

UNIVERSITETET I OSLO
Fysisk Institutt

Analyse av et varme- og
kjøleanlegg for boliger

Svetlana Sannem Heian

Februar 2010



Forord

Masterstudiet og spesielt arbeidet med masteroppgaven har vært en svært utfordrende og utviklende periode for meg. Ny livssituasjon underveis i oppgaveskrivingen satte både disiplin og morsfølelse på en alvorlig prøve. Arbeidet med oppgaven ble mer omfattende enn det jeg hadde forestilt meg, men også mer lærerikt, ikke minst takket være konstruktive og utfyllende tilbakemeldinger fra mine veiledere John Rekstad og Michaela Meir. Jeg setter også veldig stor pris på vennligheten og tilgjengelighet de har visst meg. Spesielt stor takk til Michaela som har vært en uvurderlig støtte gjennom hele prosessen.

Jeg vil også takke Henning, Espen og Øystein for et hyggelig miljø på lesesalen. Spesielt stor takk til Øystein og Espen for flere gode råd til formatering av dokumentet.

Familien min, både i Russland og i Norge har vært en viktig støtte gjennom hele prosessen. Takk til mamma for hjelp med Sofia i sluttspurten og til min kjære svigermor for moralsk støtte og oppmuntring.

Helt til slutt vil jeg spesielt takke Tønnes for all hjelp, tålmodighet og støtte!

Oslo, februar 2010

Svetlana Sannem Heian

Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å analysere effektiviteten til et solvarmeanlegg som består av polymersolfangere og et varmelager. Eksperimentene ble foretatt med og uten varmtvannsforbruk i løpet av dagen. Det er også undersøkt i hvilken grad varmelageret blir påvirket av at det blir tappet varmtvann. Muligheten til å benytte samme anlegg for både oppvarming og kjøling ved hjelp av luftvifte blir også omhandlet. Analyse av sjiktningmekanismene til anlegget med en horisontal skilleplate er en av de sentrale aspektene i denne oppgaven.

Anlegget visste seg å fungere bra under oppvarmingsfasen. Avhengig av innstrålingen kunne anlegget akkumulere over 11 kWh i løpet av dagen uten at det ble tappet vann. For dager med vannuttak har anlegget klart å akkumulere opp til 13 kWh. Effektiviteten til solvarmeanlegget økte når det ble tappet varmtvann. Slik som anlegget var dimensjonert og sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken var stilt, lyktes man ikke med å bruke dette anlegget til kjøling. Under kjøleeksperimentene hadde varmelageret en god sjiktning med rundt 15 til 20 K i temperaturforskjell mellom bunnen og toppen til tankene.

Abstract

The goal of the study is to analyze the efficiency of a heating system consisting of polymer solar collectors and heat storage. The experiments were conducted both with and without consumption of hot water during the day. It is also investigated to what extent the heat storage is influenced by the consumption of hot water. The possibility to utilize the same system for both heating and cooling by use of a fan is also analyzed. One of the central aspects of the study is the analysis of the use of a horizontal stratification plate, and how it effects on the stratification mechanism.

The system has proven to be efficient in the heating stage. Depending on the irradiance, the system could accumulate more than 11 kWh during the day without any water being consumed. During days with consumption of hot water the system has accumulated up to 13 kWh. The efficiency of the heating system increased when hot water was consumed. In the present system design and circulation settings between the solar tank and the floor tank, one did not succeed with using the system for cooling. During the cooling experiments the storage tank had stratification with a temperature difference around 15 to 20 K between the bottom and the top of the tanks.

Innhold

1. Innledning	1
2. Teori.....	3
2.1 Generelt om solenergi.....	3
2.1.1 Diffus og direkte stråling	4
2.1.2 Vinkeldefinisjoner	4
2.2 Varmeoverføring.....	6
2.2.1 Varmeledning	6
2.2.2 Konveksjon	7
2.2.3 Stråling.....	7
2.4. Solfangere	9
2.4.1 Flatplatekollektor	10
2.5 Varmelager	11
2.6 Effektiviteten til anlegget	12
2.6.1 Standard metode	12
2.6.2 Kalorimetrisk metode	12
3. Eksperimentelt oppsett og metode.....	15
3.1 Oppsett til varme/kjøle lageret.....	15
3.2 Sirkulasjonspumper i systemet	18
3.3 Solfanger.....	19
3.4 Kanalvifte	20
3.5 Aktuelle driftsituasjoner for anlegget	21
3.6 Instrumenter benyttet i forsøkene	24
3.6.1 Temperatursensorer i systemet	24
3.7 Oversikt over datainnsamling i systemet.....	25
3.7.1 Termoelementene	27
3.7.2 Pt-100 temperaturføler.....	28
3.7.3 Pyranometer	28
3.7.4 Volumstrømmåler	29
3.7.5 Solstyreren	30
3.7.6 LabVIEW Program.....	31
3.8 Metode	32
3.8.1 Oppdeling av soltanken	32
3.8.2 Akkumulert energi	33
3.8.3 Effektiviteten til anlegget	34

4. Resultater	35
4.1 Innledende eksperimenter	35
4.1.1 Sommerdrift uten varmtvanns forbruk.....	35
4.1.2 Temperaturutvikling i solfangerne.....	39
4.2. Sommerdrift med varmtvanns forbruk.....	40
4.2.1 Dag 1 med forbruk av tappevann (11.09.2007)	41
4.2.2 Dag 2 med forbruk av tappevann (12.09.2007)	46
4.2.3 Dag 3 med forbruk av tappevann (13.09.2007)	48
4.2.4 Dag 4 med forbruk av tappevann (14.09.2007)	50
4.3 Kjøling under sommerdrift for dager uten varmtvanns forbruk.....	51
4.4 Kjøling under sommerdrift for dager med varmtvanns forbruk.....	54
4.5 Vinterdrift.....	56
4.5.1 Vinterdrift med varmtvanns forbruk	56
4.6 Sjiktningsegenskaper i soltanken	60
4.7 Effektiviteten til anlegget.....	61
4.8 Varmetap i soltanken.....	63
5. Diskusjon og konklusjon	65
5.1 Sjiktning i Soltanken og DHW tanken.....	65
5.2 Temperatur påvirkning i tanken etter tapping.....	66
5.3 Kjøling.....	67
5.4 Effektiviteten til anlegget med og uten forbruk av varmt vann	68
5.5 Forslag til forbedring til anlegget under kjøling	69
5.5 Konklusjon	69
Referanser	71
Tillegg A	73
Tillegg B	77
Tillegg C	83
Tillegg D	85
Tillegg E	86

1. Innledning

Det er et stort internasjonalt fokus på den globale oppvarmingen av jorda. I følge FNs klimapanel er forbrenning av fossile energiresurser den viktigste kilden de menneskeskapte CO₂- utslippene (ICPP, 2007). Utslippene fører til økning i luft og havtemperatur. Det er en global utfordring som verdenssamfunnet blir nødt til å løse sammen. Under FNs klimatoppmøte i desember 2009 i København møttes ledere fra 190 land for å bli enige om en ny internasjonal klimaavtale som skal erstatte Kyoto protokollen når den går ut i 2012. Det kom ikke i stand noen forpliktende avtale under toppmøtet, men stadig flere land innser at det er nødvendig å redusere energiforbruk og tilhørende utslipp til miljø gjennom forpliktende klimaavtaler.

Den globale energiutnyttelsen er dominert av fossile energiresurser som gass, olje og kull. De fossile ressursene utgjør i dag rundt 80 % av verdens energimarked, mens fornybare energikilder kun bidrar med 13,5 %, og de resterende 6,5 % kommer fra kjernekraft (Revol, 2005).

Termisk solenergi er en ren og uendelig ressurs som kan bidra til å løse klimautfordringene menneskene står ovenfor. Energifordelingen i bygninger i Europa viser at 57 % av energiforbruket går til romoppvarming og 25 % til oppvarming av tappevann (Weiss, 2003). I de fleste norske husstander er det vanlig å bruke strøm som er en høyverdig energi til romoppvarming. Lavtemperaturvarme passer langt bedre til dette formålet og bruk av solfangeranlegg til oppvarming av inneareal og tappevann kan være et godt alternativ. Markedet for solvarme viser en jevn vekst på ca. 20 % i snitt per år siden 1990 (Salvesen, 2001). Tendensen tyder på at denne utviklingen vil fortsette slik i årene som kommer. Bruk av termisk solenergi er utbredt i flere EU land med Tyskland og Østerrike som de ledende. I Norge derimot, er utbredelsen fortsatt svært lav. For å bidra til en økning av solvarmemarkedet også i Norge, ble det innført en støtteordning som dekker inntil 20 % av installasjonskostnadene til et solvarmeanlegg. Støtten er imidlertid begrenset til 10.000 kroner. Det foreligger også planer om utbygning av et stort solfangeranlegg i tilknytning til fjernvarmesentralen i Akershus Energipark i Lillestrøm.

Fysisk Institutt ved Universitet i Oslo har en Solenergi gruppe som i flere år blant annet har forsket på utforming av polymersolfangere og effektiviteten til solvarmeanlegget. Gruppen har også et eget solenergilaboratorium (Sollab) for gjennomføring av forskningsaktiviteter.

Hensikten med denne oppgaven er å analysere effektiviteten til solvarmeanlegg med polymersolfangerne med og uten varmtvannsforbruk i løpet av dagen. Det er også undersøkt i hvilken grad varmelageret blir påvirket av at det blir tappet varmtvann. Muligheten til å benytte samme anlegg for både oppvarming og kjøling ved hjelp av luftviften blir også omhandlet. Analyse av sjiktningsmekanismene til anlegget med en horisontal skilleplate var en av de sentrale aspektene i denne oppgaven.

2. Teori

2.1 Generelt om solenergi

Det globale energiforbruket er ubetydelig sammenlignet med energien tilført fra sola. Hvert år får mottar jorda rundt 8 000 ganger mer solenergi enn det totale energiforbruket. Det globale energiforbruk for år 2008 var rundt 14,8 TW, mens energimengden fra sola som treffer jordoverflaten er rundt 125 000 TW (Rekstad og Meir, 2009).

Solenergien kommer fra kjernefysiske prosesser. I det indre av sola smelter lette hydrogen atomkjerner til større helium kjerner. Denne fusjonen fører til at store energimengder blir frigjort. Solinnstrålingen som vi mottar på jorda bestemmes av temperaturen på solas overflate – fotosfæren. Det meste av sollyset sendes fra fotosfæren som har en temperatur på rundt 6000 K og strålingen utenfor jordas atmosfære består av ultrafiolette stråler, synlig lys og infrarøde stråler. Solarkonstanten, $S = 1367 \text{ W/m}^2$, angir energi per flateenhet normalt på strålingen utenfor jordas atmosfære og i en middellavstand mellom jorda og sola. Solarkonstanten måles kontinuerlig ved hjelp av satellitter og den varierer med 1 % i takt med solsyklusen (Duffie and Beckman, 2006). Omtrent 30 % av den totale energien reflekteres i atmosfæren og de gjenværende 70 % transmitteres ned til jordoverflaten. Solstrålingen som treffer og fordeles over hele jordoverflaten ($5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$) utgjør en midlere innstrålt effekt per areal, \bar{P} :

$$\bar{P} = 230 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Denne gjennomsnittlige innstrålings effekten varierer mye med årstidene, geografisk beliggenhet og klimaet. Innstrålingen er relativt jevn rundt ekvator, mens forskjellene blir større mellom innstråling på sommer og vinter nærmere polene. I Norge varierer den midlere årlige innstrålte effekten mellom 120 W/m^2 og 70 W/m^2 (Rekstad og Meir, 2009).

De fleste energiresursene på jorda, med få unntak som tidevannsenergi, geotermisk energi og kjerneenergi kommer fra sola:

- Direkte solenergi
- Indirekte solenergi i form av vannkraft, vind, havstrømmer, bølger og havtermisk energi.
- Lagret solenergi i form av kull, olje, gass, planter, ved og torv.

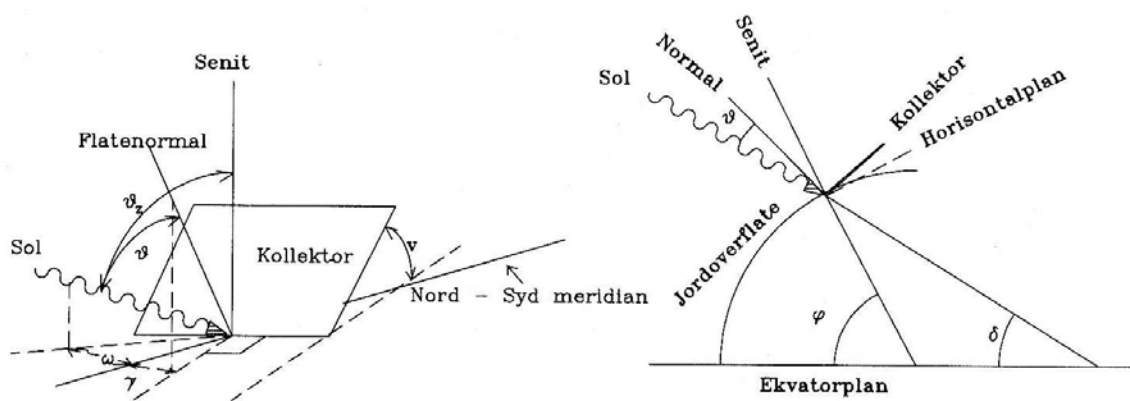
(Holter et al., 1998)

2.1.1 Diffus og direkte stråling

Global innstråling består av tre deler. Direkte stråling endrer ikke retning og blir ikke spredt eller absorbert gjennom atmosfæren. Denne direkte, eller rettete strålingen kan samles i et brennpunkt og brennlinjer i fokuserende solfangere. Diffus stråling skyldes at solstrålingen ble spredt en eller flere ganger av ulike partikler (f.eks. vann og damp) i atmosfæren. Den diffuse strålingen er tilnærmet isotropisk fordelt over himmelen og det er begrenset hvor mye av denne som kan konsentreres. Forholdet mellom direkte og diffus stråling er avhengig av en rekke faktorer, som f.eks. værforholdene, solen posisjon på himmelen og årstid. Andelen av diffus stråling utgjør opptil 50 % av den totale innstrålingen i Nord-Europa (Holter et al., 1998). Den tredje komponenten i globalstrålingen er bakkereflektert stråling. Størrelsen av denne avhenger av omgivelsene (albedo). For eksempel kan en snødekket flate gi betydelig bidrag til globalstrålingen.

2.1.2 Vinkeldefinisjoner

Retningen og hellingen på solfangeren er viktige faktorer for hvor mye energi som kan samles i løpet av året. Den høyeste innstrålingen oppnås når den direkte strålingen kommer normalt på kollektorens areal, men denne innfalsvinkelen vil variere med tid på døgnet, årstid og plassering av solfangerplate. For å kunne beregne den riktige mengden av energi som er tilført kollektorens flate er det nødvendig å kjenne vinkelen mellom solstrålingen og kollektorens planflate. De nødvendige vinklene for beregning av innfalsvinkel for en solkollektor er visst i figur 1.1, og forklaring til disse vinklene er hentet fra (Holter et al., 1998) og (Mills, 2006).



Figur 2.1: Vinkler for beregning av innfallsvinkel mellom kollektorens flatenormal og solstrålen. Til venstre er vist den "lokale" situasjonen og til høyre den "globale". Kilde: Holter et al. (1998)

Breddegrad φ : nord er definert som positiv

Deklinasjon $\delta \approx 23,45^\circ \cdot \sin\left[2\pi \frac{284+n}{365}\right]$, n er dagen i året fra 1. januar: Solas

vinkelposisjon i forhold til ekvatorplanet. Nord er positiv, varierer med årstiden og er positiv om sommeren.

Timevinkel $\omega = 180^\circ - 15t$: retningen mellom meridianen og solstrålenes horisontale projeksjon på bakken. $\omega = 0$ kl.12 og øker med 15° for hver time. Positiv på morgenen og negativ på kvelden.

Planets helningsvinkel ν : vinkelen med horisontal planet.

Planets azimutvinkel γ : avviket mellom den lokale meridianen og den horisontale projeksjonen av flatens normalvinkel, med rett syd = 0, øst positiv og vest negativ.

Innfallsvinkel θ : solstrålingens vinkel med normalen til planen, beregnes ved hjelp av formelen:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \nu \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin \nu \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \varphi \cos \nu \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \nu \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \nu \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

2.2 Varmeoverføring

Energi utveksles kontinuerlig mellom objekter for å øke entropien, som er definert som graden av systemets mikroskopiske uorden i termodynamikkens andre lov. (Holter et al., 1998). Som følge av termodynamikkens andre lov vil varmeoverføring alltid skje fra de varme omgivelsene til de kalde. Varmetransporten måles i *Joule pr. sekund* (J/s) eller *Watt* (W). Man skiller mellom tre typer varmeoverføringer i naturen: varmeledning, konveksjon og stråling (Lillestøl et al., 2001).

2.2.1 Varmeledning

Varmeoverføring ved ledning skjer i faste stoffer og i stillestående væsker og gasser. Energien sprer seg i et stoff uten at molekylene eller atomene forandrer sin posisjon. Varmeledning er kun mulig hvis to områder i kontakt har en temperaturforskjell (ΔT) og at retningen på varmestrømmen (\dot{Q}) alltid går fra det varmeste til det kaldeste området. Varmestrøm gjennom et tverrsnittsareal (A) kan uttrykkes ved:

$$\dot{Q} = A \dot{q} = -\lambda_k A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

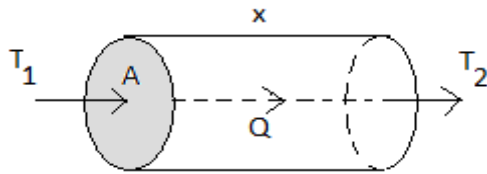
Hvor \dot{q} er varmestrømtettheten, λ_k er varmeledningsevnen eller den termiske konduktiviten til materialet (W/mK), og $\frac{dT}{dx}$ er temperaturgradienten. Materialer med stor λ_k -verdi er gode ledere for varme, mens liten λ_k -verdi vil være typisk for et godt isolasjonsmateriale.

Varmestrømmen blir ofte uttrykt ved hjelp av en varmegjennomgangskoeffisient

$$U = \frac{\lambda_k}{x} :$$

$$\dot{Q} = UA(T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

hvor T_1 er temperaturen til det varme område og T_2 er temperaturen til det kalde område.



Figur 2.2: Varmestrøm (\dot{Q}) gjennom et materiale med lengden x fra et høyt temperaturområde til et lavt temperaturområde.

2.2.2 Konveksjon

Varmetransport i væske eller gass skyldes gjerne konveksjon. Termisk energi blir spredd ved at det oppstår indre strømminger i væsken eller gassen. Konveksjon kalles derfor gjerne "varme og massetransport". Man skiller mellom tvungen konveksjon og naturlig konveksjon. Tvungen konveksjon oppstår som følge av vind eller strøm, eller ved bruk av pumper eller vifter slik at gassen eller væsken drives forbi kjøle- eller varmeflater. Naturlig konveksjon er drevet av tyngde/oppdrifts krefter som medfører fluidets lokale tetthetsendringer på grunn av lokale temperaturforskjeller. Varmestrømmen er tilnærmet proporsjonal med arealet A til flaten (m^2) og temperaturforskjellen mellom overflaten og omgivelsene ΔT og kan generelt beskrives med ligning 2.2:

$$\dot{Q} = -hA\Delta T \quad (2.4)$$

hvor h er varmeovergangskoeffisienten (W/m^2K). I motsetning til varmeledningsevnen λ_k som er en materialkonstant, vil varmeovergangskoeffisienten h være avhengig av flere ulike faktorer som retning og strømningsmåte, overflateegenskaper, geometrien til flaten, fluidet og i noen grad av temperaturforskjellen ΔT .

2.2.3 Stråling

Termisk stråling defineres som strålingsenergi utsendt fra et legeme på grunn av legemets temperatur, siden alle legemer med temperatur over 0 K stråler ut energi i form av elektromagnetiske bølger. Termisk stråling er ikke avhengig av å ha et fluid eller fast stoff for å få transportert energi, slik det er med varmeledning og konveksjon. Sort stråling er den elektromagnetiske strålingen som kommer fra et ideelt sort legeme. Et sort legeme absorberer all innkommende stråling. I naturen finnes det ikke slike

stoffer som absorberer all stråling, selv om noen materialer ligner et sort legeme. Et tykt lag med svart karbon kan absorbere omtrent 99 % av all innfallende termisk stråling innenfor det spektrale området som dekkes av solstrålingen (Duffie og Beckman, 2006). Den utstrålte effekten fra et sort legeme er gitt ved *Stefan-Boltzmanns lov*:

$$P = \sigma AT^4 \quad (2.5)$$

hvor A er overflatearealet, T er legemets temperatur og σ er Stefan – Boltzmanns konstant.

Temperaturen til et legeme er avgjørende for mengden utstrålt energi og spektralfordelingen. Et legeme med høy overflatetemperatur, som for eksempel sola, vil sende ut stråling med høyere frekvens og kortere bølgelengder enn et legeme med lavere temperatur. Energitettheten per bølgelegde ($E_{\lambda b}$) av strålingen til sort legeme bestemmes av Plancks strålingslov:

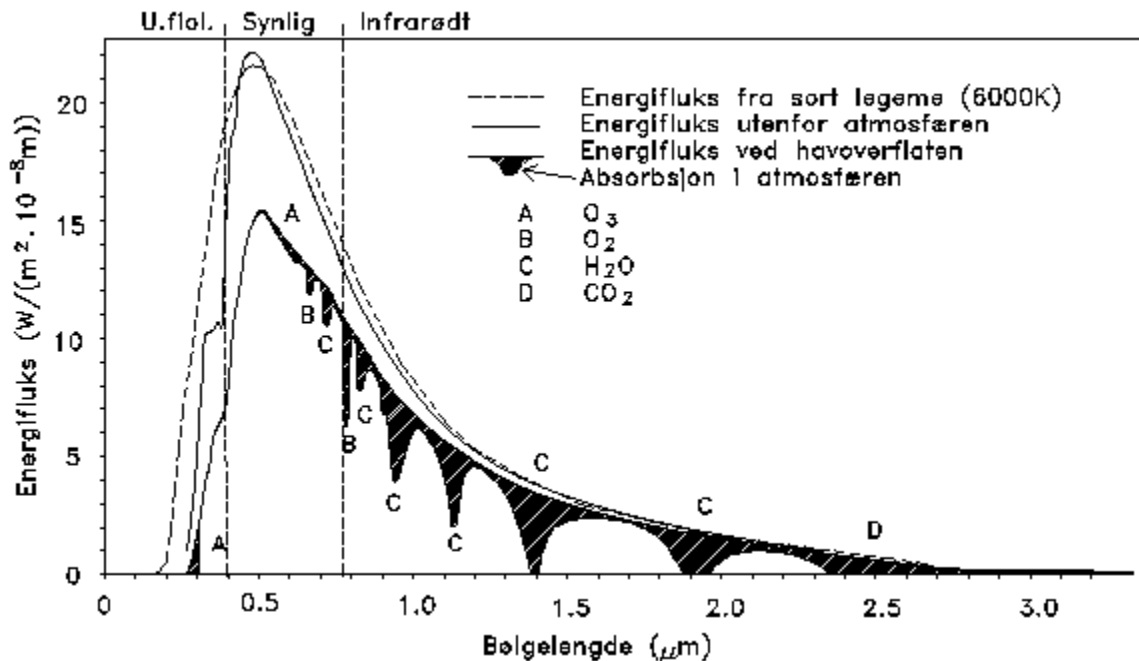
$$E_{\lambda b} = \frac{2\pi h_p c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{h_p c}{\lambda k_b T}} - 1)} \quad (2.6)$$

hvor h_p er Plancks konstant, c er lyshastighet, λ er bølgelengden, T er overflatetemperatur og k_b er Boltzmanns konstant. Ved å integrere energifluksen ($E_{\lambda b}$) i Plancks lov over hele det elektromagnetiske spekteret får man totalt utstrålt effekt per arealenhet fra et sort legeme per tidsenhet, gitt ved Stefan-Boltzmanns lov (2.4). Jo varmere objektet er, desto kortere blir bølgelengdeområde der objektet vil avgi det meste av sin utstråling og frekvensen for maksimal utstrålingseffekt blir høyere. For å finne den bølgelengden hvor intensiteten er høyest kan man derivere ligning 2.5 med hensyn på bølgelengde, som gir Wiens forskyvningslov. Wiens forskyvningslov fastslår at det er en invers sammenheng mellom den bølgelengden (λ_{\max}) hvor intensiteten fra et sort legeme er høyest og det sorte legemets temperatur (T_s) (Foster R. et al., 2009):

$$\lambda_{\max} T_s = 2,897 \times 10^6 \text{ nmK} \quad (2.7)$$

Ligning 2.7 og figur 2.3 viser at sola med overflatetemperatur på ca. 6000 K har høyest energitetthet ved bølgelengder rundt 0,5 μm som er i den grønne delen av det synlige

spekteret. Til sammenligning har innstrålingen fra jorda en maksimal energitetthet rundt $10 \mu\text{m}$ siden jorda ståler som et legeme med temperatur på 288 K ($15 \text{ }^\circ\text{C}$). Figur 2.3 viser sollysets spektralfordeling som en funksjon av bølgelengden.



Figur 2.3: Strålingsintensiteten ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 10^{-8}\text{m})$) er plottet som en funksjon av bølgelengden (μm) utenfor atmosfæren og ved havoverflaten. Kilde: Holter et al. (1998)

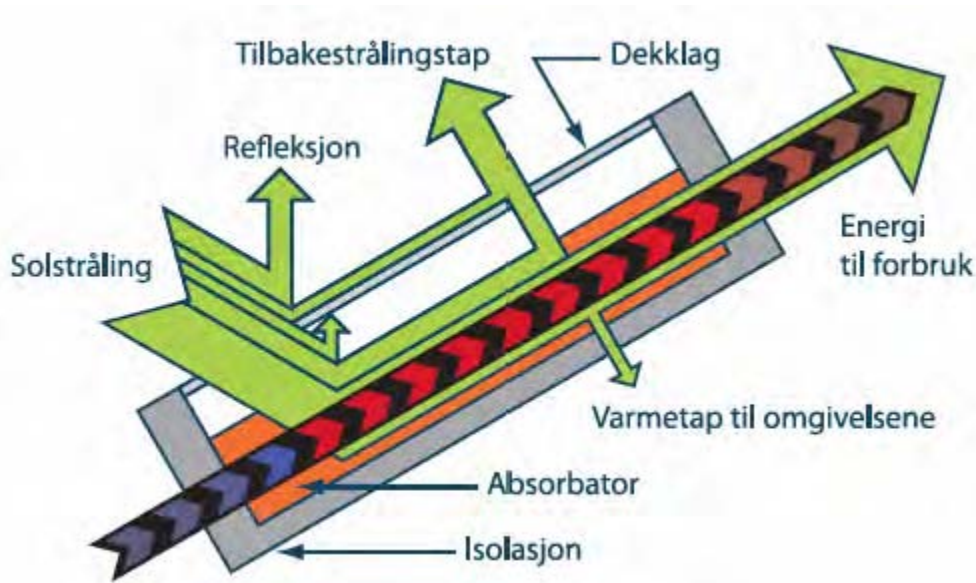
Fra figur 2.3 kan man også se hvilke gasser som bidrar til absorpsjon ved de ulike bølgelengdene ved havoverflaten. Bølgelengdeområdet på den solenergien som når jordoverflaten ligger mellom $0,3$ til $2,5 \mu\text{m}$. Stråling med bølgelengde under $0,3 \mu\text{m}$ absorberes av ozonsiktet (O_3) i stratosfæren, mens stråling med bølgelengde over $2,5 \mu\text{m}$ absorberes av karbondioksid (CO_2) i atmosfæren. Den største delen av absorpsjonen skyldes vanndamp (H_2O).

2.4. Solfangere

Solfangere overfører strålingsenergi til varme og videre til en energibærer i anlegget som transporterer denne varmen til f.eks. et varmelager. Energibæreren er gjerne en væske eller en gass. Det finnes tre hovedtyper av solfangere: flatplatekollektorer, fokuserende sylindrisk speil og dobbelfokuserende parabolske speil. Selv om alle disse typene av solfangere omgjør innstråling til varme er det en viss forskjell mellom virkemåte. I denne oppgaven benyttes flatplatekollektorer.

2.4.1 Flatplatekollektor

Solfangerpanelet består av en absorbator med en gjennomsiktig dekkplate, et rørsystem og en ramme med isolasjon (figur 2.4). Når solen skinner vil energien i strålingen passere dekkplaten og tas opp i den svarte absorbatoren. Energien blir overført som varme til vann eller en annen varmbærer, som sirkulerer i kanalene til absorbatoren og transporterer varmen videre til varmelageret.



Figur 2.4: Tversnitt av en flatplatekollektor med de termiske forholdene. Kilde: Salvesen og Rindal, 2008.

Flatplatekollektor utnytter både direkte og diffus stråling. Som figur 2.4 illustrerer, blir det meste av innstrålingen absorbert i absorbatoren, en del blir reflektert fra dekkplaten og noe fra absorbatoren. Dersom det blir stor temperaturforskjell mellom absorbatoren og omgivelsene, synker effektiviteten til solfangeren raskt på grunn av varmetapet gjennom både dekkplaten og isolasjonen. Dekkplaten bidrar til å redusere dette varmetapet ved at luften i kanalene på dekkplaten fungerer som et isolasjonslag. Det vil oppstå en drivhuseffekt mellom absorbatoren og dekkplaten, ved at den langbølgede varmestrålingen fra absorbatoren stopper i dekkplaten og temperaturen til absorbatorplatene øker. Ifølge Rekstad og Meir (2009) vil temperaturen til absorbatoren i praksis være avhengig av hvor mye energi som blir overført til varmbæreren og transportert ut fra kollektoren. Flatplatekollektorer blir primært brukt for å levere moderate temperaturer (under 100 °C) til romoppvarming og oppvarming av tappevann til husholdning. Det er liten utbredelsen a solvarmeanlegg i Norge. Samlet installert

kapasitet i Norge var på ca. 9 MWth, mens Sverige hadde 209 MWth og Danmark 287 MWth. (Salvesen og Rindal, 2008).

2.5 Varmelager

Siden energien som kan høstes fra solstrålingen varierer sterkt i tid, er det nødvendig å øke brukstiden ved å introdusere et varmelager i systemet. Varmelageret i denne oppgaven er basert på vann som lagringsmedium. Vann har meget stor spesifikk varmekapasitet og liten varmeledningsevne, som har nettopp de egenskaper som bestemmer evnen til varmelagring basert på temperaturendring i mediet. Varmelagring kan også skje ved utnyttelse av latent varme ved faseoverganger, eller ved å gjøre bruk av andre termiske prosesser.

Ved temperaturproposjonal lagring, for eksempel i vann, er evnen til å danne ulike temperaturlag, såkalt temperatursjiktning, av stor betydning.

Temperatursjiktning er essensielt for utformingen av varmelageret siden effektiviteten til solfangeren avtar med økende temperatur. Temperaturavhengig tetthet til vannet er årsaken til at det oppstår en sjiktning i varmelageret. Tettheten minker med økende temperatur, og dersom vannet i varmelageret har forskjellige temperaturer vil det varme vannet (med lavest massetetthet) være i toppen, og det kaldeste vannet (som har størst tetthet), legge seg nederst i varmelageret. Overgangssone mellom disse to sjiktningsslagene kan variere med noen få centimeter og øker med tiden. Tvungen strømning og turbulens i varmelageret er avgjørende for hvor godt en temperatursjiktning kan etableres og lagres. Lag med varmt vann i toppen blir gradvis kjølt ned, men på grunn av stor spesifikk varmekapasitet til vannet og liten varmeledning vil kjøling foregå veldig sakte (Rekstad og Meir, 2009).

2.6 Effektiviteten til anlegget

2.6.1 Standard metode

Den vanligste metoden å bruke for beregning av energiutbytte og effektiviteten til solfangere går ut på å måle strømningshastigheten til energibæreren gjennom anlegget ($\frac{dm}{dt}$), innløp (T_{inn}) og utløpstemperatur (T_{ut}) ved:

$$P_G = C \frac{dm}{dt} (T_{ut} - T_{inn}) \quad (2.8)$$

der C er varmekapasiteten til vannet.

Effektiviteten til solfangeren kan generelt defineres som forholdet mellom termisk effekt P_G levert fra solfanger og den totale solinnstrålingen på solfangerarealet (Rekstad og Meir, 2009):

$$\eta = \frac{P_G}{IA} \quad (2.9)$$

Den generelle formen for effektivitet til solfangeren uttrykkes ved hjelp av to varmetapskoeffisienter K_1 og K_2 :

$$\eta = \eta_0 - K_1 \left(\frac{T_w - T_0}{I} \right) - K_2 \left(\frac{T_w - T_0}{I} \right)^2 \quad (2.10)$$

hvor η_0 er transmittans-absorptans produkt ($\tau\alpha$) til dekkplaten og absorbatoren som ble absorbert. T_w er gjennomsnittstemperaturen til absorbatoren og T_0 er gjennomsnittstemperaturen til omgivelsene. K_1 , K_2 og η_0 bestemmes eksperimentelt ved laborietester.

2.6.2 Kalorimetrisk metode

Som et alternativ til standard metode for beregning av effektiviteten til anlegget blir det benyttet en kalorimetrisk metode. Varmelageret betraktes som et kalorimeter i denne metoden og effektiviteten til hele anlegget kan beregnes. Man kan beregne energien som er tilført anlegget med:

$$Q_{KM} = c_{kal} \cdot \frac{dT_{kal}}{dt} \Delta T \quad (2.11)$$

hvor c_{kal} er varmekapasiteten til kalorimeteret og $\frac{dT_{kal}}{dt} \Delta T$ er temperaturendringen i varmelageret over et bestemt tidsrom (Meir et al., 2002).

For å finne den totale energimengden i lageret er det nødvendig å ta hensyn til aspekter som varmetap fra tanken, varmen tilført fra solpumpen og forbrukt energi under forsøk med tappevannsuttak (Q_{tappet}), slik at:

$$Q_{KMtotal} = Q_{KM} + Q_{tappet} - Q_{tap} \quad (2.12)$$

Q_{tap} er en felles betegnelse for alle bidrag for varmetapet i varmelageret.

I motsetning til standard metode som beregner utbytte fra solfangere, blir energimengden i lagertanken funnet ved hjelp av kalorimetrisk metode. Kalorimetrisk metode er ikke egnet til å måle øyeblikkelig effektivitet til anlegget, siden det tas middelverdi over temperaturendringen i varmelageret over et bestemt tidsintervall. For å få nøyaktig middelverdi over temperaturendringen i varmelageret over et tidsintervall er det viktig å ha temperatursensorer flere steder i varmelageret. Effektiviteten til systemet kan beregnes med:

$$\eta = \frac{\Delta Q_{kal}}{\Delta Q_{inn}} = \frac{c_{kal} \Delta T_{kal}}{AI \Delta t} \quad (2.13)$$

hvor ΔQ_{kal} er energiendringen i lageret og ΔQ_{inn} er den energien som var tilført solfangerne i løpet av et bestemt tidsintervall Δt , A er arealet til solfangerne som mottar innstråling I .

Usikkerheten til denne metoden er rundt $\pm 10\%$ sammenlignet med energimålinger utført ved andre anlegg (Meir et al, 2002).

3. Eksperimentelt oppsett og metode

Alle forsøkene i denne oppgaven ble utført på Sollaben, som ligger foran Fysisk Institutt på Universitetet i Oslo. Sollaben er en prototyp versjon av systemet med solfanger, varmelager og distribusjonsanlegg som kan brukes til både oppvarming og kjøling.

Siden Sollaben ble bygd i 1997 har det blitt skrevet mange masteroppgaver og rapporter basert på anlegget. Deler av det oppsettet som har vært benyttet for denne oppgaven har også vært testet og beskrevet av tidligere studenter (Tappel, 2007).

I dette kapittelet beskrives systemet, instrumenter og metode for beregninger som ble brukt under arbeid med denne oppgaven.

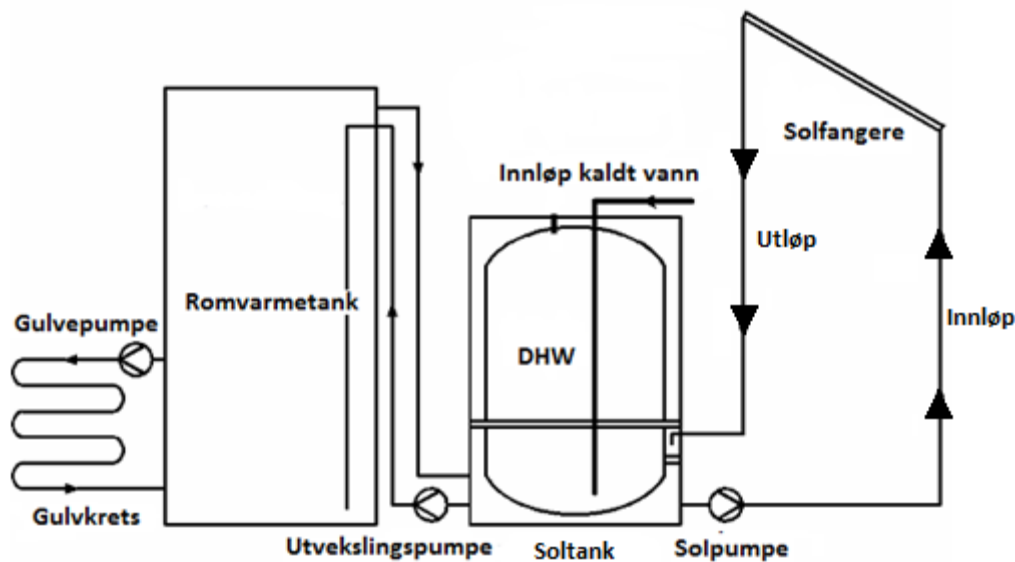
3.1 Oppsett til varme/kjøle lageret



Figur 3. 1: Sollaben. Solfangerne på taket er benyttet i denne oppgaven.

Utstyret til anlegget er plassert både på utsiden og inne i Sollaben og er presentert i figur 3.2. Anlegget består av fem solfangere som er plassert på taket og har et totalt

areal på 6,3 m². Disse varmer vannet fra saltanken om dagen og kjøler vannet om natten. Tanksystemet på Sollaben består av 3 tanker: En romvarmetank, en saltank og en DHW tank, som er integrert i saltanken. Sollaben kan bli varmet opp og kjølt ned ved hjelp av en gulvkrets som er knyttet til romvarmetanken.



Figur 3. 2: Tegning over anlegget med pumper.

Hoveddelen i dette anlegget er **Soltanken** (total volum på 500 liter) som er koblet til utløp og innløp fra solfangerne på taket (se figur 3.2). Soltanken inneholdt 466 liter vann under forsøkene. I saltanken er det plassert en horisontal skillevegg 47 cm fra bunnen for å dele tanken i to volumer med temperaturforskjell. Varmt vann som er lettere enn kaldt vann ble lagret i toppen av saltanken. Vannet fra bunnen av saltanken ble pumpet opp til solfangerne og ført tilbake under skilleplaten. Under kjøleeksperimentene sirkulerer vannet fra volumet under skilleplaten,. Dette skaper turbulens i tanken, med mye vannstrømmer og vertikale bevegelser i saltanken som ødelegger sjiktningen derfor skilleveggen er nødvendig.

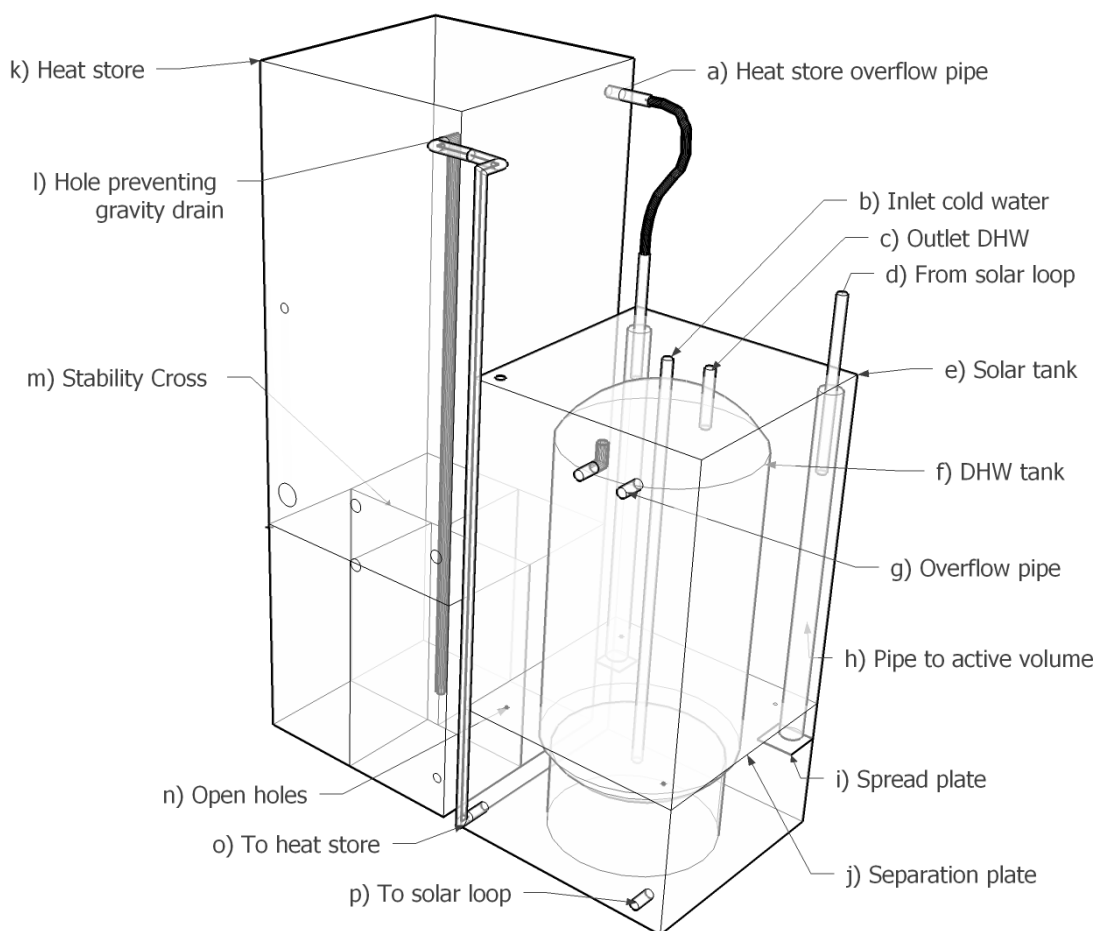
Volumet i saltanken under skilleveggen er på 123,2 liter. Inne i saltanken er det plassert en innertank som rommer 200 liter, også kalt **DHW tank**. Innertanken (DHW) skal sørge for at det er varmt vann i systemet som kan brukes til tappevann hvis dette anlegget f.eks. var en bolig. Ved hjelp av varmeveksling som oppstår mellom saltanken og innertanken blir vann i innertanken varmet opp eller kjølt ned. Detaljert 3D tegning av tankene til anlegget er presentert i figur 3.4.

Den tredje og største tanken i systemet er kalt **romvarmetank** (750 liter). Vann fra soltanken kommer til romvarmetanken og kan sirkulere i gulvkretsen (heating loop) ved hjelp av en gulvpumpe. Figur 3.3 viser romvarmetanken og soltanken under oppbygging og etter ferdigstilling.



Figur 3.3: Bildet av soltanken og romvarmetanken. Bildet til venstre viser tankene under oppbygging sommer 2006. Nederst på Soltanken vises solpumpen til høyre og utvekslingspumpen til venstre. Bildet til høyre viser de ferdigstilte tankene.

Soltanken (med DHW tank) og romvarmetanken er laget i rustfritt stål og er isolert med 5 cm polystyren (en type skumplast) i bunnen og med ca 10 cm på sidene for å minimere varmetapet. Det ble montert temperatursensorer i solfangerne, romvarmetanken og soltanken med innertanken.



Figur 3. 4 Tegning av romvarmetanken, soltanken og innertanken. Kilde: Sotland, 2009.

3.2 Sirkulasjonspumper i systemet

For at vannet skal sirkulere i de forskjellige delene av systemet er det installert 3 pumper (Grundfos, 1997):

Solpumpen er koblet mellom solfangerne og soltanken. På dagtid styres solpumpen med solstyreren, som sammenligner temperaturen i solfangerne og nedre del av soltanken. Hvis temperaturen i solfangerne er minst 6 K høyere enn temperaturen til nedre del av soltanken, slås solpumpen automatisk på. Hvis temperaturforskjellen er under 6 K, stopper solpumpen automatisk. Dette for å unngå at solfangerne skal kunne kjøle ned soltanken om dagen. På natten styres solpumpen med en klokke. Solpumpen er av typen Grundfos UPS 25-80 B 180.

Utvekslingspumpen er installert mellom soltanken og romvarmetanken og styres ved hjelp av en klokke på samme måte som solpumpen. Klokken er satt fra klokken 19:00

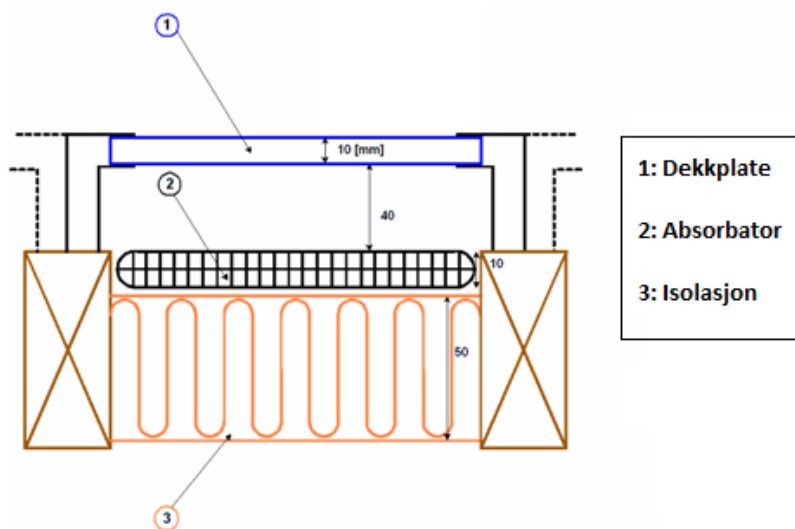
på kvelden til klokken 07:00 på morgenen. Utvekslingspumpen er av typen Grundfos UPS 25-60 B 180.

Den tredje pumpen i systemet er en **gulvpumpe**. Gulvpumpen er plassert mellom romvarmetanken og gulvkretsen. Under denne oppgaven var ikke gulvpumpen i drift under noen av forsøkene. Pumpen er av samme type som solpumpen og utvekslingspumpen og har modell nummer Grundfos UPS 25-60 B 180.

3.3 Solfanger

Solfangerpanelet består av en absorbator som er dekket med en gjennomsiktig dekkplate og er plassert i en ramme av trelekter (se figur 3.5). Når solen skinner på solfangeren vil energien i strålingen passere dekkplaten og tas opp i den svarte absorbatoren.

Absorbatoren har et dobbelt sett med kanaler hvor vannet sirkulerer i de øverste kanalene. Energien blir overført som varme til vannet i disse kanalene inne i absorbatoren. Hver absorbator har i tillegg en kanal på midten for å returnere oppvarmet vann tilbake til soltanken. Solfangerpanelet skal være godt isolert for å unngå varmetap. Nærmere spesifikasjoner til solfangeren beskrives i 2.4.1.



Figur 3. 5: Tversnitt av en solfanger.

Sirkulasjonskretsen er laget slik at vannet som sirkulerer i solfangerne dreneres tilbake til soltanken så snart solpumpen stopper (drain back). Hverken soltank eller solfangeren

er trykksatte, det er ikke statisk trykk utover trykket som følger av vannhøyden i systemet.



Figur 3.6: Solfangeranlegget består av 5 paneler.

Solfangerne på taket har følgende mål:

Tabell 3.1: En oversikt over dimensjoner til solfangerne

Lengde	2,25 m
Bredde	0,56 m
Areal	1,26 m ²
Total areal til de 5 solfangerne	6,30 m ²

3.4 Kanalvifte

På natten skjer kjøling av solfangerne ved såkalt aktiv ventilasjon, hvor luftviften spiller en sentral rolle. Det ble installert en Østberg CK100 C vifte ved et tidligere masterprosjekt (Tappel, 2007). Implementeringen av viften i anlegget var ønskelig av flere grunner. Høye temperaturer på sommeren utsetter solfangerne for termisk belastning, noe som forkorter levetiden til absorbatorene. I denne oppgaven skulle viften bidra til kjøling av vannet uten at dekkplatene ble fjernet fra solfangerne på natten. Luften ble hentet gjennom spalter i profilen på toppen av solfangerne og ved hjelp av viften ble luften videre suget/trukket gjennom alle fem solfangerne (se figur 3.8).

Viften ble kun brukt på nattid under sommerdriften for å kjøle ned systemet. På dagtid ble alle forsøkene gjort med vanngjennomstrømning i solfangerne.

Kanalviften Østberg CK100 C har en makseffekt på 70 W og imøtekom de kravene som ble stilt til viften: lavt strømforbruk, flere driftshastigheter, mulighet til å plassere den ute samt fleksibilitet for senere utvikling/ombygging av anlegget.



Figur 3. 7: Solfangeren uten dekkplate (til venstre) med innløp og utløp for vannsirkulasjon gjennom absorbatoren. Samlekanalen for luftsirkulasjonen plassert nederst i manifolden. Plassering av sirkulær kanalvifte CK100C (til høyre).

Under sommerdriften av anlegget ble viften skrudd på med timer fra klokken 19:00 på kvelden til klokken 07:00 på morgen.

Luftgjennomstrømming på natten ved hjelp av viften foregår som vist i Figur 3.8



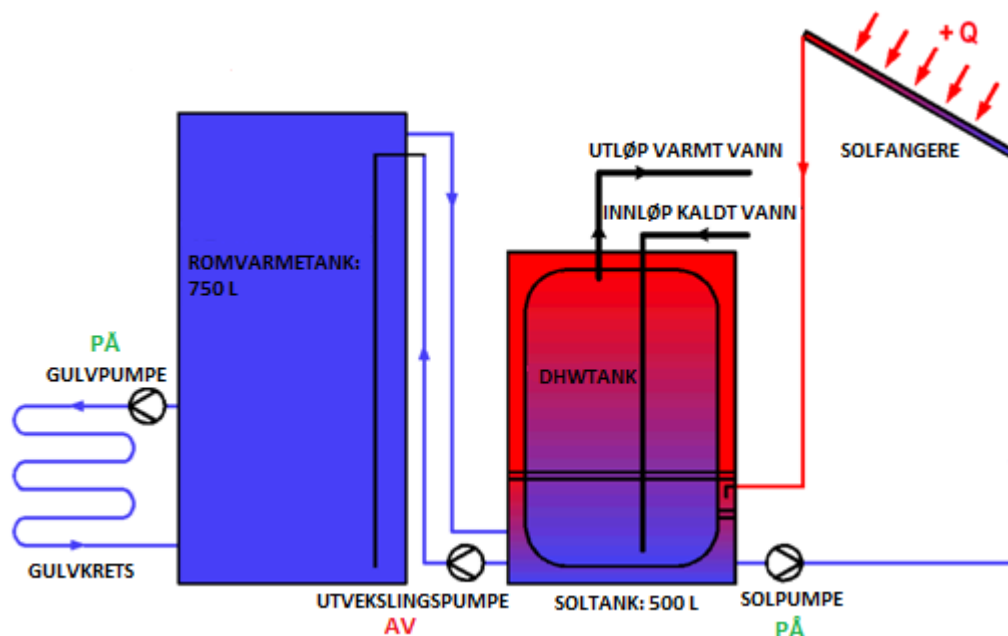
Figur 3. 8: Luftstrømmen gjennom solfangerne ved bruk av vifte på natten under kjøleforsøk.

3.5 Aktuelle driftsituasjoner for anlegget

Anlegget ved Sollaben har tre forskjellige driftmoduser/driftsituasjoner, avhengig av årstid og dagtid. I månedene når det ikke er behov for romoppvarming fungerer systemet i såkalt sommerdrift, mens under fyringssesongen er det vinterdrift som benyttes. Samtidig er det forskjell mellom dag og natt i disse driftsituasjonene. Nærmere opplysninger om disse driftsituasjoner er beskrevet under.

Sommer/ Dag

På dagtid var solpumpen på slik at vannet sirkulerte gjennom solfangerne på taket og kom tilbake til den nedre delen av soltanken. Hvis det var sol ute ble vannet raskt oppvarmet. Innertanken (DHW) ble gjennom soltanken også varmet opp, slik at det fantes varmt tappevann i systemet til husholdning. Utvekslingspumpen mellom soltanken og romvarmetank var skrudd av på dagtid, slik at kaldt vann var tilgjengelig i romvarmetanken for å kunne kjøle innearealet på Sollaben ved å sirkulere vannet i gulvkretsen på dagtid. Under eksperimenter utført for denne oppgaven forble gulvpumpen alltid avskrudd, slik at det ikke var noen sirkulasjon i gulvkretsen. Luftviften og utvekslingspumpen var i drift og styrt med en klokke.



Figur 3.9: Skisse av systemet på en sommerdag.

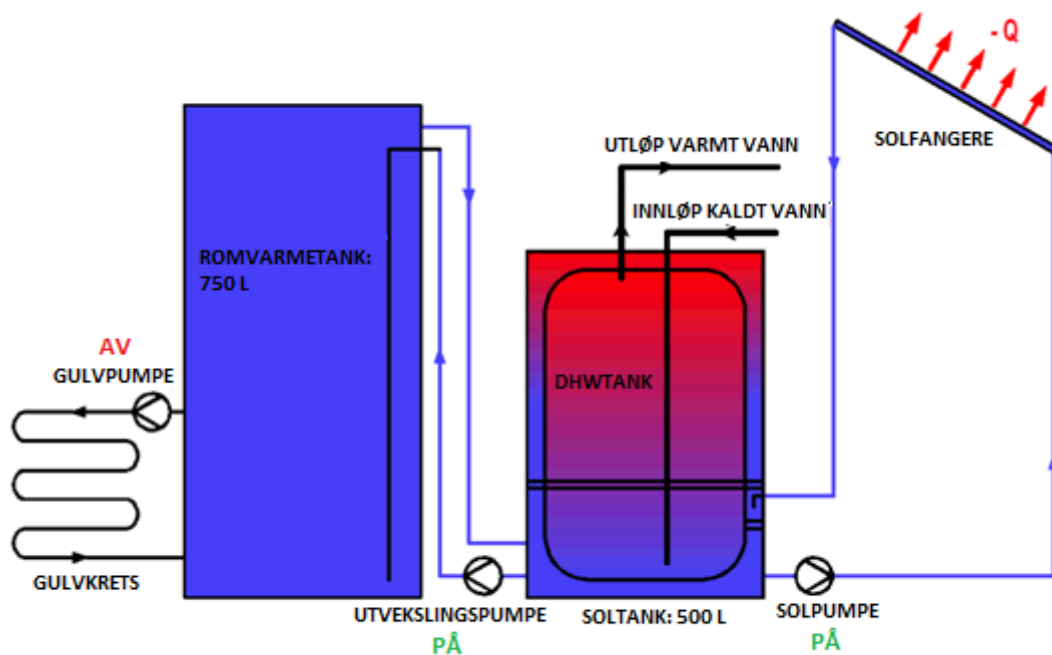
Hvis temperaturen inne i solfangerne blir for høy har man mulighet til å skru på viften slik at temperaturen i solfangerne raskt kan senkes. Dette er kun aktuelt når det ikke er sirkulasjon i anlegget. Viften er en viktig del av anlegget siden høye temperaturer (rundt $130\text{ }^{\circ}\text{C}$) kan skade den type polymersolfangerne som ble benyttet. Detaljert testing av solfangeranlegget med bruk av kanalvifte er gjort av Tappel (2007).

Varmt vann som kommer fra solfangerne blir lagret i øvre del av soltanken, slik at vannet i innertanken (DHW) også blir varmet opp gjennom varmeveksling. For at vannet fra innertanken skal kunne brukes til forskjellige formål som dusjing, oppvask

og husholdning, må temperaturen i denne tanken være mellom 50-60 °C. Dersom det ikke er mulig å oppnå denne temperaturen pga. for eksempel varierende solforhold, kan anlegget suppleres med en ekstern varmekilde i form av et elektrisk apparat eller en gassbrenner. Alle forsøkene i denne oppgaven var gjort uten slike eksterne kilder.

Sommer/ natt

Hensikten med sommerdrift på natten er å kjøle vannet i romvarmetanken så mye som mulig slik at anlegget kan benytte det kalde vannet til kjøling ved hjelp av gulvkretsen på dagtid. Kanalviften og solpumpen var på og vannet fra bunnen til soltanken sirkulerte gjennom solfangerne gjennom natten. Utvekslingspumpen til anlegget var skrudd på samtidig med viften, og vann fra romvarmetanken sirkulerte gjennom nedre del (under skilleplaten) av soltanken på natten.



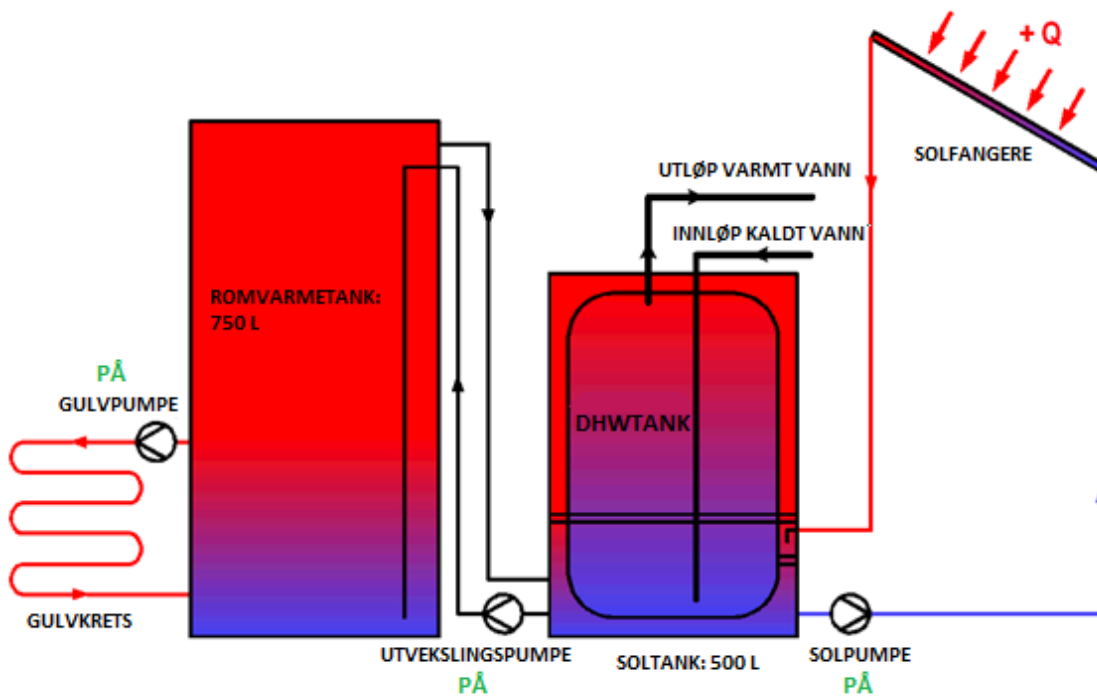
Figur 3. 10 Skisse av systemet på en sommernatt.

Som det er nevnt tidligere er soltanken konstruert slik at det vil alltid være noe varmt vann på toppen for å kunne varme opp tappevannet i innertanken. Anlegget vil derfor alltid være i stand til å holde tappevann fra innertanken varmt til neste soloppgang.

Vinterdrift

På en vinterdag er det ønskelig at solvarmeanlegget kan hente så mye varme som mulig. Sola skinner relativt sjelden og har lav innstrålingsrate. Alle pumper i systemet er på

ved dagtid, slik at gulvvarmeanlegget og innertanken (DHW) forsynes med varmt vann. Dette bidrar til å møte behovet for rom og vannoppvarming.



Figur 3. 11: Skisse av systemet på en vinterdag.

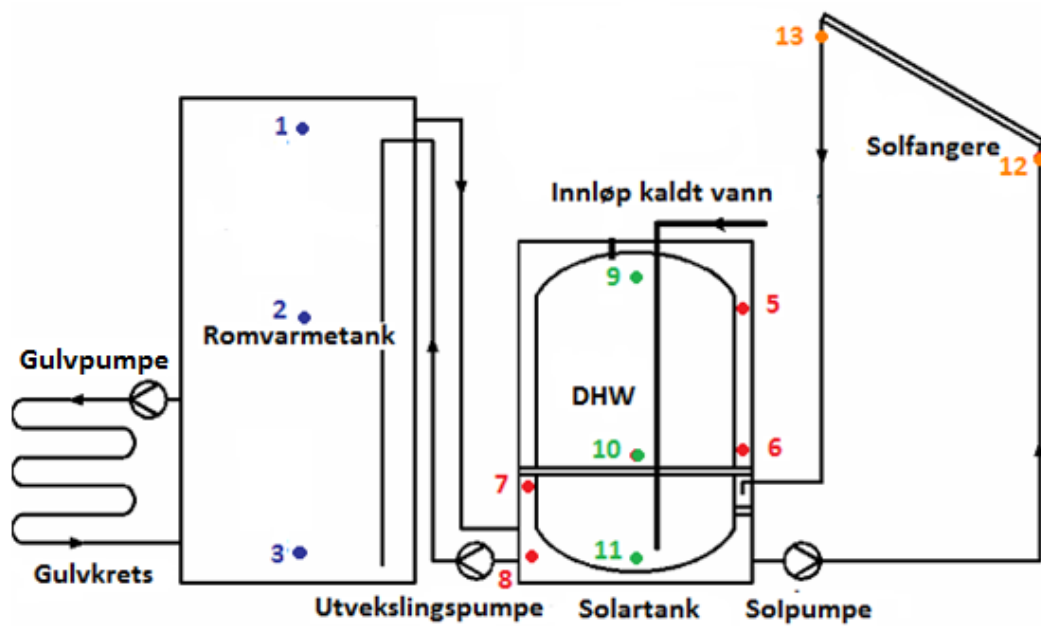
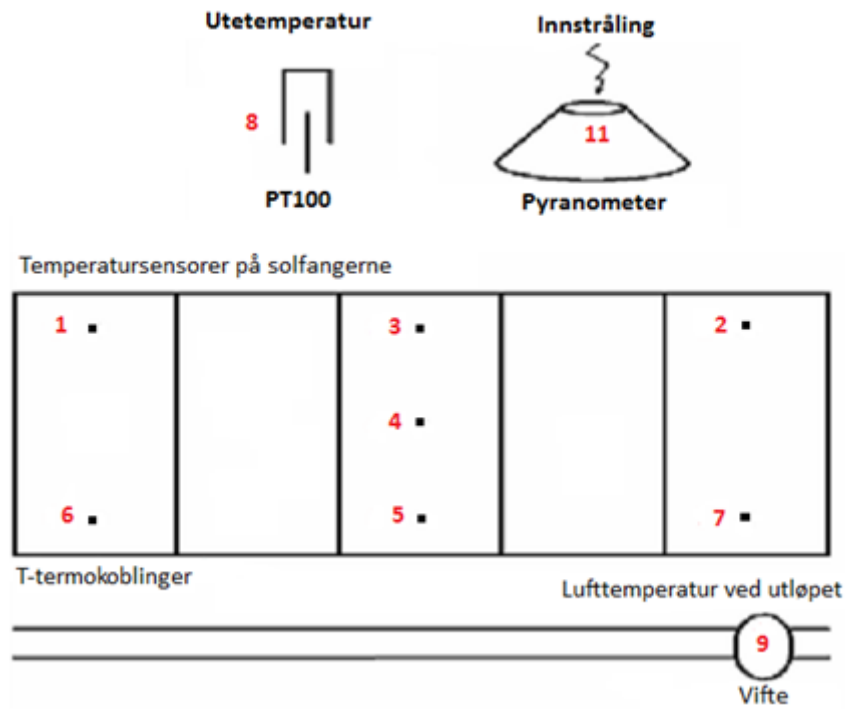
Solfangerne er slått av på natten siden varmemediet er vann, og den ikke kan være i kollektorer på grunn av at vannet kan fryse. Dette er spesielt aktuelt i et land som Norge. Når solen ikke gir mer varme til solfangerne, ble vannet drenert tilbake til soltanken ved hjelp av tyngdekraften.

3.6 Instrumenter benyttet i forsøkene

Før testingen av systemet startet sommeren 2007 ble det installert nye måleinstrumenter som pyranometer og termiske sensorer under dekkplatene på solfangerne på Sollaben. Viften var allerede på plass etter masterprosjekt av Tone Tappel.

3.6.1 Temperatursensorer i systemet

Temperaturer i anlegget ble målt med termoelementer, unntatt utetemperatur (sensor T_8), innløp (sensor T_{12}) og utløp (sensor T_{13}) temperatur til solfangerne. For disse ble et Pt-100-element brukt for å oppnå bedre presisjon i målingene.



Figur 3. 12: Plassering av temperatursensorer i solfangeranlegget og i varmelageret.

3.7 Oversikt over datainnsamling i systemet

Det ble plassert flere temperatursensorer i de forskjellige delene av systemet: på solfangerne, inne i alle de tre tankene, samt inne i og på utsiden av Sollaben. For detaljert oversikt over posisjonene til temperatursensorene se Figur 3.12. Pyranometer ble benyttet for å samle solinnstråling under eksperimentene. For å registrere all

informasjonen fra pyranometeret og termoelementene under forsøkene ble et loggesystem benyttet.

Signalene fra alle sensorer og instrumenter ble sendt til en National Instruments (NI) terminalblokk/datalogger NI TBX-68T (National Instruments, 2010) som er koblet til kort NI PCI 4351 (National Instruments, 2010) i datamaskinen på Sollaben. De oppståtte spenningene fra termoelementene ble lest ut og overført til datamaskinen, hvorpå denne datamengden ble videre behandlet av programmet LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).

Det ble benyttet to terminalblokker til separat kobling av sensorer fra solfangerpanelene og fra varmelageret. Hver terminalblokk har 16 kanaler: kanal 0 har en innebygd termistor, som gjør det mulig å vite temperaturen rundt terminalblokken for å ha en referanse for de andre temperaturene. Kanal en brukes for en funksjon kalt “AUTO ZERO” som fjerner eventuelle offset feil på kortet. Gjenstående 14 kanaler er disponible for målinger. Oversikt over hvilke sensorer og instrumenter som er koblet i disse kanalene finnes i tabell 3.2 og tabell 3.3.

Tabell 3. 2: Oversikt over Terminalblokk #1 for sensorer fra solfangere

Kanal	Sensor	Plassering
0	Innebygget termistor i NI-terminalen	
1	Auto-Zero i NI-terminalen	
2	Termokobling 1	Ytterste absorlatorplate til venstre på toppen
3	Termokobling 2	Ytterste absorlatorplate til høyre på toppen
4	Termokobling 3	Midtre absorlatorplate på toppen
5	Termokobling 4	Midtre absorlatorplate på midten
6	Termokobling 5	Midtre absorlatorplate i bunnen
7	Termokobling 6	Ytterste absorlatorplate til venstre i bunnen
8	Utetemperatur/ Pt100-element	På takmønet
9	Termokobling 7	Ytterste absorlatorplate til høyre i bunnen
10	Anemometer	På taket
11	Pyranometer	Ved siden av solfangere på taket
12	Lufttemperatur ved utløpet	I nærheten til vifte

For å samle signalene fra varmelageret ble den andre terminalblokken benyttet.

Tabell 3. 3: Oversikt over Terminalblokk #2 for sensorer fra varmelagget

Kanal	Sensor	Plassering
0	Innebygget termistor i NI-terminalen	
1	Auto-Zero i NI-terminalen	
2	Termokobling 1	På toppen i romvarmetank
3	Termokobling 2	I midten av romvarmetank
4	Termokobling 3	I bunnen av romvarmetank
5	Termokobling 4	Utløp fra toppen av romvarmetank
6	Termokobling 5	Toppen av soltank
7	Termokobling 6	Over skilleplaten i soltank
8	Termokobling 7	Under skilleplaten i soltank
9	Termokobling 8	Bunnen av soltank
10	Termokobling 9	Toppen av innertank(DHW)
11	Termokobling 10	Midten av innertank (DHW)
12	Termokobling 11	Bunnen av innertank (DHW)
13	Termokobling 12 Pt100	Innløp til solfangere
14	Termokobling 13 Pt100	Utløp fra solfangere

3.7.1 Termoelementene

Et termoelement består av to isolerte tråder av forskjellige typer metaller eller halvledere som er tvunnet sammen i målepunktet slik at det dannes en strømkrets. Ved forskjellige temperaturer i målepunktet, oppstår det en spenning i kretsen som kan konverteres/korreleres til temperaturen. Den oppståtte spenningen blir kalt Seebeck-spenning og er lineært proporsjonalt med temperaturen.

Det ble brukt termoelementer fra Labfacility av type T, med Kobber vs. Kobber-nikkel-legering. Kontaktspenningen for Cu/CuNi ligger rundt $43\mu\text{V/K}$. Ifølge produsenten skal T type termoelementene ha en usikkerhet $\pm 1,0\text{ K}$ i temperaturområde fra $-25\text{ }^\circ\text{C}$ til $100\text{ }^\circ\text{C}$. Kalibreringen viste at termoelementene i temperaturområdet fra $0\text{ }^\circ\text{C}$ til $80\text{ }^\circ\text{C}$ var mer nøyaktige enn oppgitt fra produsenten, usikkerheten var $\pm 0,36\text{ K}$.

T-type termoelement ble valgt på grunn av at det er motstandsdyktig ift. korrosjon i fuktige omgivelser og dermed kan brukes i vann. Termoelementet trenger heller ikke noen ekstern strømkilde.

Termoelementene ble kalibrert før de ble montert i anlegget og kalibreringsfunksjoner ble lagt inn i loggeprogrammet slik at korrigerede temperaturer ble lagret.

Kalibreringsrapport er vedlagt i Tillegg B.

3.7.2 Pt-100 temperaturføler

For å måle utetemperatur ved inntaket til solfangerne (sensor T_8) ble det montert en svært nøyaktig temperaturføler med benevnningen Pt-100 fra Labfacility (LabFacility Precision Platinum Temperature Sensors Brochure, 2010).

For å få mest mulig nøyaktige verdier til lufttemperaturen som kommer inn i solfangerne ble den plassert rett ved spalteåpningene til panelene. Pt-100 element er basert på en motstand som forandrer seg med temperaturen. Motstanden er av Platina og er 100 Ohm ved 0 °C. I motsetning til termoelement, produserer ikke Pt-100 element sin egen spenning, og det kreves derfor det en ekstern strømkilde for å kunne måle motstandsendingen (Larsen, 2006). Det ble brukt en ekstern strømkilde på 1 mA. Pt-100 ble også brukt som temperaturfølere for innløp (sensor T_{12}) og utløp (sensor T_{13}) av vannet til solfangere.

Ifølge produsenten skal Pt-100 type B temperaturføler ha en usikkerhet $\pm 0,3$ K. Under kalibreringen ble usikkerheten til Pt-100 temperaturføler målt til å være $\pm 0,33$ K, og stemte således godt med informasjon fra produsenten.

3.7.3 Pyranometer

For å kunne registrere global kortbølget solinnstråling, både direkte og diffuse stråling, ble det installert et danskprodusert fotovoltaiske SolData pyranometer (modellnummer 459SPC). Pyranometeret ble plassert ved siden av solfangerne på taket til Sollaben, i samme plan som solfangerne. Pyranometeret ble kalibrert i 2006, kalibreringsrapport finnes i tillegg B.2 (Gjessing, 2006).

Når solen skinner på solcellen som er i et pyranometer, blir solenergi omdannet til elektrisk energi. Denne energien registreres som en spenning U i [mV] i dataloggeren og kan omregnes til innstråling I i [W/m^2] ved hjelp av kalibreringsfaktoren K . Irradiansen er da lik $I = U / K$.



Figur 3. 13: SolData pyranometer (modellnummer 459SPC).

Kalibreringsfaktoren fra produsenten fra spenning til innstrålingen var oppgitt til å være

$172 \frac{mV}{(kW/m^2)}$ for dette instrumentet, men den ble justert etter kalibreringen fra 2006 til:

$$K = 160 \frac{mV}{(kW/m^2)}$$

Fra kalibreringsrapporten kommer det frem at usikkerheten i både enkeltmålingene, og integrert innstråling over en periode, er anslått til å være mindre enn 6 %.

3.7.4 Volumstrømmåler

Volumstrømmåleren brukes i dette anlegget til å måle sirkulasjonshastigheten til vannet i solfangerkretsen. Måleren, som er en finskprodusert Enermet MP 115, var installert av tidligere studenter. Under forsøkene til denne oppgaven var sirkulasjonshastigheten stilt til $0,600 \text{ m}^3/\text{h}$, noe som tilsvarer $0,166$ liter pr. sekund eller 2 liter pr. minutt pr. kvadratmeter av solfangeranlegget.



Figur 3. 14: Enermet MP115 volumstrømmåler som ble brukt for å måle hvor mye vann som sirkulerer i systemet.

3.7.5 Solstyreren

Det er installert Solarnor/Resol systemstyrer for å sikre optimal sirkulasjon i anlegget. Den beregner om det er energi å hente fra solfangerne ved å “sammenligne” temperaturen i solfangerne med temperaturen i bunnen av solartanken. Hvis temperaturen i solfangerne er minst 6 K høyere enn i soltanken, slås solpumpen automatisk på. Hvis temperaturskjellen er under 6 K stopper solpumpen automatisk. Dette for å unngå at solfangerne skal kunne kjøle ned soltanken om dagen. Ved kulde eller når temperaturen i vannet nærmer seg kokepunktet, stopper solpumpen og vannet dreneres ut av panelene. Styringsenheten ble ikke brukt når anlegget skulle gå kontinuerlig over flere dager. Solpumpen var skrudd på kontinuerlig og vann sirkulerte mellom solfangerne og solartanken uten avbrutt.

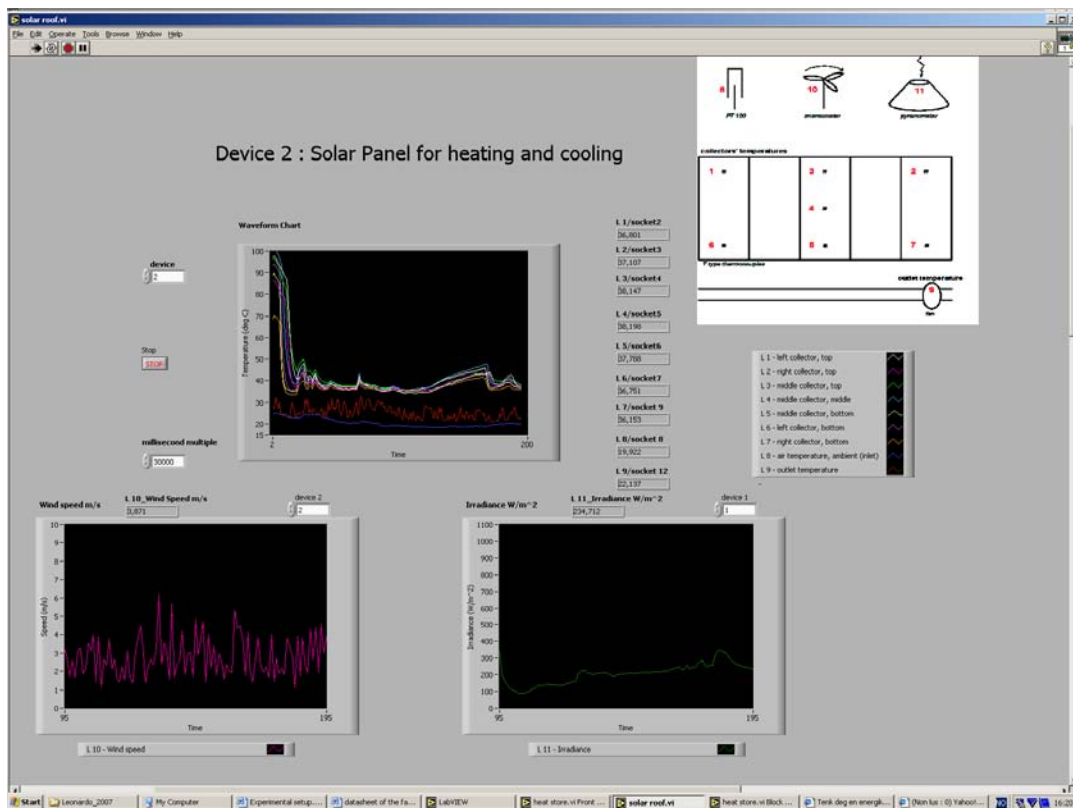


Figur 3. 15: Solstyreren til solpumpen.

3.7.6 LabVIEW Program

Etter at spenningene fra temperaturfølerne ble lest av ved hjelp av terminalblokkene og informasjonen overført til pc via datakort, kunne man logge temperaturutviklingen under eksperimentene ved hjelp av LabVIEW. LabVIEW er en programvare for et visuelt programmeringsspråk fra National Instruments (National Instruments Corporation, Labview, 2009). LabVIEW har blant annet mange avanserte datainnsamlingsløsninger og styringsapplikasjoner som gjør at det grafiske utviklingsverktøyet LabVIEW er utbredt i industri og forskningslaboratorier. Det ble skrevet et program som konverterte spenningssignalene fra terminalblokkene til temperatur ($^{\circ}\text{C}$) og innstråling (W/m^2). Det ble også tatt høyde for kalibreringskonstantene og usikkerhetene til temperaturfølerne og utstyret som ble benyttet i forsøkene. I tillegg har LabVIEW et visuelt kontrollpanel som viser utviklingen med grafer og verdier til systemet underveis i forsøkene. Frontpanel til programmet er vist i Figur 3.16.

All rådata fra målingene ble automatisk lagret i tekstfil som ble eksportert til Excel for videre analyse. På frontpanelet ble det valgt å ha temperaturer til sensorene fra solfangerne, utetemperatur, vindhastighet og innstråling.



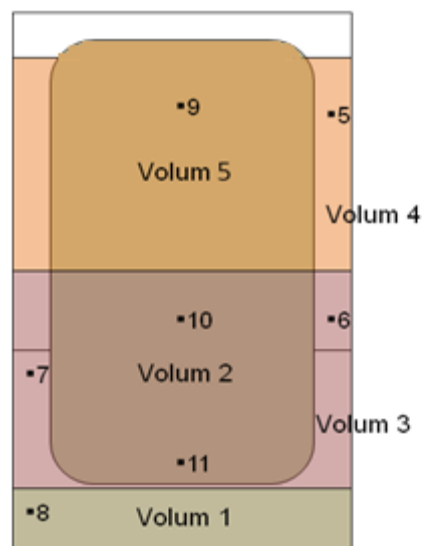
Figur 3. 16: Screenshot av frontpanel til LabVIEW programmet.

Koden til programmet er tilgjengelig i Tillegg C.

3.8 Metode

3.8.1 Oppdeling av soltanken

For å kunne gjøre beregninger basert på temperaturendringene i varmelageret var det viktig å vite hvilke sensorer som representerer de forskjellige volumene i varmelageret. Det var installert 7 sensorer totalt: 4 sensorer i soltanken (T_5 , T_6 , T_7 og T_8) og 3 sensorer i innertanken (DHW) (T_9 , T_{10} og T_{11}). Varmelageret ble delt inn i 5 volumer, og disse er presentert i Figur 3.17.



Figur 3. 17: Oppdelt Soltank og DHW tank i volumer med antatt konstant temperatur.

Ut i fra dimensjonen til soltanken og innertanken (DHW) ble de 5 volumene beregnet og presentert i Tabell 3.4.

Tabell 3. 4: Volum til vannet som er knyttet til de forskjellige volumer i tanken.

Sensor	Volum	Volum (l)
T_8	V_1	63,5
T_{10} og T_{11}	V_2	86,3
T_6 og T_7	V_3	88,3
T_5	V_4	106,2
T_9	V_5	121,7

For å dobbeltsjekke at linjen som skiller volum 3 og volum 4 er riktig satt, ble det volumet i soltanken som ble kjølt ned etter at sirkulasjonen startet mellom romvarmetanken og soltanken beregnet. Massen til vannet i romvarmetanken ($m_{V_{rmt}}$) er 750 liter. Temperaturendringen i romvarmetanken (ΔT_{rvt}) etter at sirkulasjonen startet

kan leses av figur 4.12 og 4.13 og temperaturendringen i soltanken (ΔT_{st}) kan leses av i figur 4.1 og 4.2. Etter at sirkulasjonen startet, ble soltanken kjølt ned og romvarmetanken varmet opp, på grunn av at vannet i romvarmetanken hadde ca. 20 °C lavere temperatur enn soltanken. Massen til vannet i soltanken (m_{Vst}) som ble kjølt ble beregnet ved hjelp av følgende ligning:

$$\Delta T_{rvt} \cdot m_{Vrmt} = \Delta T_{st} \cdot m_{Vst} \quad (3.2)$$

slik at:

$$m_{Vst} = \frac{\Delta T_{rvt} \cdot m_{Vrmt}}{\Delta T_{st}} \quad (3.2)$$

Etter å ha beregnet massen til vannet i soltanken (m_{Vst}) for 6 forskjellige dager ble den midlere verdien beregnet til å være 247,5 liter. Denne verdien stemmer ganske godt med volumet 1, volumet 2 og volumet 3 fra figur 3.15 som til sammen har 238 liter.

3.8.2 Akkumulert energi

For å finne ut hvor mye energi som er akkumulert i soltanken for hver dag med og uten varmtvanns forbruk, ble det benyttet en kalorimetrisk metode, som er beskrevet i avsnitt 2.6.2. Etter at anlegget var i drift og vannet i solfangerne var varmet opp ved hjelp av solenergi, kunne man beregne energien som er tilført til varmelageret. Akkumulert energi ble beregnet for hvert volum:

$$Q_i = c m_i (\Delta T)_i \quad (3.3)$$

hvor c er varmekapasiteten til vannet, m_i er massen til vannet i volum V_i og ΔT er temperaturforskjellen til vannet fra akkumuleringen starter og til temperaturen har nådd sitt maksimum. Den tilførte energien Q_{kal} (kWh) i varmelageret er lik summen av energien i fem volumer.

$$Q_{kal} = \sum_i^5 c m_i (\Delta T)_i \quad (3.4)$$

For dager med varmtvanns forbruk, ble energi for hvert tappevannsuttak beregnet i tillegg til den totale energien som ble akkumulert i varmelageret. Under

tappevannsuttak ble kaldt vann fylt i bunnen av DHW tanken og den brukte energien kunne beregnes for uttak av 20 liter og 50 liter:

$$Q_{tappet} = cm(T_{DHW_topp} - T_{CW}) \quad (3.5)$$

hvor T_{DHW_topp} er temperaturen på toppen av innertanken og T_{CW} temperaturen til vannet fra springen.

For å finne det totale energiutbyttet (Q_{total}) er det nødvendig å ta hensyn til varmetap fra tanken, varmen tilført av solpumpe og luftvifte, samtidig som forbrukt energi under forsøk med tappevannsuttak Q_{tappet} , slik at:

$$Q_{total} = Q_{kal} + Q_{tappet} - Q_{tap} \quad (3.6)$$

Q_{tap} er en felles betegnelse for alle bidrag som varmetap fra soltanken og effekten fra solpumpen og luftviften.

3.8.3 Effektiviteten til anlegget

Både for dager en har tappet varmt vann, og for dager uten tapping av varmt vann ble effektiviteten til anlegget beregnet ut fra måledataene.

Den midlere effektiviteten er forholdet mellom nyttig varme levert til varmelageret og tilført energi til anlegget i samme tidsperiode, og den kan generelt defineres slik:

$$\eta = \frac{Q_{total}(t_1, t_2)}{A_s \int_{t_1}^{t_2} I dt} \quad (3.7)$$

hvor, $Q_{total}(t_1, t_2)$ er den nyttige energien tilført varmelageret i tidsrommet t_1 til t_2 (t_1 er starttidspunktet og t_2 er tidspunktet da målingen slutter), I er innstråling målt i W/m^2 og A_s er arealet til solfangeranlegget.

4. Resultater

Målingene begynte med å teste systemet under sommerdrift og ble videre undersøkt med vinterdrift modus. For å etterligne bruk av systemet til en vanlig bolig ble det tappet vann flere ganger per døgn, slik at man blant annet kunne studere hvor fort varmen overføres mellom tankene. I tillegg skulle sjiktning i soltanken til anlegget undersøkes nærmere. Hvor godt man klarte å etablere sjiktning og skilleveggs effektivitet var en av de sentrale aspektene med studien.

Til slutt ble varmetapet til soltanken og effektiviteten til systemet som helhet beregnet. Innsamlede data er presentert med tabeller og figurer og videre analysert i dette kapittelet samt i kapittel 5.

En prototypversjon av systemet var allerede bygget og installert i "Sollaben". En viss bearbeiding av datainnhentings- og analyseprogrammet LabVIEW måtte til for å få anlegget ferdigstilt. Dataene ble samlet i perioden september (sommerdrift) - oktober (vinterdrift) 2007.

4.1 Innledende eksperimenter

4.1.1 Sommerdrift uten varmtvanns forbruk

For å bli bedre kjent med anlegget og for å finne ut hvordan det fungerer ved ulike temperaturer og innstrålingsforhold, ble det gjort målinger under forskjellige værforhold uten å tappe vann i løpet av dagen. En oversikt over innledende eksperimenter, uten forbruk av tappevann, og videre eksperimenter med forbruk av tappevann er gitt i tabell 4.2. For alle serier med målinger gjelder følgende innstilling av systemet (tabell 4.1):

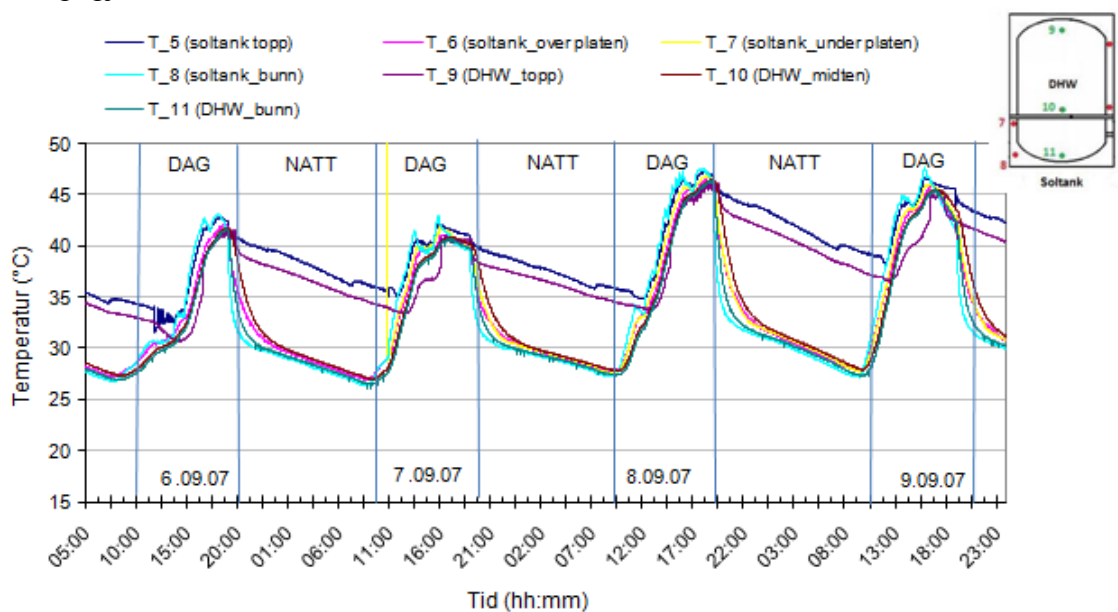
Tabell 4. 1: Innstilling til anlegget under serier med målinger.

	På	Av
Solpumpe	Alltid	
Utvekslingspumpe	fra 19:00 til 7:00	fra 7:00 til 19:00
Vifte	fra 19:00 til 7:00	fra 7:00 til 19:00
Gulvpumpe		alltid

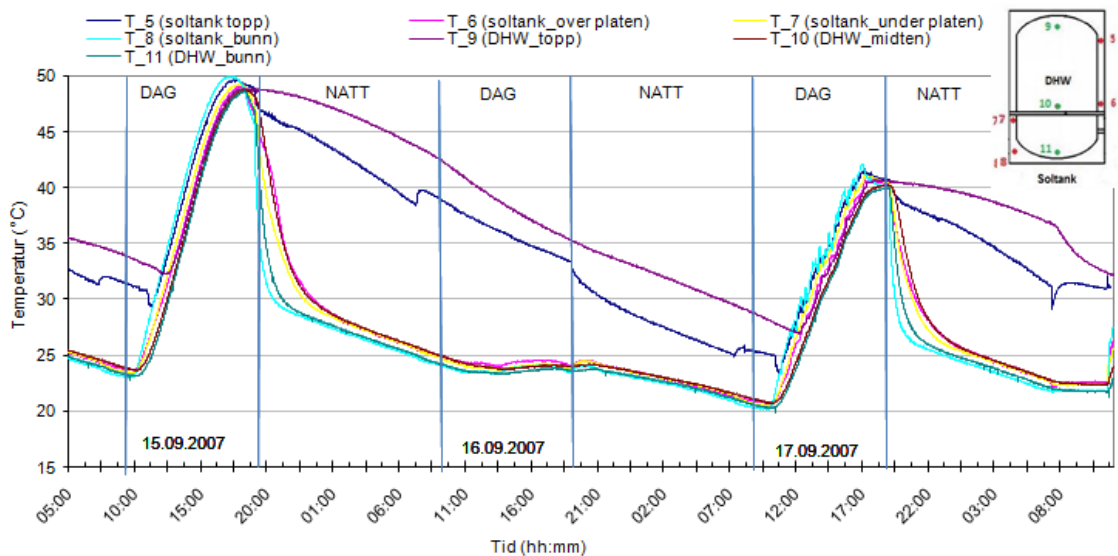
Tabell 4. 2: Oversikt over dager med måleserier med sommerdrift

Sommerdrift uten varmtvannsforbruk
06.09.2007
07.09.2007
08.09.2007
09.09.2007
15.09.2007
17.09.2007
Sommerdrift med varmtvannsforbruk
11.09.2007
12.09.2007
13.09.2007
14.09.2007

Målingene med sommerdrift uten at det ble tappet varmtvann fra innertanken i løpet av dagen er presentert i to måleserier i figur 4.1 og 4.2. Det ble registrert en signalfeil fra sensor T₇ 6. september, men etter kl 11 den 7. september fungerte temperatursensoren riktig igjen.



Figur 4. 1: Temperaturutviklingen i Soltanken og Innertanken (DHW) i løpet av 6, 7, 8. og 9. september 2007 med sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er visst i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).



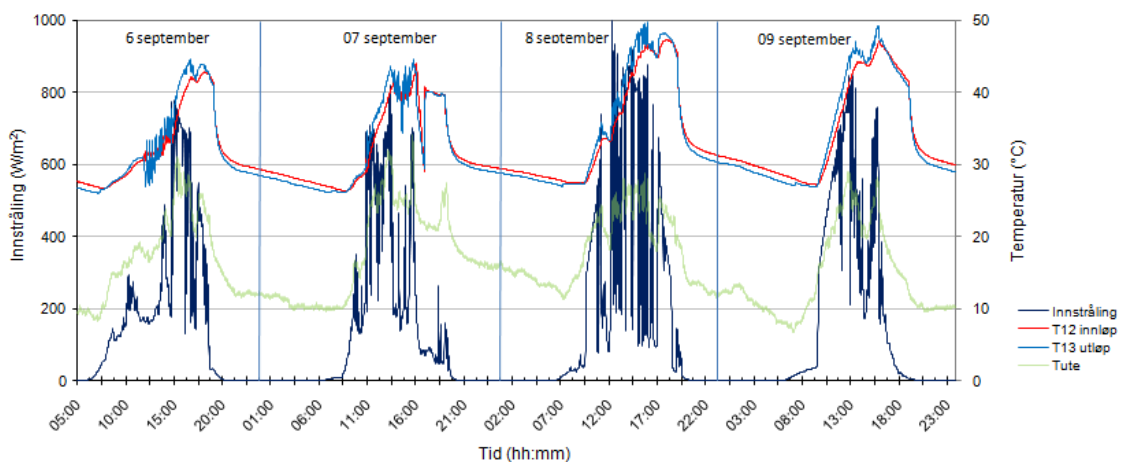
Figur 4.2: Temperaturutviklingen i Soltanken og Innertanken (DHW) i løpet av 15, 16. og 17. september 2007 med sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er visst i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Øverste sensor T₉ i figur 4.1 og 4.2 var plassert på toppen av innertanken (DHW) og nest øverste sensor T₅ var plassert på toppen til soltanken. Grafene viser at bunnen til soltanken presentert med sensor T₈ var mest utsatt for temperaturforandringer. På dagtid var det den varmeste delen av soltanken og på natten var det den kaldeste. Dette kan forklares med at det på dagtid kommer varmt vann fra solfangerne til den nederste delen av tanken, mens det på kvelden (etter at utvekslingspumpen er på fra kl 19), begynner det å sirkulere kaldt vann fra romvarmetanken inn i nedre del av soltanken og dermed kjøler bunnen til soltanken. Det bratte fallet i temperaturen i soltaken og DHW tanken, unntatt temperaturen på toppen av disse tankene hver dag rett etter kl 19, indikerer at utvekslingspumpen er på og at vann sirkulerer mellom soltanken og romvarmetanken. I figur 4.2 fremkommer det et unntak den 16. september. Denne dagen var det på grunn av lav innstråling (se figur 4.4) og dertil lav temperatur i soltanken ikke et bratt fall i temperaturen i soltanken og DHW tanken.

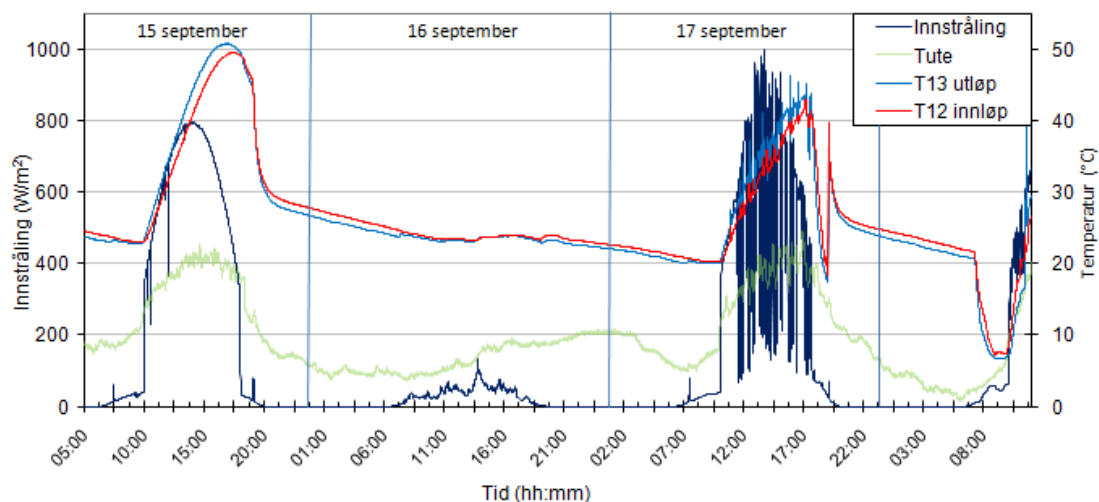
Natt til 9. september hadde vannet en temperatur på 44,0 °C i gjennomsnitt på natten på toppen av soltanken og 42,2 °C på toppen av innertanken. Nederste delen av begge tankene (T₈ og T₁₁) hadde en gjennomsnittlig temperatur på 31,8 °C natt til 9. september. Resten av dagene fra første måleserien hadde soltanken lavere temperatur etter oppvarmingsfasen på rundt 41,5 °C både den 6. og 7. september. Natten til både 7. og 8. september hadde soltanken gjennomsnittlig temperatur på rundt 39,3 °C på toppen

(T_5) og $29,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ i bunnen (T_8). Etter en varm dag, som f.eks. 15. september, med mye sol ble vannet i innertanken varmt (ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), og på natten med utvekslingspumpen og luftviften på, fikk man temperaturfordeling som er i visst i figur 4.1 og 4.2. Vannet på toppen av innertanken (T_9) hadde høyest temperatur gjennom natten til 16. september med $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ i gjennomsnitt, mens vannet på toppen av soltanken (T_5) hadde $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ i gjennomsnitt fra klokken 23 til 07. Vannet i den nedre delen av disse tankene hadde gjennomsnittlig temperatur på rundt $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av natten. Skillevegen som hindrer at varmt og kaldt vann skal blandes sammen i soltanken viste seg å fungere godt.

For å få oversikt over forholdene under oppvarmingsforsøk av soltanken og innertanken på dagtid, og kjølingsforsøk av romvarmetanken på natten, er innstråling, utetemperatur, temperaturen til innløp og utløp til solfangerne fremstilt i to måleserier i figur 4.3 og 4.4.



Figur 4. 3: Solinnstråling, T_{ute} , innløp og utløpstemperatur fra solfangerne for 6, 7, 8. og 9. september 2007 med sommerdrift. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

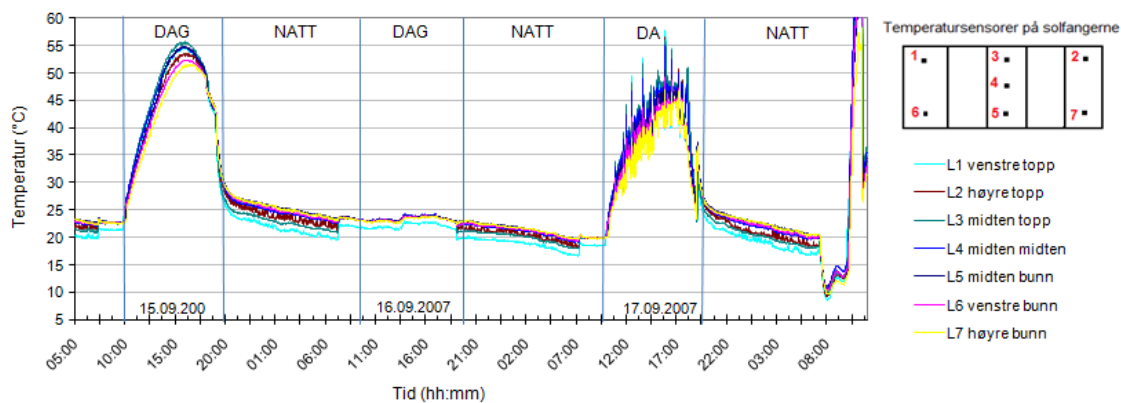


Figur 4.4: Solinnstråling, T_{ute} , innløp og utløpstemperatur fra solfangere for 15, 16. og 17. september 2007 med sommerdrift. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Det er valgt å presentere data fra to måleserier med sammenhengende dager og forskjellige værtyper. Dagene fra den første måleserien var preget av lett skydekke med maksimal innstråling mellom $700\text{--}1000\text{ W/m}^2$. Første dagen fra den andre måleserien (15. september), var en klar dag med stabil solinnstråling med maksimum på 800 W/m^2 . Dagen etter, den 16. september, var preget av dårlig vær, ingen sol og lav utetemperatur. Tredje dag, den 17. september, var det lett skydekke og innstrålingen var helt opp til 1000 W/m^2 .

4.1.2 Temperaturutvikling i solfangerne

Når det gjelder kjøleforsøkene av anlegget for disse to måleseriene var det også interessant å studere temperaturutviklingen til absorptorplatene nærmere. Eksempel på en representativ temperaturutvikling gjennom dag og natt i forskjellige værforhold for solfangerne er visst i figur 4.5.



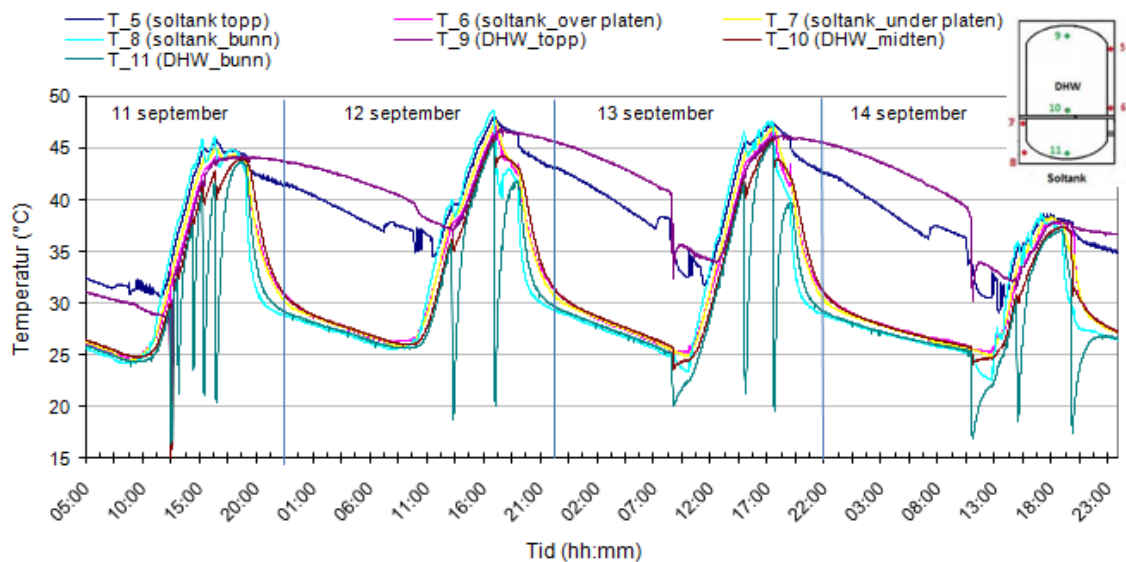
Figur 4.5: Temperaturen til solfangerne fra 15. til 18. september 2007 med sommerdrift. Plassering av sensorer på absorberplatene er vist i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Temperatursensorene var plassert flere steder på absorberplatene, ytterst på venstre- og ytterst på høyre plate, samt tre sensorer på platen i midten (se figur.3.12). Målingene viser at den høyre platen var ca. 3-4 K varmere enn den venstre platen på natten. De høyeste temperaturene på solfangerne gjennom natten ble registrert i bunnen av platene (L₅, L₇ og L₆) med den midterste platen (L₅) som den varmeste. På dagtid var det derimot sensorene i bunnen som viste lavest temperatur. Liknende temperaturfordeling på dagtid stemmer overens med resultater fra tidligere arbeid hos Gjessing (2006) og Tappel (2007).

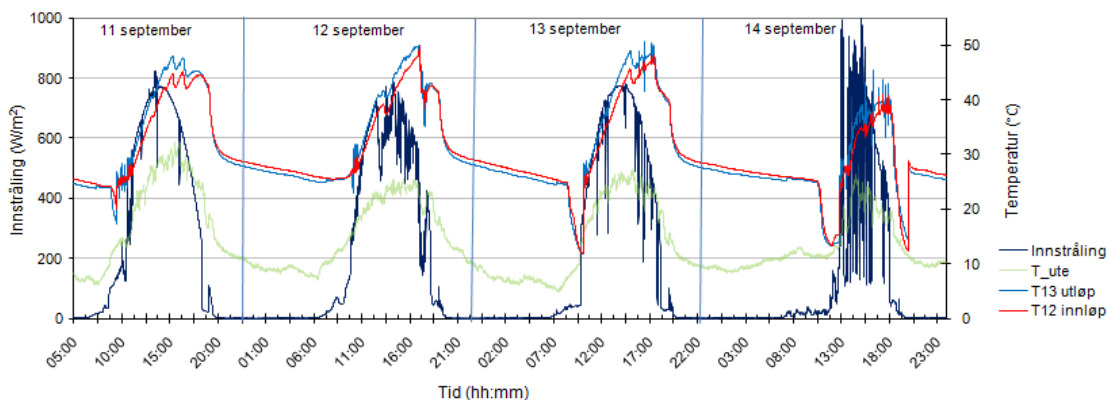
4.2. Sommerdrift med varmtvanns forbruk

Anlegget har blitt testet av tidligere masterstudenter under forskjellige værforhold og driftmodus, men uten å tappe vann fra innertanken. Det som har blitt testet i denne oppgaven er derimot drift av systemet på sommeren med tappevannforbruk flere ganger per dag. Dette for å simulere et bruksscenario som var så realistisk som mulig.

Felles parametrene for hver dag med vannforbruk: soltanken med innertanken ble varmet opp ved hjelp av solfangerne. Utvekslingspumpen var slått av på dagtid, og solpumpen var på i løpet av alle måleserier. Hver natt ble det utført kjøleforsøk ved at viften og utvekslingspumpen ble satt på fra klokken 19:00 til klokken 07:00. Før resultatene ble presentert for driften av anlegget med tapping, og for å få en helhetlig oversikt over utviklingen, er dataene fremstilt i figur 4.6 med fire sammenhengende dager, samt i figur 4.7 med innstråling, T_{ute} , innløp og utløpstemperatur for disse dagene.



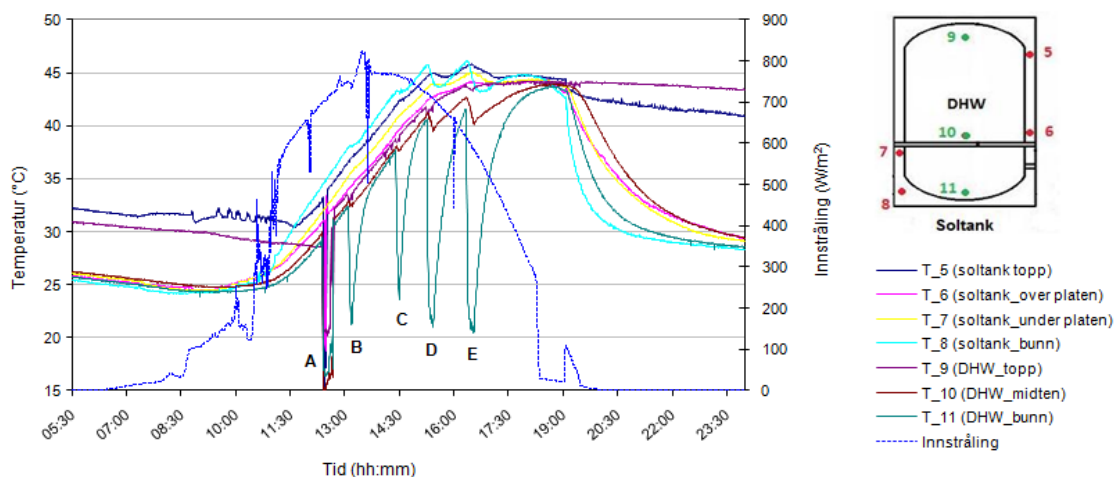
Figur 4.6: Måleserie med sommerdrift og tapping av varmtvann. Temperaturen til soltanken + innertanken fra 11.- 14.09.2007. Plassering av sensorer i begge tankene er vist i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ(styres med solstyreren), Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).



Figur 4.7: Solinnstråling, T_{ute} , innløp og utløpstemperatur fra solfangere for 11.-14.09.2007. Sommerdrift. Solpumpen PÅ(styres med solstyreren), Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00)

4.2.1 Dag 1 med forbruk av tappevann (11.09.2007)

For å kunne registrere endringer i soltanken og innertanken valgte jeg å forstørre de aktuelle tidsintervallene fra figur 4.8 samtidig som temperaturutviklingen av begge tankene er presentert i tabell 4.3.



Figur 4.8: Temperaturen til soltanken og innertanken (DHW) i løpet av 11. september med 2 tappinger av 20 liter og 2 tappinger av 50 liter. Sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er visst i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utevekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Brått fall i temperaturen rundt klokken 12:30 (merket A på Fig.4.8) den 11. september ved noen av sensorene (T_5, T_9, T_{10} og T_{11}) fra soltanken og innertanken, skyldes at disse sensorene ble tatt ut for å kontrollere posisjonen for deretter å bli satt tilbake etter kort tid.

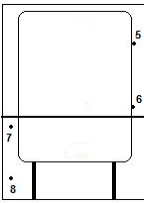
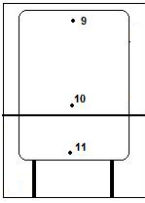
- Første uttak av varmtvann, kl. 13:06

Eksperimentene begynte med at det ble tappet 20 liter varmtvann fra innertanken (merket B på figur 4.8). Første tapping ble utført 11. september kl 13:06, solinnstrålingen på det tidsrommet var 751 W/m^2 og utetemperaturer var ca. $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Det ble registrert noen små endringer i temperaturen i soltanken under tappingen og hele tanken ble noe varmere, unntatt bunnen til soltanken T_8 , som i motsetning til de andre målepunktene stagnerte i løpet av tappingsperioden. Dette kan forklares med at sensor T_8 ligger nærme innertanken (kun 6 cm nedenfor sensor T_{11}), og er derfor følsom for det kalde vannet i bunnen til innertanken.

Man kunne også registrere at temperaturen sank med 0,4 K på toppen av innertanken (T_9) og med rundt 0,22 K i midten av innertanken (T_{10}). Når det gjelder bunnen av innertanken (T_{11}), så falt temperaturen raskt når tappingen var satt i gang og kaldt vann ble fylt ned i tanken. Det tok rundt 5 minutter å tappe 20 liter vann, og temperaturen i bunnen av innertanken sank fra $31,3 \text{ }^\circ\text{C}$ før tapping, til $21,1 \text{ }^\circ\text{C}$ rett etter.

Det var solrik dag og etter 18 minutter hadde vannet i bunnen til innertanken samme temperatur som før tappingen. For en detaljert oversikt over forsøk med tapping 11. september, se tabell 4.3.

Tabell 4. 3: Oversikt over forsøk med 4 tappinger 11. september 2007 med tidspunkt, innstråling og utetemperatur ved starttidspunkt for hver tapping og kort beskrivelse av temperaturendringer i begge tankene.

SOMMERDRIFT						
Dato	Antall vann uttakk	Tidspunkt for vann uttakk	I (W/m ²)	T_{ute} (°C)	Soltanken (Sensor T ₅ , T ₆ , T ₇ og T ₈)	Innertanken (Sensor T ₉ , T ₁₀ og T ₁₁)
11.09.07	1	Start: 13:06 (20 liter) Stopp: 13:11	751,1 732,4	27,1 27,4	 $\Delta T_{(T_5)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_8)} = 0K$	 $\Delta T_{(T_9)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,2K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -10,2K$
	2	Start: 14:24 (20 liter) Stopp: 14:30	766,5 763,5	28 28,2	$\Delta T_{(T_5)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_8)} = 0K$	$\Delta T_{(T_9)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,4K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -14K$
	3	Start: 15:15 (50 liter) Stopp: 15:25	721,7 708,3	27,9 29,6	$\Delta T_{(T_5)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,5K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_8)} = -1,5K$	$\Delta T_{(T_9)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -1,8K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -19,7K$
	4	Start: 16:20 (50 liter) Stopp: 16:28	613,9 595,2	27,2 27	$\Delta T_{(T_5)} = 0,2K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,1K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,2K$ $\Delta T_{(T_8)} = -1,0K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,3K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -1,6K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -20,9K$

- Andre uttak av varmtvann, kl. 14:24

Solinnstrålingen var på 766 W/m² og utetemperatur målt i skyggen var 28 °C. Det ble tappet 20 liter vann klokken 14:24 (merket C på figur 4.8). Lignende mønster som under den første tappingen oppsto. Kun temperaturen i bunnen til soltanken (T₈) ble påvirket mens temperaturen andre deler av soltanken fortsatt å stige. Temperaturen på

toppen av innertanken (T_9) fortsatte å stige med 0,3 K under 20 liters vann forbruk. Midten av innertanken (T_{10}) ble litt påvirket, og temperaturen der sank rundt 0,4 K i løpet av vannforbruket. Vannuttak av 20 liter tok rundt 6 minutter og temperaturen i bunnen av innertanken (T_{11}) sank med 14 K fra 37,5 °C til 23,5 °C. Dagen fortsatte med fint vær med mye sol, og etter 22 minutter var temperaturen i bunnen av innertanken (T_{11}) rundt 37,5 K slik som det var før tappingen.

- Tredje uttak av varmtvann, kl. 15:15

Tapping av 20 liter vann 2 ganger forstyrret systemet i veldig liten grad. Jeg valgte derfor å fortsette med å tappe 50 liter i de videre forsøkene.

Vannet ble tappet klokken 15:15 (merket D på figur 4.8). Midlere innstråling var på 722 W/m² og utetemperaturen på 28 °C i tidsrommet for vannuttaket.

Man kunne tydelig se at systemet ble mer påvirket under uttak av 50 liter kl 15:15. Soltanken, i likhet med tidligere tappevannforbruk, ble ca 0,4 K varmere, mens i bunnen (T_8) falt temperaturen med 1,5 K. I innertanken kunne man registrere at vannet på toppen av tanken (T_9) ble noe varmere (0,3 K) mens det i den nedre delen ble kaldere (T_{10}), og helt i bunnen (T_{11}) falt temperaturen med ca. 20 K.

Solinnstrålingen begynte å minke jevnt på den tiden av dagen og det tok 48 minutter før bunnen til innertanken (T_{11}) ble varmet opp til 40,4 °C slik den var før tredje uttak av varmtvann.

- Fjerde uttak av varmtvann, kl. 16:20

Det ble tappet 50 liter vann klokken 16:20 (merket E på figur 4.8). Selv på den tiden av dagen var det en god del solinnstråling (614 W/m²) og utetemperaturen var 27 °C. Som etter tidligere tapping var det bunnen av soltanken som ble mest påvirket under tappingen, og temperaturen der sank med ca. 1 K, mens temperaturen i resten av soltanken fortsatt å stige. Toppen av innertanken ble lite påvirket, temperaturen der sank med 0,3 K. I nedre del av innertanken falt temperaturen med 1,6 K og helt i bunnen av innertanken falt temperaturen med 21 K. Irradiansen etter man var ferdig å tappe var fortsatt ganske høy, rundt 595 W/m² og det tok 59 minutter før temperaturen i bunnen av innertanken hadde samme temperatur som før tappingen.

Det ble beregnet hvordan varmen ble utvekslet mellom soltanken og DHW tanken etter den tredje uttakk av varmtvann ved hjelp av metode beskrevet i avsnitt 3.8.2. Vannet sirkulerte gjennom solfangeranlegget og det ble tilført energi til soltanken hele tiden. Etter at 50 liter kaldt vann ($m_{tapping}$) ble fylt ned i DHW tanken, ble vannet varmet opp og den tilførte energi fra andre steder i varmelageret ble beregnet:

$$Q_{DHWbunn} = c \cdot m \cdot \Delta T = 1,16 \cdot 50 \cdot 10 = 580Wh$$

c er varmekapasitet til vannet ($\frac{Wh}{kg \cdot K}$), m er massen til vannet (kg) og ΔT (K) ble lest av figur 4.8 (merket E). Varmen som ble tilført fra bunnen i soltanken (Q_{SB}) kunne beregnes på en tilsvarende måte:

$$Q_{SB} = 294,6Wh \Rightarrow 50,8\%$$

Varmen tilført fra midten av soltanken (Q_{SM}):

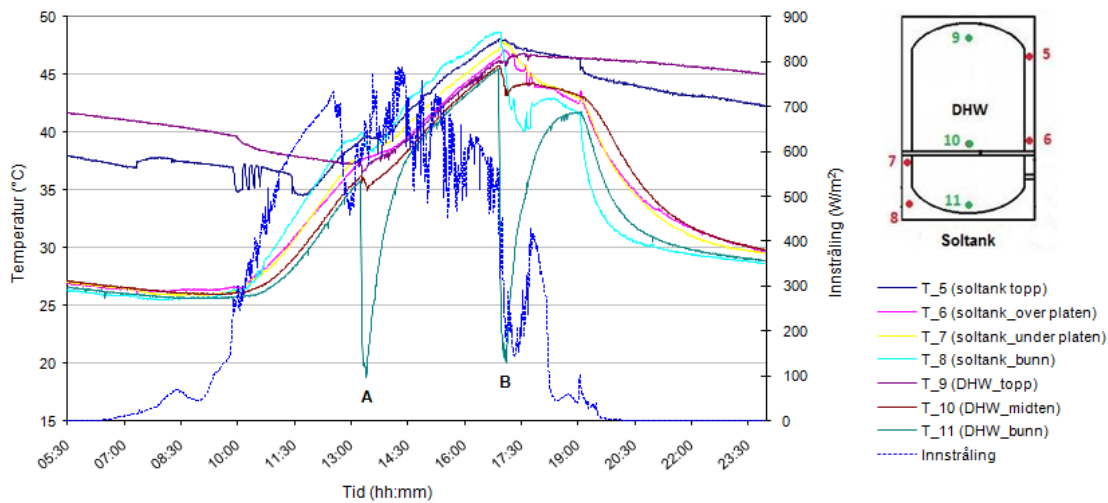
$$Q_{SM} = 102,8Wh \Rightarrow 17,6\%$$

Til slutt ble varmen tilført ved miksing i innertanken beregnet:

$$Q_{DHWM} = 101,0Wh \Rightarrow 17,4\%$$

Det meste av varmen kommer fra bunnen av soltanken med rundt 50 %, mens miksing i innertanken og midten av soltanken utgjør nesten likt bidrag.

4.2.2 Dag 2 med forbruk av tappevann (12.09.2007)



Figur 4. 9: Temperaturen til soltanken og innertanken (DHW) i løpet av 12. september med 2 tappinger av 50 liter. Sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er visst i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ(styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

- Første uttak av varmtvann, kl. 13:14

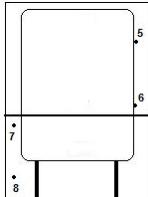
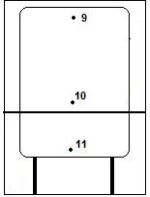
Første vanntapp begynte klokken 13:14 og det ble tappet 50 liter vann (merket A på figur 4.9). Solinnstrålingen ved start av tappingen var 577 W/m^2 og utetemperaturen var rundt $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen i soltanken steg videre med rundt $0,3 \text{ K}$ under tappingen, mens temperaturen i bunnen til soltanken (T_8) sank med rundt 1 K . I innertanken var det i bunnen (T_{11}) hvor temperaturen forandret seg mest, den falt med 17 K , mens temperaturen i resten av tanken (T_9 og T_{10}) falt med $0,7 \text{ K}$. Det tok 59 minutter før temperaturen i bunnen av innertanken (T_{11}) hadde samme temperatur som før tappingen.

- Andre uttak av varmtvann, kl. 16:54

Den andre tappingen av 50 liter ble satt i gang klokken 16:54 (merket B på figur 4.9). Innstrålingen var rundt 535 W/m^2 ved start av tappingen og falt ned til 211 W/m^2 på slutten av tappingen. Man kan tydelig se av figur 4.9 at systemet ble påvirket mye i forhold til ved tidligere tappinger. Det samme mønsteret kan registreres som ved tidligere tappinger under lignende værforhold. Hele soltanken (T_5, T_6, T_7) ble noe oppvarmet mens temperaturen i bunnen (T_8) falt med nesten 4 K . I innertanken (DHW) falt temperaturen med $0,4 \text{ K}$ på toppen (T_9), med ca 2 K i nedre delen (T_{10}), mens temperaturen i bunnen (T_{11}) falt ned med over 25 K . For en detaljert oversikt over forsøk med tappingen den 12. september, se tabell 4.4.

Nesten samtidig som tappingen av 50 liter var satt i gang, falt solinnstrålingen bratt og var helt ned i 140 W/m^2 før den etter hvert steg igjen til ca 400 W/m^2 . Derfor ble systemet både påvirket av tappingen og lite innstråling. Selv med lite innstråling etter tappingen, med en topp på ca 400 W/m^2 og deretter jevn synkende innstråling, ble bunnen av innertanken varmet opp til $41,6 \text{ K}$ før kjøling av anlegget ble satt i gang klokken 19:00.

Tabell 4.4: Oversikt over forsøk med 2 tapping 12. september 2007 med tidspunkt, innstråling og utetemperatur ved starttidspunkt for hver tapping og kort beskrivelse av temperaturendringer i begge tankene.

SOMMERDRIFT						
Dato	Antall vann uttakk	Tidspunkt for vann uttakk	I (W/m^2)	T_{ute} ($^{\circ}\text{C}$)	Soltanken (Sensor T_5, T_6, T_7 og T_8) 	Innertanken (Sensor T_9, T_{10} og T_{11}) 
12.09.07	1	Start: 13:14 (50 liter) Stopp: 13:23	577 651	22,2 22,3	$\Delta T_{(T_5)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_8)} = -1K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,7K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,7K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -17,1K$
	2	Start: 16:54 (50 liter) Stopp: 17:06	535 174	24,5 21,2	$\Delta T_{(T_5)} = 0K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,5K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,5K$ $\Delta T_{(T_8)} = -3,7K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,4K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -2K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -25,5K$

Det ble beregnet hvordan varmen ble utvekslet mellom soltanken og DHW tanken etter andre uttakk av varmtvann ved hjelp av metode beskrevet i avsnitt 3.8.2. Det var ingen sirkulasjon i soltanken, grunnet fall i innstrålingen. Etter at 50 liter kaldt vann ble fylt ($m_{tapping}$) ned i DHW tanken, ble varmen tilført dit fra andre steder i varmelageret beregnet:

$$Q_{DHWbunn} = c \cdot m \cdot \Delta T = 1,16 \cdot 50 \cdot 16 = 928Wh$$

c er varmekapasitet til vannet ($\frac{Wh}{kg \cdot K}$), m er massen til vannet (kg) og ΔT (K) ble lest

av figur 4.9 (merket B). Varmen som ble tilført fra bunnen i soltanken (Q_{SB}) kunne beregnes på en tilsvarende måte:

$$Q_{SB} = 589Wh \Rightarrow 63,5\%$$

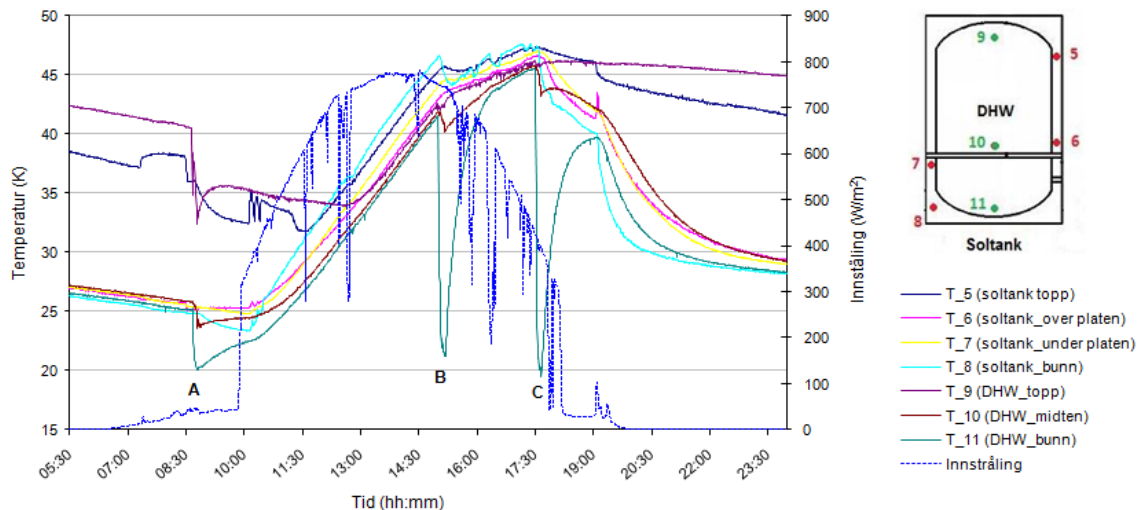
Varmen tilført fra midten av soltanken (Q_{SM}):

$$Q_{SM} = 307Wh \Rightarrow 33\%$$

Til slutt ble varmen tilført ved miksing i innertanken beregnet:

$$Q_{DHW} = 3105Wh \Rightarrow 11\%$$

4.2.3 Dag 3 med forbruk av tappevann (13.09.2007)



Figur 4. 10: Temperaturen til soltanken og innertanken (DHW) og solinnstråling i løpet av 13. september med 3 tappinger av 50 liter. Sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er visst i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

- Første uttak av varmtvann, kl. 8:40

Denne dagen ble det valgt å begynne å tappe 50 liter vann før solen hadde begynt å varme opp anlegget (merket A på figur 4.10). Anlegget var på med solpumpen i drift, mens luftviften og utvekslingspumpen ble skrudd av klokken 07:00. Det var fint vær denne dagen med ganske stabil innstråling opp til 800 W/m^2 , og utetemperatur opp til $25 \text{ }^\circ\text{C}$ på det varmeste. Den første tappingen ble satt i gang klokken 08:40 og man kunne se at systemet reagerte annerledes enn under tapping i oppvarmingsfasen. Under selve tappingen ble soltanken tilnærmet upåvirket, mens temperaturen i innertanken sank med 5 K i bunnen (T_{11}), med $2,2 \text{ K}$ i midten (T_{10}), og med 8 K på toppen (T_9). Etter at 50 liter var tappet begynte temperaturen på toppen (T_5) og i bunnen (T_8) av soltanken å synke som følge av at temperaturen i innertanken hadde falt. Det tok 2 timer og 21 minutter før temperaturen i bunnen av innertanken var like varm ($25,2 \text{ }^\circ\text{C}$) som før første tapping.

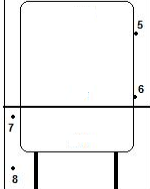
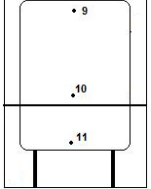
- Andre uttak av varmtvann, kl. 15:00

Solinnstråling var rundt 750 W/m^2 når andre tapping av 50 liter vann ble påbegynt (merket B på figur 4.10). Samme mønster ift. temperaturutvikling kunne registreres som ved tidligere tappinger under lignende værforhold. Hele soltanken ble videre noe oppvarmet mens temperaturen i bunnen (T_8) falt med 1,5 K. På toppen av innertanken (T_9) steg temperaturen med 0,3 K mens temperaturen i den nedre delen av tanken (T_{10}) falt med rundt 2 K og med 20,4 K i bunnen (T_{11}). Det tok 52 minutter før temperaturen i bunnen av innertanken var like varm (25,2 K) som før andre tapping.

- Tredje uttak av varmtvann, kl. 17:30

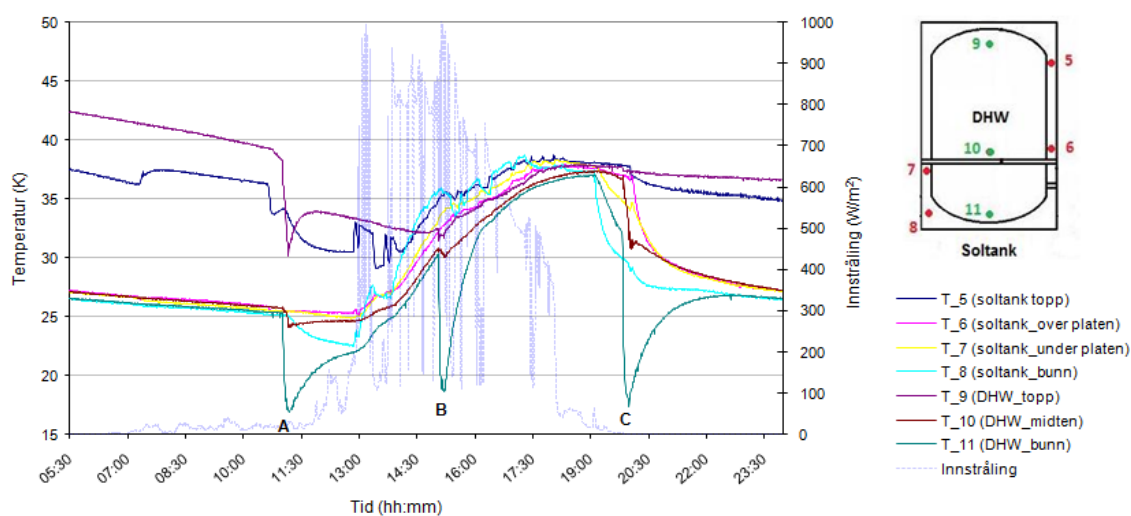
Etter at tredje tapping var ferdig klokken 17:39 (merket C på figur 4.10), var solinnstråling på vei ned. Som følge av dette ble bunnen av innertanken (T_{11}) ikke varmet helt opp til $45,5 \text{ }^\circ\text{C}$ som den var før tapping, men kun opp til $39,6 \text{ }^\circ\text{C}$ før kjølingen av anlegget ble satt i gang klokken 19:00. Under denne tappingen ble soltanken veldig lite påvirket unntatt i bunnen (T_8), hvor temperaturen sank med 2,2 K. Det ble størst nedgang i temperaturen i bunnen av innertanken (T_{11}), hvor temperaturfallet var på hele 26 K. Temperaturen på toppen (T_9) falt veldig lite, med 0,3 K og i midten av DHW tanken (T_{10}) falt den med 2,6 K. En detaljert oversikt over tappinger 13. september finnes i tabell 4.5.

Tabell 4. 5: Oversikt over forsøk med 3 tappinger 13. september 2007 med tidspunkt, innstråling og utetemperatur ved starttidspunkt for hver tapping, samt kort beskrivelse av temperaturendringer i begge tankene.

SOMMERDRIFT						
Dato	Antall vann uttakk	Tidspunkt for vann uttakk	I (W/m^2)	T_{ute} ($^\circ\text{C}$)	Soltanken (Sensor T_5, T_6, T_7 og T_8) 	Innertanken (Sensor T_9, T_{10} og T_{11}) 
13.09.07	1	Start: 8:40 (50 liter)	39,4	7,8	$\Delta T_{(T_5)} = -0,6K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0K$ $\Delta T_{(T_8)} = 0K$	$\Delta T_{(T_9)} = -8K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -2,2K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -5,1K$
		Stopp: 8:48	44,6	8,3		
		Start: 15:00	751	25,4	$\Delta T_{(T_5)} = 0,4K$	$\Delta T_{(T_9)} = 0,3K$

	(50 liter) Stopp: 15:11	745	27,0	$\Delta T_{(T_6)} = 0,5K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_8)} = -1,5K$	$\Delta T_{(T_{10})} = -1,7K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -20,4K$
	Start: 17:30 (50 liter) Stopp: 17:39	422	23,3	$\Delta T_{(T_5)} = 0K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0K$ $\Delta T_{(T_8)} = -2,1K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,3K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -2,6K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -26K$

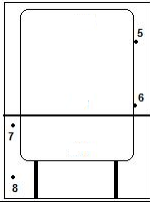
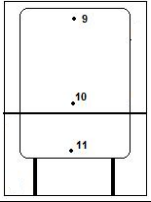
4.2.4 Dag 4 med forbruk av tappevann (14.09.2007)



Figur 4.11: Temperaturen til soltanken og innertanken (DHW) og innstrålingen i løpet av 14. september med 3 tapping av 50 liter. Sommerdrift. Plassering av sensorer i begge tankene er vist i bildet på toppen til høyre. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utevekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

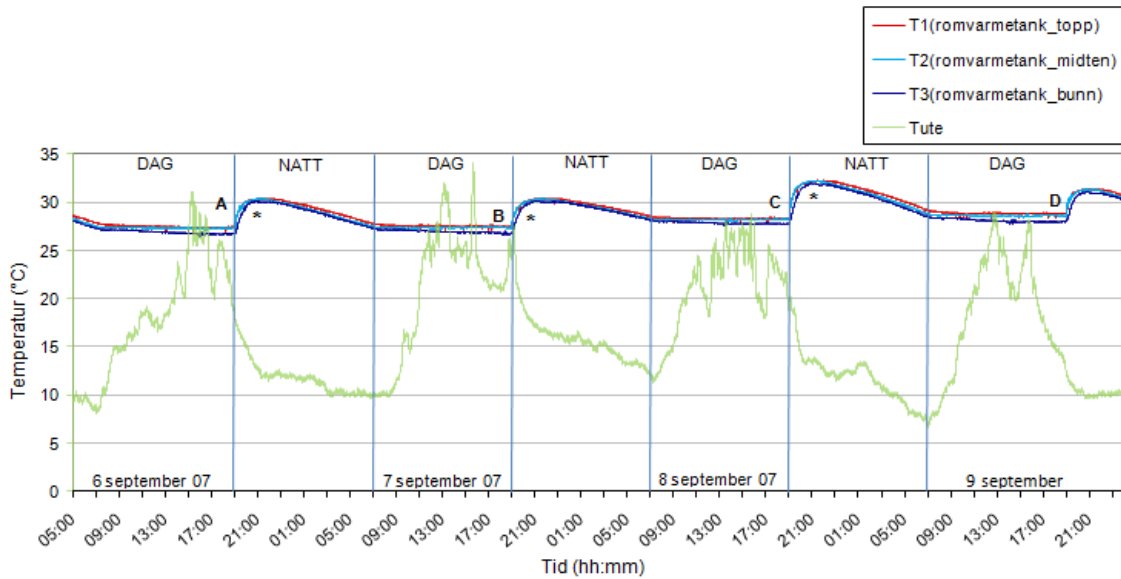
Siste dag med tre tappinger var preget av ustabil innstråling. Oversikt over temperaturen i soltanken og innertanken samt innstrålingen er presentert i figur 4.11. Detaljer rundt de tre tappingene som ble foretatt denne dagen er samlet i tabell 4.6.

Tabell 4.6: Oversikt over forsøk med 3 tappinger 14. september 2007 med tidspunkt, innstråling og utetemperatur ved starttidspunkt for hver tapping samt kort beskrivelse av temperaturendringer i begge tankene.

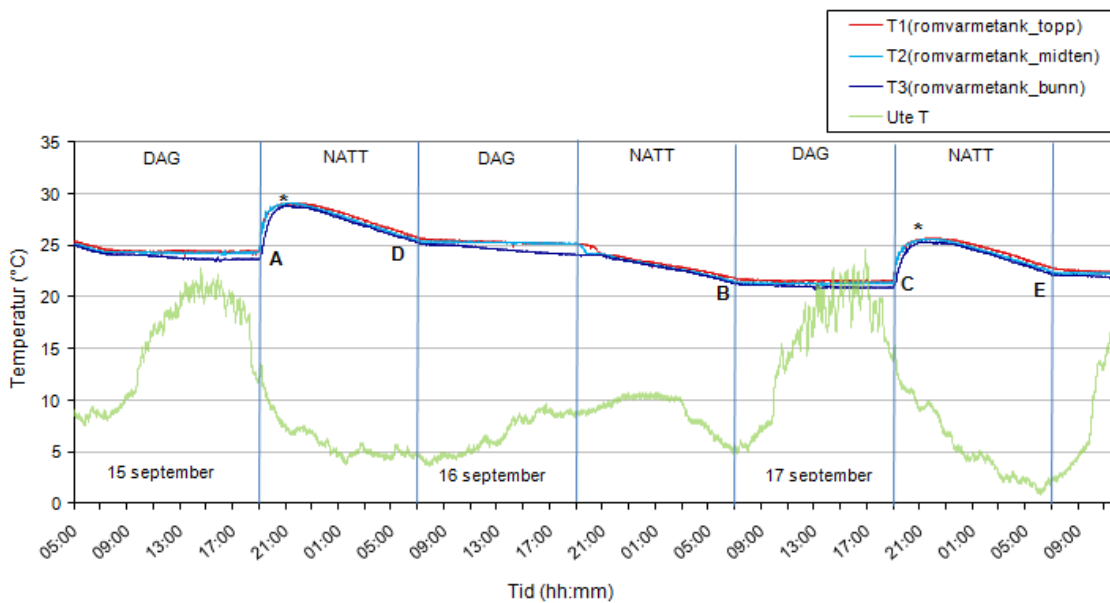
SOMMERDRIFT						
Dato	Antall vann uttakk	Tidspunkt for vann uttakk	I (W/m ²)	T_{ute} (°C)	Soltanken (Sensor T ₅ , T ₆ , T ₇ og T ₈) 	Innertanken (Sensor T ₉ , T ₁₀ og T ₁₁) 
14.09.07	1	Start: 11:00 (50 liter) Stopp: 11:13	19,7 27,4	11,5 11,1	$\Delta T_{(T_5)} = -1K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0K$ $\Delta T_{(T_8)} = -0,3K$	$\Delta T_{(T_9)} = -6,6K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -1,4K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -8,3K$
	2	Start: 15:03 (50 liter) Stopp: 15:12	842 722	21,6 22,2	$\Delta T_{(T_5)} = 0,6K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,6K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,7K$ $\Delta T_{(T_8)} = 0, K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,4K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,8K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -11,7K$
	3	Start: 19:49 (50 liter) Stopp: 20:00	2,1 0,8	11,7 11,5	$\Delta T_{(T_5)} = 0K$ $\Delta T_{(T_6)} = -0,3K$ $\Delta T_{(T_7)} = -0,7K$ $\Delta T_{(T_8)} = -0,6K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,5K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -5K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -14,7K$

4.3 Kjøling under sommerdrift for dager uten varmtvanns forbruk

På dagtid var utvekslingspumpen avslått slik at det ikke var sirkulasjon mellom soltanken og romvarmetanken. Figur 4.12 og 4.13 viser temperaturutviklingen i romvarmetanken og utetemperatur fra 6. til 9. september og fra 15. til 17. september 2007.



Figur 4.12: Temperaturen til romvarmetanken og utetemperatur fra 6. til 9. September 2007. Sommerdrift. Solpumpen PÅ(styres med solstyreren), Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).



Figur 4.13: Temperaturen til romvarmetanken og utetemperatur fra 15. til 18. September 2007. Sommerdrift. Solpumpen PÅ(styres med solstyreren). Utsveklingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Utsveklingspumpen og kanalviften var på fra klokken 19:00 hver dag og det kan registreres på grafen (merket A, B, C og D på figur 4.12 og A, C på figur 4.13) med at temperaturen i romvarmetanken begynte å stige rett etter dette på grunn av at varmt vann fra bunnen til soltanken ble pumpet inn. Kjølingen av romvarmetanken begynte rundt klokken 21:20 for alle dagene (unntatt den 16. september) etter at temperaturen i romvarmetanken ble varmet opp med mellom 3-5 K for de ulike dagene. Dette er

merket med * i figur 4.12 og 4.13. Hver dag ble romvarmetanken kjølt ned frem til klokken 07:00 på morgningen, tidspunktet når sirkulasjon mellom soltanken og romvarmetanken ble stoppet, samtidig som kanalviften ble slått av. Det kommer tydelig frem på figur 4.12 og 4.13 at temperaturen i romvarmetanken enten var lik eller høyere enn temperaturen tanken hadde før kjølingen.

Den 16.september var temperaturen i romvarmetanken (merket D på Fig.4.13) 1,3 K høyere på morgningen enn på kvelden den 15., noe som ikke svarte til forventningene. Tilsvarende situasjon oppstod under kjøleforsøk den 17. september. Rett etter at sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken ble satt i gang klokken 19:00, steg temperaturen i romvarmetanken med ca 4 K før kjøling oppstod. Tanken var igjen rundt 1 K varmere på morgningen enn på ettermiddagen (merket E på figur.4.13).

Under kjøleforsøk den 16. september kunne man registrere en annen utvikling. Det var overskyet og utetemperatur var 7 °C i gjennomsnitt på dagtid. Vannet under skilleveggen hadde en temperatur på 24 °C målt med T_7 og T_8 i soltanken rett før klokken 19:00 og var derfor lavere enn temperaturen på toppen og i midten av romvarmetanken målt med T_1 og T_2 på 25 °C. Til sammenligning var temperaturen til vannet under skilleveggen i soltanken etter en dag med stabil innstråling mellom 45 og 50 °C. Fra figur 4.6 kan man registrere at romvarmetanken ikke fikk temperaturøkning rett etter klokken 19:00 den 16. september, pga. at vannet i bunnen til soltanken ikke var varmere enn vannet i romvarmetanken. Vannet i romvarmetanken ble kjølt ned med 3 K (merket B i figur 4.13) i løpet av natten.

Kjølekapasiteten til anlegget som var avhengig av utetemperatur på natten kan uttrykkes ved en formel:

$$P = k(T_{inn} - T_{ute}) \quad (4.3)$$

T_{inn} er innløpstemperatur til vannet fra bunnen av soltanken til solfanger, T_{ute} er utetemperatur og k er en konstanten som kan bestemmes ved at kjøleeffekten ble beregnet ved hjelp av :

$$P = (m_{Vst} + m_{Vrmt}) \cdot \frac{dT_{inn}}{dt} \cdot c \quad (4.1)$$

hvor m_{Vst} er massen til vannet i soltanken, m_{Vrmt} er massen til vannet i romvarmetanken,

$\frac{dT_{inn}}{dt}$ er endringen i temperaturen i romvarmetanken per tidsenhet som ble bestemt ved

hjelp av lineær regresjon og c er spesifikk varmekapasitet til vannet. Konstanten k blir da lik:

$$k = \frac{(m_{Vst} + m_{Vrmt}) \cdot \frac{dT_{inn}}{dt} \cdot c}{(T_{inn} - T_{ute})} \quad (4.2)$$

Beregnet kjølekapasiteten og konstanten k til ulike nettene for sommerdrift uten varmtvannsforbruk, samt gjennomsnittsverdier for utetemperatur og temperaturen til vannet som ble pumpet opp til solfangeranlegget er samlet i tabell 4.7.

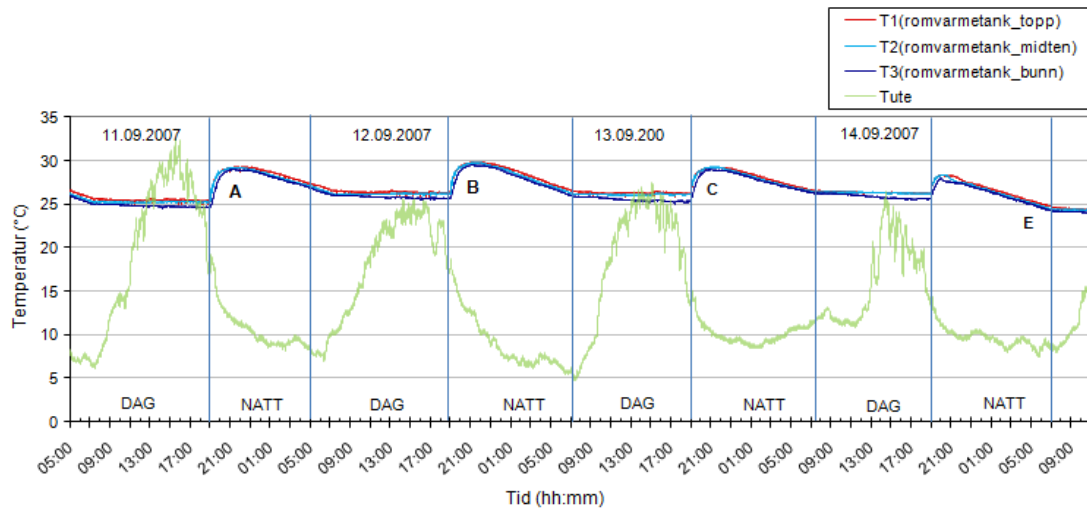
Tabell 4. 7: Nøkkeldata for beregning til kjøleeffekt og konstanten k under kjøleeksperimentene.

Dato	$T_{inn}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ute}(^{\circ}\text{C})$	P(W)	k
6-7.09.2007	29,0	13,4	407,6	26,1
7-8.09.2007	29,4	14,9	305,7	21,1
8-9.09.2007	30,7	11,0	509,5	25,9
15-16.09.2007	27,4	5,4	509,5	23,2
16-17.09.2007	22,8	8,9	356,6	25,6
17-18.09.2007	24,3	4,3	458,5	22,9

4.4 Kjøling under sommerdrift for dager med varmtvanns forbruk

Etter at anlegget i løpet av dagen hadde varmet opp vannet, var det ønskelig å teste om det samme systemet kunne brukes til kjøling på natten ved å sirkulere vannet mellom romvarmetanken og soltanken og videre gjennom solfangerpanelene. Kanalviften skulle forsterke kjølingseffekten, slik at den bidro til den naturlige kjølingen av vannet ved hjelp av himmeltemperatur. Samtidig som det var ønskelig å kjøle romvarmetanken, var det viktig at det fortsatt var varmt vann tilgjengelig på toppen av soltanken og i innertanken på morgningen. Dette skulle skilleveggen i soltanken bidra til å opprettholde.

Anlegget var innstilt slik at både utvekslingspumpen og viften automatisk ble skrudd på klokken 19:00, samtidig som solpumpen var på. Denne innstillingen hadde systemet frem til klokken 07:00 på morgen etter. Temperaturutviklingen i romvarmetanken og utetemperatur under dagene med vanntapping, er vist i figur 4.14.



Figur 4. 14: Temperaturen til romvarmetanken for 11,12,13 og 14 (dager med tapping) september 2007. Sommerdrift. Solpumpen PÅ (styres med solstyreren), Utvekslingspumpe og kanalvifte AV (fra 07:00-19:00).

Det kommer tydelig frem i figur 4.14 at temperaturen i romvarmetanken på morgningen enten var lik eller høyere enn den var før kjølingsforsøket startet på kvelden. Unntaket var den 14. og 16. september hvor tanken var kaldere på morgenene. For alle dagene, bortsett fra den 16. kunne man registrere en økning mellom 3-5 K ved start av viften og utvekslingspumpen. Dette skyldtes at vannet fra soltanken ble pumpet inn i romvarmetanken.

Temperaturen i romvarmetanken ble kjølt ned med rundt 2 K i løpet av natten til den 15. september (merket E på figur 4.14). Grunnen til dette kan forklares med at det ble tappet 50 liter vann fra DHW tanken rundt klokken 20 under kjølingsforsøket. Kaldt vann ble fylt nederst i innertanken, slik at dette bidro til at vannet i bunnen av soltanken ble kaldere.

Beregnet kjølekapasiteten og konstanten k til ulike nettene for sommerdrift med varmtvannsforbruk, samt gjennomsnittsverdier for utetemperatur og temperaturen til vannet som ble pumpet opp til solfangeranlegget er samlet i tabell 4.8.

Tabell 4. 8: Nøkkeldata for beregning til kjøleeffekt og konstanten k under kjøleeksperimentene.

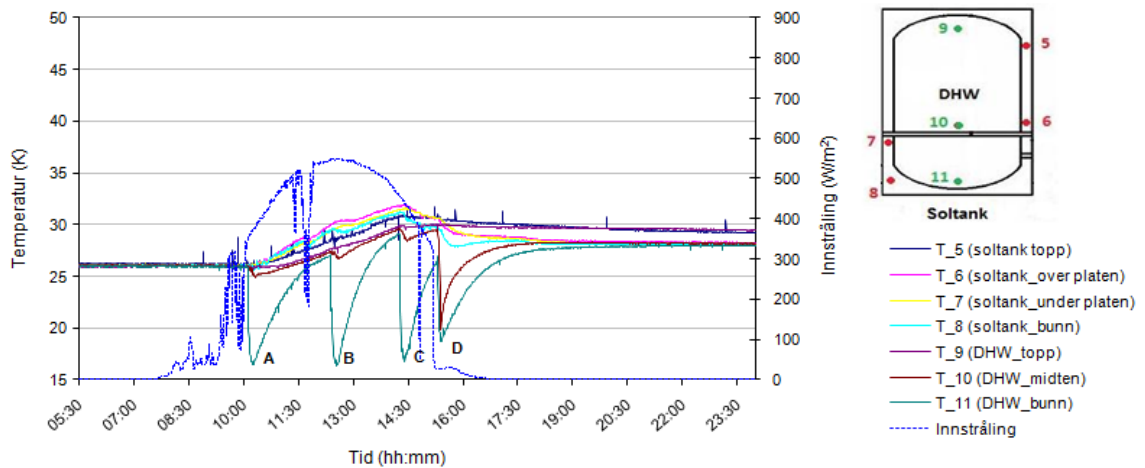
Dato	$T_{inn}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ute}(^{\circ}\text{C})$	P(W)	k
11-12.09.2007	27,9	9,3	458,5	24,6
12-13.09.2007	28,2	7,7	509,5	24,8
13-14.09.2007	27,8	9,6	407,6	22,4
14-15.09.2007	24,6	9,2	458,5	29,7

4.5 Vinterdrift

I løpet av fyringssesongen, som typisk varer fra oktober til mars i Norge, skal anlegget være innstilt på vintermodus. Det vil si at solfangeren skal levere varme til varmtvann og romvarme. Når det er sol skal normalt både solpumpen og utvekslingspumpen være i drift. Utvekslingspumpen skal riktignok styres av en termostat slik at den kun er i drift når det er høyere temperatur i bunnen av soltanken enn i romvarmetanken.

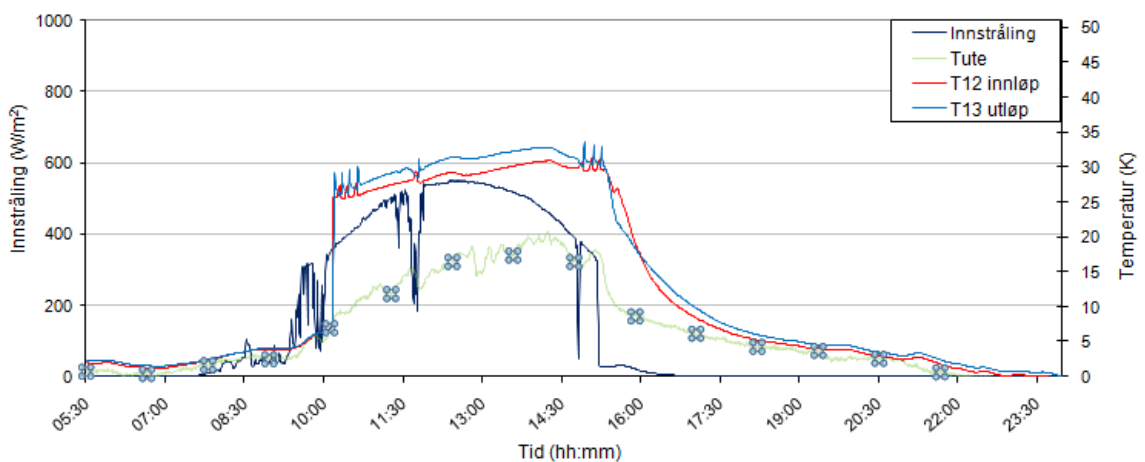
4.5.1 Vinterdrift med varmtvanns forbruk

Siste halvdel av høsten 2007 hadde få dager med sol, slik at det sjeldent var mulig å få testet anlegget med vinterdrift. Ut i fra de måleresultatene som er tilgjengelige fra høsten 2007 ble det valgt å presentere kun én dag med tapping. I likhet med sommermodus, var solpumpen kun i drift når det var sol. Temperaturutviklingen til soltanken og innertanken, samt innstråling, utetemperatur, innløp og utløpstemperatur fra solfangerne for 30. oktober er presentert i figur 4.15 og 4.16.



Figur 4.15: Temperaturen til soltanken med innertanken og irradians 30.oktober 2007. Vinterdrift.

Temperaturutviklingen under oppvarmingen av innertanken (DHW) har samme trekk som under oppvarmingen ved sommerdrift: bunnen av tanken var det kaldeste området, toppen var det varmeste området, og midten var noe kaldere enn toppen. Soltanken under oppvarmingsfasen med vinterdrift har derimot et annet mønster enn under oppvarmingsfasen sommerdriften. Den varmeste temperaturen i oppvarmingsfasen var over skillevegen, mens toppen av soltanken var det kaldeste med rundt 2 K lavere temperatur enn over skillevegen. Bunnen i soltanken hadde ganske lik temperatur som vannet under skillevegen, og var ca. 1 K kaldere enn den varmeste delen av tanken. I løpet av oppvarmingsfasen fra klokken 10:00 til 16:00 ble soltanken varmet opp med rundt 4 K. Gjennomsnittlig temperaturforskjell i oppvarmingsfasen mellom innløps- og utløpstemperatur fra solfangere var på 1,7 K.



Figur 4.16: Solinnstråling, T_{ute} , innløp og utløpstemperatur fra solfangere for 30. oktober 2007. Vinterdrift.

Det ble foretatt fire tappinger med 50 liter vann fra innertanken denne dagen. Oversikt over disse tappingene er samlet i tabell 4.9.

- Første uttak av varmtvann, kl. 10:07

Første tapping ble gjennomført kl 10:07 (merket A på figur 4.15) mens innstrålingen var rundt 350 W/m^2 . Temperaturen på toppen av soltanken (T_5), over (T_6) og under skillevegen (T_7) forble uforandret under tappingen. I bunnen av soltanken (T_8) falt temperaturen med 0,1 K. På toppen av innertanken (T_9) falt temperaturen med 0,15 K og i midten (T_{10}) av innertanken sank temperaturen med 0,6 K. Største temperaturendringen var i bunnen av innertanken (T_{11}), der falt temperaturen med ca. 10 K. Det tok nøyaktig 1 time og 31 minutter før temperaturen nederst i innertanken (T_{11}) ble varmet opp til 26 K, slik det var før tappingen.

- Andre uttak av varmtvann, kl. 12:23

Andre tapping av 50 liter vann ble satt i gang klokken 12:23 (merket B på figur 4.15). Ved starten av tappingen var innstrålingen helt opp til 550 W/m^2 . I løpet av tappingen ble innertanken påvirket noe mer enn ved første tapping, temperaturen på toppen (T_9) fortsatte å stige med 0,2 K, mens temperaturen på midten (T_{10}) og nederst i bunnen (T_{11}) falt med henholdsvis 0,7 K og 10 K. Temperaturen i soltanken fortsatte å stige, med 0,2 K på toppen (T_5), med 0,3 K på midten av soltanken over skillevegen (T_6) og med 0,4 K under skillevegen (T_7). Temperaturen i bunnen (T_8) forble uforandret under selve tappingen. I figur 4.15 ser det imidlertid ut som temperaturen i bunnen av soltanken (T_8) sank under tapping, noe som kan forklares med at sensor T_8 var plassert 6 cm under bunnen av innertanken, hvor det kalde vannet ble fylt, slik at nedre delen av soltanken ble kjølt ned. Det tok 1 time før vannet i bunnen av DHW tanken (T_{11}) ble varmet opp til 27 K som var samme temperatur som før tappingen.

- Tredje uttak av varmtvann, kl. 14:16

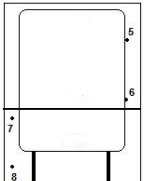
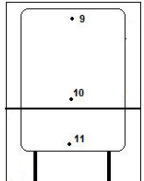
Tredje tapping av 50 liter ble gjort klokken 14:16 (merket C på figur 4.15). Innstrålingen var da på vei ned og systemet ble mer forstyrret enn tidligere etter at tappingen var ferdig. I bunnen (T_{11}) av DHW tanken hadde temperaturen falt med 12 K, i midten (T_{10}) med rundt 1 K, mens på toppen (T_9) forble temperaturen uforandret. I soltanken kunne man registrere at temperaturen forble uforandret på toppen (T_5) og over skilleplaten (T_6), under skillevegen (T_7) steg temperaturen med 0,1 K mens den i

bunnen (T_8) falt med 0,3 K. Selv om innstrålingen begynte å synke, ble bunnen av DHW tanken (T_{11}) varmet opp med 10 K i løpet av 54 minutter før fjerde tapping ble satt i gang.

- Fjerde uttak av varmtvann, kl. 15:19

Fjerde og siste tapping ble gjennomført klokken 15:19 (merket D på figur 4.15) med innstrålingen på rundt 16 W/m^2 . Temperaturutviklingen i begge tankene ble dermed annerledes. Temperaturen på toppen av både soltanken (T_5) og innertanken (T_9) ble tilnærmet upåvirket av tappingen. I resten av DHW tanken (T_{10} og T_{11}) sank temperaturen med ca. 8 K. Soltanken hadde en ubetydelig reduksjon i temperaturen med ca. 1 K i bunnen (T_8) og enda mindre i resten av tanken med 0,4 K på toppen (T_5), 0,7 K over skillevegen (T_6) og med 0,2 K under skillevegen (T_7) under selve tappingen. På grafen ser det imidlertid ut til at temperaturen sank mer enn det som er oppgitt. Grunnen til dette er at temperaturen fortsatte å synke etter at selve tappingen var ferdig.

Tabell 4. 9: Oversikt over forsøk med 4 tappinger 30. oktober 2007 med tidspunkt, innstråling og utetemperatur ved starttidspunkt for hver tapping samt kort beskrivelse av temperaturendringer i begge tankene.

VINTERDRIFT						
Dato	Antall vann uttakk	Tidspunkt for vann uttakk	I (W/m^2)	T_{ute} ($^{\circ}\text{C}$)	Soltanken (Sensor T_5, T_6, T_7 og T_8) 	Innertanken (Sensor T_9, T_{10} og T_{11}) 
30.10.07	1	Start: 10:07 (50 liter) Stopp: 10:15	348,3 371,73	9,2 12,5	$\Delta T_{(T_5)} = 0K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0K$ $\Delta T_{(T_8)} = -0,1K$	$\Delta T_{(T_9)} = -0,1K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,6K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -9,5K$
	2	Start: 12:23 (50 liter) Stopp: 12:36	550,3 548,5	18,8 20,7	$\Delta T_{(T_5)} = 0,2K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0,3K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,4K$ $\Delta T_{(T_8)} = 0K$	$\Delta T_{(T_9)} = 0,2K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -0,7K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -10,4K$
	3	Start: 14:16 (50 liter) Stopp: 14:25	457,8 437,9	27,5 22,6	$\Delta T_{(T_5)} = 0K$ $\Delta T_{(T_6)} = 0K$ $\Delta T_{(T_7)} = 0,1K$ $\Delta T_{(T_8)} = -0,3K$	$\Delta T_{(T_9)} = 0K$ $\Delta T_{(T_{10})} = -7,9K$ $\Delta T_{(T_{11})} = -8,1K$

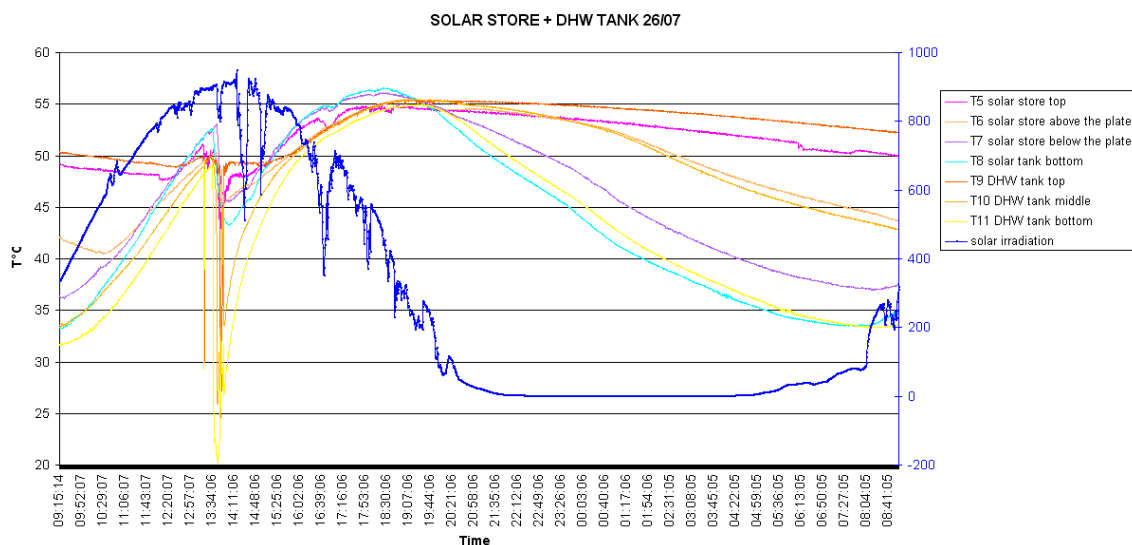
4.6 Sjiktningsegenskaper i soltanken

En av de viktigste parametrene til anlegget som skulle undersøkes under kjølingsekperimentene var soltankens sjiktningsegenskaper. Det å ha varme og kalde sjikt i samme lukkede system er essensielt for at anlegget skal kunne brukes til kjøling. Figurene 4.1, 4.2 og 4.6 viser tydelig tegn på sjiktning i sol- og innertanken. Anlegget hadde en god sjiktning i kjølefasen (fra klokken 19:00 til 07:00), hvor temperaturen på toppen av soltanken (T_5) og DHW tanken (T_9) holdt seg varm gjennom natten og var mellom 10-20 K varmere enn den nedre delen av tanken. Klokken 19, etter at utvekslingspumpen og luftviften var satt på, begynte temperaturen i den nedre delen av soltanken (T_6, T_7 og T_8) og innertanken (T_{10} og T_{11}) å synke raskt på grunn av blandingen med kaldt vann fra romvarmetanken. Temperaturutviklingen til både soltanken og DHW tanken under kjølefasen kan beskrives slik:

$T_9(\text{DHW_topp}) > T_5(\text{Soltank_topp}) \gg T_{10}(\text{DHW_midten}) > T_6(\text{Soltanken_over skilleplate}) > T_7(\text{Soltank_under skilleplaten}) > T_{11}(\text{DHW_bunn}) > T_8(\text{Soltank_bunn})$

I kjøleeksperimentene utført i denne oppgaven, ble utvekslingspumpe alltid skrudd PÅ klokken 19. Figuren 4.17 viser utviklingen i soltanken med utvekslingspumpen AV med kun solpumpe i drift. Sjiktningen er dårligere når utvekslingspumpe er AV.

Sammenlignet med sjiktningen fra figur 4.1, 4.2 og 4.6 hvor alle sensorene unntatt T_5 og T_9 viser samme temperatur, har midten av soltank og innertank høyere temperatur enn i bunnen.



Figur 4. 17: Temperaturutviklingen i Soltanken og Innertanken (DHW) samt innstrålingen i løpet av 26.juli 2006. Solpumpen PÅ, Utvekslingspumpe AV. Kilde: D. Lelandais and D. Pain (2006).

På dagtid under oppvarmingsfasen fikk soltanken og innertanken god vertikal varmeoverføring, slik at:

$$T_8(\text{Soltank_bunn}) > T_5(\text{Soltank_topp}) > T_7(\text{Soltank_under skilleplaten}) > \\ T_6(\text{Soltanken_over skilleplate}) > T_9(\text{DHW_topp}) > T_{10}(\text{DHW_midten}) > \\ T_{11}(\text{DHW_bunn})$$

4.7 Effektiviteten til anlegget

Effektiviteten til anlegget ble beregnet ut fra måledataene for dager med tapping, når man fylte kaldt vann i systemets innertank, og uten tapping for tidsrommet fra klokken 10:00 til 18:00. For hver dag som er analysert i dette kapittelet, ble det beregnet flere parametre: gjennomsnittseffekt P (kW) generert per time, utbytte per time (W/m^2), akkumulert energi Q (kWh) eller utbytte til anlegget dvs. den energien som systemet faktisk klarer å hente inn i forhold til den energien som var tilført systemet i den angitte tidsperioden fra klokken 10:00 til 18:00. Videre ble det også effektiviteten til anlegget beregnet ut fra måleresultatene. Anlegget var innstilt slik at volumstrøm gjennom soltanken og solfangerne var $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$, dette tilsvarer $0,166$ liter pr. sekund eller 2 liter pr. minutt pr. kvadratmeter av solfangeranlegget. Resultatene er gjengitt i tabell 4.10. Effektiviteten er forholdet mellom nyttig energi og tilført energi for en bestemt periode, og den kan defineres slik:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt}{A_s \int_{t_1}^{t_2} I dt} \quad (4.4)$$

hvor, \dot{Q} er den nyttige energien tilført varmelageret, I er innstråling og A_s er arealet til solfangeranlegget.

Tabell 4. 10: Nøkkeldata for beregningen av effektiviteten til anlegget i ulike dagene med sommerdrift og uten varmtvannsforbruk fra kl. 10:00-18:00. Gjennomsnittsverdier for innstråling, utetemperatur, temperatur i varmelageret ved start og slutt av måleserien, akkumulert energi, gjennomsnittlig effekt og utbytte per time og effektiviteten til anlegget.

SOMMERDRIFT UTEN TAPPING AV VARMTVANN									
Dato	\bar{I} (W/m ²)	\bar{T}_{ute} (°C)	Temperatur i varmelager (K)			Akkumulert energi (kWh)	\bar{P} (W) Per time	Utbytte (W/m ²)	η (%)
			Volum (liter)	$\bar{T}_{v,start}$	$\bar{T}_{v,stop}$				
06.09.2007	352,5	27,7	V ₁ (63,5)	28,5	43,0	5,4	675	107,1	30,3
			V ₂ (86,3)	27,7	40,7				
			V ₃ (88,3)	28,5	41,3				
			V ₄ (106,2)	34,3	42,5				
			V ₅ (121,7)	33,0	40,7				
07.09.2007	324,7	28,6	V ₁ (63,5)	28,1	40,0	4,6	575	91,3	28,3
			V ₂ (86,3)	27,1	40,4				
			V ₃ (88,3)	27,9	40,3				
			V ₄ (106,2)	35,9	41,3				
			V ₅ (121,7)	34,2	40,5				
08.09.2007	450,6	23,1	V ₁ (63,5)	28,7	47,5	7,6	950	150,8	33,5
			V ₂ (86,3)	27,7	45,8				
			V ₃ (88,3)	28,1	46,3				
			V ₄ (106,2)	35,7	47,1				
			V ₅ (121,7)	34,3	45,3				
09.09.2007	417,3	21,7	V ₁ (63,5)	28,3	43,4	5,7	713	113,2	27,1
			V ₂ (86,3)	27,7	44,6				
			V ₃ (88,3)	28,0	44,1				
			V ₄ (106,2)	39,3	45,7				
			V ₅ (121,7)	37,4	43,5				
15.09.2007	634,0	18,9	V ₁ (63,5)	23,1	49,4	11,1	1384,6	220,2	34,7
			V ₂ (86,3)	23,4	48,5				
			V ₃ (88,3)	23,5	49,1				
			V ₄ (106,2)	31,2	49,4				
			V ₅ (121,7)	31,2	49,5				
17.09.2007	491,0	18,1	V ₁ (63,5)	20,2	40,3	8,8	1097,3	174,2	35,5
			V ₂ (86,3)	20,4	39,8				
			V ₃ (88,3)	20,6	40,7				
			V ₄ (106,2)	25,1	40,9				
			V ₅ (121,7)	28,2	40,6				

Det ble antatt at uttak av tappevanns i løpet av dagen skulle føre til en økning i solenergibidrag til anlegget. Etter at effektiviteten ut fra måledataene ble beregnet for dager uten tapping av vannet, ble de samme beregningene gjort for dager med tapping for deretter å kunne sammenligne effektiviteten.

Tabell 4.11: Nøkkeldata for beregningen av effektiviteten til anlegget i ulike dagene med sommerdrift og varmtvannforbruk fra kl. 10:00-18:00 og en dag med vinterdrift fra kl 10:00-15:00. Gjennomsnittsverdier for innstråling, utetemperatur, temperatur i varmelageret ved start og slutt av måleserien, akkumulert energi, gjennomsnittlig effekt og utbytte per time og effektiviteten til anlegget.

SOMMERDRIFT MED TAPPING AV VARMTVANN												
Dato	\bar{I} (W/m ²)	\bar{T}_{ute} (°C)	T i varmelager (K)			\dot{Q} (kWh)	Vanntapping		Total \dot{Q} (kWh)	\bar{P} (W) per time	P/A (W/m ²)	η (%)
			Volum (liter)	$\bar{T}_{v,start}$	$\bar{T}_{v,stop}$		antall tappinger	Q_{tappet} (kWh)				
11.09	595,7	24,9	V ₁ (63,5)	24,7	44,8	9,0	1(20 l)	0,4	12,9	1622,5	275,5	46,3
			V ₂ (86,3)	24,6	43,1		2(20 l)	0,6				
			V ₃ (88,3)	25,0	44,2		3(50 l)	1,6				
			V ₄ (106,2)	31,2	44,7		4(50 l)	1,7				
			V ₅ (121,7)	29,4	44,2							
			Sum:					4,3				
12.09	546,5	21,9	V ₁ (63,5)	26,4	42,6	7	1(50 l)	1,4	9,9	1243,2	197,3	36,1
			V ₂ (86,3)	25,9	41,4		2(50 l)	1,9				
			V ₃ (88,3)	26,4	44,2							
			V ₄ (106,2)	34,8	46,9							
			V ₅ (121,7)	39,4	46,6							
			Sum:					3,3				
13.09	595,8	31,4	V ₁ (63,5)	23,4	42,5	8,3	1(50 l)	1,7	11,5	1437,5	228,2	38,3
			V ₂ (86,3)	23,3	38,3		2(50 l)	1,9				
			V ₃ (88,3)	25,0	44,8							
			V ₄ (106,2)	32,5	46,8							
			V ₅ (121,7)	35,2	46,1							
			Sum:					3,6				
14.09	480,9	31,5	V ₁ (63,5)	25,4	37,7	3,1	1(50 l)	1,4	5,2	650,0	103,2	21,5
			V ₂ (86,3)	25,7	36,6		2(50 l)	1,1				
			V ₃ (88,3)	25,9	37,8							
			V ₄ (106,2)	36,5	38,3							
			V ₅ (121,7)	39,7	37,6							
			Sum:					2,5				
VINTERDRIFT MED TAPPING AV VARMTVANN												
30.10	465,7	23,0	V ₁ (63,5)	26,0	29,9	1,9	1(50 l)	0,7	4,2	829,5	131,6	28,3
			V ₂ (86,3)	25,9	26,7		2(50 l)	0,8				
			V ₃ (88,3)	26,0	30,9		3(50 l)	1,0				
			V ₄ (106,2)	26,2	30,7							
			V ₅ (121,7)	25,9	29,9							
			Sum:					2,5				

4.8 Varmetap i soltanken

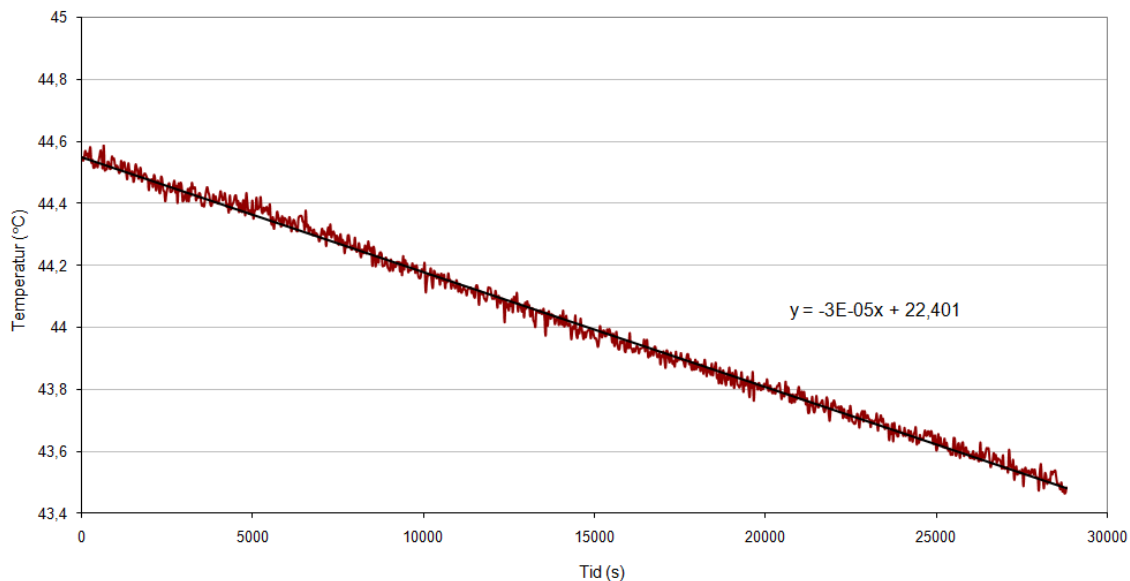
Noe av den energimengden som ble tilført tanken gikk til varmetap, enten via varmeledningen eller via fordamping/kondens gjennom rørene i systemet. I denne oppgaven er det kun varmetap gjennom varmeledning som er beregnet.

For å beregne varmetapet i soltanken ble det valgt en dag når det ikke var sirkulasjon i soltanken, dvs. at både solpumpen og utvekslingspumpen var skrudd av. I tillegg var temperaturen inne på Sollaben tilnærmet konstant i perioden for beregningen av varmetapet. Varmetapet ble beregnet slik:

$$Q_{\text{varmetapp}} = \rho \cdot V \cdot C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.5)$$

hvor ρ er den temperaturavhengige tettheten til vannet, V er saltankens volum og C er varmekapasiteten.

Dagen som oppfylte disse betingelsene var 27. august 2007. Det ble beregnet varmetap i perioden fra klokken 19:00 til klokken 01:00. Ved å plote gjennomsnittstemperaturen i saltanken som en funksjon av tid (figur 4.17), kunne man bestemme varmetapet ut fra ΔT mellom omgivelsene og saltanken per tidsenhet ($\frac{dT}{dt}$) ved hjelp av lineær regresjon.



Figur 4.17: Synkende ΔT mellom omgivelsene og saltanken den 27. august 2007, fra kl. 19:00 - 03:00.

Stigningstallet til kurven som representerer ΔT mellom omgivelsene og saltanken per tidsenhet er $\frac{dT}{dt} = -3 \cdot 10^{-5} \frac{K}{s}$. Ved hjelp av denne verdien ble varmetapet beregnet med likning 4.4 og man fikk $Q_{\text{varmetap}} = -58,5 \text{ W}$.

Størrelsen på varmetapet ga ikke særlig utslag på energien som var tilgjengelig i saltanken, noe som tyder på at tanken var godt isolert.

5. Diskusjon og konklusjon

5.1 Sjiktning i Soltanken og DHW tanken

Resultatene viser at man klarer å etablere kalde sjikt nederst i soltanken og varme sjikt på toppen av soltanken. Det samme gjelder for DHW tanken. Under kjølingen på natten er det ønskelig at vannet i toppen av tanken holder så høy temperatur som mulig, slik at det finnes varmt vann til bruk i husholdningen. Samtidig er det viktig å unngå at varmen fra den nederste delen av innertanken blir overført til det aktive volumet under skilleplaten i soltanken. Dette fordi det kalde volumet under skilleplaten er essensielt for å oppnå en vellykket kjøling av romvarmetanken. Mer om kjøling omhandles i avsnitt 5.2.

3D tegningen av tankene i figur 3.4 viser at innertanken kun har to rørtilslutninger: en for innløp av kaldt vann som går helt til bunnen og en for uttak av varmt vann fra toppen, slik at det er ingen andre strømmer i DHW tanken. Sjiktningen i DHW tanken er avhengig av at det er sjiktning i soltanken. Ved å sammenligne temperaturutviklingen i soltanken mens utvekslingspumpen som var PÅ (figur 4.1 og figur 4.2) og AV (figur 4.17), ser man at sjiktningen var dårligere når utvekslingspumpen var PÅ enn når utvekslingspumpen var AV. Med utvekslingspumpen PÅ viser alle sensorene unntatt de fra toppvolumet (T_5 og T_9) ca. samme temperatur. Med utvekslingspumpen AV ble temperaturen på midten av tankene (T_6 og T_{10}) ca. 10 °C varmere enn i bunnen. Sirkulasjonene gjennom romvarmetanken reduserer følgelig sjiktningsegenskapene i soltanken. En mulig årsak er at det følger luft med vannet i utløpet fra gulvvarmetanken. Dersom luften trekkes med vannet til under skilleplaten, vil luften strømme opp gjennom soltanken og reduserer sjiktningen i denne.

Det var mye vertikale strømmer og bevegelser i soltanken. Vannet fra det aktive volumet under skilleplaten sirkulerte gjennom solfangerne på dagen. Under kjøling på natten ble vannet fra romvarmetanken først pumpet til dette aktive volumet og så videre til solfangerne på taket.

Resultatene av målingene for dager både med og uten varmtvannsforbruk (figur 4.1, 4.2 og 4.6) viser at man klarer å etablere en god vertikal sjiktning i kjølefasen i begge tankene, med kaldt vann med høy tetthet i nedre del av tankene mens i toppen er det varmt vann med lavere tetthet. Målingene viser også at det er større temperaturforskjell

mellom bunnen og toppen i DHW tanken enn det er i soltanken i løpet av en natt med kjøling. Under eksperimentene gjort i denne oppgaven, ble det observert at DHW tanken normalt hadde en temperaturskjell rundt 14,5-16,5 K mellom bunnen og toppen. Temperaturskjellen for soltanken var 10-13,5 K under kjøleeksperimentene på natten. Dersom vannet i begge tankene ble varmet opp til ca. 50 °C etter en dag med mye sol (som f. eks 15.09.2007 fra figur 4.2) kunne temperaturskjellen på natten være opp til 20 K i DHW tanken og 16,6 K i soltanken. Siden det kun var installert tre sensorer i innertanken, har man for lite informasjon for å ha en nøyaktig temperaturofordeling i tanken. I masterprosjektet til Soteland (2009) ble det gjort en omfattende studie om sjiktning i soltanken og innertanken når skilleplaten var plassert 10 cm lavere enn i denne studien. Soteland utførte eksperimentene ved forskjellige start temperaturer i soltanken før kjølingen, slik at han fikk større sjiktning desto høyere temperaturen var i tanken før kjølingen. I et av eksperimentene hans hadde soltanken en temperatur på 50 °C før kjølingen, og i løpet av kjølefasen fikk innertanken en sjiktning på rundt 25 °C. Dette er større sjiktning enn i tilsvarende eksperiment hos meg den 15.9.2007 hvor temperaturen i soltanken var ca. 50 °C før kjølingen, mens sjiktningen i løpet av natten var rundt 20 °C. Posisjonen til skilleplaten kan være grunnen til mer sjiktning i soltanken hos Soteland. Samtidig er det vanskelig å sammenligne direkte med mine resultater, på grunn av at Soteland har gjort målinger med simulert oppvarming og kjøling i motsetning til mine eksperimenter, som kun ble gjort ved hjelp av solenergi og utetemperatur.

Selv om sjiktningmekanismene i anlegget var gode kunne man sannsynligvis få en bedre sjiktning i soltanken ved å gjøre en del justeringer. Skilleplaten i soltanken var ikke helt tilpasset DHW tanken, slik at den ikke gikk helt inntil DHW tanken over hele omkretsen. Noe vann kunne derfor strømme gjennom den. Det var også laget fire hull med diameter på 10 mm hver i skilleveggen for plassering av sensorer gjennom disse. Noe vann vil derfor ha beveget seg gjennom disse.

5.2 Temperatur påvirkning i tanken etter tapping.

Etter flere eksperimenter med vannuttak ble det studert i hvilken grad tapping påvirker temperaturen i soltanken og DHW tanken. Dersom innstrålingen falt under 200 W/m², ble solpumpen automatisk skrudd av ved hjelp av solstyreren. Tapping av vann ble foretatt både med og uten sirkulasjon i solfangeranlegget. Kaldt vann ble fylt ned i

bunnen av innertanken og den ble raskt varmet opp. Det var interessant å beregne hvor denne varmen ble hentet fra. For vannuttak uten sirkulasjon ble det meste av varmen hentet fra bunnen av soltanken (rundt 60 %), rundt 30 % kom fra midten av tanken, (volum 3 fra figur 3.17) og resten av varmen, ca. 11 % ble tilført ved miksing i innertanken. Med sirkulasjon i anlegget ble bildet noe annerledes. Solpumpen var PÅ og det ble tilført energi hele tiden. Den største andelen av varmen (mellom 50-65 %) ble hentet fra bunnen til soltanken, mellom 12-17 % ved miksing i innertanken og de resterende 5-15 % ble tilført fra midten av soltanken. I DHW tanken var den generelle trenden at temperaturutviklingen etter vannuttak var likt for tilfeller med og uten sirkulasjon i solfangeranlegget.

5.3 Kjøling

Hensikten med kjøleeksperimentene om natten var å forsøke å kjøle vannet i romvarmetanken uten å fjerne dekkplater fra solfangerne, og uten å installere et kjøleapparat. Kjølingen skulle foregå ved at vann fra toppen av romvarmetanken skulle pumpes til det aktive volumet under skilleplaten i soltanken ved hjelp av utvekslingspumpen. Deretter sirkulerte vannet gjennom solfangerne ved hjelp av solpumpen. Fra solfangerne kom vannet tilbake til det aktive volumet i soltanken og ble ført videre til den nedre delen av romvarmetanken. Kanalviften skulle bidra til kjøling og den ble sammen med utvekslingspumpen skrudd PÅ fra klokken 19 og ble slått av klokken 07 hver natt under eksperimentene. I resultatkapittelet er det presentert temperaturutvikling i romvarmetanken fra to måleserier for dager uten at det ble foretatt tapping av vann på dagtid. Disse er fremstilt i figur 4.12 og 4.13. Fra figur 4.12 ser man imidlertid at temperaturen til vannet i romvarmetanken ikke var kaldere enn på kvelden før kjølingen. Det ble også registrert (figur 4.12, merket A, B, C og D) en uønsket temperaturøkning på 3-4 K i romvarmetanken rett etter at utvekslingspumpen ble skrudd PÅ. Dette skyldes at styringen av sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken ikke var optimal. Sirkulasjonen startet før temperaturen i bunnen av soltanken hadde nådd ned til romvarmetankens temperatur. Under bearbeiding av resultatene ser man at utvekslingspumpen ikke burde vært skrudd PÅ klokken 19, men heller på et seinere tidspunkt. Installasjonen av termostat i soltanken som styrte utvekslingspumpen kunne ha løst dette problemet. Da hadde volumet under skillevegen hatt mulighet til å bli først kjølt ned før den skulle sirkulere gjennom romvarmetanken. Temperaturforskjellen mellom volumet under skilleplaten i soltanken og

romvarmetanken før kjølestart var $\Delta T = 14,5\text{K}$ den 6.september, $\Delta T = 12,5\text{K}$ den 7.september og $\Delta T = 18,1\text{K}$ den 8.september. Det tok ca. to og en halv time før temperaturen i romvarmetanken begynte å synke. Kjølekapasiteten til anlegget ble beregnet for alle dagene med kjøleforsøk og kunne uttrykkes ved hjelp av en beregnet gjennomsnitts kjøle konstanten for anlegget $k = 24,6$:

$$P = 24,6 \cdot (T_{inn} - T_{ute}) \quad (5.4)$$

Kjøleeffekten til anlegget varierte mellom 305,7 og 509,5 W, avhengig av lufttemperaturen og temperaturen til vannet i det aktive volumet i soltanken. Kjølekapasiteten var ikke særlig imponerende og det ble det konkludert med at mangelen på skikkelig ventilasjon begrenser muligheten for å kjøle solfangere med dekkplate på. Slik som anlegget var dimensjonert og sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken var stilt, lyktes man ikke med å bruke dette anlegget til kjøling.

5.4 Effektiviteten til anlegget med og uten forbruk av varmt vann

Før målingene ble utført ble det antatt at effektiviteten til anlegget ville øke på grunn av uttak av varmt vann fra innertanken. Dette fordi effektiviteten til solfangerne minker med økende vanntemperatur. Anlegget skulle gi mer utbytte når det ble tappet vann fordi varmelagerets temperatur ble redusert. Resultater fra dager med vannuttak fra tabell 4.3, 4.4, 4.5 og 4.6 bekrefter at det er bunnen i soltanken (T_8) som får mest temperaturreduksjon under et vannuttak. Det ble registrert at temperaturen i bunnen av soltanken sank mer jo senere på dagen man tappet vann. Dette kan skyldes at innstrålingen var minkende på ettermiddagen og at det ikke ble tilført like mye energi som tidligere på dagen. Oppvarmingsfasen for anlegget i løpet av målingene som er tatt i september varer fra ca. klokken 10 til ca. 18:00. Resultatene til effektiviteten av anlegget for dager uten forbruk av varmt vann er samlet i tabell 4.10, og resultatene for dager med forbruk av varmt vann er presentert i tabell 4.11. Det kommer tydelig frem at anlegget er mer effektivt for dager med tapping. På den mest effektive dagen (11.september) ble det foretatt 4 tappinger (til sammen 140 liter) med gjennomsnittsinstråling 596 W/m^2 og en utetemperatur på ca. $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Effektiviteten for denne dagen var på hele 46,3 %. Til sammenligning med den 15. september (ingen

varmtvannsforbruk) hadde anlegget en effektivitet på ca. 35 % på tross av høyere innstråling enn den 11. september. Innstrålingen den 15. september var i snitt på 634 W/m^2 og utetemperatur rundt $19 \text{ }^\circ\text{C}$. For noen andre dager med vannuttak er forskjellen ikke så stor mellom effektiviteten til dager uten vannuttak. Det er mange faktorer som er viktig for å kunne sammenligne effektivitet til anlegget: utetemperatur, temperaturen i varmelageret ved start av oppvarmingsfasen og innstråling. Selv om det var få dager med samme grunnlag for sammenligning, kunne det allikevel fastslås at effektiviteten til anlegget er høyere dersom man tapper vann. Dette gjør at slike anlegg er spesielt gunstige for boliger. Salvesen og Rindal (2008) tar utgangspunkt i et forbruk per person på ca. 50 liter per døgn. Vannforbruket i denne studien kan således hevdes å være tilnærmet forbruket til en vanlig husstand.

5.5 Forslag til forbedring til anlegget under kjøling

Etter å ha bearbeidet resultatene fra kjøleeksperimentene ser man at anlegget hadde trengt en del justeringer for å forbedre kjølefunksjonen. Skilleplaten i soltanken bør flyttes noe ned, fordi det var et for stort aktivt volum i bunnen (ca. 123,2 liter).

Styringen av sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken var ikke optimal. Sirkulasjonen begynte før temperaturen til det aktive volumet i soltanken hadde nådd temperaturen til romvarmetanken. Sirkulasjonen burde startet senere på kvelden. Et tiltak som kunne løse dette problemet ville vært å installere en termostat som kunne startet utvekslingspumpen når vannet i det aktive volumet ble kjølt.

Det kunne vært interessant å teste anlegget uten dekkplatene fra solfangerne på natten for at kjøleeffekten kunne økes ved også å utnytte utstrålingen fra absorptorplatene i tillegg til konveksjonskjølingen.

Utvidelsen av solfangeranlegget ville kunne gi en økning i kjølebidraget.

5.5 Konklusjon

Anlegget har visst seg å fungere bra under oppvarmingsfasen. Avhengig av innstrålingen kunne anlegget akkumulere over 11 kWh i løpet av dagen uten at det ble

tappet vann. For dager med vannuttak har anlegget klart å akkumulere opp til 13 kWh. Effektiviteten til solvarmeanlegget økte når det ble tappet varmtvann.

Under tappingen ble det fylt kaldt vann i bunnen av innertanken, som raskt ble varmet opp igjen. Temperaturutviklingen i tanken etter tapping ble studert med og uten sirkulasjon i solfangeranlegget.

Under kjøleeksperimentene hadde både soltanken og innertanken en god sjiktning med rundt 15 til 20 K i temperaturforskjell mellom bunnen og toppen til tankene.

Skilleplaten stabiliserte sjiktningmekanismene i anlegget.

Dessverre lyktes det ikke å anvende anlegget til kjøling av romvarmetanken.

Sirkulasjonen mellom soltanken og romvarmetanken ble satt i gang før temperaturen til det aktive volumet i soltanken hadde nådd temperaturen til romvarmetanken.

Kjøleeffekten ble beregnet til å variere mellom 305 W og 509 W og kunne uttrykkes ved hjelp av en beregnet gjennomsnittskonstant for anlegget $k = 24,6$. Selv om man ikke lyktes med å bruke anlegget til kjøling, har man lært mye om hvordan kjølefunksjonen kan forbedres.

Referanser

- B. Belanger and J. Bredin. 2007. *A low energy system for combined heating and cooling*. Technical report, Universitetet i Oslo/ Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes/Aventa, (upublisert).
- J. A. Duffie og W.A. Beckman (2006). *Solar engineering of thermal processes*. 3. utgave. John Wiley & Sons Inc., New York.
- R. Foster, M. Ghassemi og A. Cota (2010). *Solar energy. Renewable energy and the environment*. Taylor & Francis Group, Florida
- J. Gjessing (2006). *Ventilering som metode for å redusere stagnasjonstemperatur i solfangere*. Masteroppgave, Universitetet i Oslo.
- T. Henriksen og I. Kanestrøm (2001). *Klima drivhuseffekt energi*. Gyldendal Norsk Forlag AS, Oslo.
- Ø. Holter, F. Ingebretsen og H. Parr (1998). *Fysikk og energiresurser*. 2 utgave. Universitetsforlaget AS, Oslo.
- ICPP (2007). *IPCC Fourth assessment report: climate change 2007*. [Internett, 25. januar 2009], http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
- LabFacility (2010). *Precision platinum temperature sensors brochure*. Labfacility Ltd., [Internett, 4. desember 2009], <http://www.temperature-sensors1.com/pdf/sensors-PRTs.pdf>
- B. Larsen (2006). *Industriell måleteknikk for automatikerfaget*. 3. utgave. Vett & Viten A/S, Nesbru.
- D. Lelandais and D. Pain (2006). *Study of a heating and cooling system thanks to solar energy*. Technical report, Universitetet i Oslo/ Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes/Solarnor. (upublisert).
- M. Meir, J. Rekstad, M. Peter, L. Henden, og B. Sandnes. 2002. *Determination of the performance of solar systems with the calorimetric method*. *Solar energy*, 73(3):195-207.
- M. Meir, Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo [muntlig meddelelse, 2009].
- National Instruments (1998) *NI 4351/4350 user manual*. National Instruments Corporation, Austin, Texas.
- National Instruments Corporation. *Labview*, [Internett, 25. august 2007], <http://ni.com/labview/>.

National Instruments Corporation. [Internett, 25. august 2007],
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/2929>

D.R. Mills (2006). *Solar thermal electricity*, i: *Solar Energy*. State of the art. Ises position papers, J. Gordon (ed.). James & James, London.

J. Rekstad, Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo [muntlig meddelelse, 2008].

J. Rekstad og M. Meir (2009). *Kompendium for "FYS4540: Energifysikk, solenergi"*. Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo.

Revol J.P. 2005. *Global energy needs in the 21 century: a physicists view*. Presentasjon for Norsk Fysisk Selskap. Ulvik.

F. Salvesen, L. B. Rindal (2008). *Solenergi for varmeformål – snart lønnsomt?* Oppdragsrapport. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

Ø. Soteland (2009). *Combined heat transfer in a system for solar heating and radiative cooling*. Masteroppgave, Universitetet i Oslo.

T. Tappel (2007). *Temperaturkontroll av solfangere ved tvungen konveksjon*. Masteroppgave, Universitetet for Miljø og Biovitenskap.

Grundfos, 1997. *UPE series 2000. Monterings- og driftsinstruksjon*.

W. Weiss (2003). *Solar heating systems for houses – a design handbook for solar combisystems*. James & James Science Publishers Ltd, London, UK.

A. C. A. Østberg. *Tehnnical data for the ck100c circular duct fan*. [Internett, 1. desember 2009], <http://www.ostberg.com>.

Tillegg A

Nomenklatur

A	Tverrsnittsareal [m^2]
A_s	arealet til solfangerne [m^2]
A	Areal til flaten [m^2]
C	Varmekapasiteten til vannet [$\frac{Wh}{lK}$]
c	lyshastighet [= $3,00 \cdot 10^8 m/s$]
$E_{\lambda b}$	Energitettheten per bølgelegde [$W/m^2 \mu m$]
h	Varmeovergangskoeffisienten [$W/m^2 K$]
I	innstråling [W/m^2]
\dot{Q}	Varmestrømmen [W]
\dot{q}	Varmestrømtettheten [W/m^2]
k_b	Boltzmann-konstant [$1,38 \cdot 10^{-23} J/K$]
h_p	Plancks konstant ($h_p = 6,63 \cdot 10^{-34} Js$)
m_{Vst}	Massen til vannet soltanken [kg]
m_{Vrmt}	Massen til vannet i romvarmetanken [kg]
$m_{tapping}$	Massen til tappet vann [kg]
n	Dagnummer, 1januar er dag 1.
φ	Breddegrad [$^\circ$]
δ	Deklinasjon. Solens vinkel i forhold til ekvatorialplanet [$^\circ$]
ω	Timevinkel [$^\circ$]
ν	Planets helningsvinkel [$^\circ$]

γ	Planets azimutvinkel [°]
θ	Innfallsvinkelen mellom den direkte solinnstrålingen og en plan flate [°]
λ_k	Varmeledningsevnen [W/mK]
σ	Stefan – Boltzmanns konstant $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$
\bar{P}	midlere innstrålt effekt per areal [W/m ²]
P_G	Termisk effekt [Wh]
S	Solarkonstanten [W/m ²]
λ	bølgelengden [m]
T	er overflatetemperatur [°C]
T_1	temperaturen til det varme område [°C]
T_2	temperaturen til det kalde område [°C]
$\frac{dm}{dt}$	Strømningshastighet [m/s]
T_{inn}	Innløpstemperatur til vannet fra bunnen av soltanken til solfanger [°C]
T_{ut}	utløpstemperatur fra solfangere [°C]
T_{ute}	Utetemperatur [°C]
Q_{KM}	Energien som er tilført anlegget [kWh]
η	Effektiviteten
k	Konstanten for utrykk til kjølekapasitet
K_1	Varmetapskoeffisienter [W/m ² K]
K_2	Varmetapskoeffisienter [W/m ² K]
η_0	Transmittans-absorptans produkt ($\tau\alpha$) til dekkplaten
T_w	Gjennomsnittstemperaturen til absorbatoren [°C]
T_o	Gjennomsnittstemperaturen til omgivelsene [°C]
Q_{tap}	En felles betegnelse for alle bidrag for varmetapet i varmelageret [Wh]
Q_{tappet}	Forbrukt energi under forsøk med tappevannsuttak [Wh]
ΔQ_{kal}	Energiendringen i lageret [Wh]

ΔQ_{inn}	Energien som var tilført solfangerne i løpet av et bestemt tidsintervall Δt [Wh]
Q_{kal}	Energien tilført til varmelageret [kWh]
Q_{total}	Totalenergiutbyttet [kWh]
Q_{SB}	Energi tilført fra bunnen av soltank [kWh]
Q_{SM}	Energi tilført fra midten av soltank [kWh]
Q_{DHWM}	Energi tilført ved miksing av innertank [kWh]
ΔT_{rvt}	Temperaturendringen i romvarmetanken [K]
T_{st}	Temperaturendringen i soltanken [K]
T_{DHW_topp}	Temperaturen på toppen av innertanken [°C]
T_{CW}	Temperaturen til vannet fra springen [°C]
U	varmegjennomgangskoeffisient $U = \frac{\lambda_k}{x}$ [W^2/m^2K^2]

Tillegg B

Kalibrering av temperatursensorer

Formålet med kalibrering av termoelementene var å korrigere systematiske avvik i loggeutstyret, slik at det ble avlest riktige temperaturer av datalogger. Kalibreringen av termoelementene ble gjennomført 16.07.2007.

Utstyr

- Referansetermometer (kvikksølv)

Produktnavn: TG Labotherm-N

Skala: 0-100 °C

Usikkerhet: $\pm 1^\circ\text{C}$

- Dewar beholder (3 liter)
- 7 termoelementer til kalibrering:

Produktnavn: Labfacility, type T

Måleområde: -25°C til 100°C

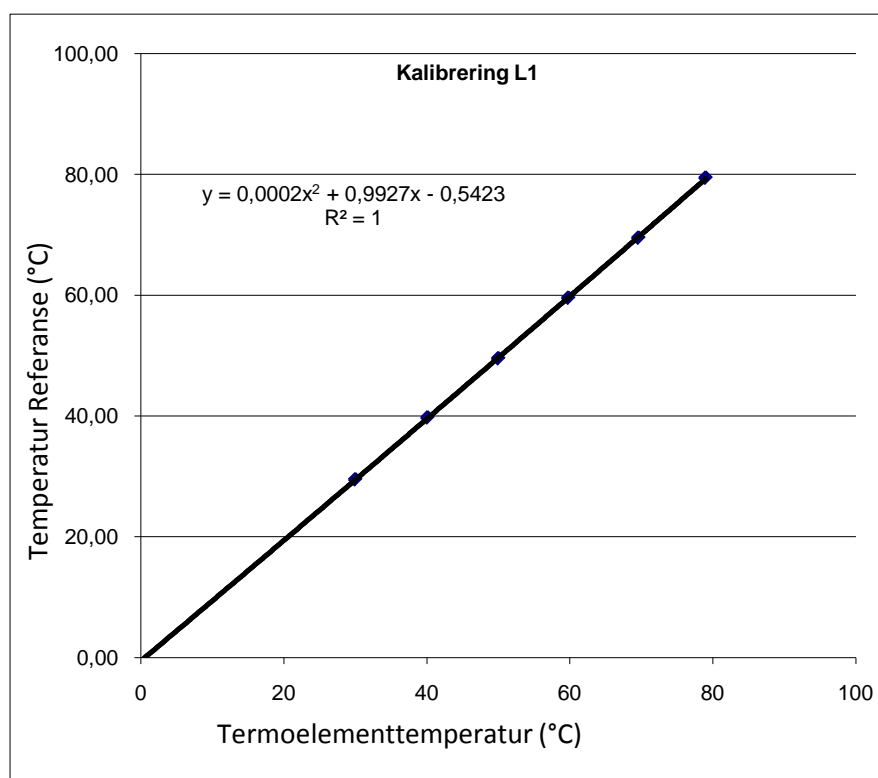
Fremgangsmåte

Dewar beholderen ble først fylt med varmt vann og termoelementene som ble buntet sammen med kvikksølvtermometeren ble plassert ned i beholderen. Beholderen ble lukket med isoporlokk. Kaldt vann ble etterfylt i beholderen for å synke temperaturen. Ved bestemte temperaturer ble de avlest ved hjelp av kvikksølvtermometer, mens signalene fra termoelementene ble logget av et LabVIEW-program. For å komme helt ned til 0°C i beholderen ble blanding av vann og is benyttet. Temperaturene målt med de 7 termoelementene ble plottet mot de avlste temperaturene.

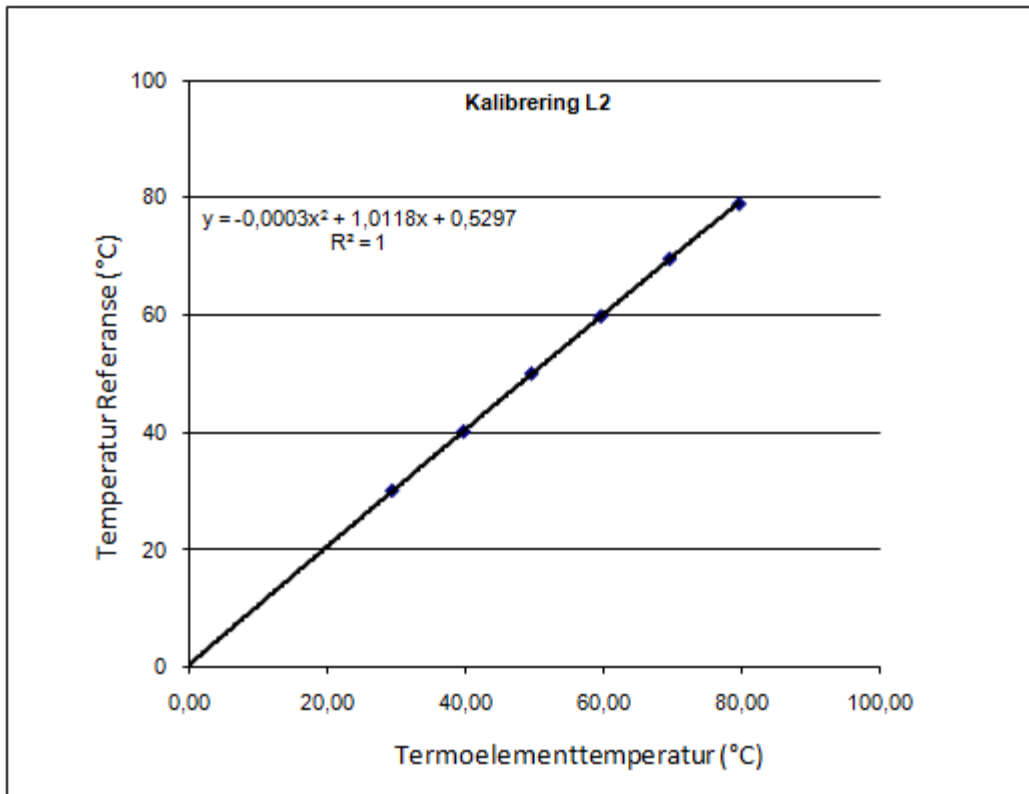
Tabell B.1: Avleste og målte temperaturer til termoelementene.

Termometer (°C)	L1(°C)	L2(°C)	L3(°C)	L4(°C)	L5(°C)	L6(°C)	L7(°C)
0	-0,58	-0,56	-0,52	-0,63	-0,56	-0,56	-0,02
30	29,52	29,40	29,49	29,38	29,47	29,46	29,99
40,1	39,76	39,70	39,71	39,73	39,75	39,65	40,15
50	49,54	49,51	49,56	49,51	49,52	49,45	49,98
59,8	59,56	59,51	59,54	59,46	59,55	59,33	59,91
69,6	69,49	69,43	69,53	69,47	69,44	69,28	69,94
79	79,42	79,47	79,50	79,45	79,49	79,21	79,88

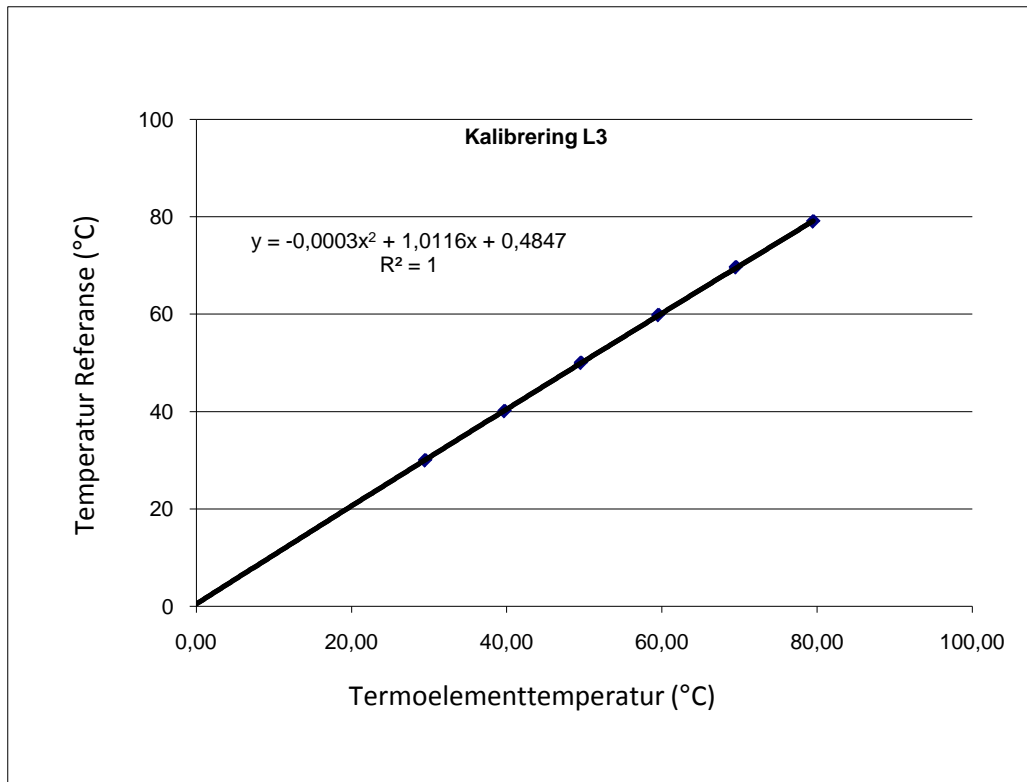
Resultatene ble framstilt grafisk for hvert av termoelementene, avlest temperatur ble plottet som funksjon av de målte temperaturer. Ved hjelp av lineær regressjon ble punktene tilpasset andregradskurve.



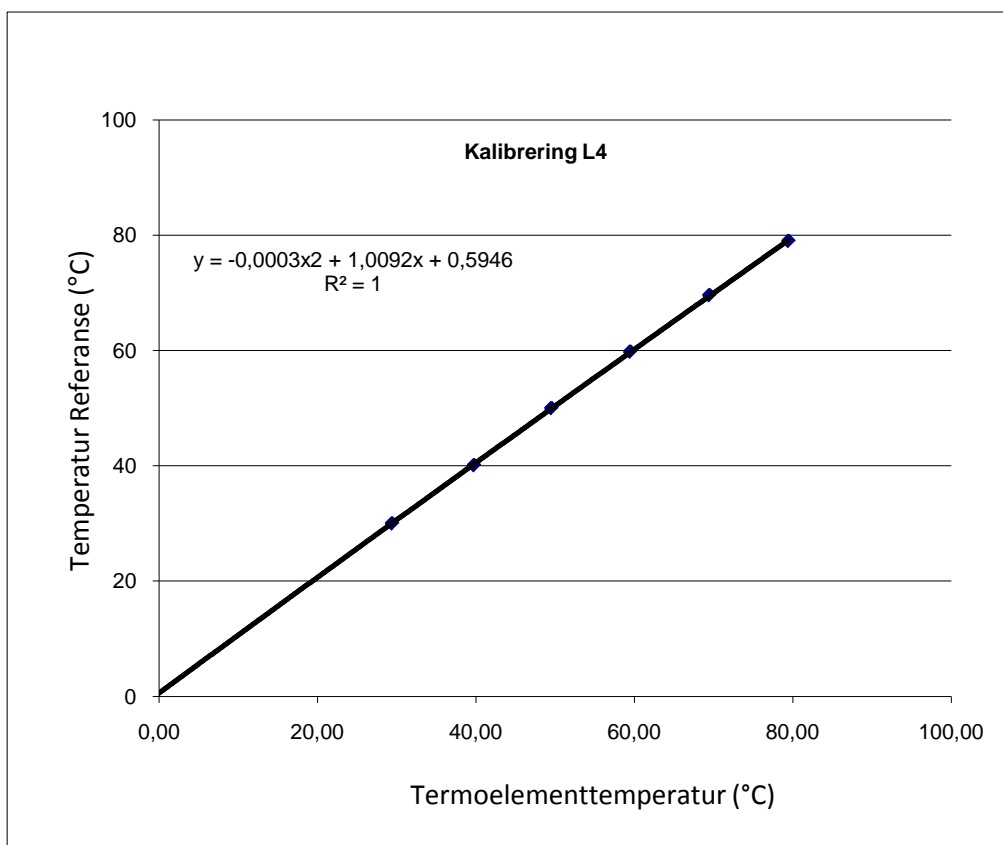
Figur B. 1: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 2).



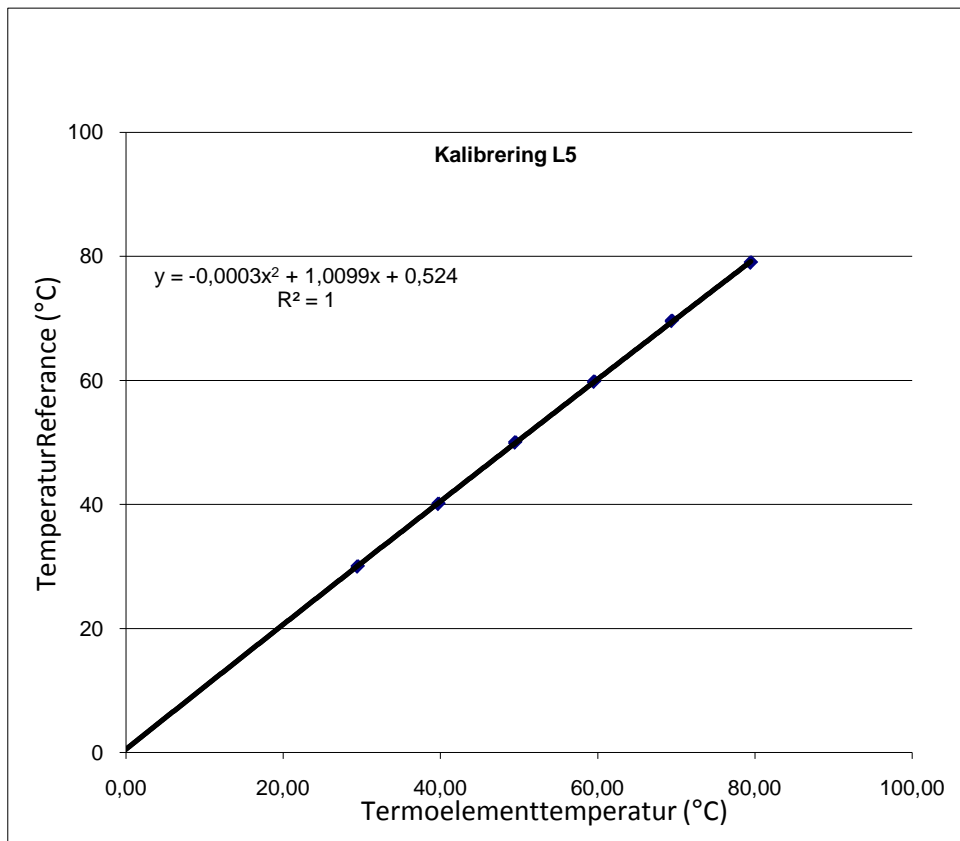
Figur B. 2: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 3).



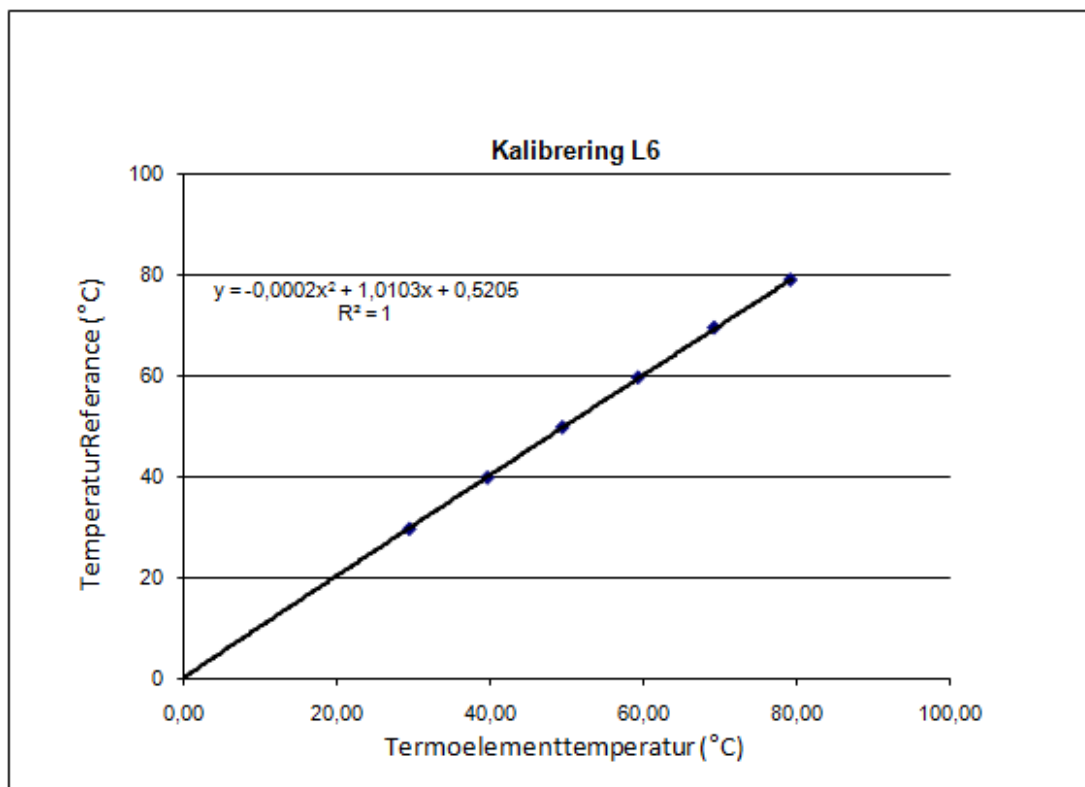
Figur B. 3: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 4).



Figur B. 4: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 5).



Figur B. 5: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 6).

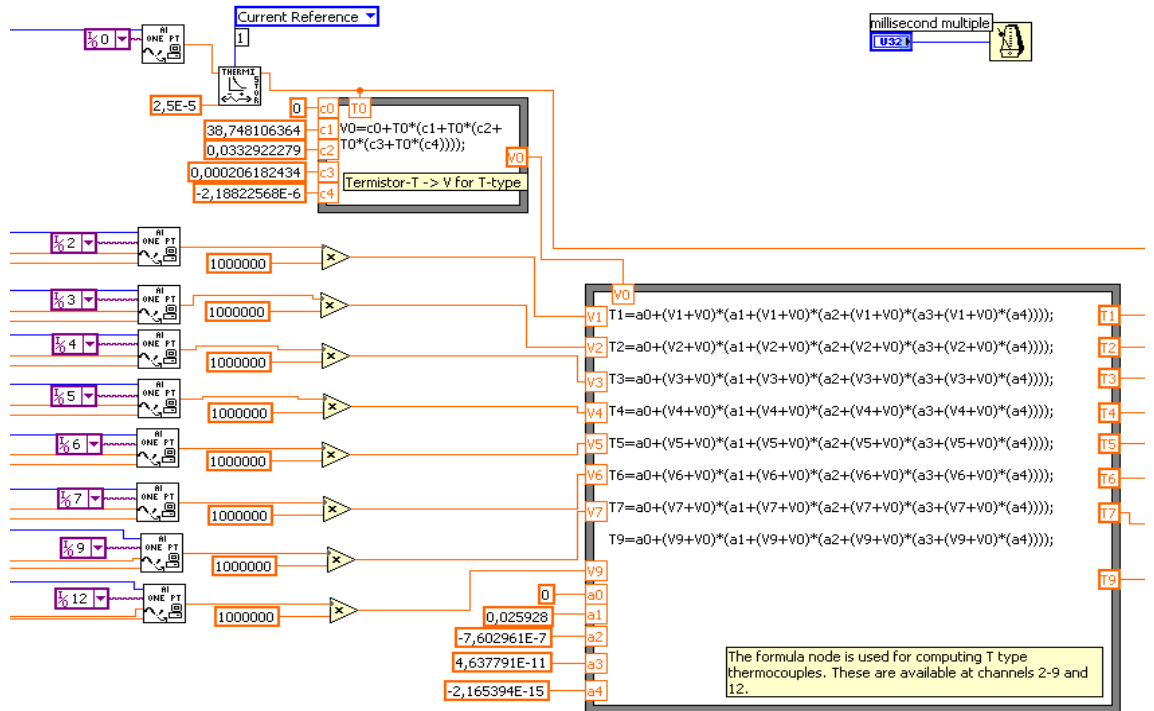


Figur B. 6: Lineær sammenheng mellom temperatur avlest med kvikksølvtermometer og målt termoelement temperatur av datalogger (Kanal 7)

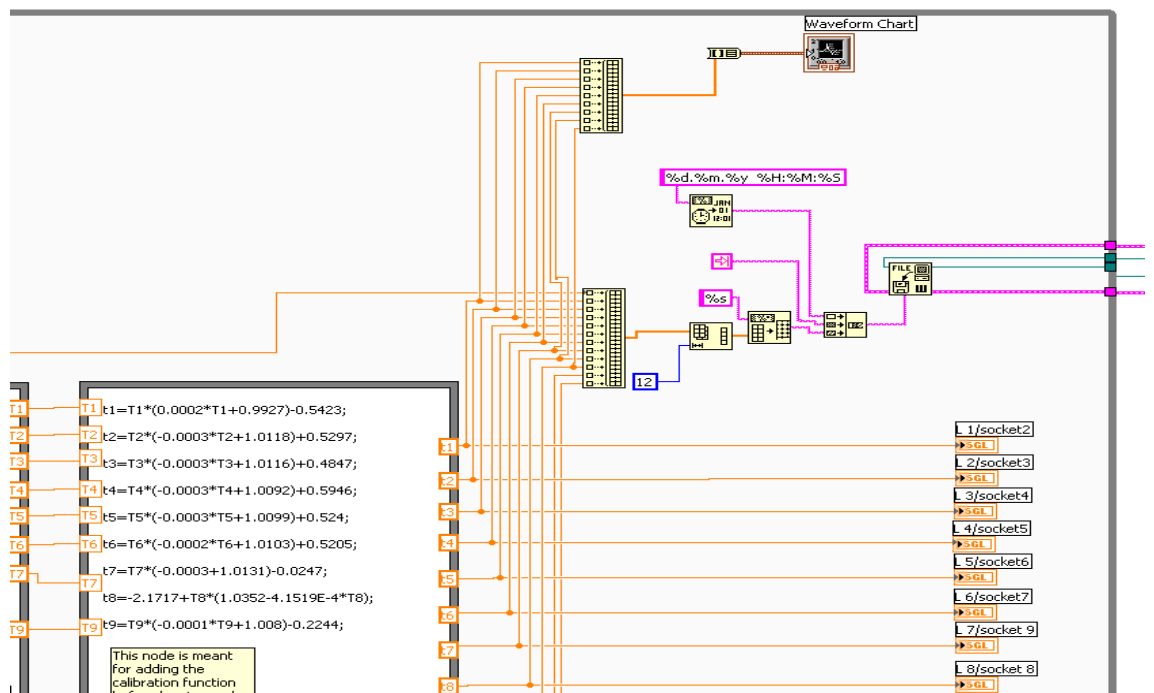
Etter at termoelementene ble kalibrert ble de montert i anlegget og kalibreringsfunksjoner ble lagt inn i loggeprogrammet slik at korrigerte temperaturer ble lagret.

Tillegg C

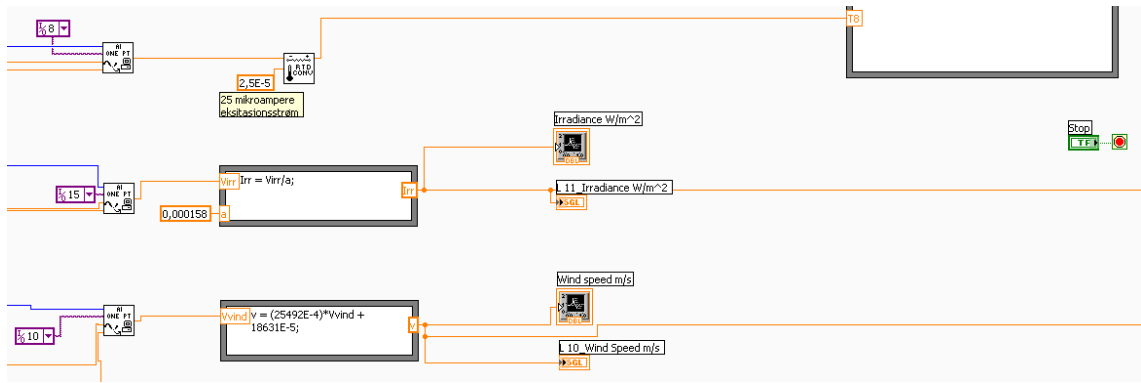
Koden til LabView



First part of the first program: Conversion mV to T for all thermocouples



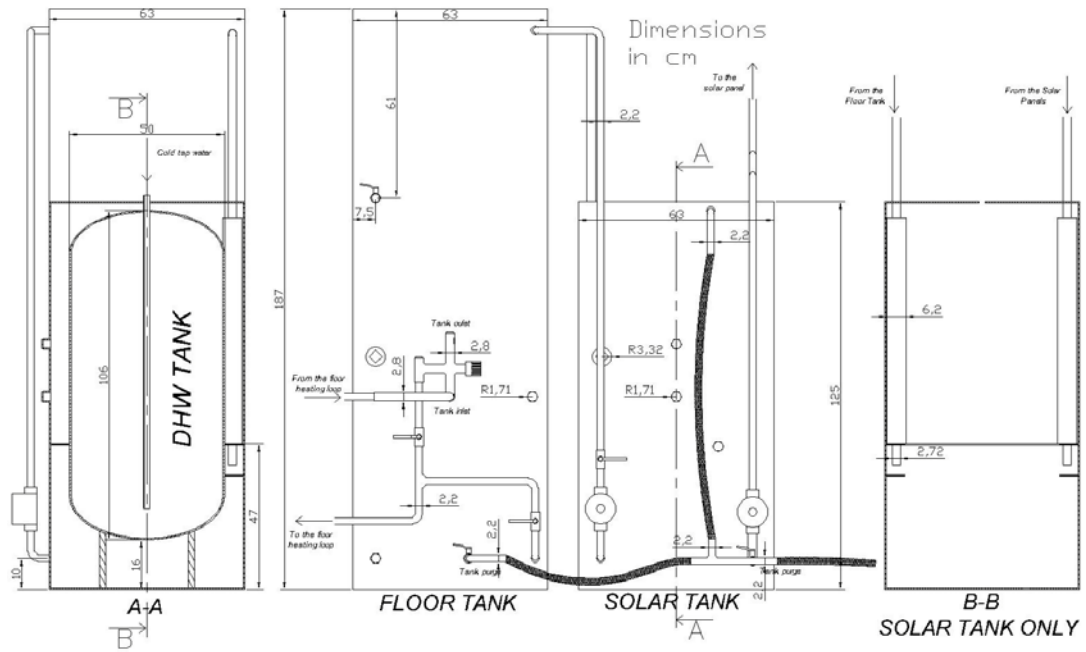
Second part of the first program: Calibration formula, savings data and plots



Last part of the program: Wind speed and Irradiance

Tillegg D

Teknisk tegning til tankene i anlegget



Tillegg E

Teknisk tegning til tankene med posisjon til sensorer

