet [24].

Effekten fra en synkrongenerator er gitt ved følgende ligning [26]:

$$P_{out,1\phi} = + \frac{V_T E_f}{X_s} \sin \delta \quad (3)$$

Der V_T er terminalspenningen, E_f er eksiteringsspenningen, X_s er den synkrone reaktansen og δ er vinkelen mellom rotormagnetfeltet og statormagnetfeltet.

I stedet for å sette opp rotorfeltet ved hjelp av feltviklinger, kan man velge å bruke permanentmagneter. Synkrongeneratorer med permanentmagneter er brukt i en del vindmøller i isolerte systemer, i slike tilfeller likerettes ofte spenningen til å levere DC [25]. Permanentmagneter er med på å gjøre konstruksjonen enklere, ettersom det fjerner behovet for slipringer, børster eller commutatorer for å overføre effekten fra rotoren [25].

Induksjonsgeneratorer krever som tidligere nevnt gir for å øke opphastigheten på rotoren. Gir er en svært fordyrende del av en vindturbin. For synkronmotorer er det mulig å ha et girfritt system, der rotoren roterer med samme hastighet som turbinen.

Det finnes svært mange forskjellige teknologier og kombinasjoner av løsninger for vindturbiner. I alle tilfeller handler det om å velge best mulig løsning for sitt bruk. For store vindmølleparker som har som mål å produsere mest mulig kraft for videresalg er det viktig å velge den teknologien som maksimerer kraftproduksjonen, hvis man derimot skal forsyne et avsidesliggende sted med lokal energi er det viktigere å satse på enkel og solid teknologi som sikrer energiforsyningen over tid.

4.4.2 Energiproduksjon

Effekten fra en vindturbin er gitt ved ligningen under [24], der C_p er den aerodynamiske virkningsgraden, V er vindhastigheten, ρ er lufttettheten og A er sveipet areal.

$$P(V) = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad (4)$$

Vindturbiner har kommet svært langt i forhold til virkningsgrad. Den maksimale teoretiske virkningsgraden C_p er på 0,59, det vil si at det bare er mulig å utnytte opp til 59 % av energien i den innkommende vinden. Den faktiske aerodynamiske virkningsgraden på state-of-the-art vindturbiner ligger mellom 40 og 50 % [27].

4.4.3 Spesielle utfordringer

Turbiner som skal kunne fungere i områder hvor man opplever sterk kulde krever at man tar spesielle hensyn til hvordan klimaet påvirker yteevnen. Det er viktig å velge materialer hvor styrken ikke reduseres som en følge av lave temperaturer. Vanlige stålkonstruksjoner kan bli sprø i kaldt klima [28]. Erfaringen fra International Energy Agency (IEA), som har samlet data fra vindmølleparker i kaldt klima er at det holder å bruke kuldebehandlet stål [29]. IEA sine erfaringer kommer fra vindmølleparker i Finland, Sverige, Sveits, USA og Canada. I Antarktis opplever man temperaturer under frysepunktet gjennom hele året. Det er også der man har registrert den kaldeste temperaturmålingen i verden, minus 89 °C [1]. Driftserfaringer med vindmøller i Antarktis er svært begrenset, men når det gjelder hva som er laveste akseptable temperatur for en turbin er det materialet i konstruksjonen som er den begrensende faktoren [28]. Dermed gjelder det å velge turbiner som er godkjent for lave nok temperaturer.

En annen utfordring knyttet til temperaturen er at effekten fra en vindmølle, som vi kan se av ligning (4), er lineært avhengig av lufttettheten ρ , som igjen avhenger av temperaturen T , lufttrykket p og den ideelle gasskonstanten R . ρ er gitt ved følgende uttrykk [24]:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5)$$

Ved svært lave temperaturer fører det til overproduksjon i generatoren, noe som kan være svært ødeleggende [29].

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{273+15}{273-20} = 1,138 \quad (6)$$

Som ligning (6) viser vil en temperaturendring fra 15 til -20 °C medføre en økning i lufttetthet på nærmere 14 %. Dette vil igjen øke effekten fra turbinen tilsvarende.

Dette gjelder bare for stall-regulerte turbiner. Med pitch-regulering kan man snu bladene på turbinen for å bremse effekten av vinden [30]. Dette vil være nødvendig å ta hensyn til i valg av turbin.

Lav temperatur vil også medføre et annet problem, nemlig ising på instrumentene. Det er derfor en viktig del av målingsarbeidet å måle isdannelsen når man planlegger vindturbiner i kaldt klima. Isdannelsen vil variere fra sted til sted, avhengig av nedbør og luftfuktighet [29]. Hvis mye is får anledning til å danne seg vil det begrense effekten fra turbinen, eller til og med kreve full driftsstans. Fallende is kan også være en fare for mennesker i nærheten. I områder med jevnlig isdannelse over lange perioder, anbefales det å investere i avisingsystemer [29][30]. Avisingsystemer vil være viktigst for turbinbladene og for instrumentene. Ising på bladene vil påvirke aerodynamikken og dermed redusere effekten. Ising på instrumentene vil kunne føre til stans i målinger, noe som kan føre til total driftsstans [29]. Ved Troll er luften svært tørr, og det er svært lite nedbør. Forventningen tilsier at det vil være lite problemer med ising. På den annen side vil det være lite håp om at isen skal smelte av seg selv hvis det først skulle fryse. Dermed vil det nok være nødvendig å vurdere installasjon av avisingsystemer ved en vindturbin på Troll.

4.4.4 Aktuelle turbiner

På Troll har de opplevd svært sterke vinder, målinger er registrert på opptil 110 knop, nærmere 60 m/s [11]. Dette er ekstreme vindhastigheter, som vil sette store krav til en eventuell vindturbin. Exmouth, Australia rammes jevnlig av sykloner. Sykloner er spiralformede vinder som oppstår over varme havområder [31], disse vindene kan nå hastigheter over 70m/s [32]. Områder som ofte rammes av sykloner vil ofte være lite aktuelle for vindturbiner, ettersom standard vindmøller ikke vil tåle de ekstreme vindhastighetene. I Exmouth har de likevel en vindmøllepark. Turbinene der er produsert av Westwind Turbines, og er spesiallaget for å tåle vindkast opp mot 210 km/h, eller 58 m/s. I tillegg kan hele tårnet med turbinen senkes, og legges på bakken på kort varsel, dersom ekstreme vinder meldes [33]. En annen fordel med Westwind sine turbiner er at man kan velge mellom flere turbinstørrelser og tårnkonfigurasjoner ut i fra lokale behov [34]. Det at disse turbinene kan heves og senkes relativt raskt, ved hjelp av motoriserte kjøretøy heller enn store heisekraner, gjør den også svært enkel å installere i avsidesliggende områder hvor større kraner ikke er tilgjengelig. Westwind leverer turbiner opp til 20kW [34].

På Australske Mawson Station leveres vindenergien fra to Enercon E-30 turbiner på 300kW [35]. Med det energibehovet som finnes på Troll vil disse turbinene være alt for store. I tillegg vil det by på problemer å installere såpass store turbiner ved Troll. Mawson Station ligger rett ved sjøen, og hadde den fordel at turbinene kunne fraktes med båt og installeres med kran fra båt.

På den belgiske Princess Elizabeth Station, som vil komme i drift fra 2009, søker de å dekke energibehovet i sin helhet med fornybar energi [36]. Stasjonen skal være forsynt med både vindturbiner og solceller [37]. De åtte vindturbinene er av typen Proven 6 [38] og leverer til sammen 48 kW. Proven er et engelsk firma som har spesialisert seg på å levere små vindturbiner [39]. Hovedmarkedet deres er til privat bruk, og mindre samfunn på kontinentet og i USA. Med små endringer i materialvalg og sveising kan de også brukes i Antarktis [38], Proven er godkjent for temperaturer ned til -60 °C og vindhastigheter opp mot 70 m/s [40]. Proven vil være aktuelt også ved Troll. Små vindmøller er enklere å frakte og installere enn de store. Flere vindmøller kan brukes til å dekke behovet.

4.4.5 Valg av turbin

Det er mange faktorer som spiller inn ved valg av teknologi på et så utsatt sted som Antarktis. Det er grunnleggende viktig at man velger teknologi som er laget og testet for å tåle påkjenningene fra det ekstreme klimaet. I tillegg er det nødvendig å velge en løsning som lar seg gjennomføre i praksis. Det er svært begrenset utstyr tilgjengelig ved Troll for å gjennomføre store operasjoner i form av å installere en vindmølle. Dermed bør man velge en lett og liten konstruksjon som reduserer behovet for tung maskinkapasitet, og heller installere flere turbiner for å dekke behovet. Det er også viktig å velge enkle konstruksjoner med gode driftserfaringer. Store serviceoperasjoner som krever at personell må hentes inn utenfra kan medføre lang nedetid for installasjoner i Antarktis. Normalt vedlikehold bør kunne utføres av personell ved stasjonen.

Ut i fra de ovennevnte retningslinjene kriteriene virker Proven 6 som den beste løsningen for Troll. Proven 6 er valgt fordi den er en enkel turbin, med robust konstruksjon. Flere faktorer bidrar til det. Blant annet er den en nedstrøms vindturbin, med stall-regulering og permanentmagnet synkrongenerator. Turbinen er dessuten dirkektekoblet, og har dermed ikke noe girsystem. Dessuten er Proven 6 lagd for å tåle ekstreme påkjenninger, og er designet for å fungere best mulig i isolerte strøk. En gjennomført sammensetning av enkle og solide løsninger, gjør at Proven 6 egner seg svært godt i Antarktis. Proven leveres dessuten med oppvarmingssystem, men det må verifiseres før en eventuell investering hva et slikt system dekker. På Troll vil det være nødvendig med avising på både turbinblader og instrumenter.

I de videre simuleringene brukes dermed data for Proven 6. Tilsvarende som for Princess Elizabeth Station vil det på Troll være nødvendig å installere flere vindturbiner.

4.5 Solenergiteknologi

I dette kapittelet skal aktuelle teknologier for å utnytte solenergi ved Troll presenteres, i tillegg til hvilke spesielle utfordringer som er knyttet til bruk av teknologien i Antarktis. Solenergi kan utnyttes på mange forskjellige måter. De som er aktuelle ved Troll er solceller, som omformer solenergien til elektrisitet, og solfangere, som bruker solenergien til å produsere varmtvann.

4.5.1 Solceller

Solceller omformer solenergien til elektrisk energi. Prosessen som gjør dette mulig kalles fotoelektrisk effekt. Det skjer når solstråler treffer en halvleder, et metall med spesielle elektriske egenskaper, og energien i solstrålen løsriver ladede partikler. Solceller gjør det mulig å utnytte disse ladningene som elektrisk strøm.

Halvledere former krystallstrukturer, elektronene i slike krystallstrukturer faller innenfor forskjellige energibånd. Disse kalles valensbåndet, og ledningsbåndet, og har en energiforskjell seg i mellom. Denne energiforskjellen kalles båndgapet. Halvledere i sin naturlige form har fylt opp valensbåndet, mens ledningsbåndet er tomt. Når et bånd er fullt kan ikke elektronene røre på seg, og stoffet vil fungere som en isolator. For å oppnå elektrisk ledningsevne i strukturen er det nødvendig å dope materialet med et stoff som har et flere eller færre elektroner enn det som er utgangspunktet i strukturen. Silisium er den vanligste halvlederen som brukes i solcelleproduksjon. Hvis silisium dopes med fosfor, som har et elektron mer enn silisium vil det ekstra elektronet ende opp i ledningsbåndet. Det kalles en n-type halvleder. Tilsvarende kan silisium dopes med bor som har et elektron mindre enn silisium, det vil dermed bli et hull i valensbåndet. Det kalles en p-type halvleder.

En solcelle er satt sammen av en n og en p-type halvleder. Siden det ene laget har overskudd og det andre har underskudd av elektroner, vil man i overgangen mellom materialene få et elektrisk felt. Dette skyldes at i området nært overgangen vil elektroner og hull diffusere over til motsatt side. Dette vil skape en forskjell i elektrisk ladning som gir et elektrisk felt. Det er ingen netto strøm i en slik celle. Hvis man derimot setter på en spenning utenfra vil strømmen øke sterkt. Strømmen i en slik celle er uttrykt ved følgende ligning [41], og kalles diffusjonsstrømmen:

$$I_D = I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

Der I_o er strømmen som går uten påtrykt spenning, k er Boltzmanns konstant, q er elektronladningen, T er temperaturen i kelvin og V er den påtrykte spenningen. En slik pn-overgang fungerer som en diode.

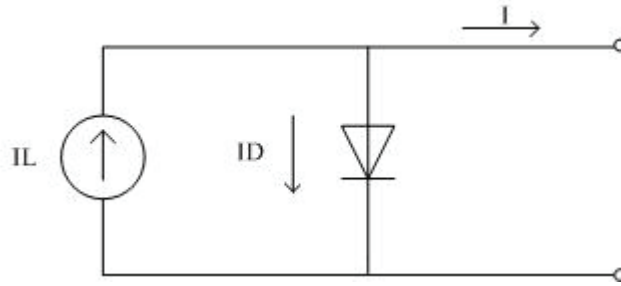
Lyset fra sola kan beskrives som små partikler som kalles fotoner. Hvert foton har en viss energi gitt ved følgende formel [41]:

$$E_{ph}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \quad (8)$$

Der h er Plancks konstant, c er lyshastigheten og λ er bølgelengden på lyset[41]. Fotoner som har høyere energi enn båndgapet, 1,12 eV for silikon, kan absorberes og dermed eksitere et elektron til ledningsbåndet. Hver eksitering genererer et elektron-hull par som dermed vil diffusere på samme måte som beskrevet overfor og skaper en elektrisk strøm. Strømmen som genereres på denne måten kan uttrykkes på følgende måte [41]:

$$I_L = qNA \quad (9)$$

N er antallet fotoner som klarer å eksitere et elektron, q er elektronladningen og A er arealet av halvlederen. En solcelle kan beskrives enkelt med en elektrisk ekvivalentkrets som vist i figur 4.4.



Figur 4.4: Solcelleekvivalentkrets

Figuren viser hvordan strømmen som genereres fra lyset fremstår som en strømkilde. Den totale strømmen fra solcellen reduseres ved at diffusjonsstrømmen da ladningene som bidrar til denne strømmen reduserer antall frie ladningsbærere. Uttrykket for den totale strømmen er gitt ved følgende uttrykk [41]:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

En enkel solcelle lages av en pn-overgang, som dekkes med et refleksfritt lag for å kunne utnytte mest mulig av strålingen. I tillegg har cellen kontakter for å lede strømmen, både på forsiden og baksiden. Kontaktene på forsiden sperrer for innstrålingen og må dermed oppta så lite areal som mulig. Flere solceller settes sammen til moduler. Hvor mange moduler man har i serie og parallell bestemmer spenningen og strømmen man får ut av modulen. Flere moduler trengs ofte til større anlegg.

4.5.2 Solfangere

Solfangere bruker solenergien til å varme opp varmt vann som kan brukes til tappevannsproduksjon eller til oppvarming. Ved Troll dekkes store deler av varmebehovet fra spillvarmen fra dieselgeneratoren. Per i dag er denne produksjonen tilfredsstillende [13], men hvis målet er å få deler av energiproduksjonen over på fornybar energi vil andelen produsert varme synke. Ved å bruke en LLD i samproduksjon med enten vindturbiner eller solceller vil man på dager med gode vind/sol forhold risikere svært lav belastning på dieselgeneratoren. Dette er ønskelig for å spare diesel, men da må varmebehovet dekkes på annet vis. Solfanger kan være en svært god løsning på dette problemet. Solfangere krever ikke i nærheten like store arealer som solceller for elektrisitetsproduksjon. På Princess Elizabeth Station har de 22m² med solfangere [37] til en stasjon med maksimal kapasitet på 25 personer.

Solfangere finnes i forskjellige varianter, men felles for alle er at de har en absorbatore, hvor transportmediet varmes opp av sola. Transportmediet er vanligvis vann [42], som sendes i rør eller kanaler over absorbatoreflaten. Solfangeren er ofte dekket med en gjennomsiktig plate for å redusere varmetapet til omgivelsene.

Nyttbar varmeeffekt fra en solfanger er gitt ved følgende ligning [43]:

$$Q_u = AF_r \left[G(t \cdot a) - U_1(T_{inn} - T_{omg}) - U_2(T_{inn} - T_{omg})^2 \right] \quad (11)$$

Hvor A er arealet til solfangeren, F_r er effektivitetsfaktoren på solfangeren, G er global stråling, t er transmisjonstallet for dekklaget, a er absorpsjonstallet, U_1 og U_2 er varmetapskoeffisienter, T_{inn} er snittemperaturen på vannet i solfangeren og T_{omg} er omgivelsestemperaturen.

Det finnes mange forskjellige teknologier for solfangere. En av disse er kalt vakuumsolfanger. Slike solfangere består av parallelle glassrør mot en reflekterende bakvegg. Det er vakuum i glassrørene, noe som gjør at vesken i røret fordampes ved forholdsvis lave temperaturer. Fordampingen gjør at den varme gassen stiger opp, hvor den kommer inn i en kondensator hvor temperaturen overføres til et transportmedium, og gassen kondenserer, for deretter å gå gjennom den samme prosessen på nytt [44]. Denne designen gir den fordelen at den utnytter stråling fra alle retninger, og vil dermed kunne utnytte refleksjonen fra snøen svært godt [44]. Denne typen solfanger er dessuten godt egnet for områder hvor innstrålingsvinkelen er høy, og er allerede valgt som foretrukket løsning flere steder på Grønland [44]. Ulempen med vakuumsolfangere er at de inneholder store mengder kobber, og dermed ikke er spesielt heldig for miljøet [45].

Solstrålingen vil variere i styrke over døgnet, og som følge av skydekket. For å kunne gjøre nytte av mest mulig av energien i sola, er det derfor nødvendig med et varmelager. Slike varmelager kan holde på varmen i vannet og forsyne huset i et par dager[43] hvis dårlig vær skulle begrense tilførselen av varme.

Det er spesielt viktig å ta hensyn til materialvalg i solfangere for bruk i Antarktis. Materialet må tåle store temperaturforskjeller, ettersom omgivelsestemperaturene er svært lave, mens høy innstråling vil bidra til å gi høy temperatur i transportmediet.

En solfanger vil per i dag ikke kunne dekke hele varmtvannsbehovet for en bygning. Dette skyldes blant annet varierende solinnstråling i løpet av året. Likevel kan en solfanger bidra med et substansielt varmetilskudd, som drives med gratis brensel.

4.5.3 Spesielle utfordringer

De klimatiske forholdene i Antarktis, dermed også på Troll, er temmelig ørkenpreget [1]. Lite nedbør, og mange soldager gir svært gode forhold for å utnytte solenergi. Ved Troll med sin sørlige beliggenhet på 72° sør [46] er det midnattssol store deler av sommeren. Snø og is gir dessuten svært gode refleksjonsforhold. Med solinnstråling målt til over 1000 W/m² er det svært gode forhold for solenergi.

Ulempene med solenergi er selvsagt at det er lange perioder hvor det ikke er noe energi å hente. I tillegg kreves det store arealer for å kunne få nok energi til å kunne forsvare investeringen. Likevel er det god korrelasjon mellom aktiviteten på Troll og potensialet for solenergi. Aktiviteten på Troll mangedobles i løpet av sommeren. I den samme perioden er det altså mulig å supplere energibehovet med ren, fornybar energi fra sola.

Den tidligere omtalte Princess Elizabeth Station skal utstyres med solceller i tillegg til vindturbiner for å leve opp til sin visjon om å være en nullutslippsstasjon. Ved Princess Elizabeth er 109,5 m² solceller montert på bygget, i tillegg til 270 m² som skal monteres i terrenget ved siden av. Til sammen vil dette kunne levere 50,6 kW [37]. Stasjonen ligger omtrent nøyaktig på samme breddegrad som Troll, og sesongvariasjonene må kunne påregnes å være sammenlignbare. Svakheten med å velge solceller er at det kreves store arealer. Plass er det for så vidt nok av i Antarktis, men problemet er at 99 % er dekket av is. Isen beveger seg, og egner seg dermed svært dårlig som underlag for faste installasjoner. Terrenget rundt Troll er ganske ulendt, men det burde være mulig å finne områder med plass for en solcelleinstallasjon. En annen svært aktuell mulighet er å montere solceller oppe på de eksisterende konstruksjonene, for å unngå å bruke mer av de åpne områdene. Hovedbygningen har en grunnflate på over 400 m² som muligens kan utnyttes.

Det er også viktig ved installasjon av solceller å ta hensyn til de lokale forholdene. Det er nødvendig å sørge for at modulene plasseres sånn at de ikke dekkes av snø som fokker seg foran dem. Det at Troll ligger så langt sør medfører at det vil være aktuelt med en ganske bratt helning på solcellene for å utnytte solenergien optimalt. Hvis disse monteres oppe på et flatt tak vil de fungere som et vindseil, og sannsynligvis ble revet av ganske fort. Det er derfor viktig å sørge for en solid festekonstruksjon og gjøre noen tiltak for å hindre at vinden får tak i solcellepanelene.

Når det gjelder forskjellige leverandører av solceller så finnes det svært mange av disse. Men til forskjell fra vindturbiner er variasjonsmulighetene større. Solcellemoduler kombineres til man oppnår ønsket effekt, eller har fylt opp tilgjengelige arealer. Dermed kan de fleste produsenter levere til det aktuelle behov. Forskjellene fra leverandør til leverandør er mye mindre enn innenfor vindturbiner, derfor er det ikke lagt noe særlig vekt på valg av leverandør i denne rapporten.

En ulempe med bruk av solfangere i arktisk klima er at vann, som brukes som transportmedium, ikke er direkte tilgjengelig. Dette er også tilfellet ved Troll, alt vann må smeltes fra is og snø, noe som er svært energikrevende. Likevel finnes det et oppvarmingssystem basert på vannbåren varme på Troll per i dag, og introduksjon av solfangere vil dermed ikke bety en ekstra belastning i forholdt til smelting av vann.

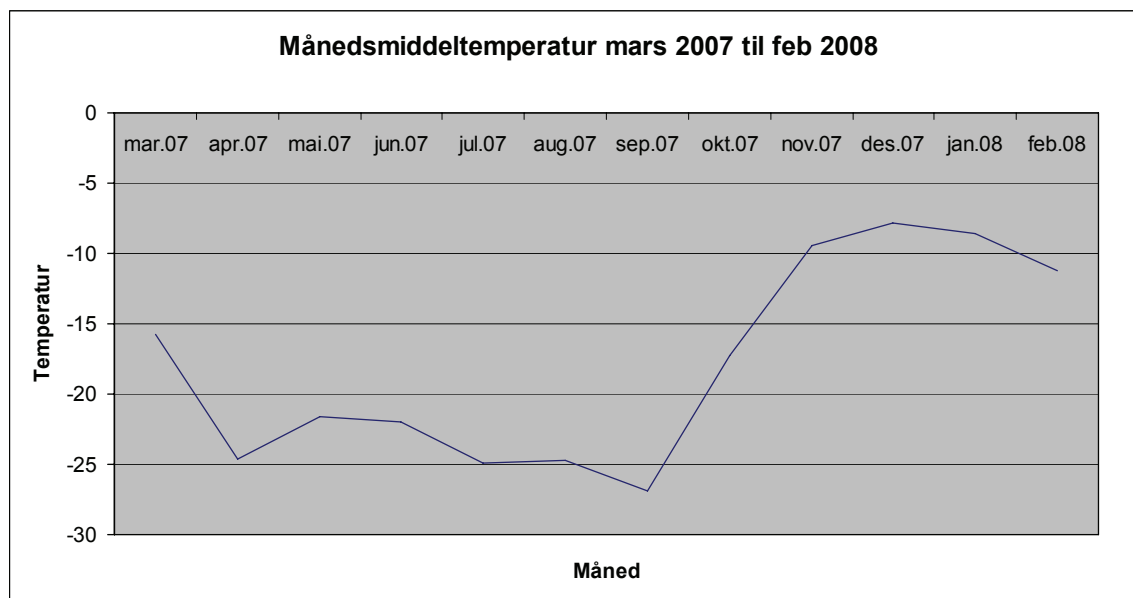
4.5 Sammenfatning av teori

Det viktigste grunnlaget for valg av teknologiske løsninger i Antarktis bør være solide, enkle, og godt utprøvde alternativer. Energiforsyningen er en av de mest kritiske funksjonene i et så hardt klima, og spesielt med en så avsidesliggende beliggenhet. Man bør fortrinnsvis velge løsninger som har vært testet i Antarktis, eller tilsvarende klima andre steder. På den måten øker man sannsynligheten for å unngå driftsproblemer knyttet til kaldt klima. Med å velge enkle løsninger menes at teknologien bør være robust og av en slik karakter at normalt vedlikehold kan gjennomføres av teknisk personell ved Troll. I denne rapporten vil modelleringen av energisystemet på Troll konsentrere seg om elektrisitetsproduksjon fra vind og sol, i kombinasjon med LLD-teknologi. Storskala lagring av energi utover det som finnes på Troll per i dag vil ikke være aktuelt i denne omgang. Et annet moment i modelleringen vil være å se på hvordan introduksjon av fornybar energi påvirker varmeproduksjonen i diesellaggregatet, og hvor mye av varme som kan erstattes av

solfangere. På grunn av beliggenheten til Troll er det ønskelig å velge flere små vindturbiner, heller enn en stor, da disse vil være enklere å montere uten et stort maskineri til stede.

Kapittel 5 Ressursgrunnlag for fornybar energi, og klimatiske forhold ved Troll

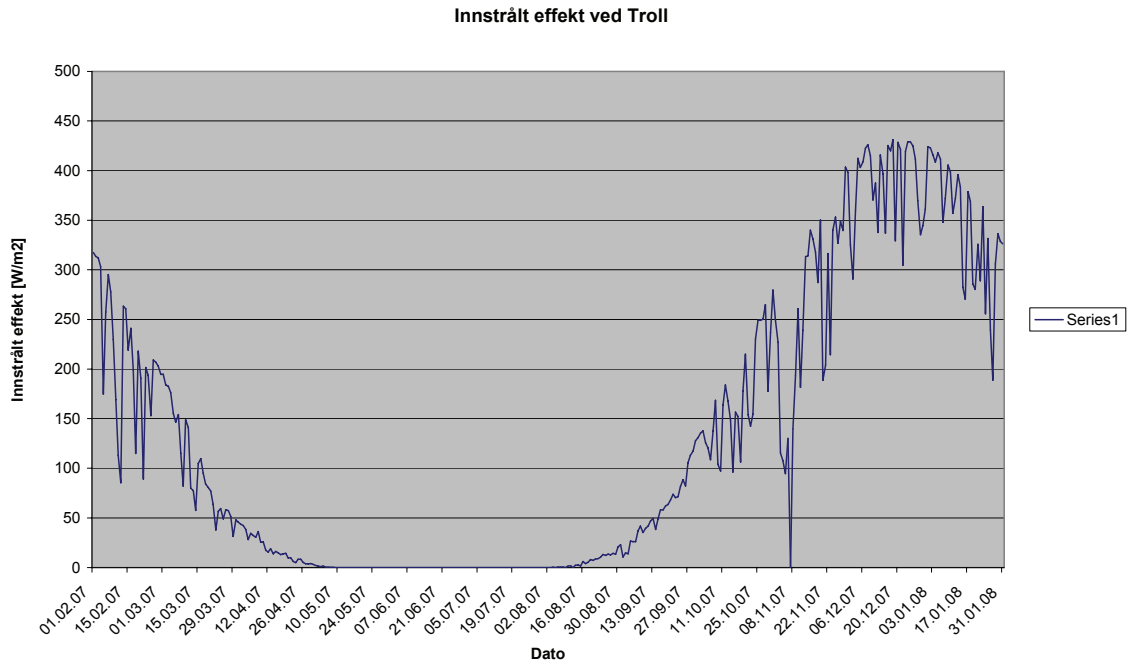
Klimaet i Antarktis er et av de hardeste i verden. Selv i sommerhalvåret vil temperaturene minne om en god vinterdag i Norge. Månedlige gjennomsnittstemperaturer for Troll vises i figur 5.1.



Figur nr 5.1: Månedsmiddeltemperaturer ved Troll [47]

Med gjennomsnittstemperaturer som til enhver tid befinner seg under frysepunktet setter det store krav til utstyr og materialvalg. Det er nødvendig å forsikre seg om at teknologien vil tåle de ekstreme påkjenningene som venter i Antarktis. Store områder i Antarktis er preget av svært lite nedbør. Selv om kyststrøkene kan få rikelige mengder, karakteriseres mesteparten av innlandsisen som ørkenområder, med ned mot 50mm nedbør i løpet av et år [1]. Den meteorologiske stasjonen ved Troll måler ikke nedbør, men med sin beliggenhet drøye 20 mil fra kysten, ligger Troll i et område med svært lite nedbør.

Troll ligger på 72° sørlig bredde, og når det gjelder antall soltimer per dag over året, kan forholdene sammenlignes med det man opplever på Nordkapp. Troll registrerer både mørketid og midnattssol. Sesongene er derimot omvendt av i Norge, ettersom Troll ligger på den sørlige halvkule. Derfor er det midnattssol fra midten av mai til midten av august. Som tidligere nevnt ligger Troll i et område med tilnærmet ørkenklima, og opplever dermed mye fint vær. I sommersesongen er det derfor svært gode forhold for å utnytte solenergi, med jevnt høy innstråling. Dette kan man tydelig se av figur 5.2.



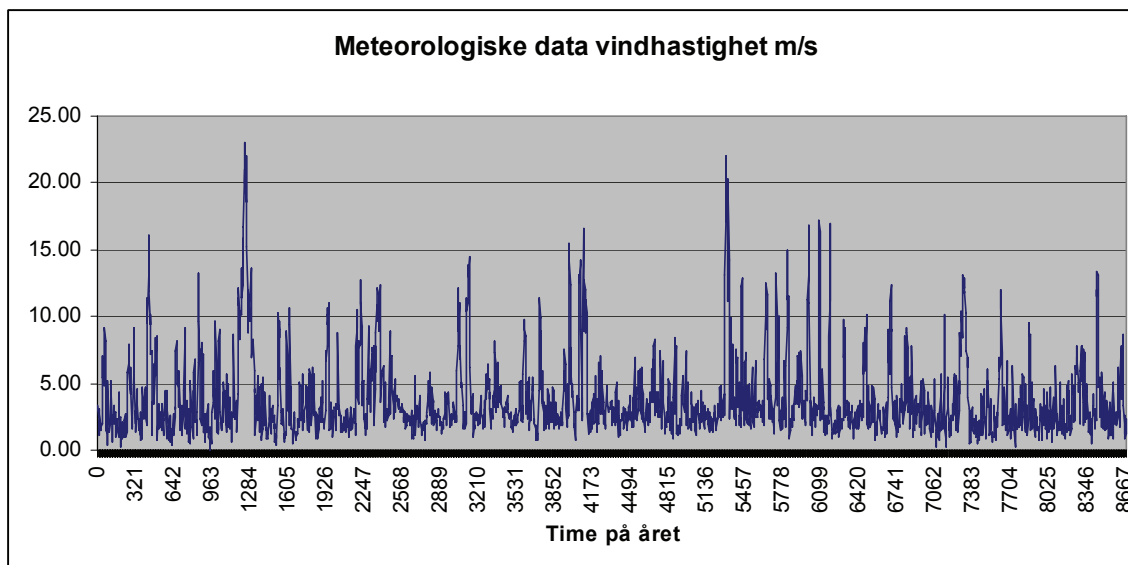
Figur 5.2: Innstrålt effekt døgnsnitt

Nivået på innstrålingen er i januar det samme som man kan registrere i Osloområdet i juli [4]. Forskjellen er at på Troll har man midnattssol, og omgivelsene er dekket av snø. Det siste gjør at man vil få mye refleksjon fra underlaget, og dermed kan utnytte en større andel av den diffuse strålingen.

Geografien i Antarktis er preget av et høyt platå i innlandet, som skråner ut mot kysten på alle kanter. Dette er med på å skape de dominerende vindmønstrene på kontinentet. Kald luft fra høyden faller ned over varmere luft ved kysten. Dette skaper svært jevne sterke vinder langs kysten, mens forholdene er mer varierende i innlandet.

Vindstyrken er blitt målt på den meteorologiske stasjonen på Troll over en lengre periode. Et slikt grunnlag er dessverre ikke tilstrekkelig for å basere en vurdering om å installere vindmøller på. Ytterligere målinger ble startet ved årsskiftet 2007/08 i regi av Troms Kraft. Det finnes strenge krav til målinger som må utføres i prosjekteringsfasen av en vindmøllepark. Forholdene på Troll blir i en litt annen skala, men likevel er det viktig å ha et solid datagrunnlag for å ta en beslutning om å installere en vindturbin. Det er også viktig å velge riktig plassering, slik at man får mest mulig nytte av turbinen. Det er vanlig å bruke målte vinddata som input i simuleringer for å finne den optimale plasseringen av turbinene i en vindmøllepark. På Troll er det aktuelle området rimelig lite ettersom man ønsker å begrense inngrepene i naturen.

Figur 5.3 viser målte vindhastigheter på Troll over et år, fra januar til desember. Dette er de meteorologiske dataene som foreligger. Dataene er tretti minutters snittverdier. Det er disse dataene simuleringene er utført på bakgrunn av.



Figur 5.3: Vindhastigheter målt ved Troll

Målingene fra Troms Kraft ble tilgjengelig mot slutten av perioden som var satt av til arbeidet med denne rapporten. Data fra perioden mellom januar og starten av mai 2008 viser at nivået er omtrent akkurat det samme som det man har sett i de meteorologiske målingene når man ser på data som er målt ti meter over bakken, og for tretti minuttss gjennomsnitt av hastighetene. Ettersom det ikke var noen forskjell å spore utover det som må kalles naturlige variasjoner fra år til år, ble det ikke gjort noe for å generere en ny årsprofil på bakgrunn av målingene fra Troms Kraft for å bruke i simuleringene. Den totale gjennomsnittsvindhastigheten for de meteorologiske dataene er på 3,97 m/s, mens samme tall for Troms Krafts data er 3,69 m/s. Til sammenligning er den gjennomsnittelige vindhastigheten på Princess Elizabeth Station 5,5 m/s [37]. Gjennomsnittshastigheten kan være et villedende tall ettersom svært høye vindhastigheter vil bidra til et høyere snitt, men for de fleste turbiner vil vindhastigheter over 25 m/s føre til at de må stanse produksjonen for å beskytte turbinen. Det er ønskelig med jevnt høye vindhastigheter for å oppnå best mulig utbytte fra vindturbiner. Hvis man ser på figur 5.3 virket det nærliggende å tro at en gjennomsnittshastighet på oppunder 4 m/s gir et rimelig godt bilde av situasjonen. Fra effektkurven til Proven 6 [Se vedlegg nr. 3], som er den valgte turbinen til bruk ved Troll, får man at for 4 m/s produseres 500 W. Det gir et forholdsvis lite bidrag mot en last på flere titalls kilowatt.

Kapittel 6 Modelling og simulering

I prosjektoppgaven ble det utviklet et par svært enkle generiske modeller for å illustrere nivået på besparelsene man kan forvente ved å introdusere fornybar energi i energisystemet på Troll. Nå er modellene utviklet til å inkludere spesifikke modeller for flere av de sentrale komponentene som ble presentert i teorikapittelet. Modellene er laget i simuleringsprogrammet TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation) som er utviklet for å studere energiflyten i fornybare energisystemer.

6.1 Simuleringsverktøy

TRNSYS er en programvare som i hovedsak brukes til simulering av termiske energisystemer. Den har blitt utviklet gjennom mer enn tjue år, og har sin opprinnelse ved solenergilaboratoriet ved University of Wisconsin. TRNSYS er skrevet i programmeringsspråket Fortran, og har svært gode muligheter for at den enkelte bruker kan programmere sine egne komponenter og inkludere disse. På denne måten har TRNSYS utviklet seg til å omfatte komponenter utover kun det termiske, og har blitt et solid verktøy for simuleringer av fornybare energisystemer..

TRNSYS består av en mengde komponenter eller typer. Hver type beskriver en isolert del av energisystemet, som et solcellepanel eller et dieselaggregat. Alle typene er bygget opp på samme måte. De representeres med et ikon i det grafiske brukergrensesnittet, og ved å trykke på det kan man redigere parametrene til komponenten. Hver type har både parametere og inputverdier, og produserer på bakgrunn av disse individuelt spesifiserte outputverdier. TRNSYS er bygd opp av første ordens differensialligninger som beskriver fysiske fenomener og prosesser. De matematiske modellene presenteres ytterligere i kapittel 6.2.

Sammensatte systemer modelleres ved at enkeltkomponenter knyttes sammen til å utgjøre en helhet. På denne måten kan komponenter forsyne hverandre med inputdata. Dessuten finnes det et utvalg støttefunksjoner som utfører databehandling eller beregninger som ikke dekkes av de opprinnelige typene.

De simuleringene som har blitt utført i dette prosjektet er gjort i TRNSYS versjon 16.01.003

6.2 Matematisk beskrivelse av de viktigste komponentene

Bak ikonene i brukergrensesnittet i TRNSYS ligger de matematiske modellene av komponentene. Disse ligger til grunn for beregning av alle aktuelle parametere. For noen av komponentene er modellene svært omfattende, og inkluderer mange parametere, mens andre er enklere. Dette kapittelet vil ta for seg de mest sentrale komponentene i modelleringen av energisystemet på Troll, og hvordan de er bygget opp. Ytterligere beskrivelse finnes i [49], hvor ligningene er hentet fra.

6.2.1 Diesलगeneratoren Type 120

Diesलगeneratoren [49] i TRNSYS finnes i to versjoner, en generisk og en spesifikk modell. Den generiske modellen baserer seg på data for dieselforbruk oppgitt av modellen, til sammenligning kan man i den spesifikke modellen spesifisere data for dieselforbruk selv basert på en aktuell generator man ønsker å modellere. For den spesifikke modellen må man inkludere kurven for dieselforbruk for forskjellige laster som en ekstern fil. Data for den generiske modellen bruker en fuel efficiency curve basert på gjennomsnittet fra fem forskjellige diesलगeneratorer.

Dieslmodellen inneholder også en database av andre brenseltyper den kan kjøres på.

Tabell 6.1: Variabler i matematisk modell av diesलगenerator

Variabler	Måleenhet	Beskrivelse
P_{DEGS}	[W]	Effekt
$P_{DEGS, rated}$	[W]	Merkeeffekt
N_{DEGS}	[-]	Antall generatorer
X	[-]	Normalisert effekt
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumstrøm brensel
ρ	[kg/m ³]	Tetthet brensel
LHV	[J/kg]	Lavere brennverdi

Elektrisk modell:

Normalisert effekt:

$$X = \frac{P_{DEGS}}{P_{DEGS, rated}}$$

Elektrisk virkningsgrad:

$$\eta_{el} = \frac{P_{DEGS}}{\rho_{diesel} \cdot \dot{V}_{diesel} \cdot LHV_{diesel}}$$

Total elektrisk effekt:

$$P_{total} = N_{DEGS} \cdot P_{DEGS}$$

Brenselforbruk:

Brenselforbruk:

$$\dot{V} = a + bX$$

Brenselvirkningsgrad:

$$\eta_{fuel} = \frac{P_{DEGS}}{\dot{V}_{diesel}}$$

Totalt brenselforbruk:

$$\dot{V}_{total} = N_{DEGS} \cdot \dot{V}_{diesel}$$

Termisk modell:

Varmetap i generatoren:

$$Q_{waste} = N_{DEGS} \cdot P_{DEGS} (100 - \eta_{el}) / \eta_{el}$$

Ekstern datafil:

For den spesifikke modellen av dieselgeneratoren oppgis dieselforbruket for forskjellige belastninger som en lineær kurve på formen $a + bX$, der parameterne a og b sammen med merkeeffekt på aggregatet er oppgitt. Kurven for LLD-generatoren finnes i figur 4.3 i kapittel 4.3. Den eksterne filen som ble brukt i simuleringene av diesellaggregatet i denne rapporten finnes i vedlegg nr. 2.

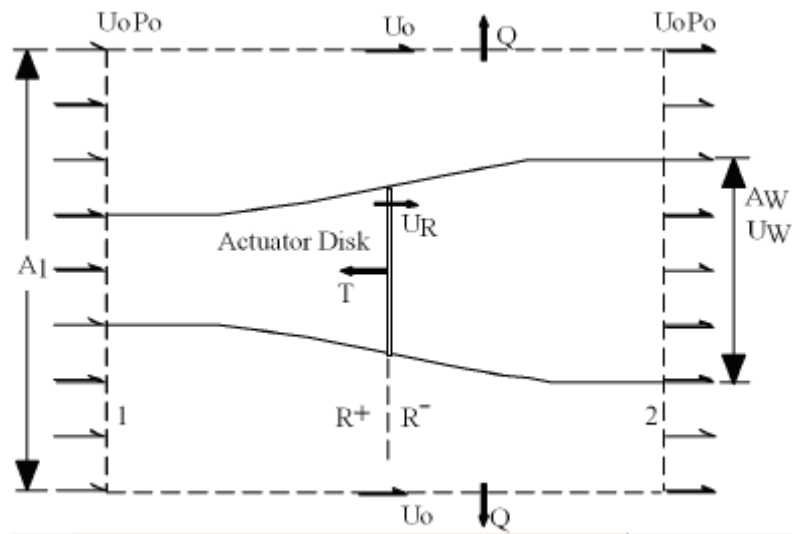
6.2.2 Vindturbinmodell Type 90

Den matematiske beskrivelsen av type 90 er svært omfattende [49]. Det vil ikke være interessant å inkludere alt i denne rapporten, for ytterligere informasjon henvises det til dokumentasjonen i TRNSYS. Hovedpunktene i den matematiske modellen vil presenteres under.

Tabell 6.2: Variabler i matematisk modell av vindmølle

Variabler	Måleenhet	Beskrivelse
P	[W]	Effekt
A	[m ²]	Areal
U	[m/s]	Vindhastighet
D	[kg/ms ²]	Trykkraft
ρ	[kg/m ³]	Lufttetthet
C_p	[-]	Virkningsgrad
g	[m/s ²]	Tyngdeakselerasjon
R	[J/Kmol]	Ideell gasskonstant
T	[K]	Omgivelsestemperatur

For å kunne modellere hvor stor andel av energien i vinden en turbin kan klare å trekke ut brukes i TRNSYS modellen vist i figur 6.1. Et kontrollvolum passerer turbinen som modelleres som en "actuator disc", eller en turbin med uendelig antall blader. I tillegg antar man at luftstrømmen er konstant, inkompressibel, ikke-roterende og ved konstant temperatur. Ingen luftstrøm beveger seg over grensene til kontrollvolumet. Dessuten går man ut i fra at punkt 1 er så langt oppstrøms, og punkt 2 så langt nedstrøms at man opplever "steady-state" forhold. Ingen endringer skjer i kontrollvolumet ved disse punktene som følge av vindturbinen.



Figur 6.1: Kontrollvolummodell av vindturbin [49]

Med bakgrunn i massebalansen og bevaring av momentet i horisontalretningen kommer mann fram til følgende uttrykk for kraften på turbinen:

$$D = \rho A_w U_w (U_0 - U_w) \quad (12)$$

Dette utvikles videre ved å bruke Bernoullis ligning til å beregne trykkdifferansen over turbinen. Ved denne tilnærmingen får man følgende uttrykk for trykkraften:

$$D = \frac{1}{2} \rho A_R (U_0^2 - U_w^2) \quad (13)$$

Ved å kombinere de to ovennevnte ligningene får man følgende uttrykk for vindhastigheten ved rotoren:

$$U_R = \frac{(U_0 + U_w)}{2} \quad (14)$$

Som vi kan se er vindhastigheten ved rotoren gjennomsnittet av hastigheten før og etter rotoren. Effekten fra turbinen kan dermed uttrykkes som trykkraften ganget med vindhastigheten:

$$P = D \cdot U_R \quad (15)$$

Ved å sette inn i uttrykket og omorganisere får man følgende uttrykk for effekten, der C_p er virkningsgraden til turbinen:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A_R U_0^3 \quad (16)$$

Størrelser som påvirker effekten fra turbinen:

Lufttetthet:

Effekten fra vindturbinen er direkte avhengig av lufttettheten ρ , som vi kan se av ligning (4) i kapittel 4.4.2. Lufttettheten er igjen avhengig av lufttemperaturen og høyden over havet. Avvik fra den lufttettheten turbinen er designet for kan få store konsekvenser. Derfor er det svært viktig å inkludere effekten av endret lufttetthet i simuleringene.

Følgende ligning beskriver trykkendringer som følge av endring i høyde over havet:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (17)$$

Ideell gasslov:

$$p = \rho RT \quad (18)$$

Ved å kombinere de to ovennevnte ligningene og anta konstant temperatur får man følgende uttrykk for trykkendring mellom to forskjellige høyder:

$$p_2 = p_1 e^{\left[-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT}\right]} \quad (19)$$

Temperaturen faller lineært som en funksjon av høyde over havet etter følgende formel, hvor B er en konstant med størrelsen 6,5K/km:

$$T(z) \approx T_0 - Bz \quad (20)$$

Ved å inkludere variasjon i temperatur på grunn av høydeforskjell får man følgende uttrykk for trykkendring over samme høydeendring:

$$p_2 = p_1 \left(1 - \frac{Bz}{T_0}\right)^{\frac{g}{RB}} \quad (21)$$

Eksponenten $g/RB = 5,26$ for luft og $T_0 = 288\text{K}$.

Ekstern datafil:

Vindturbiner finnes i alle størrelser, og mange forskjellige konfigurasjoner. Data for den spesifikke vindgeneratoren tas inn gjennom en ekstern datafil. Denne filen er ganske omfattende, og beskriver fysiske størrelser ved turbinen samt yteevne og ytre forhold under testing av turbinen.

Den eksterne filen som er brukt i simuleringene av vindturbinen ved Troll finnes i vedlegg nr. 3.

6.2.3 Solfangermodellen Type 71

TRNSYS-biblioteket inneholder flere typer solfangere. Simuleringene i denne rapporten er kjørt med type 71, som er en vakuumbjør-solfanger, som i kapittel 4.5.2 ble presentert som den beste solfangerteknologien for bruk i Antarktis.

Den matematiske modellen av solfangeren er omfattende, derfor blir bare de viktigste ligningene blir presentert her. Dersom ytterligere informasjon er ønskelig henvises det til TRNSYS' dokumentasjon [49].

Tabell 6.3: Variabler i matematisk modell av solfanger

Variabler	Måleenhet	Beskrivelse
η	[-]	Virkningsgrad
Q_u	[W]	Termisk effekt
A	[m ²]	Areal av solfanger
I_T	[kJ/hm ²]	Global stråling inn på solfangeren
F_R	[-]	Total varmeopptakskoeffisient
$(\tau\alpha)$	[-]	Produktet av transmittansen og absorbtansen
$(\tau\alpha)_n$	[-]	$(\tau\alpha)$ ved normal innfallsvinkel
$(\tau\alpha)_b$	[-]	$(\tau\alpha)$ for direkte stråling
$(\tau\alpha)_d$	[-]	$(\tau\alpha)$ for diffus stråling
$(\tau\alpha)_g$	[-]	$(\tau\alpha)$ for reflektert stråling fra bakken
U_L	[kJ/hm ² K]	Varmetapskoeffisient
$U_{L/T}$	[kJ/hm ² K ²]	Varmetapskoeffisientens avhengighet av temp
T_i	[°C]	Innløpstemperatur
T_a	[°C]	Omgivelsestemperatur
T_o	[°C]	Utløpstemperatur
T_{av}	[°C]	Gjennomsnittstemperatur i solfangeren
a_o	[-]	Maksimum av solfangerens virkningsgrad
a_1	[kJ/hm ² K]	Negativ førsteordens koeffisient i uttrykk for η
a_2	[kJ/hm ² K ²]	Negativ andreordens koeffisient i uttrykk for η
\dot{m}	[kg/h]	Massestrøm under bruksforhold
\dot{m}_{test}	[kg/h]	Massestrøm under testforhold
C_{pf}	[kJ/kgK]	Varmekapasitet for transportmedium
β	[°]	Solfangerens vinkel i forhold til underlaget
ρ_g	[-]	Reflektansen i underlaget

Matematisk beskrivelse:

Solfangerens termiske effektivitet er gitt ved følgende ligning:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (22)$$

Ligningen kan skrives om til følgende uttrykk:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(\Delta T)}{I_T} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{I_T} \quad (23)$$

Parameterne a_0 , a_1 og a_2 er vanligvis tilgjengelig som en del av datagrunnlaget for solfangere. Hvordan man definerer ΔT har naturligvis en innvirkning på resultatet. Flere alternative tolkninger er som følgende:

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= T_i - T_a \\ \Delta T_{av} &= T_{av} - T_a \\ \Delta T_o &= T_o - T_a \end{aligned} \quad (24)$$

Parameterne a_0 , a_1 og a_2 må tilpasses ut i fra hvilken definisjon man velger for ΔT . Hvis man velger en definisjon basert på gjennomsnittsverdier for temperaturen må uttrykket for effektiviteten korrigeres. I TRNSYS brukes ΔT_i , som er den opprinnelige delen av uttrykket. Dette har ikke blitt endret på i simuleringene.

Hvis strømningsraten i solfangeren er en annen enn den som ble målt under testing av solfangeren, er det nødvendig å korrigere for dette i beregningene. F_R , som er varmetransport effektivitetsfaktoren, endres med følgende faktor:

$$r_1 = \frac{F_R U_L' |_{use}}{F_R U_L' |_{test}} = \frac{F_R (\tau\alpha)_n |_{use}}{F_R (\tau\alpha)_n |_{test}} = \frac{\frac{\dot{m} C_{pf}}{AF'U_L} \left(1 - e^{-\frac{AF'U_L}{\dot{m} C_{pf}}} \right) |_{use}}{\frac{\dot{m}_{test} C_{pf}}{AF'U_L} \left(1 - e^{-\frac{AF'U_L}{\dot{m}_{test} C_{pf}}} \right) |_{test}} \quad (25)$$

$F'U_L$ er gitt ved følgende formel:

$$F'U_L = -\frac{\dot{m} C_{pf}}{A} \ln \left(1 - \frac{F_R U_L' A}{\dot{m} C_{pf}} \right) \quad (26)$$

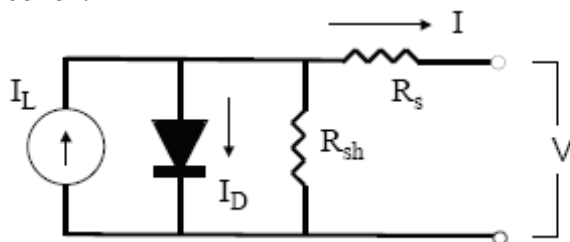
Det må dessuten også korrigeres for andre strålingsforhold enn de som ble registrert under testingen. Man går ut i fra at testforholdene er sol og skyfritt vær, og normal innfallsvinkel for strålingen. $F_R(\tau\alpha)_n$ er beregnet ut i fra normale forhold. Korreksjonen er gitt ved forholdet $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$. Korreksjonsfaktoren er gitt ved:

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{I_{bT} \frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \frac{(\tau\alpha)_d}{(\tau\alpha)_n} + \rho_g I \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \frac{(\tau\alpha)_g}{(\tau\alpha)_n}}{I_T} \quad (27)$$

Data for $(\tau\alpha)_b/(\tau\alpha)_n$ suppleres fra en ekstern datafil. Simuleringene i TRNSYS er utført med defaultdata.

6.2.4 Solcellemodell Type 180

Solcellen modelleres med en ekvivalentkrets som den man ser i figur 6.2. I_L er den lysgenererte strømmen i cellen, representert av en strømkilde i figuren. I_D er strømmen gjennom dioden som representerer p-n overgangen i cellen. Differansen mellom disse to strømmene er I , og representerer strømmen ut fra cellen [40]. R_s er en motstand som representerer omskete tap i cellen, mens R_{sh} er en shuntmotstand. R_{sh} skyldes urenheter i solcellen som reduserer strømmen på grunn av rekombinasjon. V er spenningen over cellen.



Figur 6.2: Solcelle ekvivalentkrets TRNSYS [49]

Både enkeltceller, og større moduler kan modelleres ved hjelp av diodemodellen. Men det er viktig å spesifisere hva man modellerer. I type 180 modelleres enkeltceller på denne måten, og man må oppgi antall celler i serie og parallell i modulen man ønsker å modellere i brukergrensesnittet i TRNSYS.

Tabell 6.4: Variabler i matematisk modell av solcelle

Variabler	Måleenhet	Beskrivelse
I_{cell}	[A]	Strøm i cellen
G_T	[W/m ²]	Innstråling
U_{cell}	[V]	Cellespenning
I_o	[A]	Mørkestrømmen
a	[-]	Forholdstall basert på k , T og q
P_{cell}	[W]	Effekten fra en enkelt celle
P_{total}	[W]	Effekten fra hele modulen
U_{oc}	[V]	Spenningen ved åpent krets
η	[-]	Virkningsgrad
A_{cell}	[m ²]	Areal
N_s	[-]	Antall celler
U_L	[W/m ² K]	Varmetapskoeffisient
$T_{amb,NOCT}$	[C]	Omgivelsestemp ved NOCT
$T_{c,NOCT}$	[C]	Celletep ved NOCT
$\tau\alpha$	[-]	Produktet av transmittansen og absorbtansen
$I_{sc,ref}$	[A]	Kortslutningsstrøm
I_{mp}	[A]	Maximum power point strøm
U_{mp}	[V]	Maximum power point spenning
μ_{Isc}	[A/K]	Temperaturkoeffisient(TCMODE2)
μ_{Uoc}	[V/K]	Temperaturkoeffisient(TCMODE2)
$G_{T,NOCT}$	[W/m ²]	Innstråling ved NOCT(TCMODE2)
C_T	[J/m ² K]	Termisk kapasitans (TCMODE3)

Elektrisk modell:

Cellestrøm:

$$I_{cell} = I_L - I_D - I_{sh}$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} \cdot (I_{L,ref} + \mu_{I_{sc}} \cdot (T_{cell} - T_{cell,ref}))$$

$$I_{sh} = \frac{U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}}$$

$$I_D = I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right]$$

Åpen celle spenning:

$$U_{oc} = a \cdot \ln \left[\frac{I_L}{I_o} \right]$$

Effekt:

$$P_{cell} = I_{cell} \cdot U_{cell}$$

$$P_{total} = N_s \cdot I_{cell} \cdot U_{cell}$$

Virkningsgrad:

$$\eta = \frac{P_{cell}}{A_{cell} \cdot G_T}$$

Termisk modell:

Temperaturen i cellen er avhengig av flere faktorer, blant annet temperaturen i omgivelsene, driftsforholdene for cellen og montering. Montering er viktig fordi det vil ha mye å si for avkjøling av cellen. I type 180 finnes det tre måter å oppgi celletemperaturen på, disse kalles TCMODE 1-3. I TCMODE 1 må temperaturen oppgis som input til komponenten. I TCMODE 2 beregnes celletemperaturen på bakgrunn av varmetapskoeffisienten U_L . I TCMODE 3 beregnes celletemperaturen på bakgrunn av varmetapskoeffisienten U_L , og en sentral termisk kapasitans C_T . Simuleringene i denne rapporten er utført i TCMODE 2.

Varmetapskoeffisient:

$$U_L = \text{taualpha} \cdot \left[\frac{G_T}{T_{c,NOCT} - T_{amb,NOCT}} \right]$$

Ekstern datafil:

I type 180 leses parameterne for solcellen inn fra en ekstern fil. En slik fil kan inneholde data for flere solceller, og gjør det dermed enkelt å veksle mellom forskjellige simuleringer. Data for solcellen brukt i simuleringene for Troll finnes i vedlegg nr 2.

6.3 Estimering av energiforbruk ved Troll

En av utfordringene ved dette prosjektet er at det foreligger svært lite data om energiforbruket ved Troll. For å kunne dimensjonere energiforsyningen for et isolert system av den typen man har på Troll, er det viktig å vite hva energibehovet er. Det er satt i gang en prosess for å gjennomføre detaljerte målinger av energi og effektbehov for de mest sentrale prosessene i systemet på Troll. Av forskjellige årsaker er på skrivende tidspunkt disse målingene ikke kommet i gang. Det eneste man har å forholde seg til av data foreløpig er de som er presentert i kapittel 2.2.2 som omhandler energisystemet på Troll per i dag.

I mangel på tilstrekkelige data fra Troll har dette kapittelet til hensikt å estimere et sannsynlig energibehov for Troll på bakgrunn av den kunnskapen som foreligger om stedet. Energibehovet deles inn i termisk og elektrisk behov. Den termiske estimeringen gjennomføres i TRNSYS. Estimeringen av den elektriske lasten gjøres i excel på bakgrunn av blant annet Norsk Standard for beregninger av bygningers energiytelse, fordi det ikke finnes funksjonalitet for dette i TRNSYS. Den termiske bygningsmodellen, og den elektriske lasten, baseres begge på hovedbygningen på Troll. Årsaken til dette er at hovedaktiviteten foregår der, og det foreligger mindre data om de andre byggene som uansett vil bidra med små tillegg. Resultatet vil uansett bli et estimat, og hensikten er å forenkle modellen slik at arbeidsmengden knyttet til estimeringen står i forhold til resultatet. Likevel er det viktig at forenklingen ikke går på bekostning av nytten av modellen. Hvis modellen blir for enkel, vil den ikke kunne gi noe informasjon om hva som er spesielt med det termiske energibehovet på Troll.

En endelig avgjørelse om nye investeringer i energisystemet bør uansett tas på bakgrunn av faktiske måledata for Troll. Disse estimatene er bare et hjelpemiddel inntil slike data foreligger.

6.3.1 Estimering av elektrisk last

Norsk Standard nr. 3031 for beregninger av bygningers energiytelse tilbyr en del gjennomsnittstall for energiforbruk i et utvalg standard bygg. Stasjonen på Troll kan ikke sies å falle inn under en standard definisjon, ettersom den skal fungere som både forskningsstasjon og bolighus for en sammensatt gruppe mennesker i spesielt hardt klima. Likevel blir beregningene for det elektriske forbruket basert på tall fra norsk standard, som er modifisert ut i fra hva man vet om forholdene ved Troll.

Tabell 6.5 gir en oversikt over hovedbygningen ved Troll, og hva den inneholder. Ut i fra den kan man se at bygningen inneholder det meste man regner med å finne i en vanlig enebolig. I tillegg er det flere kontorer, og andre tilsvarende rom som man kan regne med har høy tetthet av datamaskiner og andre instrumenter som både trekker mye strøm og gir fra seg mye varme. På denne måten har hovedbygningen også egenskaper som vanligvis kjennetegnes av et kontorbygg.

Tabell 6.5: Oversikt over innhold i hovedbygning på Troll

Innhold i hovedbygning på Troll	
8 soverom	Printerrom
Sykestue	Trimrom
Elektroverksted	Badstue
2 sambandsrom	Vaskerom
2 instrumentrom	Dusj/vaskerom
Kjøkken	2 kontor
Stue	Teknisk
Innhold i gammel del av hovedbygning	
2 garderobe	3 proviantlager
2 lager	4 Soverom(sommer)

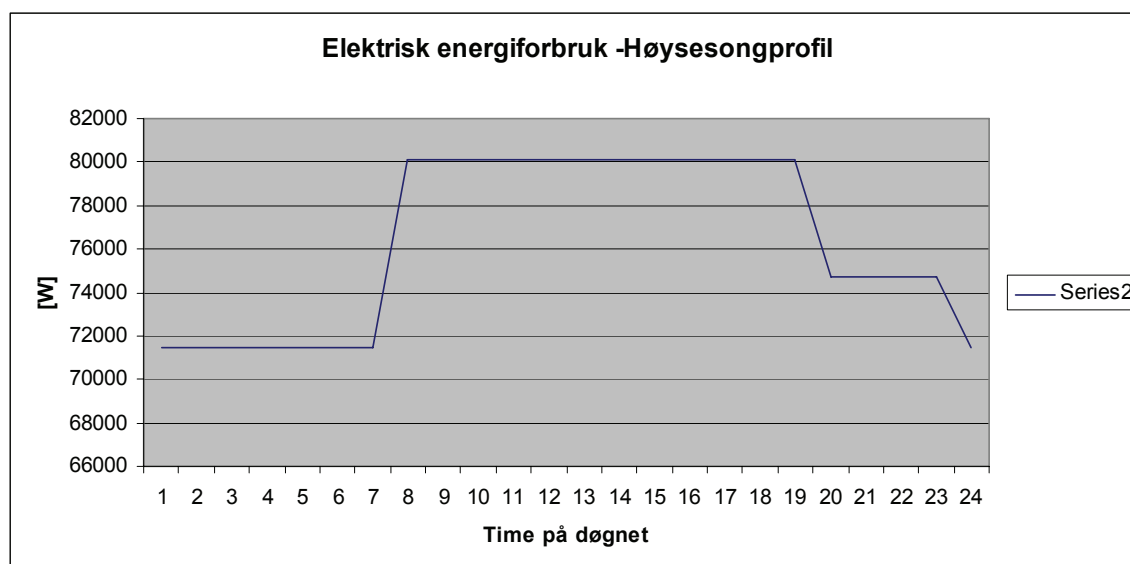
Beregninger gjort på bakgrunn av plantegningene fra hovedbygningen [Se vedlegg nr 5], viser at arealet er fordelt omtrent likt mellom kontorfunksjoner og bolighusfunksjoner. Dermed er beregningene for elektrisitetsforbruket gjort ut fra at halve arealet har behov som sammenfaller med det man vil oppleve for et kontorbygg, mens andre halvparten har behov som sammenfaller med det man finner i vanlige bolighus. En del antagelser er gjort ut fra det man vet om aktiviteten ved Troll. De fullstendige beregningene finnes i vedlegg nr 6.

Estimeringen av den elektriske lasten tar for seg fire hovedstørrelser. Disse er belysning, utstyr, varmtvann og vifter til ventilasjon. Utstyr i denne sammenheng er alt fra datamaskiner til hvitevarer. Beregningen tar utgangspunkt i at all oppvarming på Troll skjer ved spillvarme fra dieselaggregatet, eller fra andre termiske kilder. Det finnes elektriske ovner på Troll, men disse er i ferd med å fases ut.

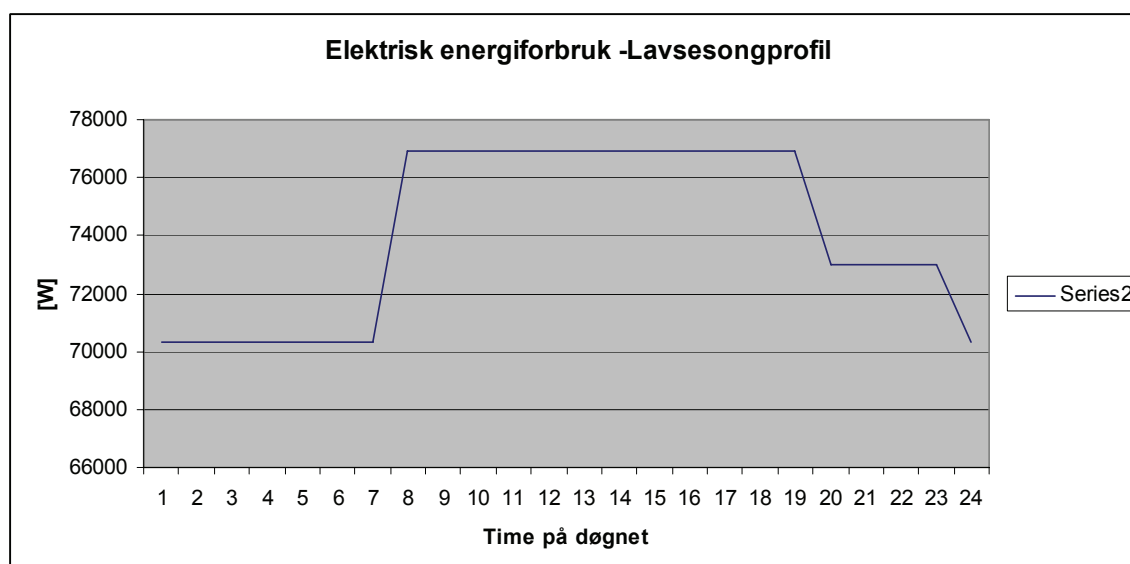
Dessuten forsøker lastestimeringen å ta hensyn til periodene med økt aktivitet på Troll. I perioden fra og med januar til og med mars mangedobles antall personer på Troll. De færreste av disse vil faktisk bo i hovedbygningen, så det er vanskelig å anslå nøyaktig hvor mye dette vil ha å si. I beregningene er mengden utstyr i bruk doblet i perioden med høy aktivitet. I tillegg til den estimerte lasten, er lasten i tabell 2.2 i kapittel 2.2.2, inkludert i den totale lasten for Troll. De er antatt å være faste laster, uten variasjoner over døgnet.

6.3.1.1 Resultater lastestimering

Estimeringen har resultert i to døgnprofiler for elektrisk last. Disse finnes i figur 6.3 og 6.4. Figur 6.3 viser døgnprofilen i høysesongen, mens figur 6.4 viser døgnprofilen for lavsesongen.



Figur 6.3: Estimert lastprofil for Troll Høysesong

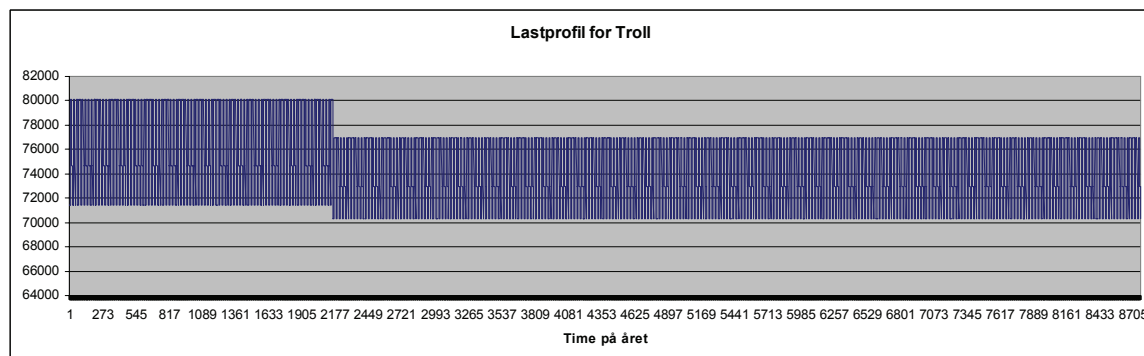


Figur 6.4: Estimert lastprofil for Troll Lavsesong

Hvis man ser disse kurvene ut i fra figur 2.4 i kapittel 2.2.2, som viser gjennomsnittelig last på Troll ligger den mellom knappe 70 kW og drøye 80 kW, kan det virke som de stemmer rimelig godt. Det må selvsagt nevnes at også figur 2.4 vil være en tilnærming. Likevel er den basert på reelle tall målt ved Troll og gir dermed en indikasjon på hva man kan forvente å finne ved mer detaljerte målinger. Ut i fra dette antar man at lastestimeringen er tilstrekkelig god i denne sammenhengen. Det er

likevel viktig å understreke at nye simuleringer bør utføres senere på bakgrunn av målte data for lasten ved Troll.

Årsprofilen for lasten ved Troll vises i figur 6.5, og er satt sammen av profilene for høy og lavsesong.



Figur 6.5: Estimert årsprofil for lasten på Troll

6.3.2 TRNSYS bygningsmodell

Hensikten med denne modellen er å simulere det termiske energibehovet. Det omfatter i hovedsak behovet for oppvarming på bakgrunn av parametere som varmetap gjennom lekkasjer i bygget, samt gjennom vegger, vinduer og ventilasjon. I tillegg vil man ha en del varmetilskudd fra personer og installasjoner i bygget som avgir varme. Værd data fra Troll er med på å gi korrekte data for energitilskudd fra solinnstråling, og tap gjennom høye vindhastigheter. Å bygge opp en modell som gjenspeiler Troll i detalj vil være alt for tidkrevende for dette prosjektet. Det vil uansett ikke være hensiktsmessig å legge for mye tid i en slik modell, da en endelig beslutning om utbygging uansett bør tas på bakgrunn av målte data fra Troll. Denne modellen skal gi en antydning om hvor man kan anta at nivået for energiforbruket ligger.

Bygningsmodellering i TRNSYS er bygget opp på en annen måte enn systemmodellene som vil bli presentert senere i dette kapitlet. Bygningen bygges opp, og redigeres i et eget program som heter TRNbulid og er integrert i TRNSYS.

Bygningsmodellen settes sammen av flere soner. Den forenklete modellen består av fire soner som til sammen skal prøve å modellere forholdene på Troll. De fire sonene er like store, og til sammen tilsvarer de det totale arealet av hovedbygningen på Troll. Som presentert i kapittel 6.3.1 er arealet i hovedbygningen delt omtrent i to når det gjelder å dekke kontorfunksjoner og boligfunksjoner. For å gjenspeile dette i den termiske modellen av bygningen er de fire sonene delt inn som følger, stue og soverom samt verksted og kontor. Hensikten med dette er å kunne dele inn i soner med høy og lav aktivitet, og varierende tetthet av mennesker og utstyr. Både mennesker og utstyr bidrar med varmeutstråling, noe som reduserer behovet for oppvarming.

Modellen er bygget som en kvadratisk boks, men andelen vinduer på hver side gjenspeiler virkeligheten. Stråling gjennom vinduer gir ekstra oppvarming på dager med mye sol. Data for u-verdier i vinduer og yttervegger er hentet inn fra containerleverandøren, og oppgitt i vedlegg nr 7. Disse gir hvor stor del av varmen som tapes gjennom ytterveggene i bygningen. For de indre veggene er det brukt generiske data.

Når det gjelder de detaljerte innstillingene for de forskjellige sonene i TRNbuild henvises det til vedlegg 7. Grovt sett kan det oppsummeres med null behov for både lys og utstyr i soveromsonen. I stuesonen er det en del behov for lys, og personer i lavt aktivitetsnivå. Det er også satt inn noe utstyr for å representere TV-skjerm etc. Kontorsonen har høy tetthet av datamaskiner, og flere personer i lett arbeid. I verkstedsonen er det også satt inn noe utstyr for å representere forskningsutstyr og datamaskiner. I tillegg er det flere personer i moderat aktivitetsnivå.

For å gjøre en slik modell mest mulig korrekt når det gjelder ytre forhold, kan man hente inn værdata fra det aktuelle stedet. Et utvalg steder fra hele verden er inkludert i TRNbuild. Ingen data fra Antarktis er dessverre tilgjengelige. Løsningen er ekstern programvare som genererer værdata på det formatet som TRNbuild leser. Meteonorm er en slik programvare, og den ble brukt i denne sammenhengen. Den genererer værdata for Troll på bakgrunn av en svært omfattende database av meteorologiske observasjoner. Data for steder som ikke omfattes av databasen, genereres på bakgrunn av lengde og breddegrad samt data for værmønstre i nærheten.

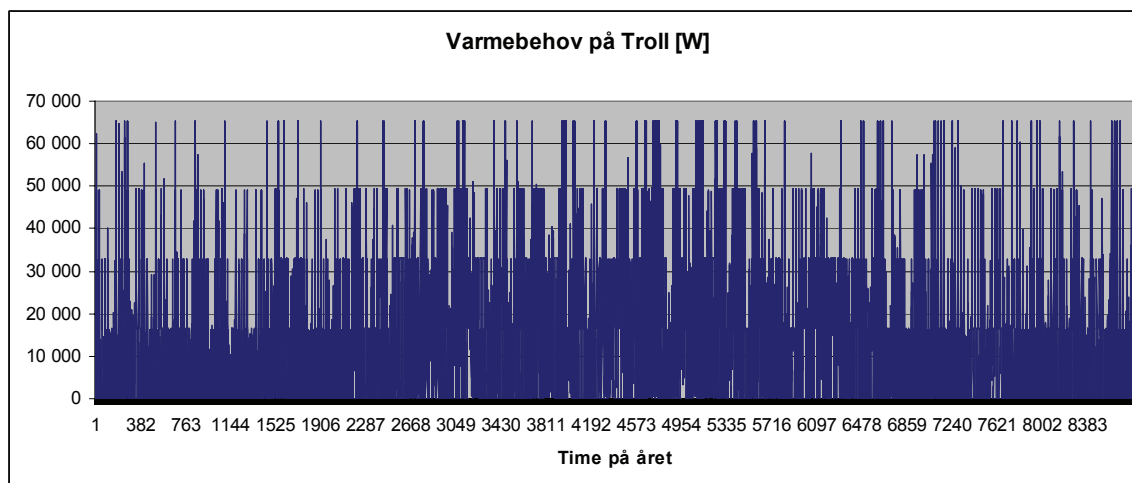
Bygningsmodellen tar ikke hensyn til høy og lavsesong på samme måte som den elektriske lastestimeringen. Bortsett fra at værdataene gir sesongvariasjoner i utetemperatur og solinnstråling regnes den termiske lasten som jevn over hele året. Bygningsmodellen er svært enkel, men gir likevel en indikasjon på hva man kan forvente når målinger foreligger.

6.3.2.1 Resultater termisk lastestimering

Det viste seg i løpet av simuleringene at en av de størrelsene som påvirket oppvarmingsbehovet mest var temperaturen på luften fra ventilasjonsanlegget. Med en innløpstemperatur på 16 °C ble det totale behovet for oppvarming i løpet av et år på 114 700 kWh, det gir 287 kWh/m²år.

Tilsvarende tall for en enebolig i Oslo er i underkant av 117 kWh/m²år, og for et kontorbygg er tallet så lavt som 68 kWh/m²år [50]. Den store forskjellen skyldes den svært lave utetemperaturen man merker gjennom hele året ved Troll.

Figur 6.6 viser varmebehovet for Troll over året. Oppløsningen på figuren er dessverre ikke optimal, men det er likevel mulig å se at varmebehovet stiger en del i løpet av vintersesongen.



Figur 6.6: Estimert varmebehov på Troll

Selv om disse dataene virker sannsynlige, og dermed kan brukes i denne omgang for å angi et sannsynlig nivå på varmebehovet, er det viktig å understreke at for det videre arbeidet er det helt nødvendig å skaffe til veie data fra Troll.

6.4 Aktuelle løsninger på Troll

Det eksisterer per i dag ikke noen ambisjoner om at Troll skal kunne dekke alle sine energibehov med fornybar energi, på linje med belgiske Princess Elizabeth Station. Hensikten med denne analysen er å finne en konfigurasjon på energisystemet som vil bidra med betydelige reduksjoner i brenselforbruket, samtidig som det representerer en sunn investering fra et økonomisk synspunkt.

De aktuelle teknologiene ble presentert i kapittel 4, og inkluderer vindturbiner, solceller og solfangere for varmtvannsproduksjon. Solfanger alene vil ikke være en interessant konfigurasjon, ettersom man har tilstrekkelig varmeproduksjon i spillvarmen fra dieselaggregatet når dette dekker hele den elektriske lasten. Vindturbiner og solceller er begge interessante sammen med en solfanger, som kan erstatte noe av den tapte spillvarmen dersom man ser at det blir nødvendig. I tillegg vil besparelsene ved å kombinere alle tre teknologiene undersøkes. Ulempen i det tilfellet er at man får et større og mer komplekst system med så mange energikilder. I tillegg vil man trenge kompetanse på flere tekniske systemer. Fordelen er at med flere fornybare energikilder vil man sannsynligvis kunne oppnå en større gjennomsnittelig andel fornybar energi.

Følgende konfigurasjoner av energisystemet vil bli modellert:

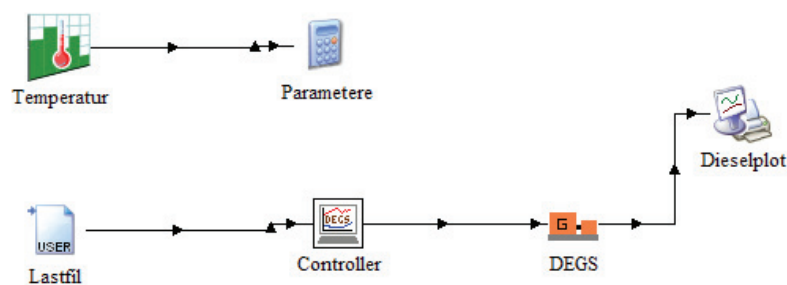
- Systemet slik det er på Troll i dag for referanseformål
- LLD-dieselteknologi i kombinasjon med vindturbiner
- LLD-dieselteknologi i kombinasjon med solceller

- LLD-dieselteknologi i kombinasjon med vindturbiner og solceller
- LLD-dieselteknologi i kombinasjon med vindturbiner og solfanger
- LLD-dieselteknologi i kombinasjon med solceller og solfanger

6.4.1 Energisystemet på Troll per i dag

Modellen vist i figur 6.7 skal fungere som referanse for de foreslåtte nye løsningene for energisystemet på Troll. Det finnes selvsagt også en referanse i hva man vet om energiforbruket per i dag, som ble presentert i kapittel 2.2.2. Likevel vil det være avvik mellom faktisk målt forbruk, og resultatene fra simuleringen. Det mest nøyaktige målet på potensielle besparelser vil være å sammenligne med en simulering av nå-situasjonen, for deretter å kommentere disse ut i fra de målte data som foreligger.

Modellen slik den kan sees i TRNSYS finnes i figur 6.7.



Figur 6.7: Modell av eksisterende energisystem ved Troll

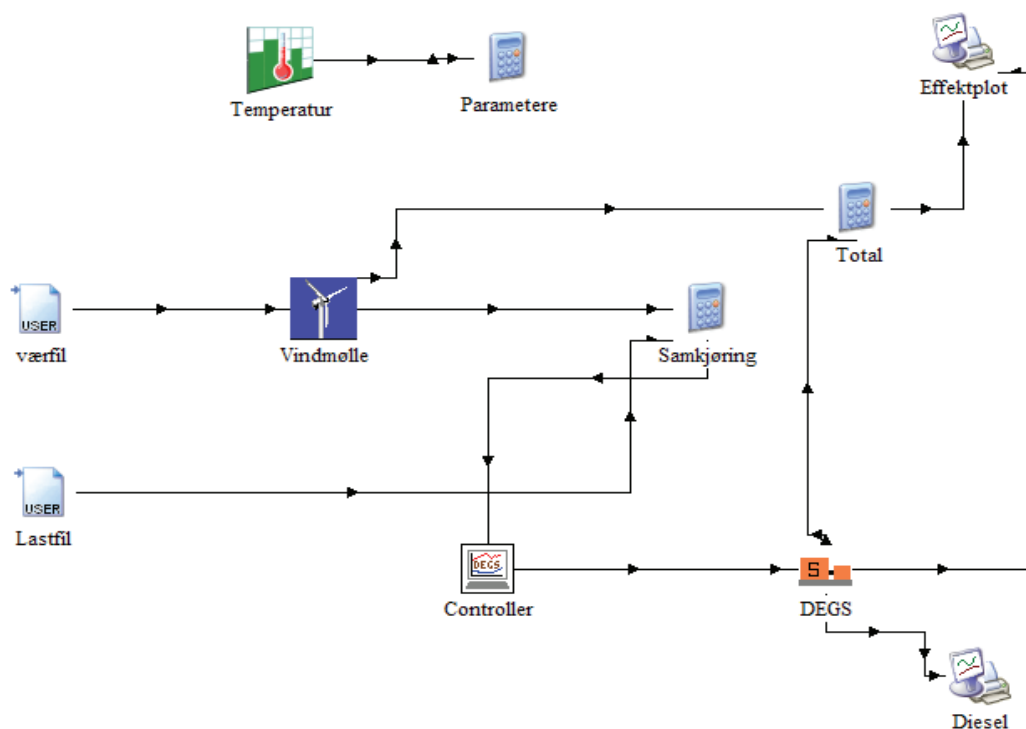
Modellen er satt opp med den estimerte lastfilen fra Troll, samt et dieselaggregat med samme størrelser som det som finnes på Troll per i dag, men med generiske data for dieselforbruk. Lastfilen er en tekstfil som ligger utenfor modellen, men leses av en komponent som er kalt "lastfil". For å kunne gjøre endringer på en rask og enkel måte, er de sentrale parameterne samlet i en egen kalkulator. Alle komponentene kan benytte disse. Controlleren er nødvendig for å styre belastningen på generatoren. Dieselgeneratoren er innstilt med merkeeffekt 260 kW, som er det man har på Troll. Minste tillatte effekt på generatoren er satt til 50 kW, lavere enn anbefalt ettersom man vet at generatoren på Troll blir kjørt på for lav belastning.

Parametere og inputdata for dieselgeneratoren finnes i vedlegg nr 2.

6.4.2 Vindturbiner som fornybar energikilde

Som tidligere nevnt er vindturbiner en av de mulige aktuelle kildene til fornybar energi på Troll. Denne modellen viser hvordan et slikt system vil fungere. Figur 6.8 viser hvordan systemet ser ut i TRNSYS. Systemet er koblet slik at man til enhver tid

bruker den vindenergien som er tilgjengelig, mens et hvert underskudd i forhold til lasten dekkes av dieselaggregatet.



Figur 6.8: Modell av energisystemet på Troll med vind som fornybar energikilde

Vindmøllen leser vindhastigheter målt ved Troll fra en ekstern fil. I tillegg leser vindmøllekomponenten spesifikke data for ytelsen til en Proven 6 turbin, ettersom denne ble valgt som den mest aktuelle turbinen å bruke ved Troll. Det er dessuten mulig å endre antall turbiner i simuleringen. Simuleringer er utført for et varierende antall turbiner, for å kunne vurdere optimalt antall for installasjon på Troll.

Lastfilen gir den elektriske lasten ved Troll på bakgrunn av estimeringen utført i kapittel 6.3.1. I kalkulatoren "Samkjøring" beregnes hvor stor del av lasten som må dekkes av dieselgeneratoren. Dieselgeneratoren er her basert på data for en LLD-generator, vist i figur 4.3 i kapittel 4.3. Størrelsen, og kurven for dieselforbruk er spesifikke for LLD. Sentrale parametere er samlet for seg for å forenkle endringer i modellen. Temperaturen er månedsmiddelverdier gitt i figur 5.1 i kapittel 5.

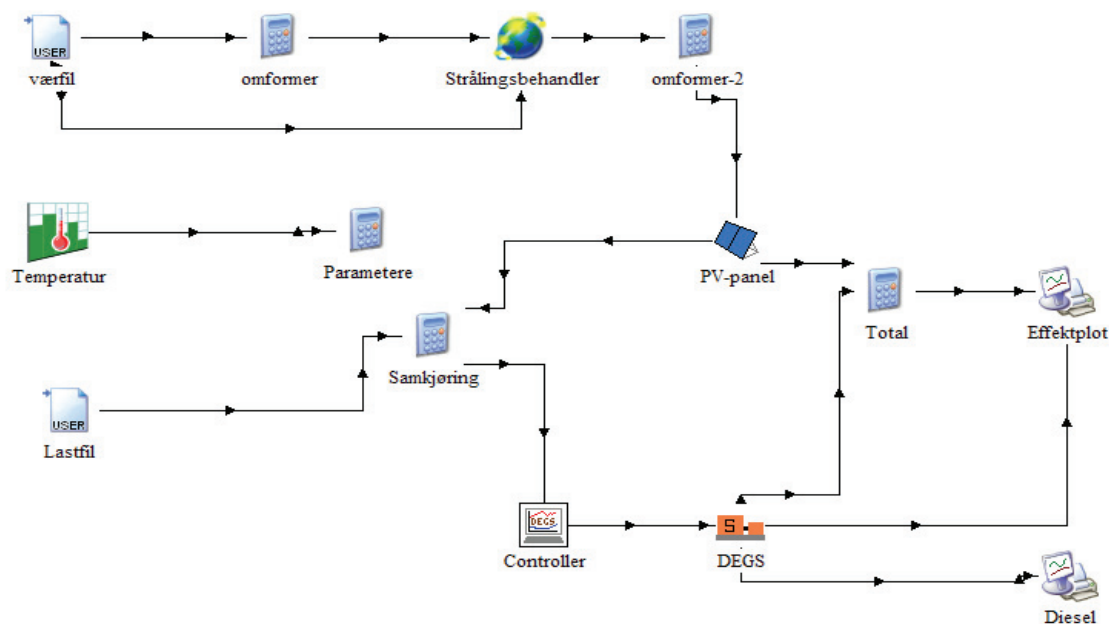
Kalkulatoren "Total" samler data for effekt fra dieselgenerator og vindturbin for presentasjon i plotter/printer "Effektplot".

Parametere og inputdata finnes i vedlegg nr 3.

6.4.3 Solceller som fornybar energikilde

Solceller er, i tillegg til vind, en av de aktuelle fornybare energikildene ved Troll.

Figur 6.9 viser hvordan et slikt system ser ut i TRNSYS.



Figur 6.9: Modell av energisystemet på Troll med sol som fornybar energikilde

Solinnstrålingen er målt ved Troll over det siste året, og leses inn i modellen i komponenten "Værfil". Enkle strålingsdata bearbejdes ut i fra data om blant annet breddegrad som legges inn i komponenten "Strålingsbehandler".

Solcellen tar inn data for innstrålingen fra strålingsbehandleren, og produserer effekt ut i fra det, og størrelsen på panelet. Simuleringene er utført for flere forskjellige størrelser av solcellepanelet for å kunne vurdere optimal størrelse for installasjon ved Troll.

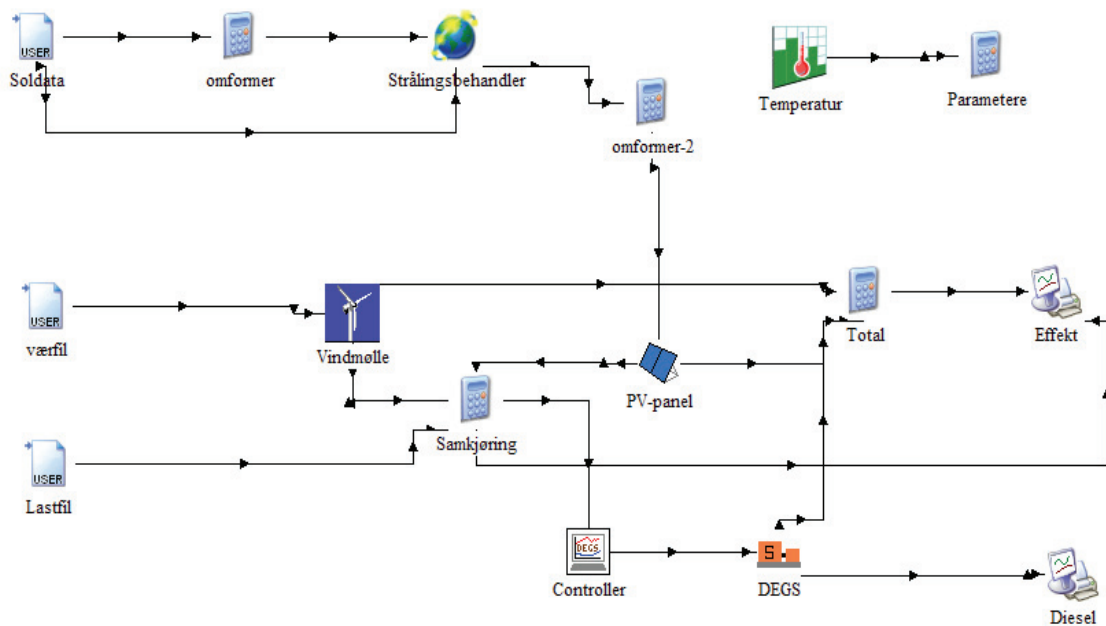
De delene av modellen som ikke omfatter solenergiproduksjonen er identiske med dieseldelen av vindmodellen. For beskrivelse, se kapittel 6.4.2. Systemet er koblet på samme måte, for å kunne utnytte mest mulig av den fornybare energien.

Parametere og inputdata finnes i vedlegg nr 2.

6.4.4 Vindturbiner og solceller i kombinasjon

En kombinasjon av vindturbiner og solceller vil gjøre det mulig å produserer mer fornybar energi ettersom de produserer ut i fra forskjellige energiresurser. Antall turbiner og mengden solceller vil begrenses naturlig av hvor mye plass som er tilgjengelig, men ettersom turbinene må plasseres i terrenget, og solceller antas plassert på taket av den eksisterende bygningsmassen kan de to kombineres for å oppnå større andel fornybar energi i systemet.

Figur 6.10 viser hvordan systemet ser ut i TRNSYS.



Figur 6.10: Modell av energisystemet på Troll med sol og vind som fornybar energikilde

Modellen er en kombinasjon av de to foregående modellene, og fungerer på tilsvarende måte. Effekten fra de fornybare energikildene summeres i ”Samkjøring”, og et eventuelt underskudd dekkes av dieselgeneratoren. Dieselgeneratoren vil aldri stanses, selv om den fornybare effekten i perioder er nok til å dekke hele lasten. Sol og vind er svært varierende energikilder, og man må vite at dieselgeneratoren kan ta over umiddelbart dersom produksjonen av fornybar energi skulle svikte, eller avta. I tilfeller hvor fornybar energi dekker så godt som hele lasten vil dieselgeneratoren kjøre på 5 % belastning.

Parametere og inputdata finnes i vedlegg nr 1.

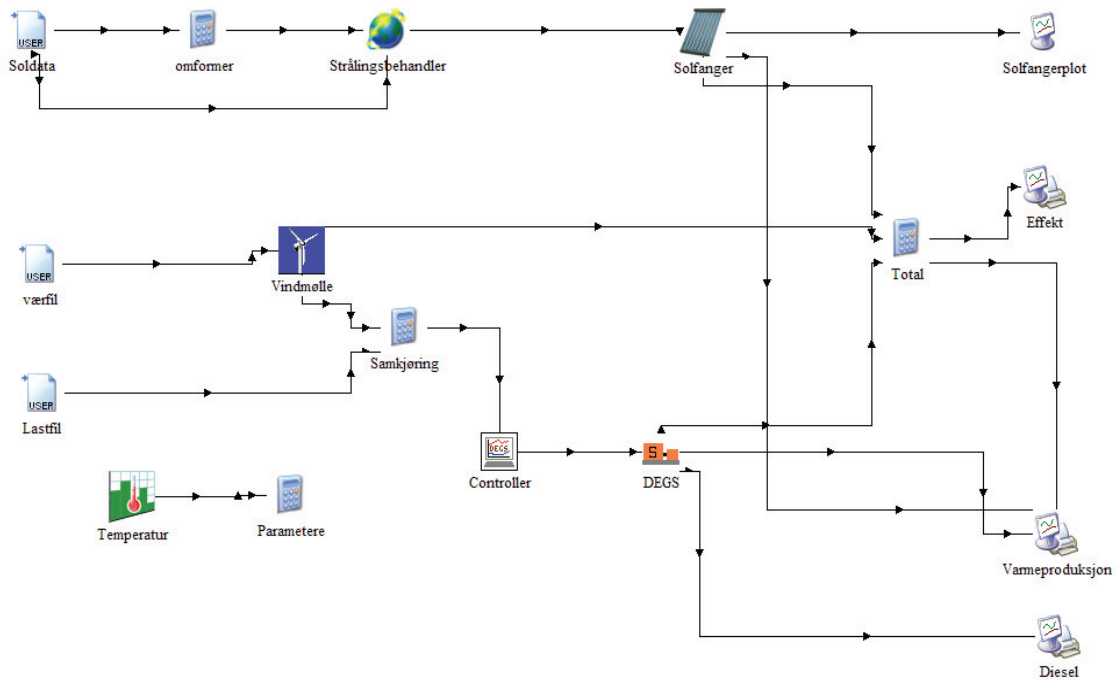
6.4.5 Solfanger for varmeproduksjon

Energisystemet på Troll er forsynt med varme fra kjølevannet på dieselgeneratoren. Dersom produksjonen fra generatoren går ned vil den tilgjengelige varmen reduseres tilsvarende. Dersom denne reduserer til under det akseptable nivået for Troll, må varmen leveres fra andre kilder.

Aktuelle kilder vil vanligvis være elektrisk fyring, eller fyring med diesel direkte. Som et alternativ kan man introdusere solfangere for varmtvannsproduksjon. Prinsippet er forklart i kapittel 6.2.3.

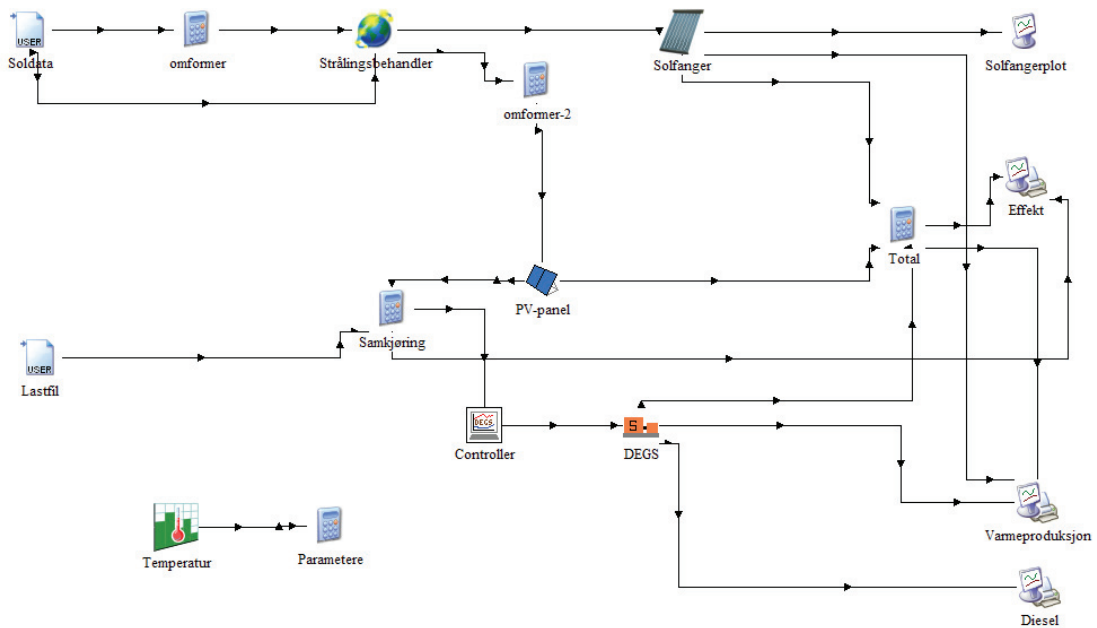
Figur 6.11 viser hvordan en solfanger kan integreres i systemet sammen med en vindturbin. Tilsvarende viser figur 6.12 hvordan solfanger kan kombineres med solceller. Det vil ikke bli kjørt en simulering hvor man kombinerer begge to, da det

viktigste er å vise korrelasjonen, og dekningsgraden i forhold til redusert spillvarme fra dieselgeneratoren.



Figur 6.11: Modell av energisystem med vindturbin og solfanger

De to modellene er bygd opp på nøyaktig samme måte, bortsett fra den delen som omhandler fornybar elektrisitetsproduksjon.



Figur 6.12: Modell av energisystem med solceller og solfanger

Det foreligger ingen målinger for termiske varmebehov ved Troll, derfor sammenlignes tallene med det termiske behovet som blir estimert i kapittel 6.3.2.1. Siden modellene ikke gir mulighet for å justere behovet for fyring ettersom tilgjengelig spillvarme reduseres, vil vi i denne omgang kun sammenligne produsert varme fra solfanger med redusert spillvarme fra dieselgenerator. Solfangermodellen slik den er nå inneholder heller ikke et varmelager. Dersom det viser seg at det vil være nyttig med en solfanger på Troll bør et varmelager inkluderes i systemmodellen, og simuleres ytterligere.

Parametere for solfangeren finnes i vedlegg nr 4.

6.5 Utfordringer og feilkilder knyttet til modelleringen

For å kunne vurdere kvaliteten på en simulering er det viktig å vurdere kvaliteten på grunnlaget for simuleringen, nemlig programmet og inndataene.

6.5.1 Modelleringsproblemer

TRNSYS er et godt simuleringsverktøy, med et omfattende bibliotek, og muligheter for å analysere kompliserte systemer. Ettersom programmet er såpass omfattende tar det litt tid å sette seg inn i all funksjonaliteten. TRNSYS leveres med grundige beskrivelser, og flere eksempler, noe som gjør det greit å komme i gang. Etter hvert som man blir kjent med programmet, går det forholdsvis lett å bygge opp modeller.

Utfordringen er å få simuleringene til å kjøre. Et generelt godt tips er å bygge opp de enkelte delene av en modell hver for seg, for å kontrollere at disse fungerer. Ved å endre en og en ting om gangen er det lettere å feilsøke hvis en modell plutselig ikke kjører lenger. En vanlig feilkilde er å få inputfiler på korrekt format. Enkelte av typene i TRNSYS er veldig sensitive på formatet på tekstfiler.

Hovedargumentet mot TRNSYS er at det dessverre har en del bugs. Tilsynelatende uforklarlige feil oppstår som selv TRNSYS' support har store problemer med å finne svar på. I prosessen med å skaffe til veie spesifikke data for de viktigste komponentene, voldt type 180 solcellen, store problemer. Modellen som i utgangspunktet fungerte fint, ville ikke kjøre med nye data. Faktisk ingen andre datasett enn det som var default, selv ikke det som var oppgitt som eksempel i beskrivelsen av modellen i TRNSYS. Noe som ytterligere kompliserte feilsøkingen var at modellen oppførte seg forskjellig på forskjellige datamaskiner. Slike problemer er frustrerende, og det er så vanskelig å rette dem opp, og at utfallet virker så tilfeldig, gjør TRNSYS til et mindre egnet verktøy. Resultatet blir at man må gå på akkord med nøyaktigheten på modellen, noe som de fleste er lite interessert i. Ettersom spesifikke data for solcellen ikke ville ha stor innvirkning på resultatet, ble det til slutt besluttet å bruke de generiske dataene, heller enn å bruke mer tid på feilsøking.

Feilsøkingen i TRNSYS er heller ikke helt tilfredsstillende da man kan oppleve at en modell fungerer fint, men ved å gjøre en endring på en komponent ikke lenger kjører. Feilmeldingen kommer ofte på en annen komponent enn den som ble endret på, og gjerne den samme uansett hva man gjør og hva som er feil. Slik forplantning av feilen

gjør at det blir vanskelig å stole på feilmeldingene, noe som reduserer nytten av dette verktøyet.

6.5.2 Feilkilder i modellene

Modellene slik de er bygget opp i TRNSYS vil aldri kunne beskrive systemet helt korrekt. Det vil være tap i systemet, og det vil være behov for blant annet kontrollsystemer, transformatorer og annen kraftkondisjonering som ikke er inkludert i disse modellene. En annen feilkilde kan være oppløsningen på modellen. TRNSYS opererer med timesintervall for beregninger. Det vil være endringer i behov eller vindstyrke med høyere frekvens enn det som ikke vil bli inkludert i beregningene. Dette vil sannsynligvis gi et lavere tall for effekt fra vindmøllene enn man vil registrere i virkeligheten. Som man ser av ligning (4) i kapittel 4.4.2, er effekten fra en vindmølle avhengig av vindhastigheten i tredje potens. Med andre ord vil det produsere mye mer effekt for høye hastigheter. Å regne med timesgjennomsnitt for vindhastigheten vil dermed gi et lavere resultat enn det man vil oppleve i virkeligheten.

Dessuten er kvaliteten på beregningsgrunnlaget, altså inputdatene, svært viktig. En god modell vil aldri kunne heve kvaliteten på dårlig input. Når det gjelder dataene fra Troll, er kvaliteten på innstrålingsdataene meget god. Det som trekker ned kvaliteten er at lasten kun er estimert ut i fra Norsk Standard. Standarden inneholder ikke data for bygninger av den typen som er på Troll, og alle tall blir veldig omtrentlige. Likevel viser sammenligninger med målte data, at tallene sannsynligvis gir en rimelig grei indikasjon på nivået. Vindmålingene som er brukt i disse simuleringene er kun meteorologiske data. Målinger med bedre kvalitet utføres i løpet av inneværende år. Foreløpige data fra disse målingene viser liten forskjell fra de meteorologiske målingene. Dermed er sannsynligvis kvaliteten på vindhastighetene brukt i simuleringen ikke veldig lav. Dataene for omgivelsestemperaturen ved Troll er kun oppgitt som månedsgjennomsnitt, i realiteten vil man ha svingninger over døgnet og som følge av endringer i vær-situasjonen. Likevel er temperaturen på Troll stabilt veldig lav, noe som gjør at effekten av en mer detaljert temperaturinput sannsynligvis ikke vil ha veldig stor effekt på nøyaktigheten til modellen.

En ting som kan være med på å heve nivået på modellen betraktelig er spesifikke data for komponentene. Alle komponentene i TRNSYS kommer med generiske verdier som gjerne er beregnet på bakgrunn av flere vanlige konfigurasjoner av den gitte teknologien. Der man har data for en spesifikk valgt komponent tilgjengelig vil det gjøre modellen mer lik virkeligheten. I modellene presentert i dette kapittelet er spesifikke data inkludert for LLD-generatoren og for Proven 6 turbinene.

Det gjenstår litt på at modelleringen av varmesystemet på Troll er tilfredsstillende. Data for varmebehovet skal registreres på Troll etterhvert. I tillegg er det viktig å kartlegge hvor stor del av varmen som forsynes fra forskjellige varmekilder. Spillvarme er den viktigste energikilden, men det finnes elektriske ovner, og muligheter for dieselfyrt oppvarming. Deretter bør det utføres tester på nytt dieselaggregat, for å kartlegge hvor mye spillvarme man kan regne med å få ved et driftsmønster som det på Troll. Modellen av systemet slik det er i dag tar ikke høyde for ekstra fyring med el eller diesel dersom varmeproduksjonen blir for lav. Ei heller

er det inkludert en varmetank for lagring av varmtvann fra solfangeren. For å gi et tilstrekkelig godt bilde av varmesystemet til å fatte en investeringsbeslutning, bør modellen utbedres på de ovennevnte punktene.

Kapittel 7 Resultater

De viktigste hovedresultatene er energiproduksjonen fra hver av de fornybare energikildene. I tillegg er dieselforbruket til generatoren i hvert av tilfellene sentralt for å tallfeste reduksjonen, og dermed også reduserte utgifter og utslipp. Et annet viktig punkt er varmeproduksjonen fra diesellaggregatet. Det er nødvendig i hvert tilfelle å se at varmeproduksjonen er tilstrekkelig i hele perioden, og eventuelt undersøke andre løsninger for å dekke inn underskuddet.

7.1 Energisystemet på Troll per i dag

Simuleringer er utført ut i fra modell presentert i kapittel 6.4.1. I løpet av et år er dieselforbruket ut i fra modellen: 241 385 liter. Dette er noe høyere enn det tallet som er beregnet ut i fra avleste verdier på Troll, og presentert i kap 2.2.2, som er på omtrent 210 000 liter. Forskjellen er på omtrent 13 %, noe som er ganske betydelig. Likevel vil det være usikkerhet knyttet til begge tallene. Dieselforbruket måles på Troll en gang i måneden [11], noe som gir rom for uregistrerte svingninger i forbruket. Hvis tallene måles på samme tid på døgnet vil man dessuten ikke få registrert svingningene over døgnet. Ettersom det ikke foreligger annet enn et beregnet tall for totalt dieselforbruk i løpet av et år fra Troll, er det vanskelig å si noe mer konkret om riktigheten av modellen. Med bakgrunn i de usikre tallene som ligger til grunn kan 13 % avvik regnes som godkjent.

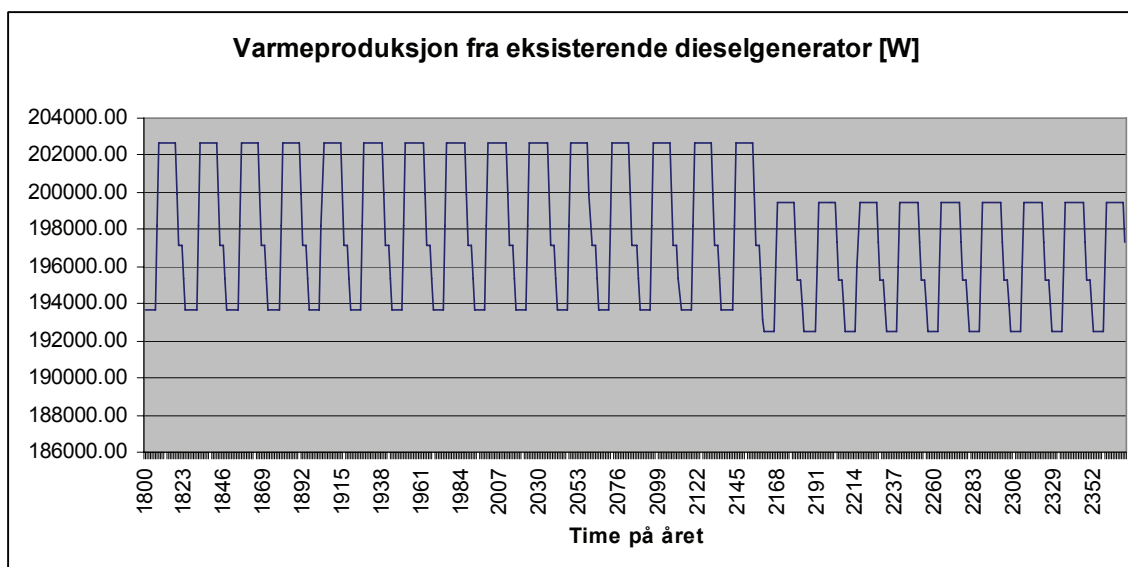
Tabell 7.1 viser dieselforbruk og CO²-utslipp når simuleringen er kjørt med generiske data for generatoren, med størrelse tilsvarende det eksisterende anlegget på Troll. Til sammenligning er den samme modellen kjørt med data for en LLD-generator, for å vise effekten av å introdusere en generator som er spesialisert på å kjøre på lav last. CO²-utslipp er beregnet ut i fra at for hver liter diesel som forbrennes dannes det 2,69 kg CO² [51].

Tabell 7.1: Resultater fra simulering av energisystemet per i dag

Modell	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO ₂ -utslipp [kg]	Besparelse
Generisk modell	241 385	-	-	-	649 326	-
LLD	202 419	38 966	0.16	1 052 082	544 507	104 819

Tabell 7.1 viser at skifte av diesellaggregat gir en besparelse på 16 % i dieselforbruk, noe som gir reduserte utgifter med over 1 000 000kr. Dette viser hvor viktig det er å velge riktig diesellaggregat for et gitt system. Vi vet at systemet slik det er i dag kjører på alt for lav last i forhold til det optimale bruksområdet. LLD har, som vi kan se av figur 4.3 i kapittel 4.3, høy virkningsgrad også for lave belastninger.

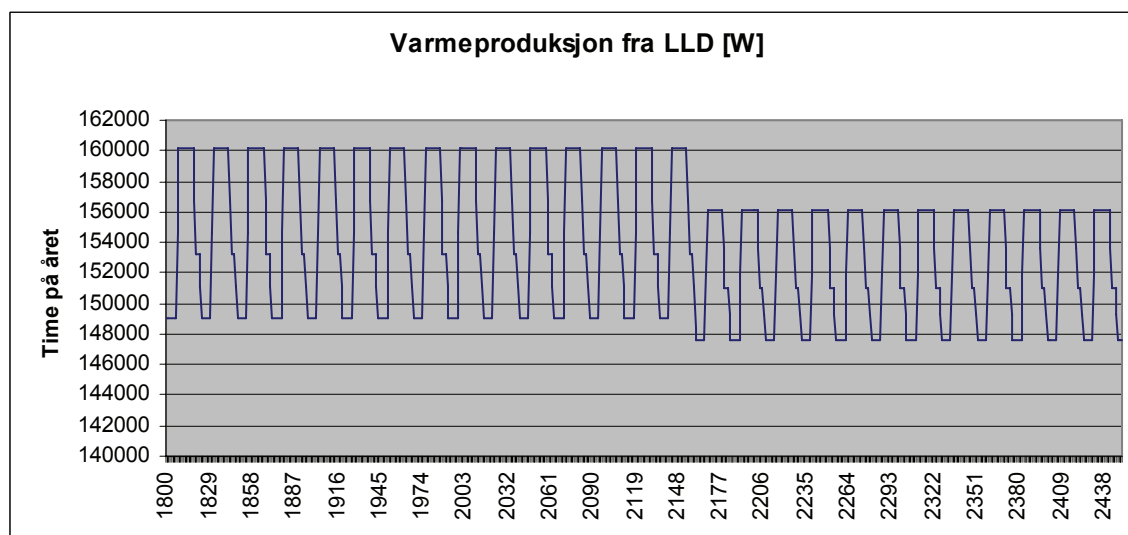
Figur 7.1 viser varmeproduksjonen fra den eksisterende dieselgeneratoren på Troll.



Figur 7.1: Varmeproduksjon fra eksisterende dieselgenerator for overgangen mellom høy og lavsesong

Figuren viser ikke varmeproduksjonen for hele året, men viser overgangen mellom høy og lavsesongen. Med bakgrunn i figur 6.5 i kapittel 6.3.1.1, som viser årsprofilen for lasten ved Troll, er det lett å se sammenhengen mellom de to figurene. Hensikten med å inkludere denne figuren er å vise hvilket varmetilskudd som er tilgjengelig per i dag. Vi vet fra kapittel 2.2.2 at per i dag er spillvarmen nok til å forsyne varmebehovet på Troll. I mangel på måledata fra Troll brukes derfor simuleringsdata som grunnlag for å vurdere varmebehovet inntil videre.

Figur 7.2 viser varmeproduksjonen med en LLD-dieselgenerator.



Figur 7.2: Varmeproduksjon fra LLD-dieselgenerator for overgangen mellom høy og lavsesong

Hvis man sammenligner figur 7.1 og figur 7.2, er det tydelig at installasjon av en LLD-dieselgenerator vil redusere den tilgjengelige mengden spillvarme betydelig. Skifte av dieselgenerator vil bety at varmeproduksjonen reduseres med 20 % i forhold

til det man har tilgjengelig i dag. Hvis man sammenligner figur 7.1 og 7.2, med figur 6.5 i kapittel 6.3.2.1, som viser estimert termiske energibehov for Troll, er det grunn til å tro at et skifte av dieselgenerator ikke vil redusere varmeproduksjonen så mye at det vil bli mangel på varme.

7.2 Vindturbiner som fornybar energikilde

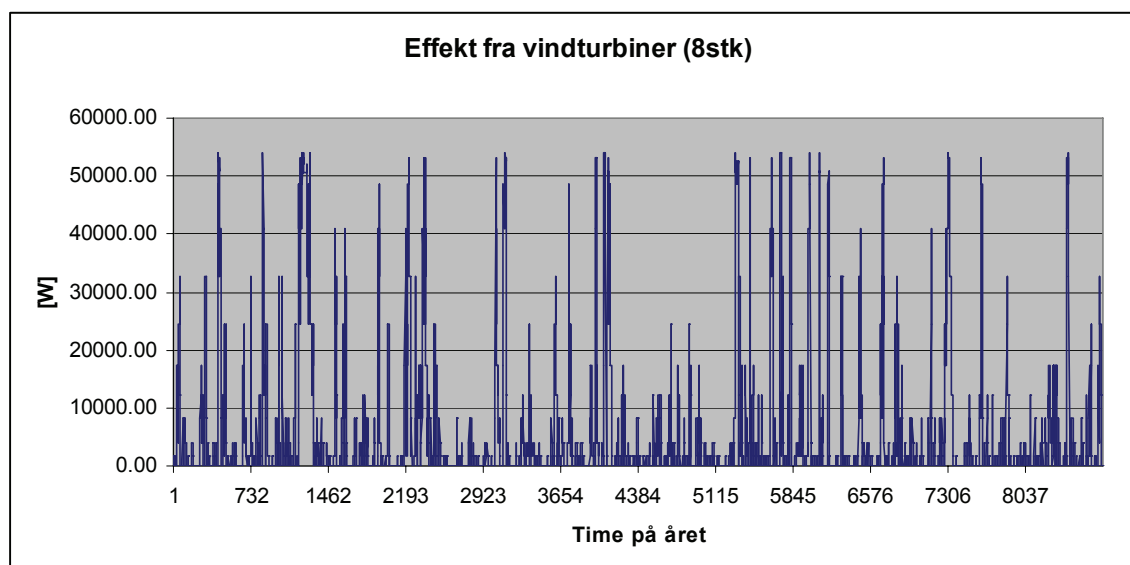
Simuleringer er utført ut i fra modell presentert i kapittel 6.4.2. Resultater for dieselforbruk og resulterende CO²-utslipp med forskjellige antall vindturbiner i systemet er gitt i tabell 7.2. Som referanse er simuleringen hvor hele lasten er kjørt på LLD-generatoren inkludert i tabellen.

Tabell 7.2: Resultater for vind (9m mast)

Modell	Antall turbiner	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO2-utslipp [kg]	Besparelse
Diesel LLD	-	202 419	-	-	-	544 507	-
Vind	4	196 752	5 667	0.03	153 009	529 263	15 244
Vind	5	195 335	7 084	0.03	191 268	525 451	19 056
Vind	6	193 918	8 501	0.04	229 527	521 639	22 868
Vind	7	192 501	9 918	0.05	267 786	517 828	26 679
Vind	8	191 084	11 335	0.06	306 045	514 016	30 491
Vind	9	189 743	12 676	0.06	342 252	510 409	34 098

For Proven 6 har hver enkelt turbin et forholdsvis lite bidrag, ettersom de kun leverer opp til 6 kW. Derfor er det ikke utført simuleringer med mindre enn fire turbiner i systemet. Totalt bidrag fra mellom fire og ni turbiner, er mellom 24 kW og 54 kW.

Figur 7.3 viser effekten fra 8 vindturbiner. Effektkurven for hver enkelt turbin på bakgrunn av vinddataene fra Troll vil se identisk ut som denne, men ha lavere maksimal effekt. Som man kan se av figur 7.3 varierer levert effekt fra vindturbinene ganske mye. Årsaken til dette er de svært varierende vindhastighetene man opplever ved Troll, dette kan man også se av figur 5.3 i kapittel 5.



Figur 7.3: Effekt fra vindturbiner(stall, 9m mast)

Åtte turbiner skal yte til sammen 48 kW. Som man kan se av figur 7.3, er effekten noe høyere enn dette, helt opp mot 54 kW. Årsaken til dette er, som nevnt i kapittel 4.4.3, knyttet til økt lufttetthet grunnet lave lufttemperaturer for stall-regulerte turbiner. Dette vil vanligvis være svært skadelig for generatoren. Likevel kan vi anta at Proven 6 vil kunne tåle dette ganske bra, ettersom den er svært robust bygget. Vi vet at turbinen er bygget for å tåle vindkast på opp til 70 m/s. Vanlige turbiner vil slutte å produsere for vindhastigheter over 25 m/s. Dessuten er Proven 6 allerede valgt for Princess Elizabeth Station, og man må anta at den kan tåle forholdene. Likevel bør det bekreftes før en eventuell investering finner sted.

Proven 6 leveres med to forskjellige mastehøyder, 9 og 15 meter over bakken. Vindhastigheten øker vanligvis med høyden over bakken opp til et visst nivå, fordi forstyrrelser på bakkenivå bremser vinden. Tabell 7.3 viser dieselbesparelser ved femten meter høy mast.

Tabell 7.3: Resultater for vind (15m mast)

Modell	Antall turbiner	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO2-utslipp [kg]	Besparelse
Diesel LLD	-	202 419	-	-	-	544 507	-
Vind	4	195 922	6 497	0.03	175 419	527 030	17 477
Vind	5	194 298	8 121	0.04	219 267	522 662	21 845
Vind	6	192 673	9 746	0.05	263 142	518 290	26 217
Vind	7	191 049	11 370	0.06	306 990	513 922	30 585
Vind	8	189 424	12 995	0.06	350 865	509 551	34 957
Vind	9	187 905	14 514	0.07	391 878	505 464	39 043

Som tabellen viser, reduseres dieselforbruket for ni turbiner med drøye 1 800 liter per år når høyden på masta øker til femten meter. Årsaken til dette er at vindhastighetene vil være jevnt høyere femten meter over bakken enn ni meter over bakken.

Hver enkelt turbin reduserer dieselutslippene med mellom 1 400 og 1 600 liter per år. Det tilsvarer omtrent 4 000 kg CO². Enkeltvis blir ikke bidraget så stort, men med ni turbiner og 15 meters mast, som tilsvarer 54 kW, er det mulig å dekke opp til 67 % av topplasten på 80 kW. Da sparer man omtrent 14 500 liter diesel i løpet av et år. Det tilsvarer omtrent 39 000 kg CO², og nesten 400 000 kr i sparte dieselutgifter.

For samme tilfelle vil den fornybare energiproduksjonen i løpet av et år bli på omtrent 63 100 kWh, som tilsvarer 9,6 % av den totale energiproduksjonen.

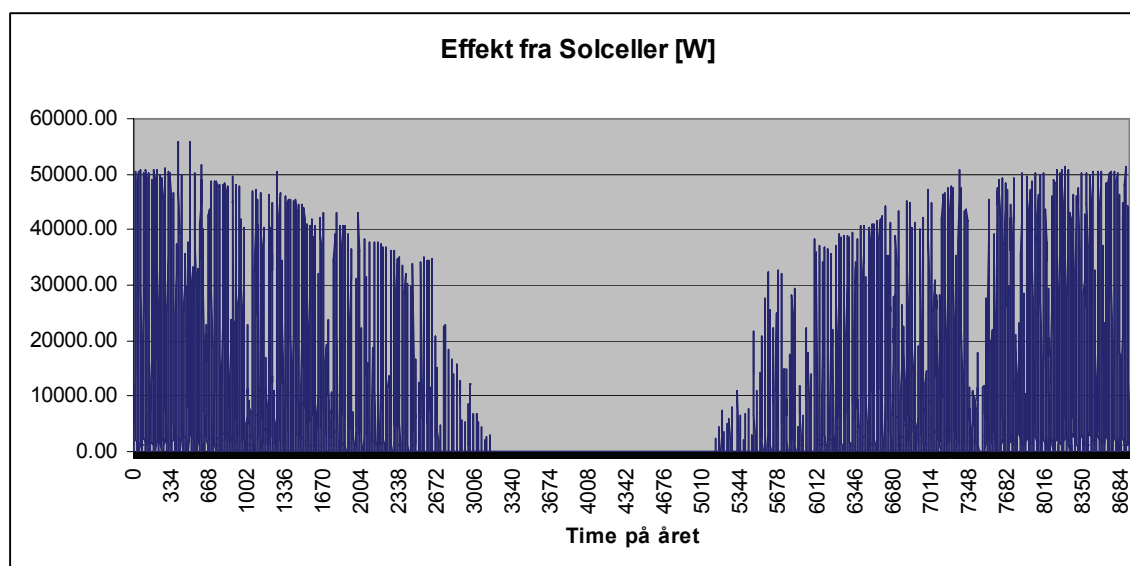
7.3 Solceller som fornybar energikilde

Simuleringer er utført ut i fra modell presentert i kapittel 6.4.3. Tabell 7.4 viser mulige besparelser i dieselforbruk for forskjellige konfigurasjoner av solceller.

Tabell 7.4: Resultater fra simulering med solceller

Modell	Moduler (S x P)	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO2-utslipp [kg]	Besparelse
Diesel LLD	-	202 419	-	-	-	544 507	-
Sol 108 m2	20 x 6	195 299	7 120	0.04	192 240	525 354	19 153
Sol 157,5 m2	25 x 7	192 035	10 384	0.05	280 368	516 574	27 933
Sol 216 m2	30 x 8	188 178	14 241	0.07	384 507	506 199	38 308
Sol 252 m2	35 x 8	185 804	16 615	0.08	448 605	499 813	44 694
Sol 300 m2	37 x 9	182 905	19 514	0.10	526 878	492 014	52 493

Figur 7.4 viser effekten fra 216 m² solceller over et år. I den perioden det er sol på Troll er utbyttet fra solceller jevnt godt. Det samme kan man se av tabell 7.4 som viser besparelser på opp mot 20 000 liter diesel i løpet av et år.



Figur 7.4: Effekt fra solceller(216m²)

Den største andelen fornybar energi blant disse simuleringene er gitt ved 300 m² solceller. Da er produksjonene fra solcellene i løpet av et år 85 300 kWh. Andelen fornybar energi er 13 % av den totale energien som blir forbrukt.

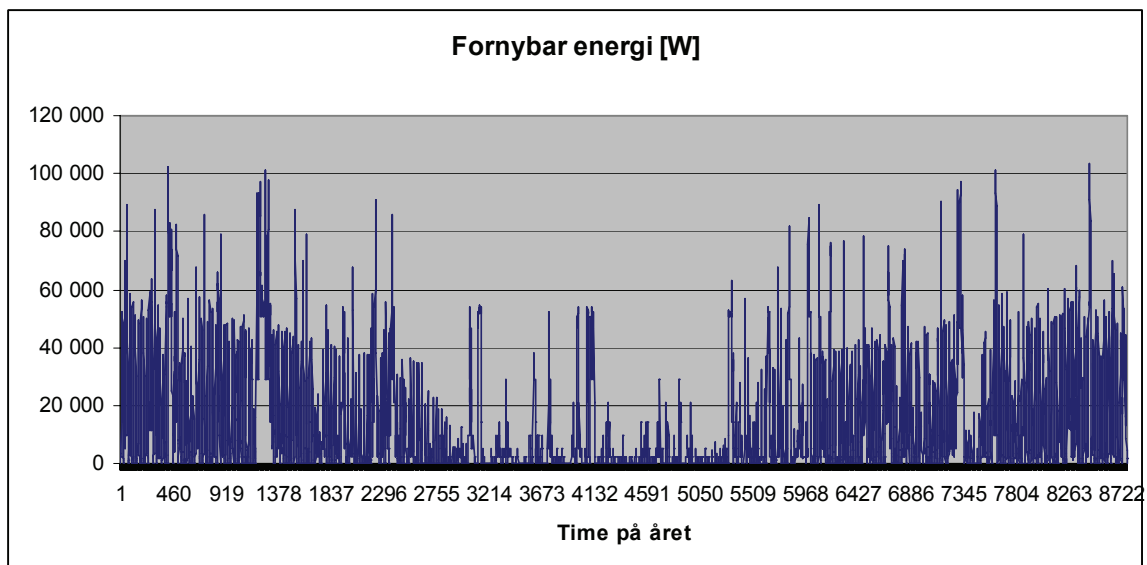
7.4 Solceller og vindturbiner i kombinasjon

Simuleringer er utført ut i fra modell presentert i kapittel 6.4.4. Tabell 7.5 viser resultater for simulering av både vindturbiner og solceller, i et utvalg kombinasjoner. Tabellen viser at det er mulig å gjøre substansielle besparelser i dieselforbruk ved å kombinere begge de fornybare energikildene.

Tabell 7.5: Resultater for sol og vind (15m mast)

Modell	Antall turbiner	Solceller	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO2-utslipp [kg]	Besparelse
Diesel LLD	-	-	202 419	-	-	-	544 507	-
Vind + Sol	8	108 m2	182 439	19 980	0.10	539 460	490 761	53 746
Vind + Sol	8	216 m2	175 873	26 546	0.13	716 742	473 098	71 409
Vind + Sol	6	216 m2	178 737	23 682	0.12	639 414	480 803	63 705

Figur 7.5 viser hvor mye fornybar energi som blir produsert til enhver tid over et år. Som man kan se av figuren vil det i perioder bli produsert mer fornybar energi enn maksimallasten for Troll som er på 80 kW. I tillegg vil det til enhver tid bli produsert minimumslast fra dieselgeneratoren, på 16 kW. Med denne løsningen vil man i perioder få opp mot 30 kW overproduksjon av energi. Andelen fornybar energi i løpet av et år er 17,9 %.



Figur 7.5: Fornybar energi ved tilfelle 2(8 turb, 216m²) i tabell 7.4

7.5 Solfanger for varmeproduksjon

Tabell 7.6 viser varmeproduksjon i kWh, fra dieselgeneratoren for forskjellige konfigurasjoner av energisystemet ved Troll.

Tabell 7.6: Varmeproduksjon fra dieselgenerator for forskjellige konfigurasjoner av energisystemet

Modell	Varmeproduksjon fra DEGS [kWh]
Eksisterende diesel	1 725 814
LLD-diesel	1 341 706
LLD + sol (108 m ²)	1 302 249
LLD + sol (300 m ²)	1 233 576
LLD + vind (8 stk, 9m, s)	1 278 897
LLD + vind (9 stk, 15m, s)	1 261 283
Kun solfanger (22 m ²)	45 206
Kun solfanger (50 m ²)	60 084

Det er en reduksjon i varmeproduksjon fra den eksisterende dieselgeneratoren til den løsningen med størst reduksjon, nemlig 300 m² solceller, på omtrent 28 %. De to siste linjene i tabell 7.6 viser mulig bidrag fra to forskjellige størrelser av solfangere.

Fordelen med å kombinere solceller med solfangere, er at når varmeproduksjonen fra dieselgeneratoren reduseres vil forholdene være like gode for en solfanger, som kan dekke noe av varmetapet.

Hvis man sammenligner med data fra kapittel 6.3.2.1, ser man at det estimerte termiske energibehovet for Troll ligger godt innenfor den varmeproduksjonen som dieselgeneratoren vil yte, selv i kombinasjon med fornybar energi. Dersom målte verdier for det termiske energibehovet skulle vise seg å være betydelig høyere enn de estimerte dataene, ser vi at solfangere vil kunne gi et substansielt varmebidrag. Likevel er forskjellen så stor at det virker svært lite sannsynlig. Solfangere vil derfor ikke bli diskutert i den økonomiske analysen.

7.6 Sammenfatning av resultater

Tabell 7.7 viser en oppsummering av de beste resultatene for de forskjellige fornybare energikildene.

Tabell 7.7: Oppsummering av beste resultat for dieselbesparelse

Modell	Installert mengde	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Relativ besparelse	Besparelse i kr	CO2-utslipp [kg]	Besparelse
Generisk diesel	-	241 385	-	-	-	649 326	-
LLD	-	202 419	38 966	0.16	1 052 082	544 507	104 819
Vind	9	187 905	14 514	0.07	391 878	505 464	39 043
Solceller	300 m2	182 905	19 514	0.10	526 878	492 014	52 493
Vind + Sol	8 + 216m2	175 873	26 546	0.13	716 742	473 098	71 409

Tabellen viser tydelig hvor viktig det er å velge en dieselgenerator som er tilpasset behovet den skal dekke. Ved å skifte til en LLD-generator kan man redusere dieselforbruket med hele 16 %. For øvrig er hovedkonklusjonen at solceller gir større dieselbesparelser enn det man kan få fra vindturbiner. Årsaken er at solenergien er en mer tilgjengelig ressurs enn vindenergi ved Troll. Selv om solenergien ikke er tilgjengelig over hele året er forholdene svært gode ellers. Vindhastighetene er jevnt over for lave til å generere tilstrekkelig effekt. En kombinasjon av solceller og vindturbiner vil selvsagt øke besparelsene ytterligere.

Solfanger kan gi et betraktelig bidrag til å dekke varmebehovet, men ut i fra den termiske lastprofilen er spillvarmen generert i dieselgeneratoren mer en tilstrekkelig til å dekke behovet. Det bør likevel utføres målinger på LLD-generatoren for å verifisere at man virkelig vil ha en slik varmemengde tilgjengelig.

For store mengder fornybar energi vil kun føre til overproduksjon av energi. På grunn av behovet for spinnende reserve vil dieselgeneratoren alltid måtte produsere, og i tilfeller med høy fornybar produksjon vil den produsere 16 kW. Siden det ikke er muligheter for salg av overskuddsenergi vil det være unødvendig å investere i en installert kapasitet for fornybar energi produksjon som jevnlig vil føre til overproduksjon av energi.

Kapittel 8 Økonomisk analyse

For den økonomiske analysen av en investering i fornybar energi ved Troll er det nødvendig å se på helheten i systemet. Slik energisystemet på Troll driftes per i dag vil det bli nødvendig å skifte diesellaggregat i løpet av kort tid uansett. Etersom å fortsette som før ikke vil være et alternativ særlig lenge, vil det være lettere å vurdere forskjellige nye alternativ.

Tabell 8.1 viser energiprisen for forskjellige konfigurasjoner av energisystemet på Troll.

Tabell 8.1: Energipris for forskjellige systemer

Modell	Effekt kWh	Dieselforbruk	Dieselnkostnader	Energipris kr/kWh
Målte data	660 000	210 000	5 670 000	8.59
Generisk diesel TRNSYS	653 675	241 385	6 517 402	9.97
LLD	653 675	202 420	5 465 334	8.36
LLD + vind(9 turb, 15 m)	654 130	187 905	5 073 435	7.76
LLD + sol(300 m2)	654 737	182 905	4 938 431	7.54
LLD + Sol(216 m2) + Vind(8 turb)	656 659	175 873	4 748 571	7.23

Den første linjen i tabellen er et overslag utført på bakgrunn av tall fra blant annet figur 2.4 i kapittel 2.2.2, og målte data for dieselforbruket ved Troll. Det stemmer godt overens med informasjon fra NPI som sier at energiprisen er 8 kr/kWh [52]. De øvrige tallene er basert på simuleringer i TRNSYS. Hvis besparelsen regnes ut i fra de målte dataene er det mulig å oppnå en reduksjon på 15 % i pris per kWh. Tilsvarende er det mulig å oppnå en reduksjon på 27 % hvis man sammenligner med den generiske dieselmodellen i TRNSYS.

I tillegg til å sammenligne energiprisene for de forskjellige konfigurasjonene, er det også nyttig å kvantifisere verdien av investeringen. Det vil si hvor lang tid det tar før de reduserte dieselutgiftene har spart inn investeringen i utstyret.

Vedlegg nr 8 viser prisanslag for de forskjellige installasjonene.

Annuitetsformelen beregner verdien av en pengestrøm over flere år, referert til dagens verdi [53].

$$P = \frac{A}{r} \left[1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right] \quad (28)$$

Der P er annuiteten, A er den årlige summen penger, r er renten for hver periode, og n er antall perioder/år. Denne formelen gir et overslag på hvor mye kapital man vil spare i form av reduserte dieselutgifter over levetiden til installasjonen, referert til i dag. Svakheten med denne formelen er at man antar samme årlige besparelse. Summen vil variere på bakgrunn av høy sannsynlighet for økende dieselpriiser, samt varierende tilgjengelighet på de fornybare ressursene fra år til år. Tallet vil likevel gi en indikasjon på verdien av pengestrømmen.

Antar i beregningene en rente på 6,5 %, ut i fra at styringsrenta er 5,5 % [54], og en levetid for investeringen på 20 år for vindturbiner og dieselgenerator. Levetiden er tilsvarende satt til 15 år for solcellene.

Tabell 8.2 viser de økonomiske beregningene for å installere vindmøller. Nedbetalingstiden er beregnet svært enkelt, der investeringskostnaden er delt på den årlige besparelsen i dieselutgifter. Her er det ikke tatt hensyn til rentekostnader etc. Annuitetsformelen er brukt til å gi verdien av pengestrømmen i form av årlige reduserte dieselutgifter, referert til dagens verdi.

Tabell 8.2: Økonomiske beregninger for vindturbiner

Antall vindmøller	Investeringskostnad	Dieselbesparelse [l]	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
4	686 800	6 497	175 419	3.92	1 932 856
5	858 500	8 121	219 267	3.92	2 415 995
6	1 030 200	9 746	263 142	3.91	2 899 432
7	1 201 900	11 370	306 990	3.92	3 382 572
8	1 373 600	12 995	350 865	3.91	3 866 009
9	1 545 300	14 514	391 878	3.94	4 317 911

Tabell 8.3 viser de økonomiske beregningene for å installere solceller. Alle data er beregnet på samme måte som i den ovennevnte tabellen, bortsett fra at levetiden til solcellene er satt til 15 år.

Tabell 8.3: Økonomiske beregninger for solceller

Mengde solceller [kW]	Moduler	Investeringskostnad	Dieselbesparelse [l]	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
20.1	20x6	804 000	7 120	192 240	4.18	1 807 569
30.5	25x7	1 220 000	10 384	280 368	4.35	2 636 207
41.8	30x8	1 672 000	14 241	384 507	4.35	3 615 392
48.8	35x8	1 952 000	16 615	448 605	4.35	4 218 084
58.1	37x9	2 324 000	19 514	526 878	4.41	4 954 059

Tilsvarende viser tabell 8.4 besparelsene ved å skifte fra generisk til LLD-dieselgenerator. Beregningene er gjort på grunnlag av TRNSYS-simuleringene for den generiske dieselgeneratoren.

Tabell 8.4: Økonomiske beregninger for LLD

Modell	Investeringskostnad	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
Generisk modell	-	241 385	-	-	-	-
LLD	6 000 000	202 419	38 966	1 052 082	5.70	11 592 373

Tabell 8.5 viser de økonomiske beregningene for alternativet å investere i en kombinasjon av solceller og vindturbiner. Her er verdien av pengestrømmen beregnet ut i fra solcellenes levetid, som er satt til 15 år.

Tabell 8.5: Økonomiske beregninger for solceller og vindturbiner i kombinasjon

Modell	Antall turbiner	Solceller [m ²]	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Besparelse i kr	Investeringskostnad	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
Vind + Sol	8	20.1	182 439	19 980	539 460	2 177 600	4.04	1 932 856
Vind + Sol	8	41.8	175 873	26 546	716 742	3 045 600	4.25	7 897 427
Vind + Sol	6	41.8	178 737	23 682	639 414	2 702 200	4.23	7 045 388

En viktig størrelse i forbindelse med de økonomiske beregningene for Troll er dieselprisen. Den siste tiden har man opplevd en dramatisk stigning i oljeprisene. Dette overføres raskt til dieselprisene. Med mindre nye store oljefunn blir gjort, vil

prisene bare fortsette å stige i tiden som kommer. Stigende dieselpriiser vil bidra til å gjøre investeringer i fornybar energi mer lønnsomme. Siden 2003 har oljeprisen steget med over 100 % [55]. Den tilsvarende økningen i dieselpriisen for forbrukere i Norge er på nærmere 30 % bare det siste året.

Tabell 8.6, 8.7, 8.8, og 8.9 viser de økonomiske beregningene hvis dieselpriisen øker med 20 %. Et mer sannsynlig scenario er at prisen stiger jevnt over hele perioden, men beregningen er her forenklet til at prisøkningen gjelder for hele perioden.

Tabell 8.6: Besparelser for vindturbin med 20 % økning i dieselpriis

Antall vindmøller	Investeringskostnad	Dieselparelse [l]	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
4	686 800	6 497	210 503	3.26	2 319 427
5	858 500	8 121	263 120	3.26	2 899 194
6	1 030 200	9 746	315 770	3.26	3 479 318
7	1 201 900	11 370	368 388	3.26	4 059 086
8	1 373 600	12 995	421 038	3.26	4 639 210
9	1 545 300	14 514	470 254	3.29	5 181 493

Tabell 8.7: Besparelser for solceller med 20 % økning i dieselpriis

Mengde solceller [kW]	Investeringskostnad	Dieselparelse [l]	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
20.1	804 000	7 120	230 688	3.49	2 169 083
30.5	1 220 000	10 384	336 442	3.63	3 163 449
41.8	1 672 000	14 241	461 408	3.62	4 338 470
48.8	1 952 000	16 615	538 326	3.63	5 061 701
58.1	2 324 000	19 514	632 254	3.68	5 944 871

Tabell 8.8: Besparelser for LLD-diesel med 20 % økning i dieselpriis

Modell	Investeringskostnad	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
Generisk modell	-	241 385	-	-	-	-
LLD	6 000 000	202 419	38 966	1 262 498	4.75	13 910 848

Tabell 8.9: Besparelser for sol og vind i kombinasjon med 20 % økning i dieselpriis

Modell	Antall turbiner	Solceller [m2]	Investeringskostnad	Dieselforbruk [l]	Besparelse	Besparelse i kr	Nedbetalingstid	Verdi av årlig besparelse
Vind + Sol	8	20.1	2177600	182439	19980	647 352	3.36	7 132 853
Vind + Sol	8	41.8	3045600	175873	26546	860 090	3.54	9 476 912
Vind + Sol	6	41.8	2702200	178737	23682	767 297	3.52	8 454 465

For å få en helhetlig vurdering av de forskjellige investeringene, er det vanlig å gjøre forskjellige typer analyser. I denne rapporten skal vi bruke NPV (nåverdi) og IRR (internrente). Begge disse brukes mye i investeringsanalyse.

NPV gir verdien av en investering hvor hele kapitalstrømmen er beregnet tilbake til starttidspunktet for investeringen. Jo høyere NPV, jo bedre er investeringen. NPV er gitt ved følgende formel [52]:

$$NPV = -x_0 + \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{(1+r)^k} \quad (29)$$

IRR er den verdien for renta som gir at NPV blir akkurat null, altså at utgifter og inntekter går i null. Nok en gang er det den høyeste verdien, som gir den beste investeringen.

Tabellene 8.10, 8.11, 8.12 gir NPV og IRR for de forskjellige konfigurasjonene av energisystemet.

Tabell 8.10: NPV og IRR for vindturbiner

Antall turbiner	4	5	6	7	8	9
NPV	1 123 260	1 404 007	1 685 026	1 965 773	2 246 793	2 498 964
IRR	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252	0.250

Tabell 8.11: NPV og IRR for solceller

Solceller [m2]	20.1	30.5	41.8	48.8	58.1
NPV	942 318	1 329 772	1 824 781	2 127 779	2 469 539
IRR	0.228	0.218	0.218	0.218	0.214

Tilsvarende er NPV for LLD-generatoren omtrent 11 600 000 kr, og IRR er på 17 %.

Tabell 8.12: NPV og IRR for sol og vind i kombinasjon

Modell	20.1 m2 + 8 turbiner	41.8 m2 + 8 turbiner	41.8 m2 + 6 turbiner
NPV	2 718 088	3 468 251	3 107 979
IRR	0.238	0.224	0.225

Hvis man sammenligner tallene for IRR for de forskjellige konfigurasjonene er konklusjonen at de stort sett er ganske likeverdige investeringer, bortsett fra dieselgeneratoren som har en noe lavere verdi. Ingen av verdiene er spesielt lave, så på bakgrunn av IRR er alle konfigurasjonene sunne investeringer.

Hvis man derimot sammenligner verdiene for NPV får man større forskjeller. Den gjennomgående trenden man kan se er at det lønner seg å investere stort. De konfigurasjonene med høyest fornybar kapasitet har høyest NPV. Årsaken til dette er nok at etter investeringen er tilbakebetalt vil disse redusere utgiftene med mest penger for resten av levetiden.

Det er selvsagt usikkerhet knyttet til de økonomiske beregningene. Kostnadene er i stor grad beregnet på bakgrunn av antagelser, overslag og tidligere anbud. Selv om de i høyeste grad gir et godt overslag, er det viktig å vite at en endelig vil kunne avvike en del fra en endelig prislapp for et tilsvarende system på Troll. For å skaffe et bedre prisoverslag er det nødvendig å lage en detaljert oversikt over hva som trengs av tilleggsutstyr, og hva kostnaden vil bli for frakt, leie av mannskap og maskiner til installasjon og opplæring ved Troll. Dessuten kan man kanskje regne med å få rabatter som følge av store innkjøp, og som følge av reklameverdien det er i å få installert sine produkter på sydpolen.

Rente, levetid for installasjonene, dieselpriser og andel produsert fornybar energi er alle faktorer som vil påvirke utbyttet av investeringen. Det er lite erfaring å støtte seg til på hvilken levetid man kan regne med for solceller og vindturbiner og utstyr

generelt i Antarktis. Det er meget mulig at levetiden kan bli både høyere og lavere enn den som grunnlag for beregningene her. Et viktig kriterium for å oppnå best mulig levetid er å dimensjonere systemet grundig. Hvis andelen fornybar energi produsert skulle vise seg å bli lavere enn antydningene vil det medføre at det tar lengre tid før investeringen går i null. Likevel er det rimelig gode marginer som tilsier at en investering i fornybar energiteknologi vil lønne seg selv om det er usikkerhet knyttet til kostnadene. De økende oljeprisene bidrar til å styrke inntrykket av at en slik investering vil lønne seg økonomisk.

Kapittel 9 Analyse

Det vil ikke være interessant å introdusere fornybar energi i energisystemet på Troll slik det er i dag, da dette kun vil medføre lange perioder med enda lavere belastning enn det man opplever på Troll i dag. Den eksisterende generatoren vil sannsynligvis måtte skiftes ut i løpet av kort tid uansett, ettersom man allerede opplever driftsproblemer knyttet til drift under for lav belastning.

Det viktigste enkelttiltaket for å redusere dieselforbruket på Troll er faktisk å skifte dieselgenerator. Som vi kan se av tabell 7.1 i kapittel 7.1, vil det å skifte til en dieselgenerator som er mer egnet for forholdene, redusere dieselforbruket med hele 16 %. En lignende effekt kunne man kanskje oppnå ved å introdusere en tradisjonell dieselgenerator hvor størrelsen er bedre tilpasset den eksisterende lasten ved Troll. Fordelen med å velge en LLD-generator er at man i tillegg faktisk vil få en økning i kapasitet, dermed vil man kunne utvide aktiviteten på Troll ytterligere, uten bekymring for manglende kapasitet.

Ut i fra ressursgrunnetilgjengelighet per i dag, er solinnstrålingen en relativt mye større ressurs enn vind på Troll. Det er jevnt svært mye sol, og gode forhold med høy refleksjon fra underlaget, som gjør solceller svært egnet. Ulempen med solenergien er at den ikke er tilgjengelig i mørketida. På den andre siden sammenfaller perioden med tilgjengelig solenergi svært godt med den perioden av året hvor det er størst aktivitet på Troll, og gir på den måten et godt supplement. Vindenergien kan gi et jevnt bidrag over hele året, men de tilgjengelige ressursene er ikke så gode som man kunne ha ønsket for å anbefale utbygging av vindturbiner på Troll.

Det er selvsagt ønskelig med en høy andel fornybar energi. Likevel er det flere faktorer som spiller inn når man skal velge hvor stor andel man skal velge å installere. Investeringskostnader er selvsagt en faktor man må vurdere, men i tillegg kommer blant annet tilgjengelig areal. Når det gjelder vindturbiner må disse plasseres i terrenget rundt Troll. Vindmøllene kan ikke plasseres på isen, siden den er i bevegelse. Det er svært begrensede områder som ikke er dekket av is, og i tillegg er det nødvendig med en viss minsteavstand mellom turbinene for å unngå at turbulens fra naboturbiner reduserer vindhastigheten, og dermed effekten. Solceller kan plasseres på taket av eksisterende konstruksjoner, men trenger også en viss avstand. Ved svært høye breddegrader er det ofte nødvendig med høy vinkel på panelene. Da blir det viktig med stor nok avstand til å unngå at panelene kaster skygge på hverandre.

Mengden fornybar energi man velger å installere bør dessuten avstemmes i forhold til lasten. En gjennomgående høy andel fornybar energi stiller store krav til stabiliteten til systemet, ettersom fornybare energiressurser ofte leverer en raskt varierende effekt. En annen begrensning er at dieselgeneratoren må uansett kjøre på minste belastning, dermed er det unødvendig å investere slik at kapasiteten blir høyere enn lasten i perioder.

Kvaliteten på resultatet av simuleringene begrenses av to faktorer, kvaliteten på modellen, og kvaliteten på inputdataene. I denne rapporten har målet vært å heve kvaliteten på dette sammenlignet med tidligere arbeid. Når det gjelder modellene så er

kvaliteten på disse hevet betraktelig med at det er introdusert spesifikke modeller for vindturbin og dieselgenerator. Når det gjelder solcellene lot det seg dessverre ikke gjøre, men konsekvensen er ikke så stor, ettersom variasjonen i produktet fra forskjellige leverandører ikke er spesielt stor. Kvaliteten på inputdataene er også betraktelig forbedret. Det foreligger målinger av solinnstråling for et helt år fra Troll. Dessuten har registreringen av vindhastigheter begynt. De foreløpige resultatene derfra viser lite avvik fra de meteorologiske dataene som har vært brukt i simuleringene. I tillegg er det blitt gjennomført en estimering av den elektriske lasten på Troll, slik at lasten nå avspeiler det sannsynlige forbruket på en bedre måte.

Det er forskjellige måter å måle besparelsene fra de forskjellige tiltakene på. Det er et ikke uanselig avvik mellom beregnet dieselforbruk ut i fra målte data ved Troll, og den generiske modellen i TRNSYS. Det er naturlig at man vil oppleve et avvik, ettersom tallene for dieselforbruk i generatormodellen ikke er hentet Troll. Det må også stilles spørsmålsteget ved nøyaktigheten i tallene som er målt på Troll også, jfr kapittel 7.1. Sannsynligvis ligger sannheten en plass midt i mellom disse to tallene. Mer nøyaktige data fra Troll bør derfor ligge til grunn for en ny beregning før en endelig avgjørelse tas om utbygging.

Ut i fra den økonomiske analysen ser man naturlig nok at jo mer fornybar kapasitet man installerer jo mer reduseres dieselforbruket. Akkurat det var ingen stor overraskelse. Generelt så ser man at de reduserte dieselutgiftene har tilbakebetalt investeringen i løpet av omtrent fire år. Hvis man ser på den beregnede verdien av årlig besparelse, og sammenligner solceller og vindturbiner, ser man at solceller stort sett ligger høyere enn vindturbiner. Alternativet fem turbiner gir omtrent nøyaktig samme merkeeffekt som 30 kW solceller. Investeringskostnaden for solcellene er noe høyere, men de genererer en større pengestrøm i løpet av 15 år enn det vindturbinene gjør på 20 år. På bakgrunn av dette kan det se ut som at solceller er det beste alternativet for Troll. Hvis man ser på IRR, er stort sett alle konfigurasjonene av energisystemet likeverdige investeringer. Derimot gir tallene for NPV en konklusjon som støtter opp under beregningen av pengestrømmen. Jo høyere NPV jo bedre er investeringen. For NPV ser vi at solceller gir mye høyere tall enn vindturbiner. Nok en gang er tallene beregnet over 15 år for solceller og 20 år for vindturbiner. Ut i fra dette vil en investering i solceller være å anbefale, og da er det den høyeste kapasiteten som er undersøkt som gir den beste investeringen.

I tillegg er det gjort beregninger for solceller og vindturbiner i kombinasjon. Ut i fra de økonomiske beregningene er disse konfigurasjonene enda bedre investeringer enn kun solceller. Likevel vil anbefalingen i denne rapporten helle i retning av å velge et system med bare solceller. Det å installere et energisystem bestående av svært mange komponenter kan øke sannsynligheten for at problemer vil oppstå. Som tidligere nevnt er det essensielt på et så avsidesliggende og utsatt sted som Troll at man velger enkle stabile og solide løsninger. Hvis problemer oppstår som mannskapet på Troll ikke kan utbedre selv vil man i verste fall måtte vente opp i mot et år på kvalifisert mannskap og nye deler. Dessuten vil man trenge dobbelt opp med mannskap og utstyr for å installere to vidt forskjellige systemer, noe som vil øke kostnaden til systemet. Solfanger ble undersøkt som en mulighet, men ut i fra de foreløpige lastestimater vil det ikke være nødvendig.

Den siste tiden har verdensmarkedet opplevd en sterk økning i oljeprisen. Dette overføres videre til bensin og dieselpriiser. Dette vil merkes også på den allerede svært høye dieselpriisen på Troll. Det er lite som tyder på at prisene vil synke igjen med det første, og jo mer prisene stiger, jo mer lønnsom vil en investering i fornybar energi være.

Det gjenstår fremdeles noe før kvaliteten på modellene er så god som ønskelig. Selv om lastestimeringen virker å være rimelig god, er det nødvendig å få målte data fra Troll slik at man dimensjonerer systemet riktig. Det er også viktig å få et solid datagrunnlag for fornybare energiresurser. Det bør måles over flere år, eller korreleres med andre data for nærområdet for å kontrollere at man ikke baserer simuleringene på verdier fra ekstremsesonger som man sjelden vil oppleve igjen.

Kapittel 10 Konklusjon og videre arbeid

Hensikten med denne rapporten er å vise hvordan man kan redusere dieselforbruket på forskningsstasjonen Troll i Antarktis ved introduksjon av fornybare energikilder.

10.1 Måloppnåelse

- Redegjøre for arbeid gjennomført i prosjektoppgave og av andre aktører

Enkle modeller av energisystemet på Troll med fornybar energi ble utviklet i prosjektoppgaven. Disse indikerte at det er gode muligheter for dieselbesparelse fra vindturbiner og solceller. Etter at prosjektoppgaven ble levert har målearbeid blitt startet opp på Troll. Foreløpig måles vindhastigheter. Energimålinger har blitt utsatt.

- Redegjøre for aktuelle energiteknologier

Aktuelle energiteknologier på Troll er solceller, vindturbiner og solfangere. Det er innhentet en del data om erfaringer knyttet til fornybar energiforsyning i arktisk klima. Rapporten anbefaler å bruke Proven 6 vindturbiner og LLD dieselgeneratorer. Det anbefales vakuummørsolfangere. Det er ikke foretatt noen valg av leverandør av solceller ettersom det er små forskjeller. I tillegg bør dieselgeneratoren skiftes ut med en som er mer tilpasset driftsforholdene.

- Redegjøre for klimatiske forhold og ressursgrunnlag for fornybar energi

Det er svært kaldt på Troll hele året. Dette medfører spesielle utfordringer, og setter høye krav til valg av utstyr. Vindhastighetene på Troll er svært variable, og har en forholdsvis lav gjennomsnittshastighet. Solinnstrålingen er svært høy over hele sommersesongen. Man opplever også høy refleksjon fra underlaget. Troll opplever mørketid fra midten av mai til midten av august. I denne perioden er det ikke noe grunnlag for solenergi.

- Estimere termisk og elektrisk energiforbruk for Troll

I mangel på tilstrekkelig måledata fra Troll, ble elektrisk og termisk energiforbruk estimert. Den elektriske lasten ligger på mellom 70 og 80 kW, med variasjoner over døgnet og over året. Det årlige elektriske energiforbruket er estimert til 653 675 kWh. Den elektriske lasten ble estimert på bakgrunn av Norsk Standard, og tilgjengelig informasjon om forbruket.

Det termiske energibehovet ligger på 287 kWh/m²år. Lasten varierer overdøgnet og året, og har toppverdier på opp mot 70 kW. Det årlige energiforbruket er estimert til 114 700 kWh. Den termiske estimeringen er utført i TRNSYS, på bakgrunn av data for bygningsmassen ved Troll.

- Modellere og simulere for aktuelle konfigurasjoner av energisystemet

Modelleringen av energisystemet på Troll er gjennomført i TRNSYS. Systemet ble simulert med fornybar energi fra vindturbiner og solceller hver for seg. I tillegg ble

det gjort simuleringer for en kombinasjon av begge fornybare energikilder. Dessuten ble simuleringer gjennomført for de forskjellige systemene med solfangere for varmeproduksjon.

Modellene ble utført på bakgrunn av målte data for vindhastighet og solinnstråling, samt estimerte verdier for lasten. Spesifikke data for Proven 6 vindturbiner og LLD dieselgenerator er også inkludert.

Av de forskjellige kildene viste det seg at solceller produserte mer elektrisk energi enn vindturbiner. Solfangere er ikke interessant i energisystemet slik det fremstår med estimert termisk last ettersom dieselgeneratoren produserer tilstrekkelig spillvarme.

- Gjøre en økonomisk analyse av de aktuelle konfigurasjonene

Økonomisk analyse viser at det er mulig å redusere energiprisen med mellom 15 og 27 % ved å introdusere forskjellige konfigurasjoner av fornybar energi. Tilbakebetalingstiden ligger rundt fire år for alle løsningene. Ytterligere investeringsanalyse viser at alle løsningene er økonomisk holdbare, og at solceller er den beste enkeltløsningen, og vil generere en betydelig større besparelse enn vindturbiner i løpet av levetiden. En kombinasjon av de to vil selvsagt øke besparelsene ytterligere, men komplisere energisystemet.

Man kan regne med at dieselprisene vil stige i tiden fremover, og dermed gjøre en investering i fornybar energi enda mer lønnsom.

- Presentere beste løsning ut i fra simuleringer og analyser

Ut i fra en helhetlig analyse på bakgrunn av resultatene i denne rapporten vil anbefalingen bli å installere opp 300 m² solceller som et tilskudd av fornybar energi i energisystemet på Troll. Da kan man oppnå i størrelsesorden 500 000 kr/år i reduserte dieselutgifter, samt redusere CO₂-utslippene med 52 tonn/år. I tillegg anbefales det å investere i en LLD-dieselgenerator. Det vil redusere dieselutgiftene med drøye 1 000 000 kr/år, og CO₂-utslippene med nærmere 105 tonn/år. I tillegg til å gi en god miljøprofil, er investeringen tilrådelig ut i fra økonomiske kriterier alene.

Det anbefales ikke å kombinere flere fornybare energikilder i systemet i første omgang da dette vil komplisere systemet betraktelig, både i forhold til installasjon og drift. Dersom solceller skulle vise seg å bli en suksess etter et par år med drift, kan man vurdere å utvide andelen fornybar energi med andre kilder.

10.2 Forslag til videre arbeid

For å kunne gjennomføre tiltakene som er anbefalt i denne rapporten er det en del arbeid som gjenstår. En endelig avgjørelse om opprusting og utbygging av energisystemet på Troll bør tas bare etter å ha innhentet data om alle aspekter ved energisystemet slik det fungerer i dag. På den måten kan man unngå å nok en gang feildimensjonere anlegget, og designe et system som kan fungere i mange år.

Først og fremst er det nødvendig å sørge for at målingene i tabell 3.1 i kapittel 3.2 blir gjennomført i minst et år. En endelig beslutning bør gjøres på bakgrunn av faktiske målte data fra Troll. Målinger av ressursgrunnlaget for vind og sol bør fortsette, samt at dataene korreleres med tilgjengelige langtidsdata for samme område for å sikre at simuleringene ikke baseres på ekstremår, som ikke vil gjentas på lenge. Målinger bør dessuten utføres på en LLD-dieselgenerator for å kontrollere at spillvarmeproduksjonen er tilstrekkelig til å forsyne stasjonene med spillvarme for oppvarming.

Undersøkelser i området rundt Troll må gjennomføres for å kontrollere at man har tilstrekkelig plass til utplassering av solcellepaneler.

Etter å ha utført nye simuleringer på bakgrunn av målte data fra Troll bør grunnlaget for de økonomiske beregningene bør undersøkes nærmere. Nøyaktig hva som trengs både av hovedelementer og tilleggsutstyr må kvantifiseres. Hvilket utstyr som er nødvendig for å gjennomføre en installasjon er også nødvendig å kartlegge, samt beregne kostnader for.

Belgiske Princess Elizabeth Station ligger et hestehode foran Troll i arbeidet med fornybar energiforsyning. Stasjonen skal etter planen være i drift i starten av 2009. Det er muligheter for å dra nytte av erfaringene deres i planleggingen av systemet på Troll.

Referanser

- [1] Meteorologisk Institutt Målestasjonen på Troll
http://met.no/Meteorologi/A_male_varet/Observasjoner_fra_land/Ishavsstasjoner/Troll/ 03.04.2008
- [2] Wikipedia Antarktis
<http://no.wikipedia.org/wiki/Antarktis> 04.04.2008
- [3] Antarctic Treaty Secretariat *Antarctic Treaty*
<http://www.ats.aq/uploaded/SIGNEDINWASHINGTON.pdf> 13.feb.08
- [4] Council of Managers of National Antarctic Programs
<http://www.comnap.aq/facilities> 13.feb.08
- [5] Antarctic Treaty Secretariat Committee for Environmental Protection
Madrid protocol
http://cep.ats.aq/cep/MediaItems/CEP_Handbook_2007/English/Protocol_e.pdf
11.feb.08
- [6] IEA *Renewable Energy Market and Policy Trends in IEA Countries 2004*
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/renewable1.pdf> 27.05.2008
- [7] Norsk Polarinstitutt Faktaark *Året rundt i Antarktis*
<http://npweb.npolar.no/tema/1167821898.49> 13.feb.08
- [8] Norwegian-U.S. Scientific Traverse of East Antarctica
<http://traverse.npolar.no/introduction> 13.feb.08
- [9] Randi Buchmann, Troms Kraft, rb@tromskraft.no
- [10] Marte Gammelsæter *Energiforsyningsløsninger i Antarktis 2007*
- [11] Øystein Mikelborg, NPI mikelborg@npolar.no
- [12] Kjell Krüger, Norsec, kk@norsec.no
- [13] Johan Hustadnes, NPI, elektriker.troll@npolar.no
- [14] Verve Energy/ Powercorp *Saving fuel and the environment using wind and low load diesel technology 2006* WA Engineering Excellence Awards
- [15] David Pointing *Accessing sustainable hydrogen energy technologies: Strategies for remote Antarctic communities 2007*
- [16] Australian Antarctic Division *Wind Power Performance*
<http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=32997> 14.mars 08
- [17] Poul Scheel Larsen *Thermodynamics and Sustainable Energy*
Proceedings Sustainable Energy Supply in the Arctic Conference in Greenland 2008

- [18] Hugh Sharman *Electricity storage, a key component of future energy supply in the Arctic*
 Proceedings Sustainable Energy Supply in the Arctic Conference in Greenland 2008
- [19] StatoilHydro *Det første hydrogensamfunn*
<http://www.statoilhydro.com/no/NewsAndMedia/Multimedia/features/Pages/HydrogenSociety.aspx> 11.04.2008
- [20] Daniel Thompson *Wind/diesel hybrid systems –An Australian perspective* PPT-presentasjon Verve Energy
- [21] *Advanced high penetration wind-diesel power system*
<http://www.westernpower.com.au> 18.02.2008
- [22] Daniel Thompson, Verve Energy, daniel.thompson@verveenergy.com.au
- [23] *Windpower – Technology, Control, System Integration* Forelesningsnotater fra Kjetil Uhlen/ Jarle Eek SefAS 14. sept.2007
- [24] Mukund Patel *Wind and Solar Power Systems -Design, Analysis and Operation*
 2nd edition Taylor & Francis
- [25] Manwell, Mcgawan og Rogers *Wind Energy Explained Theory, Design and Application* Wiley 2006
- [26] Hubert *Electric Machines Theory, Operation, Applications, Adjustment and Control* 2nd edition Prentice Hall 2002
- [27] European Wind Energy Association *Wind Energy –The Facts*
http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/WETF.pdf 27.05.2008
- [28] Laakso et al. *Wind energy projects in cold climates* 1.edt 2005 IEA report
- [29] Laakso et. al. *State-of-the-art of wind energy in cold climates* IEA R&D WIND 2003
- [30] Martin O. L Hansen DTU *Wind Turbines Performance in Arctic Conditions*
 Presentasjon under Sustainable Energy Supply in the Arctic Conference in Greenland 2008
- [31] Meteorologisk leksikon Sykloner
http://retro.met.no/met/met_lex/q_u/sykloner.html 01.04.2008
- [32] Meteorologisk leksikon
http://retro.met.no/met/met_lex/v_a/vind/safir-simpson_skala.html 02.04.2008
- [33] *Exmouth Advanced Mini Wind Farm Project Summary Report*
<http://www.westwind.com.au/images/exmouthreport.pdf> 02.04.2008

- [34] Westwind Wind Turbines
<http://www.westwind.com.au> 02.04.2008
- [35] Australian Antarctic Division *Wind Turbine System*
<http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=32995> 02.04.2008
- [36] Princess Elizabeth Antarctica The first zero emissions research station
<http://www.antarcticstation.org/> 02.04.2008
- [37] Princess Elisabeth Antarctica: The First Zero Emissions Research Station: Technical Sheet
http://www.antarcticstation.org/index.php?/project/press_room/press_pack/&s=2&rs=6&uid=76&lg=en 02.04.2008
- [38] Johan Berte, Antarctic Base Project Manager, International Polar Foundation,
johan.berte@polarfoundation.org
- [39] Proven Energy
http://www.provenenergy.co.uk/about_proven.shtml 02.04.2008
- [40] Proven Energy Technical Specification Sheet
<http://www.provenenergy.co.uk/>
- [41] Tomas Markvart: *Solar Electricity 2nd edition* Wiley 2004
- [42] John Rekstad *Utnyttelse av solenergi til oppvarming* Utgitt til faglærerseminær ved NTNU april 2000
- [43] Per Finden *Veileder i lokal og regional energiplanlegging* Kompendie i faget TET-13 2005
- [44] Janne Dragsted *Solar Heating Systems in the Arctic* Proceedings Sustainable Energy Supply in the Arctic Conference in Greenland 2008
- [45] Hans-Christian Francke, Solarnor, hans-christian.francke@solarnor.com
- [46] Norsk Polarinstitutt *Troll*
<http://npweb.npolar.no/plattform/troll> 02.04.2008
- [47] Meteorologisk Institutt Data hentet fra brukertjenesten Eklima
www.eklima.met.no 03.04.3008
- [48] NASA Værdatabase
http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=kamilco%40hotmail.com&step=2&lat=59&lon=10&num=191150&p=grid_id&p=srf_dwn0&veg=17&hgt=+100&submit=Submit 02.05.2008
- [49] TRNSYS16 Documentation Mathematical Reference
<http://www.trnsys.com/>

- [50] Sintef *Enøk i bygninger Effektiv energibruk* Universitetsforlaget 1996
- [51] Lyse energi Miljøkalkulator
<http://www.lyse.no/article.php?articleID=7115&categoryID=7080> 08.04.08
- [52] Roy Bruun, NPI, roy.bruun@npolar.no
- [53] David G. Luenberger *Investment Science* Oxford University Press 1998
- [54] Norges Bank <http://www.norges-bank.no/> 02.06.2008
- [55] Statistisk Sentralbyrå <http://www.ssb.no/emner/10/06/20/ogintma/> 02.06.2008

Vedlegg 1

Simuleringsdata for sol og vind i kombinasjon

Komponent	Typenr. I TRNSYS	Beskrivelse
Filleser	9e	Leser solinnstråling
Filleser	9e	Leser lastfil
Filleser	9e	Leser vindhastigheter
Strålingsbehandler	16a	Se under
PV-panel	180	Se under
Vindturbin	90	Se under
Dieselaggregat	120b	Se under
Controller	102a *	Se under
Plotter/printer	65c	Plotter grafer/skriver til fil
Forcing function temp	14c	Gir temperaturgrafene
Kalkulator	Equations	Se under

Strålingsbehandler:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Stråling på horisontal flate	Innkommende stråling	Lest fra fil
Tid forrige data lest	Info fra filleser	”
Tid neste data å lese	Info fra filleser	”
Refleksjon fra underlaget	Hvor mye sol reflekteres	0,2 (default)
Vinkel på panelet	Vinkel i forhold til horisonten	55
Azimuthvinkel	Avvik fra ekvatorvendt	0

Outputverdier	Beskrivelse
Extraterrestrial	Stråling utenfor atmosfæren
Zenitvinkel	Solas vinkel på himmelen (0 er rett ovenfra)
Azimuthvinkel	Avvik fra ekvatorvendt
Total horisontal stråling	
Direkte stråling på horisontal flate	
Horisontal diffus stråling	Stråling spredt i atmosfæren
Total stråling på overflate	
Direkte stråling på overflate	
Diffus stråling på overflate	
Trefningsvinkel direkte stråling	Vinkel mellom solstråler og underlaget
Helning på overflate	

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Horisontal strålingsmodus	Beskriver innkommende stråling	1 (bare horisontal stråling kjent)
Følgemodus	Følger panelet sola?	1 (nei)
Overflatevinkel		3 (Reindl-modellen)
Oppstartsdag	Første dag for beregning	1
Breddegrad	Beliggenhet for panelet	-72° sør
Solkonstanten	Innstrålt effekt utenfor amosfæren	4871kJ/hr.m2
Endring i soltid	Endret vinkel over en lengdegrad	0
Soltid?	Ta hensyn til ovennevnte?	1

PV-panel

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under beregning
PVmode	PVpanel av/på	På
GT	Innstrålt flux	Totalt horisontal fra strålingsbehandler
Omgivelsestemperatur		T_amb

Outputverdier	Beskrivelse
IA	Strøm produsert i panelet
VA	Spenning produsert
PA	Effekt produsert
ETA	Virkningsgrad
TC	Temperatur i cellene
ISCA	Kortslutningsstrøm
VOCA	Spenning ved åpen krets

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
MPPT	Maksimal effekt tracking	På
TCMODE	Temperaturberegningmåte	2(varmetapskoeffisient)
NCSER	Antall celler i serie per modul	150 (
NMSER	Antall moduler i serie	20-37
NMPAR	Antall moduler i parallell	6-9
AREA	Areal av en modul	0,9
TAU ALPHA	Refleksjon fra overflate, absorbert av solcelle	0,9 (default)
EGAP	Båndgapspenning	1,12eV (default)
RSH	Shuntmotstand	1E6 (default)
PVTYPE	Leser datafil	2 (default)
Logisk enhet for datafil		35

Ekstern datafil:

Følgende datafil ble brukt i simuleringene av solcellen. Solcelle nummer to ble brukt til alle simuleringer, da problemer med TRNSYS gjorde det vanskelig å bruke egne data.

3

```

1,REC Solar SCM 220
8.320 36.510 25.0 1000.0 7.710 28.330 4.00E-3 -0.1040 20.0 43.0
800.0 30.0 50000.0
2, Flagsol (KFA) 150 cell module (29.06.97)
2.664 87.720 25.0 1000.0 2.448 70.731 1.48E-3 -0.3318 20.0 44.0
800.0 30.0 50000.0
3, Kyocera LA 44/63S (IFE)
3.30 25.91 25.0 1000.0 3.03 20.7 2.20E-3 -0.095 20.0 50.0 800.0 0.0
0.0

```

Vindturbin:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Kontrollsignal	Turbin av/på	På
Vindhastighet	Vindhastighet inn på turbin	Gitt fra fil
Omgivelsestemperatur	Temperaturen ved turbin	T_amb
Vindskjærkoeffisient	Forstyrrelse pga underlag	0,14 (default)
Barometrisk trykk	Lufttrykket i bar	101325 Pa (default)

Outputverdier	Beskrivelse
Effekt	Ytelse fra generator
Turbintimer	Antall timer med produksjon
Effektkoeffisient	

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Høyde over havet		1200 moh
Innsamlingshøyde data		10 m
Høyde hub		9m / 15 m
Effekttap turbin		0 (default)
Antall turbiner		4-9
Logisk enhet		46

Ekstern datafil:

Det er mulig å legge inn spesifikke data for ytelse i turbinen. Følgende fil er brukt i disse simuleringene. Ctl_mode endres for pitch/ stall.

```

WECS_Typ Proven 6           Vindturbin type
WECS_REF provenenergy.co.uk Kilde
Len_Unit m                 Lengdeenhet, må være meter
Spd_Unit m/s              Fartsenhet, må være m/s
Pwr_Unit kW               Effektenhet, må være kW
Ctl_mode S                Reguleringsmodus (S, P, V)
Rotor_Ht 9.00            Rotorhøyde, meter
Rotor_Di 5.40            Rotordiameter, meter
Sensr_Ht 9.00            Sensorhøyde for kurve
Sher_Exp 0.16            Vindskjær for kurve
Turb_Int 0.10            Turbulens for kurve
Air_Dens 1.225           Lufttetthet for kurve, kg/m3
Pwr_Ratd 6.00           Merkeeffekt for turbin, kW
Spd_Ratd 12.00          Nominell vindhastighet, m/s
Num_Pair 25             Antall datasett for vindhastighet

```

0	0.00	Første datasett (vindhastighet, effekt)
1	0.00	Andre datasett
2	0.00	Ytterligere datasett
3	0.20	
4	0.50	
5	1.00	
6	1.50	
7	2.10	
8	3.00	
9	4.00	
10	5.00	
11	5.90	
12	6.40	
13	6.40	
14	6.20	
15	6.15	
16	6.00	
17	6.00	
18	6.00	
19	6.00	
20	6.00	
21	6.00	
22	6.00	
23	6.00	Ytterligere data sett (max 100 total)
24	6.00	
25	6.00	Siste datasett

For Proven 6 mangler det data for shear, turbulence og lufttetthet som målingen av turbinparametere ble utført under. Disse er lånt fra Enercon E33.

Controller:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
P-last	Størrelse på last som dekkes av DEGS	Gitt av PDEGS fra kalkulator

Outputverdier	Beskrivelse
PDEGS	Ytelse krevet av DEGS
NDEGS	Antall DEGS i drift

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Nmin	Minste antall DEGS i drift	1
Nmax	Største antall DEGS i drift	5
Prated	Merkeeffekt aggregat	P_DEGSrated
Xlow	Laveste last	0,5
Xup	Høyeste last før ny DEGS kobler inn	0,85

Dieselaggregat:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Bryter	DEGS av/på	På
P_set		Hentes fra Controller
Nunits	Antall aggregater i drift	N_DEGS

Outputverdier	Beskrivelse
P _{total}	Ytelse fra alle DEGS i drift
V _{liq}	Forbruk flytende brensel
V _{gas}	Forbruk gassformig brensel
ETA _{fuel}	Virkningsgrad brensel
ETA _{el}	Elektrisk virkningsgrad
Q _{waste}	Spillvarme

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Mode	Type aggregat	2 (Spesifikk)
Brenselstype	Angir aktuelt brensel	1(Diesel)
P _{max}	Høyeste tillatte belastning	P _{DEGSmax}
P _{min}	Laveste tillatte belastning	P _{DEGSmin}
Prated	Merkeeffekt	P _{DEGSrated}

Ekstern datafil:

Denne filen angir dieselforbruket til generatoren som en lineær kurvetilpasning.

```
1
1,Detroit Diesel D&WES (320kW)
320.0      5.821  74.13
```

Kalkulator:

Kalkulatoren tilbyr muligheten til å utføre enkle beregninger selv. Under er beregningene som ble utført i soldiesel-modellen.

Parametere

Input	Beregninger/satte verdier
Temp(fra forcingfunction)	P _{DEGSmax} = 320 kW
	P _{DEGSmin} = 16 kW
	P _{DEGSrated} = 320 kW
	N _{DEGS} = 1
	T _{amb} = Temp

Samkjøring

Input	Beregninger/satte verdier
Psol (fra type 180)	P _{fornybar} = Psol + P _{vind}
P _{DEGSmin} (fra parametere)	P _{underskudd} = (P _{last} - P _{fornybar})
P _{vind} (fra type 90)	P _{behovdiesel} = max(P _{underskudd} , 0)
P _{last} (fra filleser)	P _{DEGS} = max(abs(P _{behovdiesel}), P _{DEGSmin} * 1000)

Total

Input	Beregninger/satte verdier
Psol (fra type 180)	P _{tot} = Psol + P _{DEGS}
P _{DEGS} (fra type 120)	P _{sol} = Psol
P _{vind} (fra type 90)	P _{vind} = P _{vind}
	P _{DEGS} = P _{DEGS}

I tillegg finnes det i soldieselmodellen to kalkulatorer som heter omformer og omformer2. Disse to står for omregning av soldataene slik at de til enhver tid har riktig benevning. Dataene som leses fra fil kommer i måleenhet W/m^2 , mens strålingsbehandleren trenger data i kJ/m^2h . Omformerne tar ganske enkelt og ganger med 3,6 og deler med 3,6 fordi PVpanelet trenger W/m^2 igjen.

Inputfil og resultater

Både rådata for innstrålt effekt, lastfil, og resultatfiler omfatter en større mengde tall. Disse er ikke presentert i rapporten men foreligger om det skulle være av interesse.

Vedlegg 2

Simuleringsdata for soldieselmodell

Komponent	Typenr. I TRNSYS	Beskrivelse
Filleser	9e	Leser solinnstråling
Filleser	9e	Leser lastfil
Strålingsbehandler	16a	Se under
PV-panel	180	Se under
Dieselaggregat	120b	Se under
Controller	102a *	Se under
Plotter/printer	65c	Plotter grafer/skriver til fil
Forcing function temp	14c	Gir temperaturgrafene
Kalkulator	Equations	Se under

Strålingsbehandler:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Stråling på horisontal flate	Innkommende stråling	Lest fra fil
Tid forrige data lest	Info fra filleser	”
Tid neste data å lese	Info fra filleser	”
Refleksjon fra underlaget	Hvor mye sol reflekteres	0,2 (default)
Vinkel på panelet	Vinkel i forhold til horisonten	55
Azimuthvinkel	Avvik fra ekvatorvendt	0

Outputverdier	Beskrivelse
Extraterrestrial	Stråling utenfor atmosfæren
Zenitvinkel	Solas vinkel på himmelen (0 er rett ovenfra)
Azimuthvinkel	Avvik fra ekvatorvendt
Total horisontal stråling	
Direkte stråling på horisontal flate	
Horisontal diffus stråling	Stråling spredt i atmosfæren
Total stråling på overflate	
Direkte stråling på overflate	
Diffus stråling på overflate	
Trefningsvinkel direkte stråling	Vinkel mellom solstråler og underlaget
Helning på overflate	

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Horisontal strålingsmodus	Beskriver innkommende stråling	1 (bare horisontal stråling kjent)
Følgemodus	Følger panelet sola?	1 (nei)
Overflatevinkel		3 (Reindl-modellen)
Oppstartsdag	Første dag for beregning	1
Breddegrad	Beliggenhet for panelet	-72° sør
Solkonstanten	Innstrålt effekt utenfor amosfæren	4871kJ/hr.m2
Endring i soltid	Endret vinkel over en lengdegrad	0
Soltid?	Ta hensyn til ovennevnte?	1

PV-panel

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under beregning
PVmode	PVpanel av/på	På
GT	Innstrålt flux	Totalt horisontal fra strålingsbehandler
Omgivelsestemperatur		T_amb

Outputverdier	Beskrivelse
IA	Strøm produsert i panelet
VA	Spenning produsert
PA	Effekt produsert
ETA	Virkningsgrad
TC	Temperatur i cellene
ISCA	Kortslutningsstrøm
VOCA	Spenning ved åpen krets

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
MPPT	Maksimal effekt tracking	På
TCMODE	Temperaturberegningmåte	2(varmetapskoeffisient)
NCSER	Antall celler i serie per modul	150 (
NMSER	Antall moduler i serie	20-37
NMPAR	Antall moduler i parallell	6-9
AREA	Areal av en modul	0,9
TAU ALPHA	Refleksjon fra overflate, absorbert av solcelle	0,9 (default)
EGAP	Båndgapspenning	1,12eV (default)
RSH	Shuntmotstand	1E6 (default)
PVTYPE	Leser datafil	2 (default)
Logisk enhet for datafil		35

Ekstern datafil:

Følgende datafil ble brukt i simuleringene av solcellen. Solcelle nummer to ble brukt til alle simuleringer, da problemer med TRNSYS gjorde det vanskelig å bruke egne data.

3

```

1,REC Solar SCM 220
8.320 36.510 25.0 1000.0 7.710 28.330 4.00E-3 -0.1040 20.0 43.0
800.0 30.0 50000.0
2, Flagsol (KFA) 150 cell module (29.06.97)
2.664 87.720 25.0 1000.0 2.448 70.731 1.48E-3 -0.3318 20.0 44.0
800.0 30.0 50000.0
3, Kyocera LA 44/63S (IFE)
3.30 25.91 25.0 1000.0 3.03 20.7 2.20E-3 -0.095 20.0 50.0 800.0 0.0
0.0

```

Controller:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
P-last	Størrelse på last som dekkes av DEGS	Gitt av PDEGS fra kalkulator

Outputverdier	Beskrivelse
PDEGS	Ytelse krevet av DEGS
NDEGS	Antall DEGS i drift

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Nmin	Minste antall DEGS i drift	1
Nmax	Største antall DEGS i drift	5
Prated	Merkeeffekt aggregat	P_DEGSrated
Xlow	Laveste last	0,5
Xup	Høyeste last før ny DEGS kobler inn	0,85

Dieselaggregat:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Bryter	DEGS av/på	På
P_set		Hentes fra Controller
Nunits	Antall aggregater i drift	N_DEGS

Outputverdier	Beskrivelse
Ptotal	Ytelse fra alle DEGS i drift
V_liq	Forbruk flytende brensel
V_gas	Forbruk gassformig brensel
ETA_fuel	Virkningsgrad brensel
ETA_el	Elektrisk virkningsgrad
Q_waste	Spillvarme

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Mode	Type aggregat	2 (Spesifikk)
Brenselstype	Angir aktuelt brensel	1(Diesel)
Pmax	Høyeste tillatte belastning	P_DEGSmax
Pmin	Laveste tillatte belastning	P_DEGSmin
Prated	Merkeeffekt	P_DEGSrated

Ekstern datafil:

Denne filen angir dieselforbruket til generatoren som en lineær kurvetilpasning.

1

```
1,Detroit Diesel D&WES (320kW)
320.0      5.821  74.13
```

Kalkulator:

Kalkulatoren tilbyr muligheten til å utføre enkle beregninger selv. Under er beregningene som ble utført i soldiesel-modellen.

Parametere

Input	Beregninger/satte verdier
Temp(fra forcingfunction)	P_DEGSmax = 320 kW
	P_DEGSmin = 16 kW
	P_DEGSrated= 320 kW
	N_DEGS = 1
	T_amb = Temp

Samkjøring

Input	Beregninger/satte verdier
Psol (fra type 180)	Punderskudd = (P_last-Psol)
P_DEGSmin (fra parametere)	Pbehovdiesel = max(Punderskudd, 0)
P_last (fra filleser)	P_DEGS = max(abs(Pbehovdiesel), P_DEGSmin* 1000)

Total

Input	Beregninger/satte verdier
Psol (fra type 180)	Ptot = Psol + P_DEGS
P_DEGS (fra type 120)	P_sol = Psol

I tillegg finnes det i soldieselmodellen to kalkulatorer som heter omformer og omformer2. Disse to står for omregning av soldataene slik at de til enhver tid har riktig benevning. Dataene som leses fra fil kommer i måleenhet W/m^2 , mens strålingsbehandleren trenger data i kJ/m^2h . Omformerne tar ganske enkelt og ganger med 3,6 og deler med 3,6 fordi PVpanelet trenger W/m^2 igjen.

Inputfil og resultater

Både rådata for innstrålt effekt, lastfil, og resultatfiler omfatter en større mengde tall. Disse er ikke presentert i rapporten men foreligger om det skulle være av interesse.

Vedlegg 3

Simuleringsdata for vinddieselmodell

Komponent	Typenr. I TRNSYS	Beskrivelse
Filleser	9e	Leser vindhastigheter
Filleser	9e	Leser lastfil
Vindturbin	90	Se under
Diesellaggregat	120b	Se under
Controller	102a *	Se under
Plotter/Printer	65c	Plotter grafer/skriver til fil
Forcing function temp	14c	Gir temperaturgrafene
Kalkulator	Equations	Se under

*Finnes ikke i TRNSYS standardbibliotek, utviklet ved IFE av blant andre Øystein Ulleberg

Vindturbin:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Kontrollsignal	Turbin av/på	På
Vindhastighet	Vindhastighet inn på turbin	Gitt fra fil
Omgivelsestemperatur	Temperaturen ved turbin	T_amb
Vindskjærrkoeffisient	Forstyrrelse pga underlag	0,14 (default)
Barometrisk trykk	Lufttrykket i bar	101325 Pa (default)

Outputverdier	Beskrivelse
Effekt	Ytelse fra generator
Turbintimer	Antall timer med produksjon
Effektkoeffisient	

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Høyde over havet		1200 moh
Innsamlingshøyde data		10 m
Høyde hub		9m / 15 m
Effekttap turbin		0 (default)
Antall turbiner		4-9
Logisk enhet		46

Ekstern datafil:

Det er mulig å legge inn spesifikke data for ytelse i turbinen. Følgende fil er brukt i disse simuleringene. Ctl_mode endres for pitch/ stall.

WECS_Typ Proven 6	Vindturbin type
WECS_REF provenenergy.co.uk	Kilde
Len_Unit m	Lengdeenhet, må være meter
Spd_Unit m/s	Fartsenhet, må være m/s
Pwr_Unit kW	Effektenhet, må være kW
Ctl_mode S	Reguleringsmodus (S, P, V)

Rotor_Ht 9.00	Rotorhøyde, meter
Rotor_Di 5.40	Rotordiameter, meter
Sensr_Ht 9.00	Sensorhøyde for kurve
Sher_Exp 0.16	Vindskjær for kurve
Turb_Int 0.10	Turbulens for kurve
Air_Dens 1.225	Lufttetthet for kurve, kg/m3
Pwr_Ratd 6.00	Merkeeffekt for turbin, kW
Spd_Ratd 12.00	Nominell vindhastighet, m/s
Num_Pair 25	Antall datasett for vindhastighet
0 0.00	Første datasett (vindhastighet, effekt)
1 0.00	Andre datasett
2 0.00	Ytterligere datasett
3 0.20	
4 0.50	
5 1.00	
6 1.50	
7 2.10	
8 3.00	
9 4.00	
10 5.00	
11 5.90	
12 6.40	
13 6.40	
14 6.20	
15 6.15	
16 6.00	
17 6.00	
18 6.00	
19 6.00	
20 6.00	
21 6.00	
22 6.00	
23 6.00	Ytterligere data sett (max 100 total)
24 6.00	
25 6.00	Siste datasett

For Proven 6 mangler det data for shear, turbulence og lufttetthet som målingen av turbinparametere ble utført under. Disse er lånt fra Enercon E33.

Controller:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
P-last	Størrelse på last som dekkes av DEGS	Gitt av PDEGS fra kalkulator "Samkjøring"

Outputverdier	Beskrivelse
PDEGS	Ytelse krevet av DEGS
NDEGS	Antall DEGS i drift

Parameterverdier	Berkrivelse	Verdi under simulering
Nmin	Minste antall DEGS i drift	1
Nmax	Største antall DEGS i drift	5
Prated	Merkeeffekt aggregat	P_DEGSrated
Xlow	Laveste last	0,5
Xup	Høyeste last før ny DEGS kobler inn	0,85

Diesellaggregat:

Inputverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Bryter	DEGS av/på	På
P_set		Hentes fra Controller
Nunits	Antall aggregater i drift	N_DEGS

Outputverdier	Beskrivelse
Ptotal	Ytelse fra alle DEGS i drift
V_liq	Forbruk flytende brensel
V_gas	Forbruk gassformig brensel
ETA_fuel	Virkningsgrad brensel
ETA_el	Elektrisk virkningsgrad
Q_waste	Spillvarme

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Mode	Type aggregat	2 (Spesifikk)
Brenselstype	Angir aktuelt brensel	1(Diesel)
Pmax	Høyeste tillatte belastning	P_DEGSmax
Pmin	Laveste tillatte belastning	P_DEGSmin
Prated	Merkeeffekt	P_DEGSrated

Ekstern datafil:

Denne filen angir dieselforbruket til generatoren som en lineær kurvetilpasning.

1

```
1,Detroit Diesel D&WES (320kW)
320.0      5.821  74.13
```

Kalkulator:

Kalkulatoren tilbyr muligheten til å utføre enkle beregninger selv. Under er beregningene som ble utført i vinddiesel-modellen.

Parametere

Input	Beregninger/satte verdier
Temp(fra forcingfunction)	$P_DEGS_{max} = 320 \text{ kW}$
	$P_DEGS_{min} = 16 \text{ kW}$
	$P_DEGS_{rated} = 320 \text{ kW}$
	$N_DEGS = 1$
	$T_amb = Temp$

Samkjøring

Input	Beregninger/satte verdier
Pvind (fra type 90)	$P_{underskudd} = (P_last - P_{vind})$
P_DEGS_{min} (fra parametere)	$P_{behovdiesel} = \max(P_{underskudd}, 0)$
P_last (fra filleser)	$P_DEGS = \max(\text{abs}(P_{behovdiesel}), P_DEGS_{min} * 1000)$

Total

Input	Beregninger/satte verdier
Pvind (fra type 90)	$P_{tot} = P_{vind} + P_DEGS$
P_DEGS (fra type 120)	$P_vind = P_{vind}$

Inputfil og resultater

Både rådata for vindhastighet, lastfil, og resultatfiler omfatter en større mengde tall. Disse er ikke presentert i rapporten men foreligger om det skulle være av interesse.

Vedlegg 4

Solfangerkomponenten

Solfangerkomponenten er inkludert i alle modellene. Den henter data fra strålingsbehandleren i Vedlegg 2. Varmetilskuddet vises i en egen plotter, og sammen med varmeproduksjonen fra dieselgeneratoren.

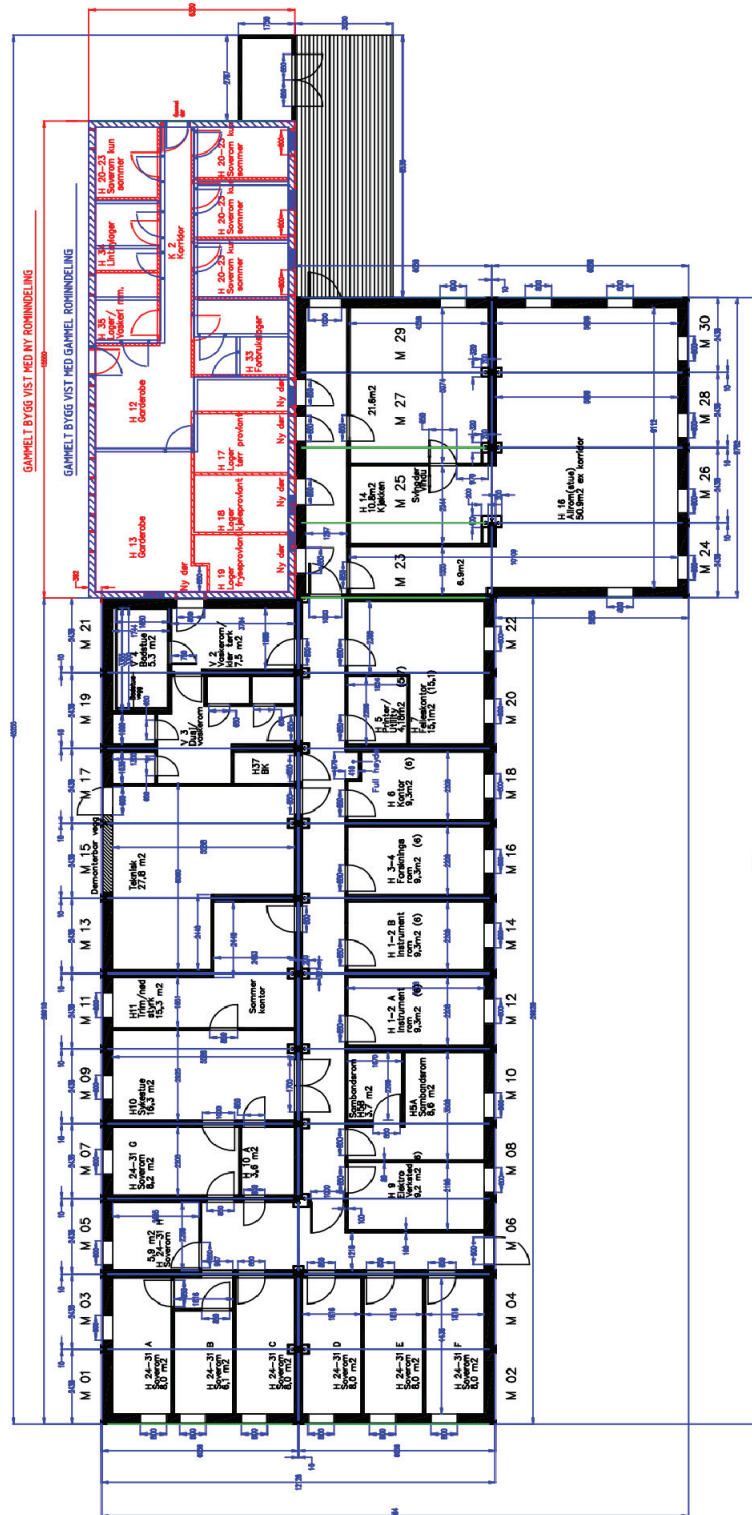
Inputverdi	Beskrivelse	Verdi under simulering
Innløstemp		20 °C
Innløpsrate		100 kg/hr
Omgivelsestemp		T_amb
Total stråling		Fra strålingsbehandler
Diffus stråling		Fra strålingsbehandler
Solas innfallsvinkel		0
Solas zenitvinkel		Fra strålingsbehandler
Solas azimuthvinkel		Fra strålingsbehandler
Solfanger vinkel		45 °
Solfanger azimuthvinkel		0

Outputverdier	Beskrivelse
Utløpstemperatur	
Utløpsrate	
Nyttig energitilskudd	

Parameterverdier	Beskrivelse	Verdi under simulering
Antall i serie	Antall solfangerer i serie	1
Solfangerareal	Areal av hver solfanger	
Spesifikk varmekapasitet	For transportmediet	4,190 kJ/kgK
Effektivitetsmodus	Bestemmer hvor temperaturen måles	1
Strømningsrate (test)	Raten under testforhold	3,0 kg/hrKm ²
Intercept effektivitet	a ₀ (Se tabell 6.3)	0,7
Neg. første ordens effektivitetskoeffisient	a ₁ (Se tabell 6.3)	10 kJ/hrKm ²
Neg. andre ordens effektivitetskoeffisient	a ₂ (Se tabell 6.3)	0,03 kJ/hrKm ²
Logisk enhet		51
Antall longitudinal angles		5
Antall transverse angles		5

Vedlegg 5

Plantegning hovedbygning



Vedlegg 6

Elektrisk lastestimering

Antagelser:

Aktiviteten på Troll fyller i hovedsak to funksjoner: kontorer/verksted/forskning og bolighus
Det totale arealet er delt i to mellom de to funksjonene
Det elektriske forbruket er estimert på grunnlag av tall fra NS, modifisert til forholdene på Troll
Det er høyere aktivitet i perioden jan,feb,mars, dette vises som økt energiforbruk til utstyr
Høysesongen er de første 2160 timene av året
Den gamle delen av hovedbygget er kun i bruk om sommeren
All oppvarming skjer ved spillvarme fra dieselaggegetat

Areal "kontor"	222 m2
Areal "enebolig"	222 m2
Areal gammel del(Lager + sommerbruk)	99 m2
takhøyde	3.4 m
Volum hver del	754.8 m3
Volum hver del sommer	923.1 m3

Elektrisk energibehov normal driftstid Data fra NS

	Bolighus	Kontorbygg
Belysning	2.9	8 W/m2
Utstyr	4	11 W/m2
Varmtvann	5.1	1.6 W/m2
Ventilasjon	2.5	2 kW/m3s

Regner med at aktiviteten på kontordelen av bygget er høyere i perioden med høy aktivitet.
Høysesong: jan,feb,mars Lavsesong: Ellers

Anslår følgende behov på Troll uti fra kunnskap om aktivitet og data fra NS:

	Bolighus	Kontor Lavsesong	Kontor Høysesong
Belysning	2.9	8	8
Utstyr	4	5.5	11
Varmtvann	5.1	1.6	1.6
Ventilasjon	2.5	2	2

Elektrisk energibehov utenfor normal driftstid. Antatt ut i fra NS

	Bolighus	Kontorbygg
Belysning	0	0 W/m2
Utstyr	0	5.5 W/m2
Varmtvann	0	0 W/m2
Ventilasjon	2.5	1 kW/m3s

Anslår følgende behov på Troll uti fra kunnskap om aktivitet og data fra NS:

	Bolighus	Kontor Lavsesong	Kontor Høysesong
Belysning	0	0	0
Utstyr	0	2	5.5
Varmtvann	0	0	0
Ventilasjon	2.5	1	1

Driftstid Data fra NS

	Bolighus	Kontorbygg
Belysning/utstyr	16	12 h/d
Varmtvann	12	12 h/d
Ventilasjon	24	12 h/d

Vedlegg 7

Datagrunnlag termisk lastestimering

kilder: trnsys library, uniteam v Carsten Gnutzmann, FDV Troll ved Statsbygg, SI Chemical data

Vegger, tak og gulv

Vegg100

	tykkelse[cm]	spesifikk vekt [kg/m ³]	λ [W/mK]	λ [kJ/hmK]	Cp [kJ/kgK]	
Sponplate	0.8	700	0.13	0.0105	0.84	
Mineralull	10	30	0.038	0.036	1.88	
Blikk(Jern)	0.06	7850	80	22.22	0.45	
Total	10.86		U-verdi [W/m ² K]			0.35

Vegg 150

	tykkelse[cm]	spesifikk vekt [kg/m ³]	λ [W/mK]	λ [kJ/hmK]	Cp [kJ/kgK]	
Sponplate	0.8	700	0.13	0.0105	0.84	
Mineralull	15	30	0.038	0.036	1.88	
Blikk(Jern)	0.06	7850	80	22.22	0.45	
Total	15.86		U-verdi [W/m ² K]			0.24

Tak

	tykkelse[cm]	spesifikk vekt [kg/m ³]	λ [W/mK]	λ [kJ/hmK]	Cp [kJ/kgK]	
Sponplate	0.8	700	0.13	0.0105	0.84	
PE-folie	0.02	1000	-	-	-	
Mineralull	12	30	0.038	0.036	1.88	
Blikk(Jern)	0.06	7850	80	22.22	0.45	
Total	12.88		U-verdi [W/m ² K]			0.3

Gulv

	tykkelse[cm]	spesifikk vekt [kg/m ³]	λ [W/mK]	λ [kJ/hmK]	Cp [kJ/kgK]	
Gulvbelegg	0.2	1500	0.23	0.064	?	
Sponplate	2	700	0.13	0.0105	0.84	
PE-folie	0.02	1000	-	-	-	
Mineralull	15	30	0.038	0.036	1.88	
Blikk(Jern)	0.06	7850	80	22.22	0.45	
Total	17.28		U-verdi [W/m ² K]			0.23

Vinduer

	høyde [cm]	bredde [cm]	U-verdi	andel karm	daglysabsorpsjon	
Størrelse	80		80	1.3	0.32	0.71

Ventilasjon og oppvarming tar utgangspunkt i default-verdier. Innendørstemperaturen er gitt til å være mellom 19 og 20 grader. Tabellen under gir innstillinger for alle soner. Selve programmet foreligger dersom mer detaljer er ønskelig.

	Personer	Aktivitetsnivå	Datamaskiner	Lys
Soverom	0	0	0	-
Stue	4	3	1	ja (default nivå)
Kontor	4	4	12	ja (default nivå)
Verksted	4	6	6	ja (default nivå)

Vedlegg 8

Prisoverslag

Vindturbiner:

21 250 euro/ turbin = 171 700kr per turbin

Kurs 1 euro er 8,08 norske kroner

Inkluderer ikke kraftelektronikk, men noe reservedeler.

Kilde: Johan Berte Anbud til Princess Elizabeth Station fra Proven Energy

Dieselgeneratorer:

400 000 australske dollar/ generator = 2 056 000kr / generator

4 mill. australske dollar (20 560 000 kr) for 2 stk generatorer, switchboard, power station controlsystem, fuelsystem, en vindturbin på 600kW samt installasjon.

Kilde: Daniel Thompson

Kurs 1 australsk dollar er 5,14 norske kroner

Antar at 20 mill. er mer enn hva det vil koste på Troll. Kommer til å trenge 2 generatorer og div ekstrautstyr som DGI samt installering, frakt etc. Uvisst hva som vil måtte byttes ut av tilleggsutstyr hvis man installerer dieselgenerator på Troll. Antar at denne utgiften vil være den samme uansett hvilken dieselgenerator man velger. Ettersom man uansett må skifte dieselgenerator i løpet av kort tid vil kostnader som transport og installasjon komme uansett, og er ikke relatert spesielt til introduksjon av LLD eller fornybar energi

Antar at utgifter på utstyr beløper seg til ca 6 000 000 norske kroner.

Solceller:

100 000 kr for 4 kW for IFE

Antar 20 % økning for andre

I tillegg en økning pga Antarktis?

Stativ: 30 000kr for 4kW

Kilde: REC

150 000 kr for 4000 W gir ca 37,5 kr/W

Øystein Ulleberg: ca 5 euro per watt = 40, 4 kr/ W

Velger å regne med 40 kr/W

108 m² gir 30,6 kW

Solfanger:

2500kr/ m²

Kilde: Solarnor ved Hans Kristian Francke

+ 30 % for vakuumsrør (Per Finden)

3250 kr/m² for solfangere

Generelle kostnader og ting som spiller inn:

- Frakt
- Personell
- Frakt/leie av utstyr til installasjon

Antar at det er muligheter for å få kvantumsrabatt ved store kjøp evt andre muligheter for å redusere utgifter

Vedlegg 9

Reiserapport Grønland

Turen gikk til Grønland for å delta på konferansen "Sustainable Energy Supply in the Arctic -sun, wind, water etc." 1-3.mars i Sisimiut, Grønland i regi av Artek (Senter for Arktisk teknologi ved Danmarks Tekniske Universitet) Etter konferansen ble det arrangert en oppfølgende workshop 4.mars, og fieldtrip 5.mars i regi av NordSESIL. (Nordic Network for Sustainable Energy in Isolated Locations)

NordSESIL er et prosjekt over tre år som er finansiert av Nordisk Energiforskning. Hensikten med prosjektet er å bringe sammen aktører med interesser innenfor temaet fornybare energiløsninger i isolerte områder. Det omfatter aktuelle samfunn, myndigheter på alle nivåer, forskningsinstitusjoner, undervisningsinstitusjoner, i tillegg til aktører innenfor aktuell teknologi og industri [<http://www.nordsesil.net/> 09.03.2008]. NordSESIL sponset deltagelsen til tre master/ph.d studenter i konferansen, deriblant undertegnede. Lederen for NordSESIL, David Pointing, deltok på konferansen og ledet den påfølgende workshop'en.

Konferansens deltagere representerte flere land i Nord-Atlanteren: Grønland, Danmark, Scotland, Shetland, Færøyene, Norge og Canada, i tillegg til en deltager fra Australia. Felles for disse er at de alle har områder med svært spredt befolkning og krevende geografi, noe som skaper spesielle utfordringer for energiforsyningen.

Konferansens deltagere representerte også forskjellige yrkesgrupper. Hovedvekten av deltagerne var ingeniører eller andre med teknologisk bakgrunn, i tillegg til politikere og andre fra den lokale forvaltningen. Det var også en del samfunnsvitere, og folk som representere teknologiselskapene. Dessuten var det en god del lokale studenter, i tillegg til et fåtall studenter utenfra.

Selve konferansen var delt opp i sju bolker, hvorav to var rent formelle prosederinger rundt konferansen, og de fem andre var forskjellige temaer av relevans for fornybar energi. Disse fem var lokal energipolitikk på Grønland, generelle teknologiske forhold på Grønland, Biomasse og Vannkraft, Vindenergi, Solenergi, og Energibesparelser og klimatisk tilpasning.

Hovedfokus i konferansen var de spesielle utfordringene som kjennetegner produksjon av energi til stasjonær bruk i arktiske strøk. Et av problemene er de særlige driftsforholdene knyttet til periodevis svært kaldt klima. Ekstrem kulde vil blant annet påvirke lufttettheten, som igjen har en lineær sammenheng med effektproduksjonen fra vindmøller. I tillegg vil kulde kunne føre til ising på anlegg og instrumenter som vil ha stor innvirkning på driftsforholdene og effekten fra turbinene.

En annen sentral problemstilling er at Grønland, som mange andre områder i arktiske strøk, sliter med lite utbygd infrastruktur. Dermed mister man muligheten til distribusjon av energi fra områder med høy produksjon og lavt forbruk, til områder med lav produksjon og høyt forbruk. I slike områder er det svært viktig at energiproduksjonen stemmer overens med forsyningsområdets forbruk. På Grønland kommer store deler av energiproduksjonen, særlig i de små samfunnene, fra

dieselfyrte aggregater. Utfordringen i slike områder ved introduksjon av fornybar energi i form av sol eller vind vil være leveringsusikkerheten. Diskusjonen gikk heftig rundt temaer som utbygging av distribusjonsnett vs backup-systemer og lagringsformer for energi. Grønlands geografi er preget av innlandsisen som dekker store deler av landet. Kystområdene med sine fjorder og høye fjell huser størsteparten av bebyggelsen. Fjorder og fjell er en kjent utfordring for nettutbygging i store deler av Norge. Forskjellen er at Grønland er nesten seks ganger så stort som Norge, men har kun en brøkdel av folketallet.

Det ble presentert en rekke aktuelle teknologier for fornybar energiproduksjon på Grønland i løpet av konferansen. Vind er en betydelig ressurs på Grønland. Det dominerende vindsystemet er katabatiske vinder, nemlig kald luft fra innlandsisen som ”faller” ned til kysten. Det er det samme man observerer i Antarktis. De bebodde områdene på Grønland ligger langs kysten, og dermed befinner energiressursene seg der hvor behovet er. Det ble redegjort for en del vindmålingsprosjekter i flere områder på vest-Grønland. En av utfordringene er mangel på infrastruktur, noe som vanskeliggjør frakt og installasjon av måleutstyr. Et annet problem er at utstyret ofte blir utplassert av folk utenfra med dårlig tid og lite lokal kunnskap. Resultatet av det ble i en kommune at ingen måleinstrumenter ble utplassert der hvor alle visste at det blåste mest. Mangel på lokal kompetanse medfører også problemer med vedlikehold og oppfølging av utstyr.

Konklusjonen ble at kompetanseoverføring til de aktuelle samfunnene er viktig for utnyttelsen av ny fornybar energiteknologi. En av presentasjonene under konferansen ble holdt av italienske Marianna Imbimbo, en masterstudent ved DTU. Hun skriver sin masteroppgave på vindenergi i Antarktis. Det var svært interessant å se hennes vinkling på en problemstilling som er noenlunde lik den jeg har jobbet med på Troll. Vi ble enige om å holde kontakt for å utveksle ideer og kunnskap.

Deltagerne fra Shetland, Elizabeth Johnson og Ross Gazey, representerte et lite firma, Pure Energy, som var startet opp som et forskningsprosjekt knyttet til energiproduksjon fra vind, i kombinasjon med lagring i form av hydrogen. I løpet av prosjektet hadde de jobbet mye med tilpassning og vedlikehold av systemet, noe som ga dem unik kompetanse, som de senere har kommersialisert. Shetland har kanskje ikke et arktisk klima, men har geografiske begrensninger på energidistribusjon i form av å være en øynasjon. Lagring av energi i form av hydrogen er en måte å spare overskuddsenergi til en periode med større behov. Hydrogen kan også brukes som drivstoff i biler. Anlegget til Pure er i første omgang et lite anlegg til forskning og demonstrasjon.

Andre aktuelle teknologier er solenergi. Ressursgrunnlaget for solenergi på Grønland er sammenlignbart med det for Antarktis. Det er preget av store sesongvariasjoner, med mørketid og midnattssol, og sterk refleksjon fra snøen. Det er bygget et lavenergihus i Sisimiut hvor solfangere er brukt til å produsere varmtvann. Erfaringene derfra er så positive at man har valgt å utplassere solfangere både på den lokale folkehøgskolen og på det nye studenthjemmet i byen.

En annen mulighet som ble diskutert er bioenergi, i form av biogass eller biodiesel. Grønland har mye biologisk avfall fra fiskeindustrien som kunne blitt utnyttet på denne måten. Utfordringen ved biogassproduksjon i kaldt klima er at den anaerobiske

nedbrytningen ikke går av seg selv fordi temperaturen er for lav. Biogassproduksjon er en svært temperaturfølsom prosess. Konklusjonen fra forsøk på Grønland er at nærmere 25 % av energien går med til å opprettholde en tilfredsstillende temperatur. Biodiesel ble presentert som den beste løsningen fordi dette har en lavere teknologisk terskel, noe som er en fordel i områder med lavt utdanningsnivå.

Grønland har store ressurser tilgjengelige for vannkraftproduksjon. Ikke alt vil være økonomisk gjennomførbart på grunn av store avstander, men likevel er det flere større utbygginger under prosjektering og gjennomføring. Det Grønlandske hjemmestyret ønsker å redusere avhengigheten av import av olje fra utlandet, og fokuserer derfor sterkt på vannkraft.

Det var svært interessant å være tilstede ved en slik konferanse for å se hva andre med samme interessefelt jobber med, og hvilke utfordringer de har møtt underveis. David Pointing har skrevet sin doktorgradsavhandling på hydrogen som lagringsform for energi i Antarktis. Martin Hansen, en professor ved DTU, holdt et svært interessant innlegg om driftsproblemer med vindturbiner i arktisk klima. Han anbefalte også flere publikasjoner med mer informasjon. Både alt som kom fram under konferansen, og muligheten til å ta kontakt med disse menneskene i ettertid har vært svært verdifull inspirasjon i forhold til min oppgave.

Workshop'en hadde betydelig færre deltagere. Omtrent 14 personer deltok, og tok for seg ulike problemstillinger knyttet til hvordan man skal praktisk skal klare å gjennomføre en del av de tingene som ble presentert under konferansen. Hoveddiskusjonen gikk rundt hva som er barrierene for å introdusere fornybare energiteknologier i små samfunn. De største problemene viste seg å være manglende infrastruktur, både i form av transportmuligheter og distribusjon. Et annet stort problem er manglende kompetanse ute i distriktene. Dårlig infrastruktur gjør transport av personell til en svært dyr affære, vedlikehold bør derfor kunne utføres av lokalt personell. Et annet viktig poeng er at lokalbefolkningen må kunne forstå og involveres i prosessen. For dem er ikke nødvendigvis forurensning og global oppvarming et viktig tema. Opplæring og informasjon er svært viktig. En annen av diskusjonene gikk rundt finansiering av energiprojekter. Workshop'en ble gjennomført i to grupper, en dansk og en engelskspråklig gruppe. Språk er en annen viktig barriere på Grønland. De fleste av lokalbefolkningen snakker grønlandsk som førstespråk, og dansk som andrespråk. I tillegg er det mange danske innflyttere. Engelsk er ikke veldig utbredt. Det ble vektlagt å kunne kommunisere godt med lokalbefolkningen.

Den siste dagen ble det gjennomført en tur rundt i Sisimiut for å se på aktuelle fornybare energiteknologier i bruk. Vi var innom blant annet en målestasjon for solinnstråling, søppelforbrenningsanlegget, lavenergihuset og dieselgeneratoren som forsyner Sisimiut med energi per i dag. Det var interessant å få sett en del av de tingene som ble nevnt i konferansen i virkeligheten, og se hvordan de føyer seg inn i helheten.

Alt i alt var turen til Grønland svært lærerik og inspirerende. Den har gitt mange nye innfallsvinkler, og kontaktflater inn i miljøet rundt fornybare energiløsninger i arktisk klima.