

UNIVERSITETET I OSLO
Fysisk institutt

**Ulike metoder for å
bestemme
energiutbyttet i et
solvarmeanlegg**

Hovedoppgave

Gunn Spikkeland

Vår 2005



Forord

Siden sol-laben utenfor Fysisk institutt på Blindern ble bygget høsten 1997 har det vært mye aktivitet der, og flere hovedfagsoppgaver og doktorgradsavhandlinger har blitt gjennomført. Det har vært gøy å få komme inn i et slikt etablert fagmiljø, og å få jobbe med et framtidsretta og lovende energisystem. Den grundige gjennomgangen av teorien bak utnyttelsen av solenergi som tidligere er publisert fra gruppa, har også gjort at jeg har kunnet vektlegge andre deler i min oppgave. Ikke minst har det gitt meg større frihet til å fokusere på hvor utfordringene ligger per i dag, og på hvordan fleksibilitet og synlige resultater er avgjørende for videre utbredelse.

Først må jeg få rette en stor takk til min hovedveileder John Rekstad. Takk for at du foreslo en oppgave som denne, og for at du har vist så stor interesse for det arbeidet jeg har gjort og de resultatene som etterhvert har kommet. Innspillene og kommentarene dine har vært nødvendige for at jeg skulle komme i mål. Medveilederen min, Michaela Meir, har også vært til helt uvurderlig hjelp underveis. Hun har alltid en løsning på et praktisk problem og er villig til å hjelpe. Jeg vil takke gutta på lesesalen og alle dere andre i solenergigruppa. Samtalene og diskusjonene har ofte vært frustrerende, men ikke mindre inspirerende. Det har vært bra å dele erfaringer underveis i arbeidet med oppgava. En spesiell takk til Tine som jeg blant annet har fått gode Matlab-tips fra, og Jeanette som hjalp meg nå i slutfasen.

Til slutt fortjener Birgit og resten av familien min hjemme en stor takk. Det har vært godt med den støtten dere har vist meg underveis. Lars Ole, du har trodd på meg hele tida, og det har betydd kjempe mye. Du har hjulpet meg både til å komme videre med arbeidet -og med å koble av. Tusen takk!

Oslo, 6.mai 2005

Gunn Spikkeland

Sammendrag

I denne oppgava er det utvikla en enkel metode for å bestemme energiutbyttet i et solvarmeanlegg. I slike anlegg omformes strålingsenergien fra sola ved hjelp av en solfanger til varmeenergi i et transportmedium som for eksempel vann. Vannet lagres i et varmelager og kan vidare brukes til oppvarming og til varmtvann. Solenergi er en tilnærma uendelig ressurs, og med et slikt anlegg kan opp imot 40% av varmebehovet i en norsk bolig dekket.

Eksperimentene er utført på et solvarmeanlegg med 4,5 m² solfangere og varmelager på 469 liter. Solinnstråling og ulike temperaturer knyttet til anlegget er logget over tid sommeren 2004, og studert systematisk for å forstå varmetviklingen i anlegget. Dette arbeidet har ledet fram til den nye metoden for bestemmelse av energiutbyttet.

Å måle energiutbyttet fra et slikt anlegg er vanskeligere enn å måle for eksempel strømforbruk. Varme beveger seg i alle retninger og på ulike måter, og det vil være varmetap i alle ledd. En vanlig metode er å måle hvor mye vann som passerer gjennom solfangeren og hvor mye temperaturen i vannet har økt på vei gjennom kollektoren. En annen metode er å se på temperaturøkningen i varmelageret. Begge disse metodene er studert og diskutert i denne oppgava. Vi har sett at selv om varmetap i rør og varmelager er tatt hensyn til er verdiene gitt ved den første metoden ca 10% høyere enn verdiene gitt ved den andre metoden.

Et aktivt solvarmeanlegg er avhengig av et styringssystem som sørger for drift kun når det er energi å hente. Det er vanlig at denne tar utgangspunkt i temperaturdifferansen mellom solfangeren og varmelageret. Er differansen mer enn 5-6 °C er det varme å hente. Dette styringsprinsippet bygger på at denne temperaturdifferansen sier noe om energiutbyttet. Denne sammenhengen er sett nærmere på, og konklusjonen er at differansen mellom temperaturen på solfangeren og temperaturen i varmelageret er et svært godt mål for energiutbyttet. Koeffisienter er bestemt slik at temperaturdifferansen kan brukes i en ny metode for bestemmelse av energiutbyttet. Fordelen med en slik metode framfor de tidligere nevnte metodene, er at styre-enheten vil kunne vise energiutbyttet til enhver tid. Dermed er det

også mulig å følge med på hvor mye annen energi som er spart.

Abstract

In this thesis a method of calculating the energy supplied by a solar heating system, without the use of complicated measurement equipment, has been developed. In such systems the solar energy is transformed by a solar collector to heat energy in a heat carrier like for example water. The water is kept in a heat storage, and can be used as domestic hot water and for room heating. The solar energy is an approximately unlimited resource. With a solar heating system one can cover up to 40% of the heat demand of a typical residence in Norway.

The experiments have been carried out on a solar heating system with 4,5 m² of collectors and a heat storage of 469 liters. The solar irradiation and different temperatures concerning the system have been logged during the summer of 2004. The values have been investigated systematically to understand the heat transfer in the system. This work has led to the new method of calculating the energy gain.

Measuring the energy yield of such a system is more complicated than measuring for example electric current. The heat is diffused in different ways, and there are heat losses in every part of the system. A common method is to measure the water flow through the collector and the temperature increase of the water on the way through the collector. Another method is to measure the temperature increase in the heat storage. Both these methods have been investigated and discussed. We have found that the first method gives values 10% higher than the latter, even though the heat losses in pipes and storage have been accounted for.

An active solar heating system needs a controller to make sure the system is turned off when the energy yield is negative or equals zero. Commonly, the input to this controller is the temperature difference between the collector and the heat storage. There is an energy gain when the difference exceeds 5-6 °C. This principle is based on the assumption that the temperature difference tells us about the energy yield. This assumption has been further investigated, and the conclusion is that the difference in temperature between the collector

and the storage is proportional to the energy yield. Two coefficients are found so that the temperature difference can be used in a new method of calculating the energy gain. The advantage of this new method, compared to the before mentioned methods, is that the control unit in this instance can tell the energy gain at any time. Therefore, it is possible to know how much energy that has been saved.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Motivasjon	1
1.2	Problemstilling	2
1.3	Inndeling av oppgava	2
2	Bakgrunn om verdens energisituasjon	5
2.1	Energikvalitet	5
2.2	Energiressurser	6
2.3	Energiforbruk	7
2.3.1	Utviklingen i Skandinavia	8
2.4	Behov for alternativer	9
2.5	Solenergi	10
2.6	Politisk vilje	11
3	Varmetransport	13
3.1	Stråling	13
3.2	Varmeledning	15
3.3	Konveksjon	15
3.3.1	Overgang mellom fast stoff og væske	15
4	Teori om flatplatekollektorer	17
4.1	Komponentene i flatplatekollektoren	17
4.1.1	Dekkplata	17
4.1.2	Absorbatorplata	18
4.1.3	Isolasjon	19
4.2	Solvarmeanlegg	19
4.2.1	Styringsmetoder	20

4.2.2	Strømningshastigheten	20
4.2.3	Drainback-anlegg	21
4.3	Flatplatekollektorens effektivitet	21
4.4	Utbytte fra solfangeren	22
4.4.1	Varmestrømmetoden	23
4.4.2	Den kalorimetriske metoden	24
4.4.3	Sammenligning av metodene	24
4.5	Varmetransport i absorptorplata	25
5	Måleoppsett	27
5.1	Testanlegget	28
5.1.1	Solfangerne	28
5.1.2	Tanken og røra	28
5.1.3	Pumpa	31
5.1.4	Styre-enheten	31
5.2	Sensorene	31
5.2.1	Temperatursensorene	31
5.2.2	Pyranometeret	34
5.2.3	Strømningshastighetsmåleren	35
5.2.4	Usikkerhet i målingene	35
5.3	Loggeutstyr	35
6	Gjennomføring av forsøkene	39
6.1	Kalibrering	39
6.1.1	Temperatursensorene	39
6.1.2	Pyranometeret	40
6.2	Kjøring	41
6.3	Bearbeiding av data	41
6.4	Varmetap i anlegget	43
6.4.1	Fra tanken	43
6.4.2	Fra rørene	44
6.5	Energiutbytte fra anlegget	45
7	Resultater	47
7.1	Målinger	47

7.2	Beregning av energiutbytte	49
7.3	Strømningshastigheten	54
7.4	Temperaturutvikling i anlegget	54
7.5	Alternativ metode for bestemmelse av energiutbyttet	60
8	Diskusjon	65
8.1	Vurdering av forskningsarbeidet	65
8.1.1	Oppsettet	65
8.1.2	Måledata	66
8.1.3	Metodene	67
8.2	Vurdering av resultatene	68
8.2.1	Strømningshastigheten	68
8.2.2	Temperaturutvikling i anlegget	69
8.2.3	Beregningsmetode	70
8.3	Konklusjon	71
	Referanseliste	75
	A Oversikter	77
	B Programmering	81
	C Kalibreringslogg	87
	D Supplerende grafer	91

Kapittel 1

Innledning

1.1 Motivasjon

Verdens energiforbruk er en av vårt samfunns største utfordringer. Forbruket øker så raskt at hver generasjon bruker mer energi enn alle tidligere generasjoner til sammen. Denne utfordringen kan bare løses ved mer bevisst forbruk, kombinert med nye energiløsninger.

Et initiativ for å møte denne utfordringen er et nytt EU-direktiv om energibruk i bygninger, som gjøres gjeldende fra 2006 også for Norge [1]. Et av hovedelementene er sertifisering av bygg med hensyn på energieffektivitet. Dette vil blant annet belønne de som satser på miljøvennlig energi. Et annet hovedelement er en felles beregningsmetode for energiforbruk i bygninger.

I et solvarmeanlegg benyttes solenergi til å varme opp vann til tappevann og/eller til bruk i romoppvarming. Denne energibruken har ingen negative miljøkonsekvenser, og er gunstig fordi den benytter energien lokalt og ikke nødvendigvis stiller krav til infrastruktur. Kravet om kvantifisering av energitilførselen har hindret solvarme i å bli implementert i energisertifiseringen nevnt ovenfor.

Vanligvis blir mengden termisk solenergi uttrykt i kvadratmeter kollektor areal. Dette har gjort det umulig å sammenligne omfanget av slik energi med annen fornybar energi eller tradisjonelle energibærere. Høsten 2004 ble International Energy Agency (IEA) og flere store solenergi-aktører enige i en omregningsfaktor for installert effekt, der 1 m^2 solfanger tilsvarer $0,7 \text{ kW}_{th}$ [2]. th -indeksen står for termisk. Dette er svært forenklet og tar ikke hensyn til lokale forhold eller hva slags solfanger det er snakk om. Den må derfor sees på som en teoretisk verdi. Det er fortsatt ikke kommet fram til en faktor som direkte kan fastsette energiutbyttet fra solvarmeanlegg.

1.2 Problemstilling

Typisk for varmeenergimålere er at de krever måleutstyr både for å måle endringen i temperatur på vannet inn/ut av et system (det være seg et solfangerpanel eller en radiator) og for å måle strømningshastigheten til vannet [3]. Dette medfører relativt store kostnader, og er ikke ofte brukt for solvarmeanlegg i privathusholdninger. Denne oppgava går ut på å utvikle og utprøve en enkel metode for å bestemme energiutbyttet fra et solvarmeanlegg. Det er tatt utgangspunkt i de ulike temperaturene som en differanseternostat allerede måler, og studert om disse kan brukes til å beregne varmeenergien, altså utbyttet fra solfangeren. En slik metode vil kunne anvendes direkte i private anlegg, uten behov for ekstra utstyr. Denne tilnærmingen til spørsmålet om energiutbytte er ikke kjent fra før, og bygger ikke på tidligere arbeider.

En metode som den forsøkt utvikla i denne oppgava, vil gi både produsent og brukere oversikt over energiutbyttet fra solvarmeanlegget. Det gir en trygghet om hvor effektivt anlegget er, og konkrete tall på hvor mye energi som er spart. Det vil være nødvendig for å kunne implementere solvarme i sertifiserings-ordninger som den nevnt ovenfor. I tillegg vil en slik metode være en stor fordel i markedsføring og videre utbredelse av solvarmeanlegg.

For å komme fram til den nye metoden har en dypere forståelse av strømningshastigheten, temperaturutvikling på solfangerne og de ulike faktorene som spiller inn på energiutbyttet vært viktig. I tillegg til generell teori om varmeoverføring og mer spesiell teori om solfangerer, bygger denne forståelsen på studier av de data som er samla inn.

I oppgava er også to kjente metoder for bestemmelse av energiutbytte til et solvarmeanlegg sammenligna teoretisk. Den ene metoden måler systemutbyttet, og den andre utbyttet over solfangeren. Faktorer som må inngå for å kunne sammenligne disse ble funnet eksperimentelt, og det faktiske energiutbyttet beregna med de ulike metodene. Disse verdiene er sammenligna, og avvikene diskutert. Det faktiske energiutbyttet er blitt definert som energien som er tilført varmelageret. Det vil si den energimengden som vanligvis dekkes i form av elektrisitet eller en annen tradisjonell energibærer.

1.3 Inndeling av oppgava

Som nevnt er dette en praktisk oppgave, der et solfangeranlegg har blitt studert. Forskningsgruppa vår har to reelle anlegg installert rett utenfor Fysikkbygningen, og det er på det ene av disse at eksperimentene er utført sommeren 2004. Jeg vil i oppgava presentere teorien bak slike anlegg, hvordan arbeidet er utført og resultatene jeg har kommet fram til.

Kapittel 2, *Bakgrunn om verdens energisituasjon*, gir den nødvendige bakgrunnskunnskapen for å forstå energisituasjonen i verden i dag. Hvilke utfordringer som ligger der og de grunnleggende fysiske prinsippene blir presentert. Generell teori om bruk av solenergi finnes i dette kapitlet.

I det neste kapitlet, *Varmetransport*, forklares de tre formene for varmetransport. Alle disse bidrar til varmeoverføringen i et solvarmeanlegg, og er derfor viktige for å forstå problemstillingen.

I kapittel 4, *Teori om flatplatekollektorer*, blir flatplatekollektoren presentert. Dette er den typen solfanger som er studert i oppgava. De viktige komponentene til kollektoren og systemet den er en del av forklares. Her diskuteres også ulike størrelser for å beskrive solfangerens ytelse.

Videre beskrives utstyret som er brukt i eksperimentene, i kapitlet *Måleoppsett*. Både solfangeranlegget, sensorene og loggeutstyret er beskrevet med tanke på at arbeidet skal kunne etterprøves.

Den videre fremgangsmåten er beskrevet i kapitlet *Gjennomføring av forsøkene*. Både forberedende arbeid, deleksperimenter, beregningsmetoder og gjennomføring av eksperimentene er forklart. En rekke hypoteser som er utgangspunktet for bearbeidingen av datamaterialet er satt opp her. Kalibreringsarbeidet presenteres, mens verdier og grafer fra dette arbeidet er samla i *Tillegg C*.

Dataene som er samla inn og bearbeiding av disse, er presentert i kapitlet *Resultater*. Disse er strukturert slik at studier av de ulike størrelsene og sammenhenger mellom disse bygger opp mot løsningen av hovedproblemstillingen. Datamaterialet er forholdsvis stort, så det har ikke vært mulig å presentere alt. Fire dager med høy innstråling og ulike initialbetingelser er valgt ut for å representere dataene. I noen tilfeller er andre dager også brukt for å understreke et poeng. Supplerende grafer for de andre dagene er samlet i *Tillegg D*.

I *Diskusjon*-kapitlet er både arbeidet som er gjort og resultatene som har kommet ut av det, vurdert. Mulige feilkilder er diskutert, og i noen tilfeller alternativ løsning presentert. Resultatene er i tillegg koblet opp mot kjent teori. Dette kapitlet avsluttes med en konklusjon.

Kapittel 2

Bakgrunn om verdens energisituasjon

Dette kapitlet er ment som et grunnlag for å forstå energisituasjonen i verden i dag, og de ulike faktorene som påvirker den. Energiressurser, forbruk og politiske grep presenteres for å forklare hvilke muligheter som ligger i naturen, og behovet for alternativ tenkning rundt energispørsmålet for en bærekraftig utvikling. En innføring om solenergi som ressurs er også gitt. På denne måten utdypes motivasjonen for å forske på solenergi, uavhengig av den konkrete problemstillingen i oppgava.

2.1 Energikvalitet

Et fundamentalt prinsipp innen fysikk er termodynamikkens 1.hovedsetning som slår fast at mengden energi alltid er bevart. Likevel snakker vi om energimangel og energikrise. Det er fordi energien kan gå over i andre former som er mindre tilgjengelige eller av lavere kvalitet. Størrelsen *entropi* er innført, og angir graden av uorden i et system [4]. Termodynamikkens 2.hovedsetning sier at entropien i et lukket system alltid er konstant eller øker når energi overføres. At entropien øker betyr at energien går over i en form der den har mindre evne til å utføre arbeid.

Vi skiller mellom høyverdig energi, eksergi, og lavverdig energi, anergi. Hovedforskjellen er at eksergi lett lar seg omforme til andre energiformer, mens anergi kun er termisk energi, det vil si varme, i likevekt med omgivelsene. Denne siste formen kan derfor ikke omformes, og heller ikke utføre noe arbeid. Kombinert med noe eksergi kan likevel anergien benyttes for eksempel i kontrollert oppvarming. utfordringen ligger i å gjøre eksergiandelen så liten som mulig [4].

Både sol, hydrokarboner og atomkjerner representerer i prinsippet ren eksergi. Når

denne energien frigjøres ved forbrenning eller annen omforming går den over til termisk energi i en gass eller væske. Eksergiandelen avhenger nå av temperaturdifferansen mellom mediet og omgivelsene. For en dampturbin med damptemperatur på 200 °C omformes maksimalt 37% av eksergien til elektrisitet, og i et kjernekraftverk mellom 30 og 45% [4]. I et forbrenningsanlegg vil deler av den resterende anergien kunne brukes i fjernvarmeanlegg eller til vannoppvarming.

2.2 Energiressurser

Grovt kan man dele inn energiressursene i to grupper. Det er de begrensede ressursene som fossile brensler og fissilt materiale, og kretsløpsressurser som sol, vind og vann i bevegelse. Fossile brensler er olje, kull og gass. Dette er hydrokarboner i ulike tilstander, som har blitt dannet ved fotosyntese gjennom flere milliarder år. De er altså en form for lagret solenergi. Kjerneenergi frigjøres enten ved fisjon av tunge atomkjerner eller fusjon av lette. Fusjonsenergi fra deuterium vil kunne løse alle energiproblemer, men man har enda ikke klart å frigjøre fusjonsenergi kontrollert. Fisjonskraftverk er derimot velutbygd og dekte i 1996 7% av verdens energiutnyttelse [4].

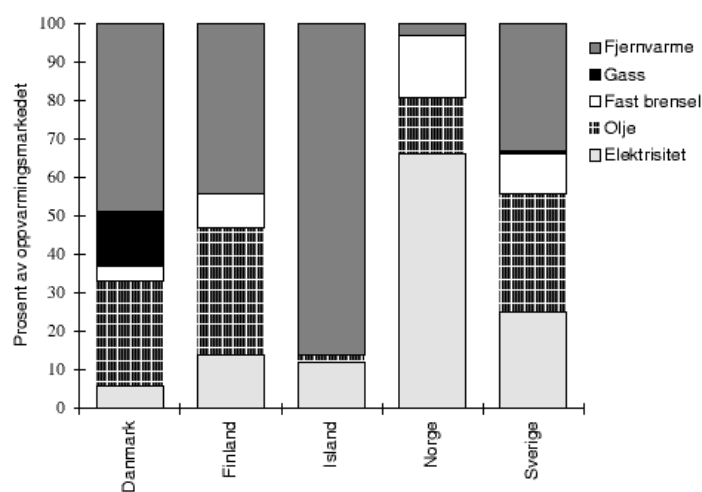
Kretsløpsressurser er de energikildene som betegnes som fornybare. I Norge er vannkraft den mest utbygde, mens vindkraft og direkte solenergi gir betydelige bidrag lenger sør i Europa. Energi fra bølger, tidevann, havstrømmer og i grenseområder mellom ferskvann og saltvann kan også tenkes å bidra mer i framtida. Biomasse er en fornybar energikilde som har blitt benyttet i flere tusen år, men som det er ny interesse for. Oversikt over potensialet til de viktigste fornybare ressursene utenom vannkraft, er for Skandinavia vist i tabell 2.1.

Land	Vindenergi	Bølgeenergi	Bioenergi	Solenergi
Norge	75	20	30	139 000
Sverige	42	Lite	180	208 500
Danmark	28	6	34	20 850

Tabell 2.1: Anslått potensiale for nye fornybare energikilder i de skandinaviske landene. Tallene er gitt i TWh/år. Tallene for vindenergi er ikke justert etter økonomiske eller miljømessige forhold, mens tallene for bioenergi er beregnet innenfor en miljømessig ramme. Tallene for solenergi er teoretiske, med 50% virkningsgrad [5].

2.3 Energiforbruk

Siden den industrielle revolusjon har forbruket vårt av energi bare økt. På verdensbasis brukes nå energi tilsvarende 19 millioner oljefat pr dag bare i boligsektoren. Tall for EU viser at 70% av energiforbruket i denne sektoren går til oppvarming [6]. Varme er lavverdig energi, og vi vet at det derfor trengs liten andel eksergi til dette formålet. Likevel har 60% av husholdningene i Norge varme fra elektriske ovner som hovedoppvarmingskilde [7]. Elektrisitet er 100% eksergi. Oversikt over oppvarmingskilder benyttet i Norden er vist i figur 2.1



Figur 2.1: Ulike energikilders bidrag for å dekke oppvarmingsbehovet i Norden [5].

Land/region	TPES (TWh)	TPES per innb (kWh/cap)	Elforbruk (TWh)	Elforbruk per innb (kWh/cap)
Verden	120 210	19 388	14 701	2 373
OECD	62 812	54 873	9 213	8 046
USA	26 912	93 648	3 802	13 228
Norge	312	68 620	111	24 526
Sverige	560	67 210	140	15 665

Tabell 2.2: Oversikt over elektrisitets- og energiforbruk i noen utvalgte land. TPES= Total Primary Energy Supply [8].

Siden 90-tallet har Norge vært nettoimportører av elektrisitet. Tall fra Statistisk Sentralbyrå viser at importen av elektrisitet økte med 13,8% fra 2003 til 2004, samtidig som eksporten avtok. Vi har en nettoimport på 9,4 % for det siste året [9]. Tabell 2.2 viser statistikk over energiforbruk i Norge og noen utvalgte land/regioner.

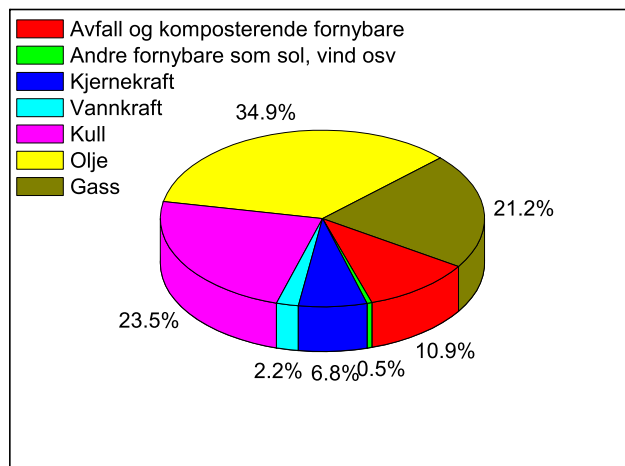
2.3.1 Utviklingen i Skandinavia

I november 2000 ga Framtiden i våre hendes forskningsinstitutt ut rapporten *Norsken, svensken og dansken... En sammenligning av energibruk og -innsats i tre land* [5]. Resultatene sammenfattes slik:

- Det er kun i Norge sluttforbruket fortsatt økte i 1998.
- Vi har lavest forbruksandel av ny fornybar energi. Dette defineres som vind, sol og biobrensel, og dekker kun 4% av energiforbruket i Norge, mot 8% og 19% i de andre landene.
- Vi bruker mest elektrisitet. Trekker vi fra elektrisiteten som brukes i industrien forbruger vi likevel 1,5 ganger så mye som svenskene per capita, og 3,6 ganger så mye som danskene.
- Sverige og Danmark benytter 16 ganger så mye fjernvarme som Norge.
- Bruk av varmpumper er minst utbredt i Norge.
- Danske myndigheter bevilga ni ganger så mye per capita på energisparende tiltak, miljøvennlig energibruk og forskning og utvikling av dette, enn det Norge gjorde.
- Energiavgiftene er små i Norge sammenlignet med de andre landene.

Disse punktene må sees i lys av Norges gode tilgang på vannkraft-generert elektrisitet. Vannkraft er en viktig form for fornybar energi, og bruken av denne har ført til at elektrisitet i Norge er både billig og miljøvennlig. Fortsatt er nesten all elektrisiteten Norge produserer fra vannkraft. Men på grunn av omlegging til det internasjonale kraftmarkedet dekkes nå deler av vårt strømforbruk av for eksempel kullkraft fra Danmark. Med lavere elektrisitetsforbruk her vil vannkraften kunne erstatte forurensende kraft generert andre steder. Det vil fremover bli nødvendig å legge om forbruk og å tenke nytt om produksjon verden over.

2.4 Behov for alternativer



Figur 2.2: Ulike energikilders bidrag til å dekke verdens primære energiforbruk på $1,2 \cdot 10^5$ TWh i 2002 [8].

Figur 2.2 viser hvordan verdens energiforbruk ble dekket i år 2002. Vi kan se at hydrokarbonene bidro med hele 79,6%.

Det er to hovedgrunner til å tenke nytt om energiforbruk og produksjon. Det er for det første at økte utslipp av karbondioksid (CO_2) er et av de store problemene det høye energiforbruket har medført. Ved forbrenning av olje, naturgass og kull produseres CO_2 -gass, og man antar at halvparten av denne forblir i atmosfæren. Gassen slipper solstrålingen gjennom, men absorberer mye av strålingen fra jorda. Dermed forsterkes drivhuseffekten av de økte CO_2 -utslippene, og fører til oppvarming av jorda [10].

For det andre er disse ikke-fornybare ressursene på god vei til å brukes opp. Levetiden for de gjenværende reservene beregnes som forholdet mellom reservene og forbruket. Denne er for 2003 på 41,0 år for olje og 67,1 år for gass [11]. Siden stadig nye felter oppdages og utbygges, samtidig som forbruket øker, har ikke disse tallene endret seg mye de siste 10 årene. Men det er urealistisk å tro at utbygging vil kunne fortsette i samme tempo. I tillegg antas den globale etterspørselen etter energi i år 2030 å være dobbelt så stor som i 2000 [12].

2.5 Solenergi

Sola er som en fusjonreaktor, der hydrogen fusjonerer kontinuerlig og frigir enorme mengder energi. Energien fraktes utover fra kjerna, og stråler ut fra overflata med en intensitet som tilsvarer et svart legeme med temperatur 5777 K [13]. Til enhver tid når 178 000 TW av denne strålingsenergi fra sola jordas atmosfære [14]. Det er mer enn 10 000 ganger så mye som verdens befolknings energibehov.

Det finnes mange metoder for å benytte solenergien. Alt fra svarte dunker ute i sola, til kilometerhøye soltårn med strømgenererende turbiner [15]. Grovt sett kan man dele de inn i aktive og passive systemer. Passiv bruk av solenergi går ut på å konstruere bygninger på en mest mulig hensiktsmessig måte for å benytte varmen og lyset fra sola. En måte er å legge spesielle belegg på vinduer som transmitterer sollyset, men hindrer varmestrålingen ut igjen [6], gjerne kombinert med store vindusflater mot sør og små og få mot nord. Andre måter kan være bevisste valg av materialer [6] eller dobbelfasade for å lagre solvarmen [16].

Aktiv bruk av solenergi krever en eller annen form for varmeveksler som kan omforme strålingsenergien til varme i et medium, eller et materiale der solenergien kan omformes direkte til elektrisk strøm. Denne siste formen er kjent som solstrøm eller photovoltaiske celler (PV celler) [6].

Strålingsvarmevekslerne kalles solfangere, og vi skiller grovt mellom fokuserende solfangere og flatplatekollektorer. Fokuserende solfangere benytter speil eller paraboliske geometrier for å samle stråling i et sentralt punkt slik at man der kan oppnå temperaturer på flere hundre grader [13]. Varmeenergien kan benyttes direkte til å varme opp vann eller olje, eller

Land	Solvarmeareal A (10^3 m^2)	A per 1000 innb ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{cap}$)	Antall anlegg	Energibidrag (GWh/a)	CO ₂ -reduksjon (10^3 t/a)
Norge	8	1,8	1 209	3	0,9
Finland	12	2,3	2 886	4	1,3
Sverige	233	26,4	29 236	67	24,3
Danmark	293	54,9	61 780	97	37,3
Østerrike	2 348	292,3	248 467	762	298,3
Tyskland	4 356	52,9	538 274	1 484	594,1
USA	24 941	87,6	447 507	7 311	3 423,9
Kina	32 000	25,0	8 000 000	13 968	6 008,0

Tabell 2.3: Oversikt over installerte solvarmeanlegg, og energibidrag og CO₂-reduksjon som følge av dette, for et utvalg land i 2001. Med solvarmeanlegg menes her oppvarming av vann til romoppvarming, tappevann og svømmebasseng [17].

brukes til å generere strøm. I denne oppgava er det den andre typen, flatplatekollektorer, som er studert, og teori om disse presenteres i kapittel 4.

Systemer der varmeenergien fra sola brukes direkte til romoppvarming og/eller oppvarming av vann kalles gjerne solvarmeanlegg. Utbredelsen av slike anlegg for et utvalg land er vist i tabell 2.3. Der vises også anleggenes bidrag for å redusere CO₂-utslippene.

2.6 Politisk vilje

Det er stor enighet verden over om at forbruket av energi i de vestlige landene må endres. Men det er likevel gjennomgående at miljøvennlige alternativer må være økonomisk lønnsomme for at de skal være interessante. For å oppnå det må enten teknologi og materialer være så billige at investeringene fort innsparer, eller så må de subsidieres.

EU-direktivet om energibruk i bygninger, som er nevnt i innledningen er et tiltak som inndirekte vil støtte bruk av alternativ energi. Det vil ikke bli gitt økonomisk støtte til ekstra investeringer, men en bolig med miljøvennlige energiløsninger vil score bra på energiklasse, og dermed øke i verdi. En lignende ordning, med tildeling av grønne sertifikater til produsenter av miljøvennlig kraft, har vært diskutert lenge, men er ikke tatt i bruk i Norge [18].

I Norge var tilskuddsordningen for strømspare-tiltak vinteren 2003 et godt eksempel på at politisk inngripen påvirker forbrukerne. Nær 20 000 husstander benytta seg av tilbudet, og reduserte strømbehovet til oppvarming med ca 1/3 av det opprinnelige [19]. Denne støtten gikk til investeringer i varmepumper, pelletskaminer og styringssystemer. I land som Tyskland og Sverige kan man se at investeringene i solvarmeanlegg har svingt i takt med gjeldende støtteordninger. Slike virkemidler er altså viktige for å øke bruken av alternativ energi.

Kapittel 3

Varmetransport

Hvordan varme beveger seg og overføres fra et medium til et annet er utgangspunktet for i det hele tatt å kunne benytte solenergien. Varmetransport er energioverføring som følge av temperaturskjeller. Dette kan foregå på tre ulike måter, avhengig av materialet, tilstanden og omgivelsene. Vi har allerede nevnt at energi fra sola når jorda som stråling. De andre formene for varmetransport er varmeledning og konveksjon. Teorien her er hentet fra *Varmelære og elektromagnetisme* [20].

3.1 Stråling

Som følge av et legemes temperatur sender det ut elektromagnetiske bølger. Av denne strålingen er det en andel som absorberes (α), en andel som transmitteres (τ) og en andel som reflekteres (r). Vi har at

$$\alpha + \tau + r = 1 \quad (3.1)$$

Noen legemer kalles svarte legemer, og de har $\alpha \simeq 1$. Et reelt legeme kan være tilnærmet svart for et gitt bølgeområde, for eksempel det som tilsvarer synlig lys. Andre media kan være transparente, slik som luft, og da går strålingen tilnærmet uhindret gjennom, det vil si $\tau \simeq 1$.

Stefan-Boltzmanns lov sier at et legeme med absolutt temperatur T stråler med en intensitet \dot{Q} på

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.2)$$

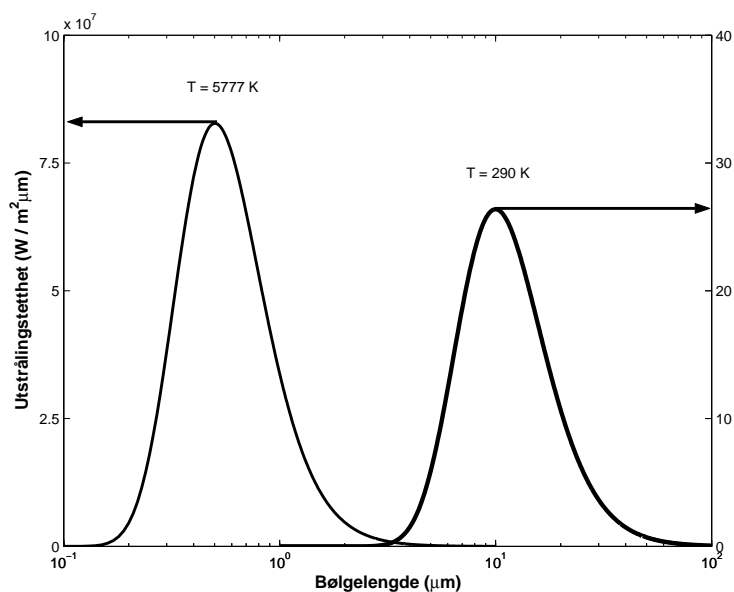
der $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$. ε er emisjonskoeffisienten som er bestemt for et gitt legeme og angir andelen stråling legemet emitterer i forhold til hva et svart legeme ville

emittert.

Hvor mye energi strålingen inneholder avhenger av strålingens intensitet og bølglengdeintervallet den fordeler seg på. Elektromagnetiske bølger med korte bølglengder frakter som kjent mer energi enn bølger med lange bølglengder. Plancks lov forklarer hvordan strålingsenergien fordeler seg på ulike bølglengder. Et legeme med høy overflate-temperatur vil stråle mer for alle bølglengder enn et legeme med lavere temperatur. Det vil også ha maksimal utstråling ved lavere bølglengder enn kaldere legemer, i følge Wiens forskyvningslov:

$$\lambda_{maks}T = 2,898 \times 10^{-3}mK \quad (3.3)$$

Utifra denne kan vi også forstå hvorfor legemer med temperaturer på over 600 °C blir rødgldende. Ved så høye temperaturer nærmer λ_{maks} seg det synlige bølgespekteret. Figur 3.1 viser slike Planck-kurver for temperaturer tilsvarende jordas og solas overflatetemperatur.



Figur 3.1: Planck-kurver som viser utstrålingstettheten for de ulike bølglengdene [13]. T = 5777 K tilsvarer solas overflate-temperatur, og T = 290 K jordas overflatetemperatur. Vi ser at som følge av temperaturen stråler sola tre millioner ganger mer enn sola per kvadratmeter.

3.2 Varmeledning

Ledning er den formen for varmetransport som vi kjenner best fra dagliglivet. Det er varmeoverføring fra en del av et materiale til en annen del, eller i overgangen mellom ulike materialer. Når en ende av et materiale varmes opp vil atomene der begynne å vibrere mer, og vekselvirke med naboatomene. Slik brer varmen seg. Det er hovedsaklig elektronene som leder varmen. Derfor er ledningen størst i faste stoffer. Metaller er gode varmeledere, mens isolatorer ofte er varmeisolerende også. Når det gjelder væsker og gasser, er det overføring av molekylenes kinetiske energi som forårsaker varmeledningen. Molekyltettheten er størst i væsker, og disse leder derfor varmen bedre enn gassene.

Fouriers varmeledningslov sier at varmestrømmen som skyldes varmeledning er proporsjonal med temperaturgradienten og arealet vinkelrett på strømmen. I praktiske anvendelser der det er en stasjonær tilstand med et materiale med flateareal A , tykkelse l og ulike temperaturer på hver side kan vi skrive varmestrømmen \dot{Q} som

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{l} (T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

λ er en materialkonstant som kalles varmekonduktivitet. Den varierer fra 0,026 for luft til over 400 W/(m °C) for enkelte metaller, og er i tillegg temperaturavhengig.

3.3 Konveksjon

Konveksjon er direkte massetransport, og oppstår kun i gasser og væsker. Oppvarmet luft blir lettere og stiger opp, og kaldere luft erstatter tomrommet. Men selv om en gass eller væske er i ro, vil det være en innvendig bevegelse i mediet som sørger for en transport av energi. Vi skiller mellom naturlig og tvungen konveksjon. Ved naturlig konveksjon er det temperaturdifferansen selv som fører til bevegelse i mediet. Ved tvungen konveksjon drives bevegelsen av en pumpe eller en vifte.

3.3.1 Overgang mellom fast stoff og væske

Når en væske beveger seg forbi et fast stoff med en annen temperatur, vil varme overføres både ved konveksjon og ledning, og er derfor en komplisert prosess. Det er et spesialtilfelle som er av stor praktisk betydning. Inntil flata vil det ligge et tynt lag med væske som har null hastighet, og samme temperatur som flata. Utover i væska øker hastigheten, mens

temperaturen øker eller avtar avhengig av om flatetemperaturen er høyere eller lavere enn den opprinnelige temperaturen på væska.

I overgangen mellom det faste stoffet og væska overføres varme som følge av ledning. Videre innover overføres den som følge av konveksjon. Vi kaller området der temperaturen og hastigheten endrer seg for et grensesjikt. Temperaturutviklingen i overgangen og utover væska avhenger både av tetthet, viskositet, termisk ledningsevne, hastigheten til væsken, varmekapasiteten og helningen til det faste stoffets flate. Alle disse verdiene sammenfattes i varmeovergangskoeffisienten h , som i de aller fleste tilfeller må bestemmes eksperimentelt. Varmestrømmen er gitt ved

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_v) \quad (3.5)$$

der T_s er temperaturen på det faste stoffet, og T_v temperaturen på væska som strømmer over flata.

Kapittel 4

Teori om flatplatekollektorer

I dette kapitlet blir de ulike komponentene og størrelsene som beskriver en flatplatekollektor presentert. To kjente metoder for bestemmelse av energiutbyttet diskuteres, og varmeutviklingen i systemet forklares. Denne teorien er viktig for å forstå oppbyggingen av forsøkene, og de påfølgende resultatene. Hvis ikke annet er oppgitt er teorien henta fra boka *Solar energy - the state of the art* [6].

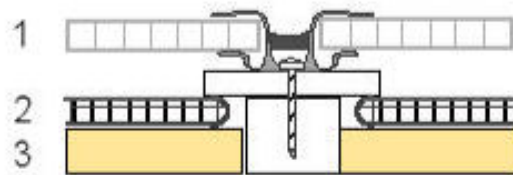
4.1 Komponentene i flatplatekollektoren

En flatplatekollektor absorberer solinnstrålingen, og overfører denne varmen til et strømmende medium; luft eller vann. I forhold til andre typer solfangere er flatplatekollektorene enkle, både når det gjelder materialer og behov for vedlikehold. De fanger opp både direkte og diffus stråling, og trenger derfor ikke å rotere med sola. For privathusholdninger er denne typen mest utbredt.

Kollektoren består av tre hoveddeler; absorberplate, dekkplate og isolasjon. Disse vises i snittet av solfangeren i figur 4.1, og forklares i kapitlene under. Det er kun sett på kollektorer med vann som varmebærende medium.

4.1.1 Dekkplata

Dekkplata har som oppgave å transmittere solstrålene og reflektere eller absorbere varmestrålingen. Det betyr at den må transmittere mest mulig for bølgelengder mellom 0,3 og 2,0 μm , og minst mulig for bølgelengder større enn 2 μm . Dette siste er for å hindre varmetap, og dermed øke utbyttet. Det er mange ulike utforminger av dekkplata. Den

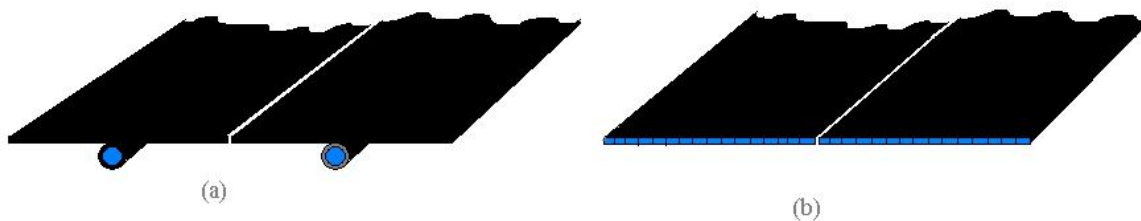


Figur 4.1: Snitt av en solfanger fra Solarnor [21]. Figuren viser dekkplate (1), luftlag, absorbator (2) og isolasjon (3). Modulene er koblet i parallell, og festes med spesiallagde aluminiumsprofiler. Figur fra kilde [22].

kan bestå av et enkelt glass, to lag med glass, et glasslag og et teflonlag eller andre kombinasjoner for å sikre høy effektivitet. Dekkplata kan også være laga av plast. Fordelene med plast er at det veier mindre, slik at det kan dekke større overflater. Men plast eldes fortere enn glass, og fører til for eksempel misfarging, korrosjon eller sprekkdannelse ved temperaturendringer.

4.1.2 Absorbatorplata

Absorbatorplata består av en mørk flate som absorberer størstedelen av solinnstrålingen, og rør eller kanaler der det strømmer vann. Vannet leder varmen videre til et varmelager. Absorbatorplata kan lages i metall eller plast. Disse materialene har svært ulike egenskaper,



Figur 4.2: To typer absorbatorplater. (a) Absorbatorplate med metallfinner og en viss avstand mellom rørene der transportmediet flyter. Overflaten er gjort svart ved hjelp av et belegg for å øke absorptansen. (b) Plastabsorbator med kanaler tett i tett under tynn overflate. Her er det god termisk kontakt mellom transportmediet og den oppvarma flata.

så utformingen blir også forskjellig. Hvis den lages i metall består den av tynne plater, og rør med en viss avstand imellom. Plast har mye lavere konduktivitet, og absorptorplater laget i dette materialet er derfor avhengig av stor kontaktflate mellom det oppvarmede materialet og transportmediet. I praksis betyr det mye mindre avstand mellom rørene, eller kanaler tett i tett under en tynn svart plastoverflate. Disse forskjellene er illustrert i figur 4.2.

Fordelene med plast er at det er et billig materiale som veier lite. Plastabsorbatorer har gjerne lavere maksimal driftstemperatur enn metallabsorbatorene. Plastabsorbatorer har derfor vært mye brukt til lavtemperatur oppvarming, som oppvarming av vann til svømmebassenger. Høyere driftstemperaturer kan oppnås for begge typer med selektive belegg. Dette kan være et lag av kobberoksid eller svart krom, og er vanlig på metallabsorbatorer siden disse i utgangspunktet ikke er svarte. Men det øker samtidig faren for overoppheting når innstrålingen er stor.

4.1.3 Isolasjon

Sola som stråler på kollektoren varmer denne opp, slik at den gjerne holder 50 - 100 °C mer enn omgivelsene. Varmetapene blir da fort store. På oversida er det dekkplata som skal hindre dette, mens det på undersida og kantene er viktig med isolasjon. Ofte brukes et lag med reflekterende folie og mineralull. Det er viktig at isolasjonen tåler de høye temperaturene som kan oppnås (> 130 °C).

4.2 Solvarmeanlegg

En flatplatekollektor er alltid en del av et større anlegg. Vannet som varmes opp blir ledet til en beholder der energien lagres, ved hjelp av et rørsystem. I tillegg er det uttak slik at det oppvarmede vannet i tanken kan brukes som varmt tappevann og/eller til romoppvarming. Dette kalles et solvarmeanlegg. Den enkleste formen for solvarmeanlegg er termosyfonen. Den har en tank plassert rett i overkant av kollektoren, og vannet sirkulerer naturlig som følge av temperaturforskjellene. I andre anlegg pumpes vannet rundt. Dette er dyrere og mer avanserte anlegg, som krever egne styringssystemer.

4.2.1 Styringsmetoder

Å styre anlegget vil i prinsippet si å sørge for at anlegget kun er i drift når det er mulig å hente ut energi fra solfangeren. I praksis betyr det å bestemme når pumpa skal slås av og på, og eventuelt hvor stor strømningshastigheten skal være. Det meste vanlige er bruk av en differensial-styrer, der temperaturdifferansen mellom solfangeren og tanken er utgangspunktet. Er denne differansen høyere enn en bestemt verdi ΔT_{on} settes anlegget i gang. Når differansen er lavere enn en verdi ΔT_{off} slås det av. Disse verdiene avhenger blant annet av strømningshastigheten og hvor solfangersensoren er plassert, og ligger på typisk $\Delta T_{on} = 6^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T_{off} = 1^{\circ}\text{C}$ [23]. Det er to hovedgrunner til at ΔT_{on} settes så høy, selv om liten temperaturdifferanse vil gi energiutbytte. Den ene er at pumpa bruker energi, slik at utbyttet må være større enn forbruket for at det skal være nettogevinst. For det andre synker temperaturen på solfangeren med flere grader når vannet begynner å sirkulere gjennom den, og lav ΔT_{on} vil medføre at anlegget slår seg mye av og på.

Et alternativ til en slik av/på-styrer, er en proporsjonal-styrer. Dette er også en differensial-styrer, men istedenfor å slå pumpa av eller på når de bestemte verdiene for temperaturdifferansen nåes, varierer den pumpeeffekten. Når temperaturdifferansen er relativt liten, gjør lav strømningshastighet at energiutbyttet fortsatt er positivt.

4.2.2 Strømningshastigheten

Det er vanlig innenfor varmebransjen å måle strømningshastighet i liter per time. For et solfangeranlegg brukes ofte benevnelsen liter per minutt per kvadratmeter, som er en omskriving der arealet til solfangerne er tatt hensyn til. Normal strømningshastighet for flatplatekollektorer i drift er $m_a=0,1-1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$. Den varierer altså mye fra anlegg til anlegg, uten at det nødvendigvis har med type kollektor å gjøre [24].

Utgangspunktet for valg av hastighet er om man ønsker et anlegg med god sjiktning eller ikke. Sjiktning er termisk lagdeling i tanken, slik at temperaturen er høy øverst, og avtar nedover. Sjiktning øker sannsynligheten for at vann med lav temperatur pumpes ut til solfangeren, og følgelig øker utbyttet. God sjiktning forutsetter lav strømningshastighet. Er strømningshastigheten høy vil kjølingen av absorptorplata være god. Det medfører lavere tap og igjen høyere utbytte. Spørsmålet er altså hvilke av disse effektene som er størst. Cristofari et al [24] har studert et anlegg med en *manifold diffuser*, det vil si med et innløp i tanken som har mange åpninger i vertikal retning for å opprettholde sjiktningen. Deres konklusjon er at med 10 slike åpninger og lav strømningshastighet er den årlige effektiviteten

for deres anlegg på 55,5%, mot 53% med kun én åpning og høy strømningshastighet.

Lav strømningshastighet er gunstig fordi det krever smalere rør, som har lavere varmetap og er billigere enn større rør. I tillegg reduseres energibehovet til pumpa [24]. Ønsker man høy temperatur på en liten andel av vannet, framfor middels temperatur på en større andel, er sjiktningen også viktig. På den andre siden bør lav strømningshastighet kombineres med en manifold diffuser, og det medfører ekstra materiale og mer avansert teknikk. Også med høy strømningshastighet og kun én åpning i tanken vil en viss grad av sjiktning inntreffe.

4.2.3 Drainback-anlegg

En utfordring med solvarmeanleggene har vært temperaturutviklingen i absorberplata når anlegget har vært ute av drift. Da kan det være fare for at vannet enten fryser til is, eller at det begynner å koke. I begge tilfeller utvider vannet seg, og på den måten ødelegger kollektoren. En løsning har vært bruk av frostvæske som også har høyere kokepunkt. Slik væske har noe lavere varmekapasitet, som medfører lavere kollektoreffektivitet. I tillegg forutsetter bruk av frostvæske varmeveksler mellom transportmediet og varmelageret. En annen løsning er drainback-anlegg. I slike anlegg tappes vannet ut av kollektoren når det ikke er i drift. Det skjer ved at vannet renner tilbake i tanken ved hjelp av gravitasjonen når pumpa slås av. Fordelen er at denne funksjonen ikke avhenger av ventiler eller andre funksjoner som kan svikte, for eksempel ved strømstans. Men det krever samtidig kraftigere pumpe fordi tanken må være plassert lavere enn kollektoren.

4.3 Flatplatekollektorens effektivitet

Verden over er det lagt mye arbeid i å finne måter å beregne effektiviteten til solfangere på, og internasjonale standarder for disse. Kollektoreffektiviteten påvirkes av konstruksjonen, solbetingelsene, omgivelsesforhold og driftsparametre. Solbetingelsene er for eksempel strålingsintensitet og vinkel mellom plata og innstrålingen. Fra omgivelsene påvirkes effektiviteten av utetemperatur og vindhastighet. Driftsforhold innebærer sirkulasjonshastigheten, temperatur på transportmediet inn i fangeren og hvordan den geografisk er orientert.

Effektiviteten uttrykker hvor stor del av innstrålinga som blir fanga opp og overført til varme i mediet. Det vil si $\eta = \frac{Q_n}{AI}$, der Q_n er den nyttige energien, og AI solinnstrålinga på dekkplata. Det gir oss følgende lineære uttrykk for effektiviteten:

$$\eta = \eta_0 - \frac{U_L(\bar{T} - T_a)}{I} \quad (4.1)$$

der η_0 er optisk effektivitet gitt ved absorberplatas absorptans og dekkplatas transmittans. U_L er varmetransportkoeffisienten som bestemmes eksperimentelt, \bar{T} middels plate-temperatur, og T_a utetemperatur. U_L er sammensatt av alle tapsledd, og både ledning, stråling og konveksjon inngår. Den er ofte temperaturavhengig, og derfor skrives gjerne ligning 4.1 om til en annengradsligning.

Flatplatekollektorer har stort absorberareal, men utbyttet begrenses likevel av de store varmetapene. For liten temperaturredifferanse mellom absorberplate og omgivelsene, har solfangere uten dekkplate høyere effektivitet enn solfangere med. Men siden dekkplate begrenser strålingstapet, synker effektiviteten raskere for solfangerne uten dekkplate når temperaturredifferansen øker. Krever man en effektivitet på mer enn 25 %, er normalt den maksimale driftstemperaturen på 80 °C for metallabsorbatorer med dekkplate. Denne kan derimot økes ved hjelp av selektive overflater, dobbel dekkplate eller vakuumisolasjon. Disse tiltakene minsker varmetapene som skyldes konveksjon og stråling på oversida av absorberplate, og effekten av de er skissert i figur 4.3.

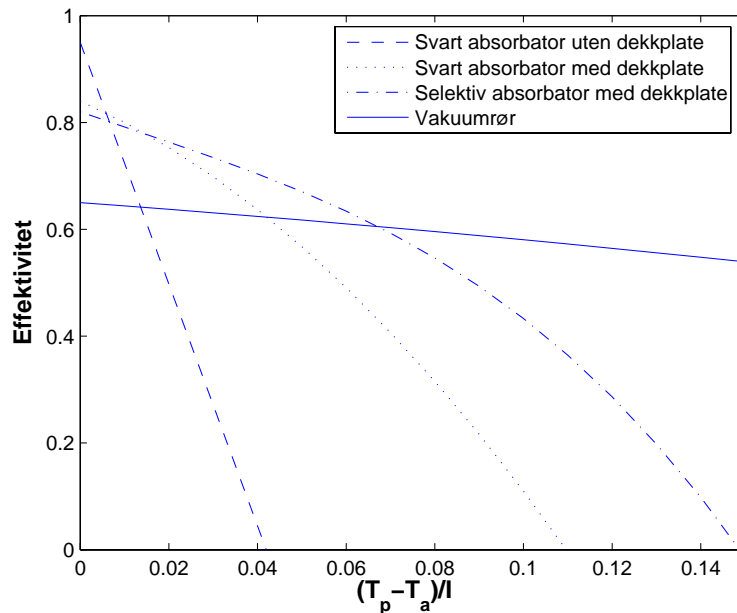
4.4 Utbytte fra solfangeren

Siden sola er en tilnærma uendelig stor ressurs er det ikke nødvendigvis et mål i seg selv å utnytte en størst mulig andel av innstrålinga. Fokus i denne oppgava har derfor vært på hvor mye varme som tilføres transportmediet. Denne effekten kan beregnes ut ifra

$$P_s = A[\eta_0 I - U_L(T_p - T_a)] \quad (4.2)$$

$$= F_R A[\eta_0 I - U_L(T_i - T_a)] \quad (4.3)$$

Denne siste formen er nyttig fordi innløpstemperaturen (T_i) er enklere å bestemme enn solfangertemperaturen (T_p). F_R kalles varmeoverføringskoeffisienten. Den tar høyde for måten temperaturen utvikler seg i strømningsretningen, og dermed de økte varmetapene. Den er et forholdstall mellom det faktiske utbyttet og utbyttet hvis platetemperaturen hadde tilsvart innløpstemperaturen. Både U_L og F_R må bestemmes eksperimentelt for et gitt anlegg.



Figur 4.3: Typiske effektivitetskurver for ulike typer solfangere [6]. Kurvene krysser x-aksen i $\eta_0 = \tau\alpha$.

De to vanligste metodene for beregning av energiutbytte er presentert i de neste to kapitlene.

4.4.1 Varmestrømmetoden

I denne metoden måles temperatur på vannet inn og ut av solfangeren, hhv T_i og T_u , og strømningshastigheten gjennom den, \dot{m} [13]. Energiutbyttet i en tidsperiode Δt er gitt ved

$$Q_{var} = \dot{m}C_p(T_u - T_i)\Delta t \quad (4.4)$$

der C_p er varmekapasiteten til sirkulasjonsmediet. Her kommer det tydelig fram at strømningshastigheten er en viktig parameter.

Denne metoden brukes ved ulike test-institusjoner i henhold til den europeiske standarden for effektivitetsmålinger [25]. Den beregner hvor mye energi som er tilført vannet på veien gjennom solfangeren til enhver tid, og gjelder når et solfangeranlegg er i likevekt og opererer under stasjonære forhold. Dette er sjelden oppfylt andre steder enn i laboratorier

utstyrt med kunstig sol. Ofte er det ønskelig å studere anlegg i drift, og da bør man vurdere andre metoder. At vannet i et selvdrenerende anlegg renner motsatt vei når anlegget slås av medfører ekstra problemer.

4.4.2 Den kalorimetriske metoden

Denne metoden er mye brukt og delvis utarbeidet her ved energigruppa ved Fysisk institutt [26][27]. Utgangspunktet til denne er at man ser på tanken som et kalorimeter, og beregner hvor mye energi som er tilført systemet ved å se på temperaturøkningen i tanken, $\Delta T_{\bar{t}}$.

$$Q_{kal} = \left(\sum_i m_i C_i \right) \Delta T_{\bar{t}} \quad (4.5)$$

Her er $m_i C_i$ varmekapasiteten til de forskjellige mediene der energien lagres (for test-anlegget er det vannet i tanken og aluminiumet den er laget av).

Denne metoden stiller mindre krav til måleutstyr og hyppige avlesninger, og er derfor god når man ser på utbyttet over tid og under varierende forhold. Men i et solvarmeanlegg som er i drift vil varme samtidig tappes ut av tanken. Da er $\Delta T_{\bar{t}}$ ikke lenger proporsjonal med energiutbyttet, og den kalorimetriske metoden kan ikke brukes uten modifikasjoner.

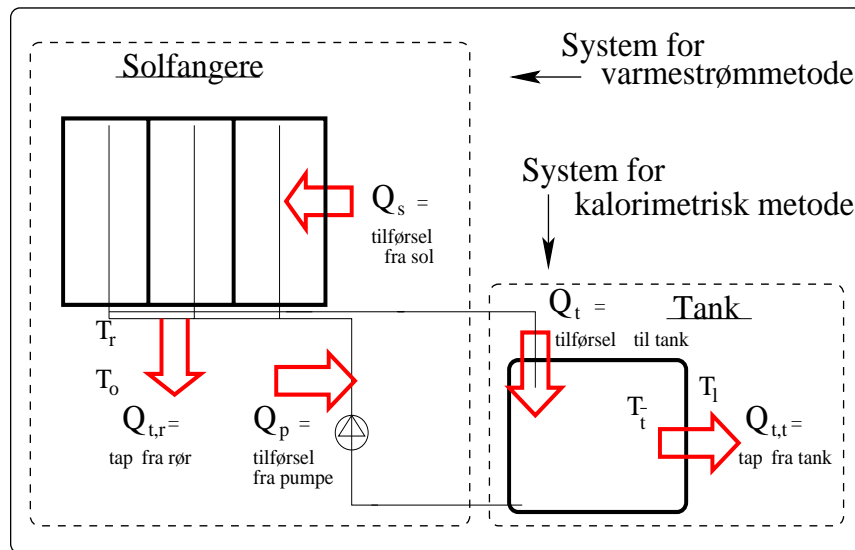
4.4.3 Sammenligning av metodene

Verdiene Q_{var} og Q_{kal} kan ikke uten videre sammenlignes. De presenterer ulike deler av et sammensatt system. Q_{var} gir utbyttet over solfangeren, mens Q_{kal} gir systemutbyttet, der tap fra tank og rør og energitilførsel fra pumpa er medberegna.

Det er mengden energi som tilføres tanken fra solfangerne som studeres i denne oppgava. Det vil si den energien som kan erstatte elektrisitet eller annen energibærer brukt til oppvarming i en vanlig varmtvannstank. Figur 4.4 viser solfangeranlegget, og energifluksen i de ulike komponentene. Varmestrømmetoden gir verdien av Q_s , og den kalorimetriske metoden gir oss verdien for energiendring i tanken. Størrelsen vi er ute etter, Q_t , finner vi da med utgangspunkt i ligningene 4.4 og 4.5 og følgende korreksjoner:

$$Q_{VAR} = Q_{var} - Q_{t,r} + Q_p \quad (4.6)$$

$$Q_{KAL} = Q_{kal} + Q_{t,t} \quad (4.7)$$



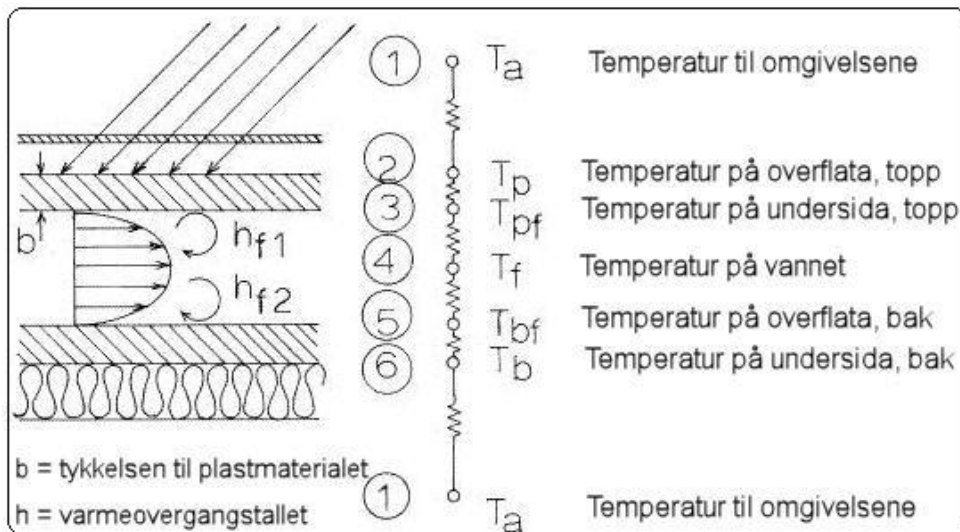
Figur 4.4: Prinsippskisse som viser de ulike varmestrømmene i solafangeranlegget. Uten korreksjoner representerer varmestrømmetoden Q_s og den kalorimetriske metoden varmeøkningen i tanken. Ordet “system” i denne figuren henspiller på de deler av anlegget som sees på i sammenligningen.

Verdiene av de ulike tapsleddene blir funnet i kapittel 6.4.

4.5 Varmetransport i absorlatorplata

I kapittel 3 ble de ulike formene for varmetransport presentert. I en solfanger opptrer alle disse formene. Energien treffer solfangeren som stråling fra sola. Denne absorberes i absorbatorens topplate, og ledes gjennom. På denne veien avtar temperaturen noe, utifra platas tykkelse b og ledningsevne k_p . Videre overføres energien til vannet som følge av ledning og konveksjon. Mengden energi er gitt ved arealet på plata, en konstant h og temperaturdifferansen mellom plata og vannet (ligning 3.4). Størstedelen av denne energien transporteres bort fra kollektoren, og resten overføres til bakplata og isolasjonen.

Figur 4.5 viser et skjematisk snitt av en kollektor med absorlatorplata med lav ledningsevne. Ut ifra denne setter Tsilingiris [28] opp en rekke ligninger for varmebalansen i de ulike prosessene som er nevnt over. I et anlegg måler man gjerne solinnstrålingen I og temperaturene T_p og T_f . Ved å kombinere ligningene kan man da for eksempel finne



Figur 4.5: Snitt av en plastsolfanger med de ulike temperaturerne og varmeovergangene. Figur fra kilde [28].

temperaturen T_{pf} i overgangen mellom plate og vann og varmeovergangskoeffisienten h_{f1} , når man vet verdien av U_t .

$$T_{pf} = T_p - \frac{b}{k_p}(S_t - U_t(T_p - T_a)) \quad (4.8)$$

$$h_{f1} = \frac{k_p(T_p - T_{pf})}{b(T_{pf} - T_f)} \quad (4.9)$$

Kapittel 5

Måleoppsett

I dette kapitlet beskrives oppsettet og utstyret som ble brukt i forsøkene. En del av oppsettet har vært brukt, og er beskrevet, av tidligere studenter [29] [30]. Men all informasjonen er også tatt med her, for at denne beskrivelsen skal være fullstendig. For teknisk dokumentasjon er referanser oppgitt.



Figur 5.1: Bilde av sol-laben. Forsøkene er utført på de fem solfangerne på høyre side av taket. PV-cellene til venstre og solfangerne på bakken og begge vegger er benyttet i andre forsøk.

5.1 Testanlegget

Eksperimentene er utført i den 20 m² store sol-laben utenfor fysikkbygningen på Blindern. Sørsiden av laben er vendt mot vest med en asimutvinkel på $\gamma = 18^\circ$, og taket har en helningsvinkel på $\nu = 32^\circ$. På tak og vegger utvendig er det montert solceller, termiske solfangere og ulike instrumenter til bruk i eksperimentene. Varmelageret og diverse måleutstyr som spesifiseres senere i kapitlet, er plassert inne i laben.

5.1.1 Solfangerne

I april 2004 ble det montert fem nye solfangermoduler fra Solarnor på det sørvestvendte taket. Disse er koblet i parallell, og har et bestrålt areal på $A = 4,23$ m². Absorbatorplatene er laget i en blanding av polyphenylenoxid og polystyrene fra General Electric. Figur 5.2 viser at strukturen er tre lags, og at vannet pumpes gjennom små kanaler med et tverrsnitt på $4,3 \times 2,4$ mm. Platene er 10 mm tykke og har en absorptans på $\alpha = 0,945$ i sollysets bølgelengdeområde [22].



Figur 5.2: Tverrsnitt av absorbatorplata. Vannet pumpes gjennom det øverste laget og ned igjen i midten. Nederste lag er fylt med luft og til tider litt vann, og bidrar til å utjevne trykket.

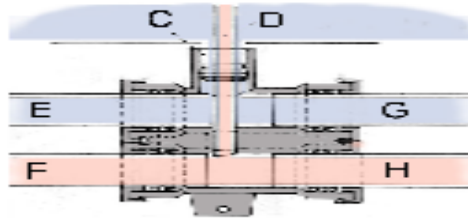
Den termiske isolasjonen består av 25 mm mineralull. Dekkplata er en dobbel polycarbonatplate med transmittans $\tau = 0,81$ [22]. Anlegget er ikke trykksatt.

Figur 5.3 viser hvordan modulene er koblet sammen og hvor vannet renner.

5.1.2 Tanken og røra

Som varmelager benyttes en aluminiumstank med dimensjoner $0,65 \times 0,65 \times 1,25$ m og 3 mm tykke vegger. Figur 5.4 viser denne. I det ene hjørnet er det en hul aluminiumssylinder. Øverst på den ene siden er et rør der overskuddsvann skilles ut når temperaturen har økt så mye i vannet at volumøkningen er merkbar. Det medfører også at det blir et luftlag øverst i tanken. Det effektive vannvolumet er målt til å være $V = 469$ liter [30].

Fra tanken går det et rør som leder vann opp til solfangerne. Utløpet for dette er valgt nederst i tanken, for å få høyest mulig effektivitet på solfangerne. Røret med returvann



Figur 5.3: Innløp og utløp fra hver solfangermodul kobles sammen ved hjelp av en manifold. Noe av det kalde vannet (G) fra tanken strømmer ut i den første absorberplate (C og D), mens resten pumpes videre (E) til neste plate. Det oppvarmede vannet fra den første plate renner ned igjen gjennom røret i midten, og blander seg med det oppvarmede vannet (F) fra de andre platene, og renner ned igjen (H) til tanken. Figur fra kilde [31].

Flate	Isolasjon
Topp, tank	5 cm mineralull, 10 cm isopor
Bunn, tank	5 cm isopor
Front, tank	10 cm mineralull
Bak, tank	10 cm mineralull, 5 cm isopor
Sider, tank	10 cm mineralull, 5 cm isopor
Rør	9 eller 13 mm Glavaflex [®] F

Tabell 5.1: Oversikt over isolering av tank og rør

fra solfangerne har innløp ca 10 cm ned fra toppen av tanken. Dette er plassert her for å opprettholde mest mulig sjiktning. Begge rørene har en indre diameter på 14 mm, og er ca 6 meter lange.

Oversikt over hvordan tank og rør er isolert finnes i tabell 5.1. Ved bestemmelse av varmelagerets varmekapasitet er det tatt hensyn til transportmediet og aluminiumet i tanken. Det gir en varmekapasitet på $C_t = \sum_i m_i C_i = 549 \text{ Wh}/^\circ\text{C}$



Figur 5.4: Varmelageret inne i sol-lab'en. 1) Dette røret står egentlig midt i tanken, men er her plassert på utsiden for å illustrere plasseringen av de tre temperatursensorene, markert med de svarte flekkene. 2) Røret der overskuddsvann kan renne ut. 3) Røret fra solfangerne og inn i tanken. 4) Tidligere brukt som innløp fra solfangerne, nå erstattet med nr 3. 5) Utløp til gulvvarmeanlegget. Dette er ikke brukt i forsøkene. 6) Røret der vann blir pumpet fra bunn av tanken og opp til solfangerne. Slangen til venstre gir mulighet for å tappe vannet ut av tanken.

5.1.3 Pumpa

Vannet pumpes opp til og gjennom solfangerne ved hjelp av en sirkulasjonspumpe fra Grundfos, av type UPS 25-60 B 180 [32]. Den har tre ulike hastighetsnivå, med et effektbehov på 45, 65 og 90 Watt. I dette oppsettet er den hurtigste benyttet. Pumpa er vannkjølede slik at storparten av effekten overføres til varme i vannet. Dette er diskutert i kapittel 6.4.2.

I røret rett ovenfor pumpa er det installert en ventil for å justere strømningshastigheten.

5.1.4 Styre-enheten

Samtidig med de nye absorlatorplatene ble det installert en mc:symphony-styrer, som er standard til anleggene Solarnor leverer [33]. Styreeren mottar signaler fra temperatursensorer ute, i bunnen av tanken og på absorlatorplata (under dekkplata). Når differansen mellom temperaturen på absorlatorplata og temperaturen i bunnen av tanken overskrider en viss verdi (ΔT_{on}) åpner den strøm til pumpa, og tilsvarende når differansen blir så liten (ΔT_{off}) at det ikke er noe energiutbytte, kutter den strømtilførselen. Verdiene velges med tanke på størst mulig energiutbytte og minst mulig pendling mellom av og på. I eksperimentene er det brukt $\Delta T_{on} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ og $\Delta T_{off} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Styreeren kan også kontrollere gulvvarmeanlegg og tilleggsoppvarming av tank, men disse funksjonene er ikke benyttet i oppsettet. For mest mulig realistiske betingelser har anlegget vært koblet til styreeren. Kun ved spesielle forhold eller i tilleggseksperimenter har det kjørt manuelt med konstant strømtilførsel.

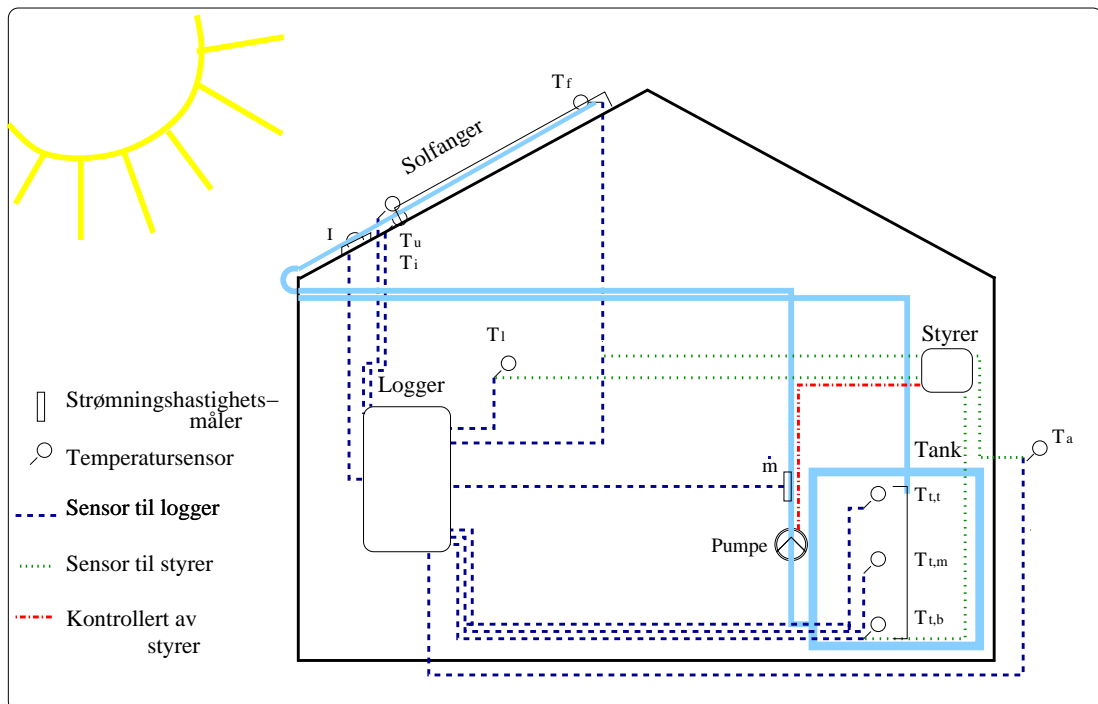
5.2 Sensorene

5.2.1 Temperatursensorene

Til å måle temperaturer har det blitt benyttet PT100-sensorer. I disse endrer resistansen seg med $0,385 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$. Ved å måle resistansen R_{RTD} finner man temperaturen ut ifra ligningen

$$T_{RTD} = \frac{2\left(\frac{R_{RTD}}{R_0} - 1\right)}{A + \sqrt{A^2 + 4B\left(\frac{R_{RTD}}{R_0} - 1\right)}} \quad (5.1)$$

For PT100-sensorer er $A = 3,9080e^{-3}$, $B = -5,8019e^{-7}$ og $R_0 = 100\Omega$ etter DIN43760-standarden [34].



Tanktemperaturene

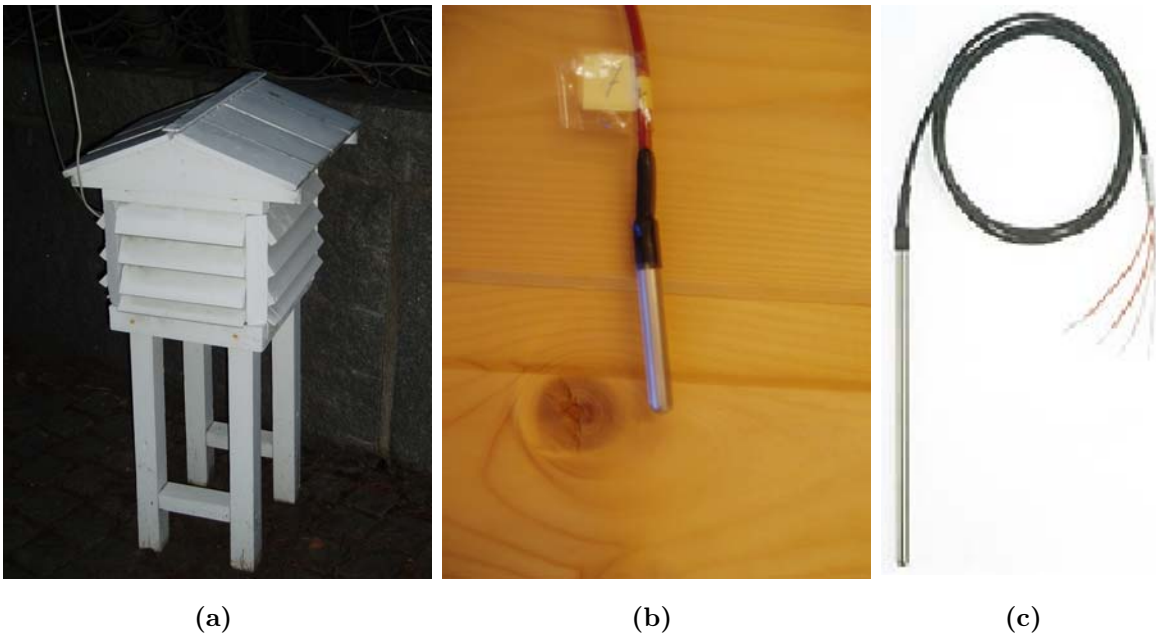
Tre sensorer er brukt for å måle temperaturen i vanntanken. De er plassert vertikalt i et glassrør fylt med aluminiumoksid, og måler temperaturen i topp, middel og bunn midt i tanken ($T_{t,t}$, $T_{t,m}$ og $T_{t,b}$). Tanken er 1,25 m høy, og sensorene er plassert med høyde 0,5 cm, 45 cm og 92 cm over bunnen. Ved å benytte tre sensorer får vi et inntrykk av hvordan sjiktningen er, og mulighet for å beregne en representativ middelværdi. Figur 5.4 viser dette røret på utsida av tanken for å illustrere plasseringen av sensorene.

Sensorene er av type 76-808-87 instickgivare, PT100 B fra Elfa [35].

Ute- og innetemperaturene

Utetemperaturen (T_a) måles med en sensor plassert inne i en hvit kasse med god lufting. Dette er for at den ikke skal bli påvirket av direkte sollys. Temperaturen inne i laben (T_l) måles med en sensor plassert på veggen, ca 1,5 m over gulvet. Figur 5.5 (a) og (b) viser disse.

Sensorene er henholdsvis artikkel 76-689-32 givare, PT100 1/3 B fra Elfa og 76-808-87 instickgivare, PT100 B fra Elfa [35].



Figur 5.5: (a) “Hytta” der utesensoren er plassert. (b) Temperatursensoren på veggen inne i lab’en. Den er av samme type som tanksensorene og sensoren på solfangeren. (c) Typen sensor som er plassert i innløp- og utløpsrør.

Innløp- og utløpstemperaturene

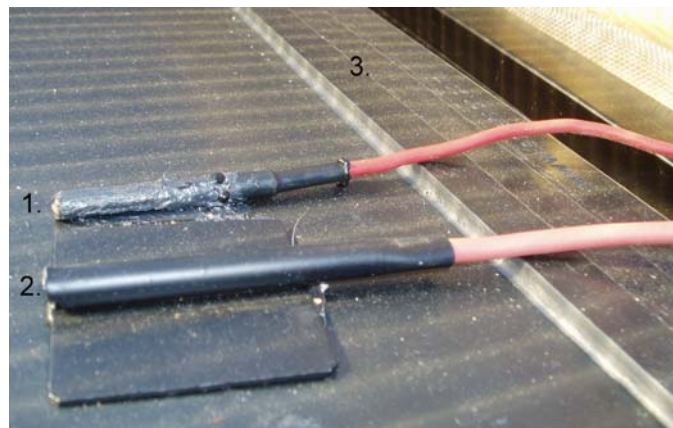
To nye sensorer ble plassert direkte i vannet ved innløp og utløp til absorptorplata (T_i og T_u), så nært manifolden som mulig. Plasseringen tilsvarer punkt G og H i figur 5.3.

Disse er av type DA-017 PT100/2528 A fra LabFacility, og vises i figur 5.5 (c) [36].

Solfangertemperaturen

For å måle temperaturen på solfangeren ble det plassert en sensor direkte på absorptorplata (T_f). Den ble dekt og festa med svart Locktite, ca 4 cm ned fra toppen av absorptorplata og ca 20 cm fra høyre kant. Dette er rett ved siden av sensoren til styreren, og vises i figur 5.6. Plasseringen av denne var ekstra viktig fordi målet med oppgava var å finne ut om denne temperaturen kunne brukes for å bestemme energiutbyttet.

Denne sensoren er av samme type som tanksensorene.



Figur 5.6: Plassering av sensoren på solfangeren. 1) Sensoren som måler temperaturen som logges. 2) Sensoren som er koblet til styreren. 3) Øverste del av absorptorplata.

5.2.2 Pyranometeret

Solinnstrålingen (I) er målt med et pyranometeret fra SolData, med typenummer 485 HDX. Det består av en liten solcelle-brikke med en glasskuppel over. Når solinnstrålingen øker, øker også spenningen over solcella, og denne registreres. Ved hjelp av en omregningsfaktor beregnes solinnstrålingen i W/m^2 . Pyranometeret er plassert på taket slik at det har samme vinkler som solfangerne i forhold til sola.

Sensor-type	Usikkerhet
Temperatursensor PT-100 type B	$\Delta T = \pm(0,3 + 0,005T)^{\circ}C$
Temperatursensor PT-100 type 1/3 B	$\Delta T = \pm(0,1 + 0,0017T)^{\circ}C$
Temperatursensor PT-100 type A	$\Delta T = \pm(0,15 + 0,002T)^{\circ}C$
Temperatursensor, differanse	$\Delta T = \pm 0,005^{\circ}C$
Pyranometer	$3\% \Rightarrow \Delta I = \pm 0,03I$
Strømningshastighetsmåler	$0,5\% \Rightarrow \Delta \dot{m} = \pm 0,005\dot{m}$

Tabell 5.2: Usikkerheten til de ulike sensorene.

5.2.3 Strømningshastighetsmåleren

Strømningshastigheten (\dot{m}) er målt med en elektronisk måler, MP115 fra Valmet. Signalet fra denne er et pulstog med en frekvens som er proporsjonal med strømningshastigheten til vannet. Måleren er plassert loddrett etter pumpe og ventil i røret der vannet går ut fra tanken.

5.2.4 Usikkerhet i målingene

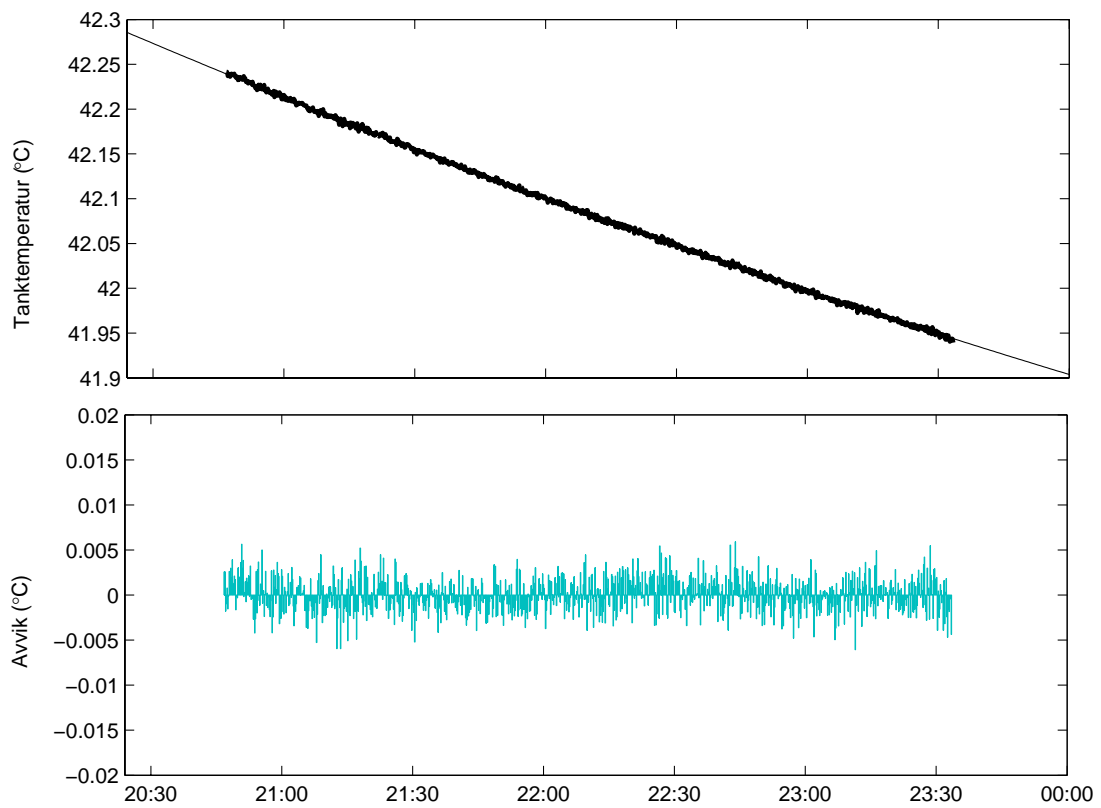
I enhver måling er det flere kilder til usikkerhet, og disse er ofte vanskelige å bestemme. Ved hjelp av kalibrering kan man fjerne de systematiske feilene som ligger i måleutstyr og oppkobling. For de tilfeldige feilene som bidrar til usikkerhet fra en måling til en annen, er det oppgitt en verdi fra produsent.

Et spesielt tilfelle er når verdier fra en sensor sammenlignes med verdier fra den samme sensoren rett før eller rett etter. Figur 5.7 viser øverst middeltemperaturen i tanken når anlegget står stille, og nederst avviket fra en glatt kurve gjennom disse. Vi ser at så lenge forholdene rundt er de samme, vil den tilfeldige feilen falle bort. Det er viktig når vi benytter den kalorimetrisk metode på små temperaturforskjeller i tanken.

Usikkerhetene for de ulike sensorene finnes i tabell 5.2.

5.3 Loggeutstyr

Utstyr fra National Instruments ble brukt for å registrere verdiene fra sensorene. Dette bestod av koblingsbrett, DAQ (Data Acquisition)-kort installert i en PC og software for å lese av verdiene. Hver sensor kobles til en kanal på koblingsbrettet, og kortene registrerer spenningen over disse. PT100-sensorene, der det er resistansen som varierer, må



Figur 5.7: Temperaturutvikling i tanken når anlegget ikke er i drift. Det nederste plottet viser hvordan temperaturene avviker fra en glatt kurve, og gir oss dermed en usikkerheten i differansemålinger med samme sensor på samme sted på $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$. Data fra 21/7-04.

derfor kobles til en spenningskilde. Et NI-4351-kort i kombinasjon med et TBX-68T-brett gir tilgang på en eksitasjonsstrøm på 0,1 mA (alternativt 25 μ A for større motstander). Eksitasjonsstrømmen og alle temperatursensorene ble koblet i serie.

NI-4351-kortet leser maksimalt 60 ganger per sekund, og kan derfor ikke brukes for å lese frekvensen fra strømningshastighetsmåleren, som er på typisk 500 Hz. Et PC-6013-kort med counter-muligheter for enklere lesing av slike signaler ble testet ut. På grunn av dårlig samsvar mellom DAQ-kortet og CB-68-koblingsbrettet, fungerte kortet dårlig. Løsningen ble å lese signalet analogt på et tredje kort, PC-6034E, i kombinasjon med koblingsbrettet CB-68LP. Selv om counter-funksjonen på dette kortet ble testet senere, er den analoge løsningen beholdt.

For å lese informasjonen fra sensorene, beregne de faktiske verdiene og skrive disse til fil ble LabVIEW versjon 6.1 benyttet. LabVIEW er en programvare fra National Instruments [37] der man programmerer målealgoritmene visuelt. Selve programmet er utarbeidet i samarbeid med medstudenter [29][38]. Omregningsligningene og kalibreringer er lagt inn i programmet, og data skrives ut i rent tekst-format; én fil med rådata, det vil si spenningen som måles, og én fil med de endelige og kalibrerte verdiene.

Kapittel 6

Gjennomføring av forsøkene

I dette kapitlet forklares forsøkene. Her presenteres forberedelsene som er gjort utover selve oppbyggingen av oppsettet og et tilleggseksperiment som ble gjennomført for å fastsette tapene i de ulike delene av anlegget. I kapittel 6.3 presenteres de ulike sammenhengene som er blitt studert, og i 6.5 de endelige ligningene for å kunne sammenligne varmestrømmetoden og den kalorimetriske metoden.

6.1 Kalibrering

Sensorene som ble brukt i forsøket måtte først kalibreres. Å kalibrere innebærer å teste logge-utstyret, og finne en omregningsfaktor som eliminerer systematiske feil og sørger for at riktige verdier logges. Kalibreringsarbeidet ble gjort i samarbeid med andre hovedfagsstudenter i flere omganger, og presenteres i Tillegg C.

6.1.1 Temperatursensorene

Det første praktiske arbeidet gikk ut på å kalibrere temperatursensorene. Fra produsent er det oppgitt en faktor for å regne om fra spenningen som måles over sensorene til temperaturen på sensoren. Denne omregningen må vanligvis justeres noe når oppsettet er ferdig montert, fordi oppkoblingen og lengden på ledningene påvirker spenningen som måles. Siden resistansen endres så lite per °C, vil en ledning med indre resistans på for eksempel 0,3 Ω øke den avleste verdien med 0,8 °C. Sensorene ble koblet til koblingsbrettet ved hjelp av tre ledninger, slik at resistansen kun fra den ene ledningen påvirker spenningen som måles [34]. Sensorene ble først koblet til hver sin kanal på brettet, og med ledningslengde tilsvarende

Kanal	Symbol	Sensor	Kalibrering	Etterkalibrering
1-2 (3)	I	Innstråling	$0,975x-0,853$	$0,88x-7,3$
1-6 (6)	T_a	Temp. ute	$1,070x-5,523$	$1,02x-8,44$
1-7 (7)	T_l	Temp. inne	$0,9953x-1,574$	
1-8 (8)	$T_{t,t}$	Temp. tank, topp	$1,008x-2,008$	
1-9 (9)	$T_{t,m}$	Temp. tank, middel	$1,013x-2,291$	
1-10 (10)	$T_{t,b}$	Temp. tank, bunn	$1,004x-2,108$	
1-5 (11)	T_i	Temp. innløp	$0,9944x-2,0132$	
1-12 (12)	T_u	Temp. utløp	$0,9931x-2,3472$	
1-11 (13)	T_f	Temp. fanger	$1,001x-1,8580$	
2-5 (17)	\dot{m}	Strømningshastighet		

Tabell 6.1: Oversikt over sensorene med kalibreringer. Første tall i kanal-nummer angir kortet, det neste kanalen. Tallet i parentes henviser til kolonnennummeret i loggefilene. De kolonnene som mangler inneholder data om størrelser som ikke er studert i denne oppgava. I tabellen står x for verdien i W/m^2 eller $^{\circ}C$ beregnet ut ifra verdier oppgitt av produsent.

det som trengtes i det endelige oppsettet. De ble sammen med et kvikksølvtermometer av typen TG Labortherm-N Skalenwert 0.1 K (0-100) $^{\circ}C$ plassert i et varmereservoar med ca 1 liter kokende vann, beskyttet fra direkte kontakt med vannet. Verdien på termometeret ble lest av manuelt med en usikkerhet på $\pm 0,05$ $^{\circ}C$, mens temperaturen på sensorene ble lest av i LabVIEW-programmet. Ved hjelp av vann og is ble det kokende vannet kjølt ned, og stabiliserte temperaturer registrert med intervall på ca 10 $^{\circ}C$, ned til 0 $^{\circ}C$ i en blanding av vann og is.

Verdiene for hver sensor ble lagt inn i en excel-fil, og plottet som x-akse med termometer-temperaturen som y-akse. En lineær tilnærming ble funnet ved hjelp av minste kvadraters metode, og er vist i tabell 6.1. Stigningstall og konstantledd ble lagt inn i LabVIEW-programmet, slik at det er de ferdig-kalibrerte temperaturene som vises og logges. Sensoren som måler ute-temperaturen ble kalibrert i etterkant, og ble logget med gammel kalibrering. Disse verdiene må derfor regnes tilbake til verdien gitt uten kalibrering, for så å bestemmes med de nye kalibreringskoeffisientene.

6.1.2 Pyranometeret

Pyranometeret ble kalibrert både våren 2003 og 2004 mot et Kipp-Zonen-pyranometer, lånt på undervisningslaben. Med 2004-kalibreringen ble det registrert solinnstråling på

over 1200 W/m^2 , så det ble klart at kalibreringen ikke kunne være riktig. Mest sannsynlig skyldtes det at referanse-pyranometeret ikke var blitt kalibrert om igjen på mange år. Kalibreringen fra 2003 ble lagt inn i LabVIEW-programmet. I august ble det investert i to nye pyranometer med kalibreringsrapporter. Disse ble plassert på taket sammen med det gamle, og verdiene av solinnstrålingen registrert kontinuerlig i ca en uke. Uti fra disse dataene ble det beregnet en ny kalibreringsfaktor. Innstrålingsverdiene må justeres i forhold til denne nye kalibreringen på samme måte som ute-temperaturen. Dette er forklart i kapittel 6.1.1.

6.2 Kjøring

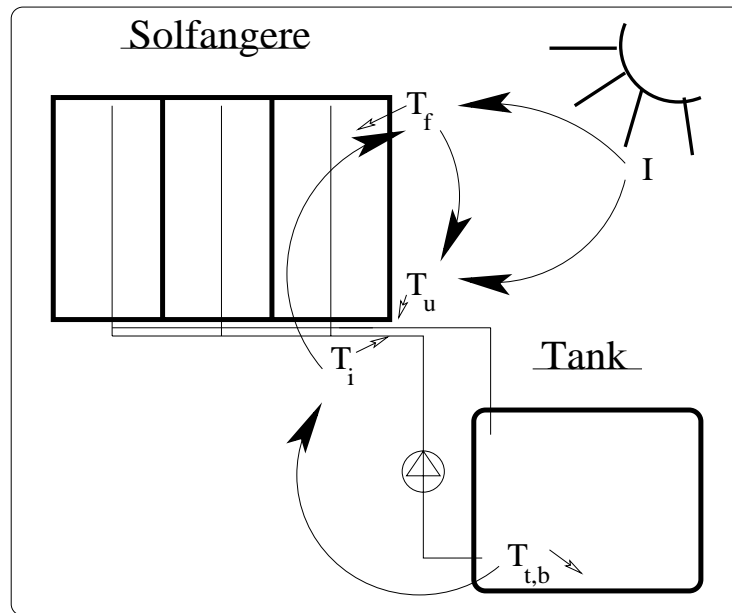
Det ble gjort målinger på solfangeranlegget hele våren og sommeren 2004. Men i denne oppgaven er det fokusert på perioden etter 20/7, for det var først da alle sensorene og delene i oppsettet var på plass.

Siden det er montert en styrer til anlegget, kunne det i prinsippet gå kontinuerlig med logging til enhver tid. Den ene ulempen med dette er at det ville gitt et utrolig stort datamateriale å forholde seg til. Den andre er problemet med at det ikke er noe forbruk av varmtvannet i tanken. Det fører til at etter to dager med fint vær vil tanken nå en maksimumstemperatur på ca $70 \text{ }^\circ\text{C}$, og utbyttet fra anlegget være minimalt. Derfor er vannet innimellom skiftet ut manuelt. Av både praktiske årsaker og for å få varierte data er dette gjort noen ganger etter to dager, andre ganger sjeldnere. I perioder med dårlig vær har det også hendt at anlegget har vært frakoblet styrer og strøm.

Ved hjelp av den manuelt kontrollerte ventilen kan strømningshastigheten stilles inn til ønsket verdi. Det fleste av målingene er gjort med $\dot{m} = 280 \text{ l/h}$, som tilsvarer $\dot{m}_a = 1,0 \text{ l}/(\text{min m}^2)$. Det er den verdien som anbefales av solfangerprodusent. Til sammenligning er det også utført en del målinger med $\dot{m} \simeq 420 \text{ l/h}$, altså $\dot{m}_a \simeq 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$.

6.3 Bearbeiding av data

Tekstfilene med målingsdata ble bearbeidet videre i Matlab versjon 6.5 fra The MathWorks, Inc [39]. Det ble plottet innstråling, temperaturutvikling i tank og ulike temperaturredifferanser for å studere hvordan anlegget fungerer. I tillegg ble Matlab brukt for å beregne energitilførsel og sammenhenger mellom de ulike temperaturene. Ett av Matlab-programmene er lagt ved i Tillegg B.



Figur 6.1: Skisse av solfangeranlegget med de temperaturene som logges og inngår i ulike energiligninger eller kan tenkes å påvirke energiutbyttet. De buede pilene viser hvordan de ulike størrelsene påvirker hverandre, og er utgangspunkt for en del av sammenhengene som skal studeres.

Målet med dette arbeidet er å komme fram til en metode for beregning av energiutbyttet til en solfanger, uten bruk av avansert måleutstyr. Da er samspillet mellom energiutbyttet, solinnstrålingen og de ulike temperaturene viktig. Figur 6.1 viser plasseringen av temperatursensorene, og hvordan disse og solinnstrålingen påvirker hverandre. Med utgangspunkt i ligningene for energiutbytte og de skisserte sammenhengene, ble det satt opp følgende hypoteser:

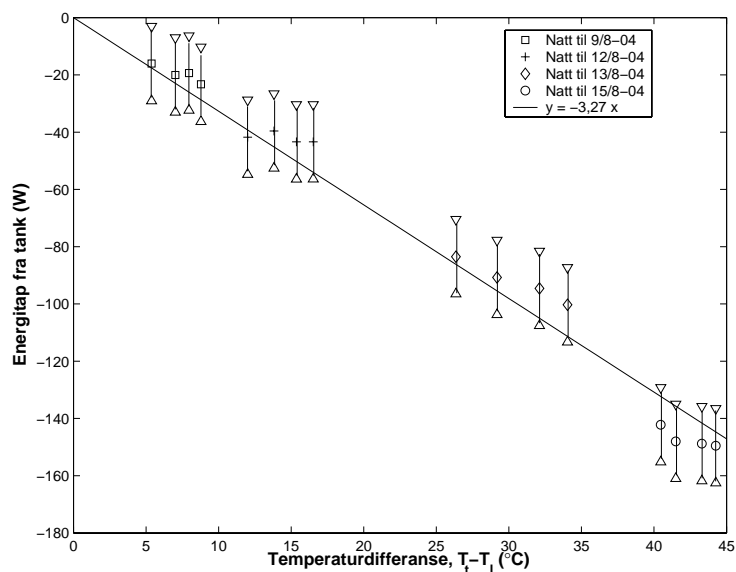
1. Energiutbyttet beregnet med den kalorimetriske metoden og varmestrømmetoden vil være det samme, når det tas hensyn til korreksjonene i avsnitt 4.4.3.
2. Strømningshastigheten i solfangeranlegget i drift vil være konstant.
3. $T_{t,b}$ kan erstatte T_i .
4. T_f kan uttrykkes som funksjon av T_i og I .
5. T_u kan uttrykkes som funksjon av T_f og I .
6. Det er en lineær sammenheng mellom $T_f - T_{t,b} \simeq T_f - T_i$ og energiutbyttet.

6.4 Varmetap i anlegget

6.4.1 Fra tanken

Hvor mye varme tanken taper avhenger av mengden isolasjon og av omgivelsestemperaturen. Tabell 5.1 viser oversikt over hvordan tanken er isolert. Med de gitte flatene og $\lambda = 0,047 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ for mineralull og $\lambda = 0,041 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ for isopor, kommer man fram til en teoretisk tapsverdi på $1,23 \text{ W}/^\circ\text{C}$, uten å ta hensyn til økt bidrag fra hjørnene. Med en maksimal temperaturdifferanse mellom vannet i tanken og omgivelsene på $50 \text{ }^\circ\text{C}$ gir det et tap på 60 W . Målinger av tapet fra tanken gir verdier som er ca tre ganger så høye. Disse verdiene er plottet mot differansen mellom tanktemperaturen og labtemperaturen i figur 6.2. Det er valgt en lineær tilnærming av første orden, der $Q_{t,t}$ er gitt i Wh.

$$Q_{t,t} = 3,27(T_t - T_l)\Delta t \pm 13\Delta t \quad (6.1)$$



Figur 6.2: Energitap fra tanken per sekund som funksjon av differansen mellom middeltemperaturen i tanken og omgivelsestemperaturen. Punktene tilsier at tapet følger en annengradsfunksjon, men en forenkling er valgt. Usikkerheten er funnet fra figuren. Målingene er utført når anlegget var ute av drift natt til 9., 12., 13. og 16. august.



Figur 6.3: Bildet viser hvordan tilleggseksperimentet for å bestemme varmetapet fra rørene ble utført. Innløps- og utløpsrørene ble koblet fra solfangerne, og sammen som i en kortslutning.

6.4.2 Fra rørene

For å måle varmetap og -gevinst i rørene eksperimentelt, ble rørene koblet sammen før solfangermanifolden som vist i figur 6.3. Vann ble pumpet gjennom kretsen med strømningshastighet på 280 l/h.

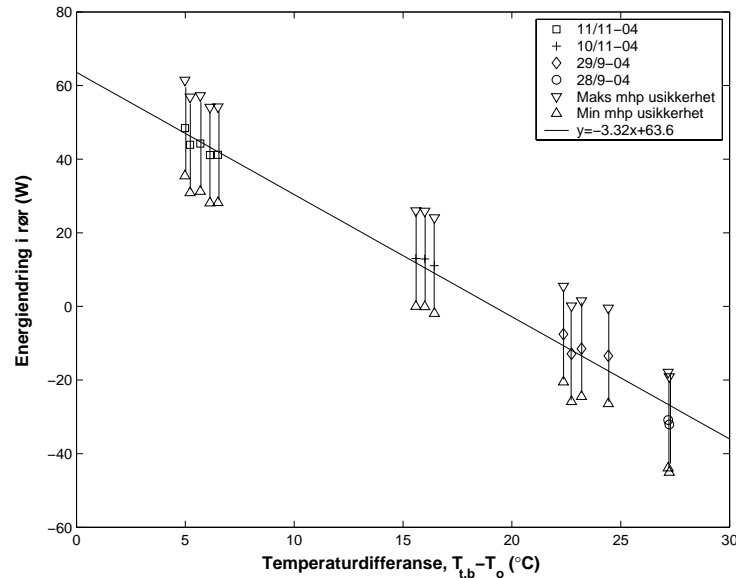
Temperaturrendringen i tanken ble målt, energiendringen beregna, og det eksperimentelt bestemte tapet fra tanken gitt ved ligning 6.1 trukket fra. Disse verdiene er plottet i figur 6.4, som dermed viser energitilførsel fra pumpe og tap fra rør. Der temperaturdifferansen mellom rørene og omgivelsene er null er det ingen varmeutveksling med omgivelsene, og energiendringen skyldes effekten pumpa tilfører (ligning 6.2). Stigningstallet gir verdien for tap fra rør (ligning 6.3).

$$Q_p = 63,6\Delta t \quad (6.2)$$

$$Q_{t,r} = 3,32(T_r - T_o)\Delta t \quad (6.3)$$

der T_r er temperaturen til vannet i rørene. I eksperimentet er $T_r = T_{t,b}$, men når anlegget er

i drift vil den være satt sammen av temperaturen på vannet fra tanken og fra solfangeren, $T_r = 0,5T_{t,b} + 0,5T_u$. T_o er temperaturen til omgivelsene rundt rørene, satt sammen av temperaturen ute og inne, ut ifra hvor stor andel av rørene som befinner seg på utsiden og innsiden av hytta, $T_o = 0,15T_a + 0,85T_l$. Temperaturene har enhet $^{\circ}\text{C}$, Δt enhet timer og Q_p og $Q_{t,r}$ enheten Wh.



Figur 6.4: Energiendring i tanken per sekund på grunn av tap fra rør og tilførsel fra pumpe, som funksjon av temperaturdifferansen mellom vannet som går inn i rørene og omgivelsene. Usikkerheten på ± 13 W er fra bestemmelsen av tapet fra tanken i kapitlet før. Målingene er fra tilleggseksperiment utført 28/9, 29/9, 10/11 og 11/11.

6.5 Energiutbytte fra anlegget

Med utgangspunkt i diskusjonen i kapittel 4.4.3 og tapsvurderingene i det foregående kapitlet, får vi følgende ligninger for energiutbyttet fra testanlegget:

$$Q_{VAR} = Q_{var} - Q_{t,r} + Q_p \quad (6.4)$$

$$= (1,16\dot{m}(T_u - T_i) - 3,32(T_r - T_o) + 63,6)\Delta t \quad (6.5)$$

$$Q_{KAL} = Q_{kal} + Q_{t,t} \quad (6.6)$$

$$= 549\Delta T_{\bar{t}} + 3,27(T_{\bar{t}} - T_l)\Delta t \quad (6.7)$$

Her er det satt inn de konstante verdiene som er $C_p=1,16 \text{ Wh}/(1 \text{ }^\circ\text{C})$ for vann og $\sum_i(m_i C_i)=549 \text{ Wh}/^\circ\text{C}$ for tanken. Δt er oppgitt i antall timer.

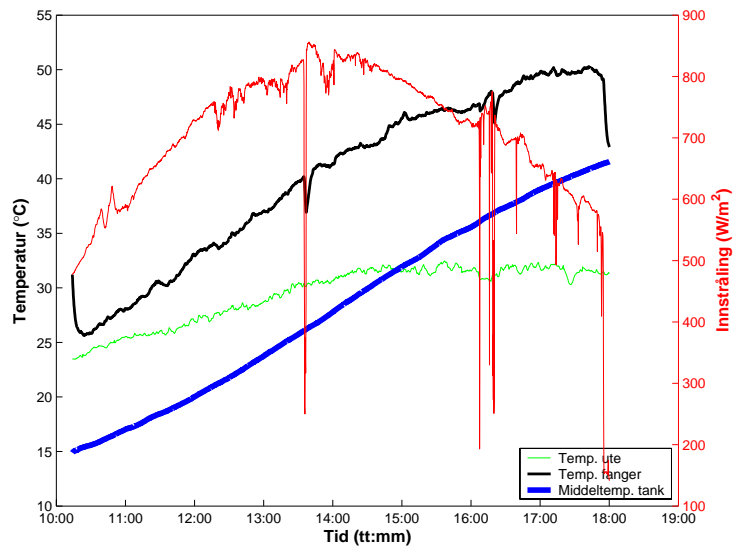
Kapittel 7

Resultater

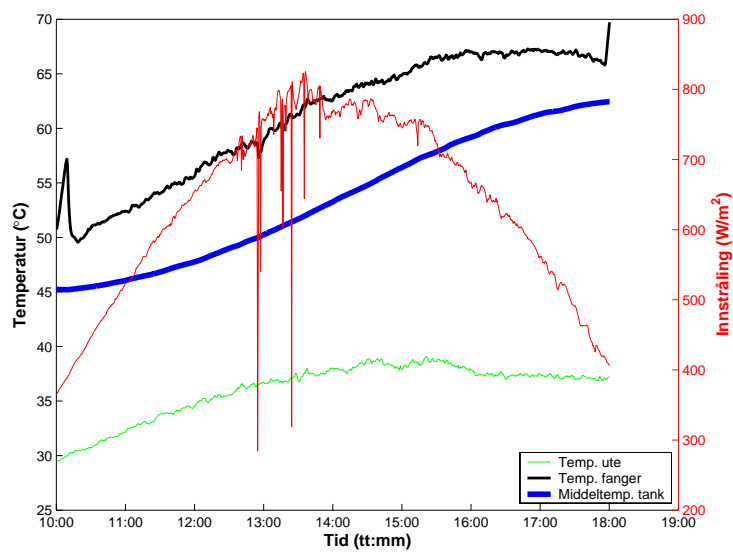
I dette kapitlet presenteres resultatene av forsøkene som er gjort. De første figurene er ment for å vise hvordan noen av størrelsene endrer seg i løpet av en dag. Resten av kapitlet tar for seg de ulike sammenhengene som er studert. Disse ble satt opp som hypoteser i kapittel 6.3. Spesielt fokus er lagt på temperaturen nederst i tanken og på solfanger-temperaturen. Avslutningsvis presenteres den nye metoden for bestemmelse av energiutbyttet. Supplerende grafer er lagt ved i Tillegg D.

7.1 Målinger

Fra datamaterialet som består av målinger fra ca 40 dager og en del netter der anlegget har vært drevet av styreren, er det i første omgang valgt ut to dager med god solinnstråling. Begge dagene er strømningshastigheten på $1,0 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, men den ene dagen er starttemperaturen lav og den andre dagen høy. Solinnstråling, middeltemperaturen i tanken og temperaturen på solfangerne er plottet sammen i figur 7.1. Tilsvarende er det valgt ut to dager med $\dot{m}_a = 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, men disse er ikke plottet.



(a) 21/7-04



(b) 6/8-04

Figur 7.1: Solinnstrålingen, temperaturen ute og på solfangeren og middeltemperaturen i tanken for to ulike dager. (a) Lav starttemperatur i varmelageret ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Det plutselige fallet i solfangertemperaturen ca kl 10.15 skyldes at anlegget ble slått på, og vann fra tanken kjøler plata. Fallet ca kl 18 skyldes at det kom skygge på anlegget. (b) Høy starttemperatur i varmelageret ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$).

7.2 Beregning av energiutbytte

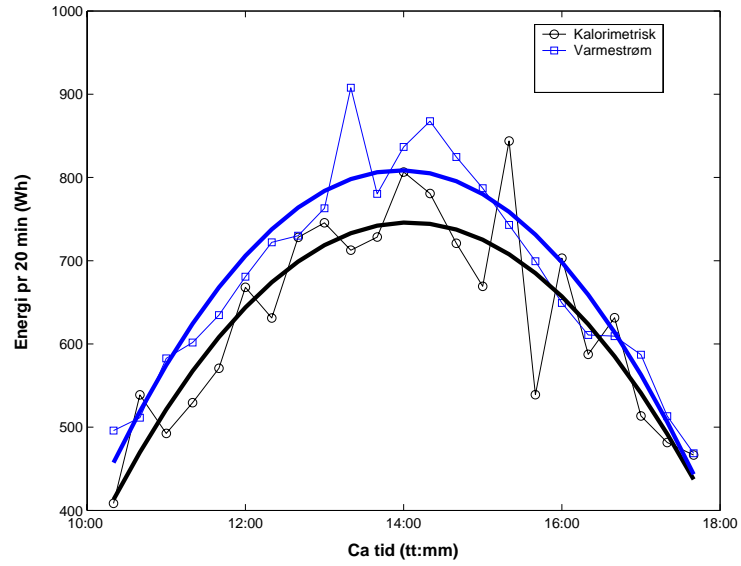
I kapittel 6.5 er to kjente metoder for å beregne energiutbyttet satt opp slik at verdiene kan sammenlignes. Energiutbyttet for de fire utvalgte dagene finnes i tabell 7.1. Ved alle disse fire tilfellene gir varmemestrømmetoden høyere verdier. Største avviket er på 5%, for 9/8. Strømningshastigheten ser ikke ut til å spille noen stor rolle på utbyttet.

Dag	Karakteristikk	Varmestrøm (kWh)	Kalorimetrisk (kWh)
21/7	$\dot{m}= 1,0 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, $T_{start} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	8,86	8,54
9/8	$\dot{m}= 1,0 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, $T_{start} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$	6,87	6,54
10/9	$\dot{m}= 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, $T_{start} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	6,78	6,61
16/9	$\dot{m}= 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$, $T_{start} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	8,38	8,29

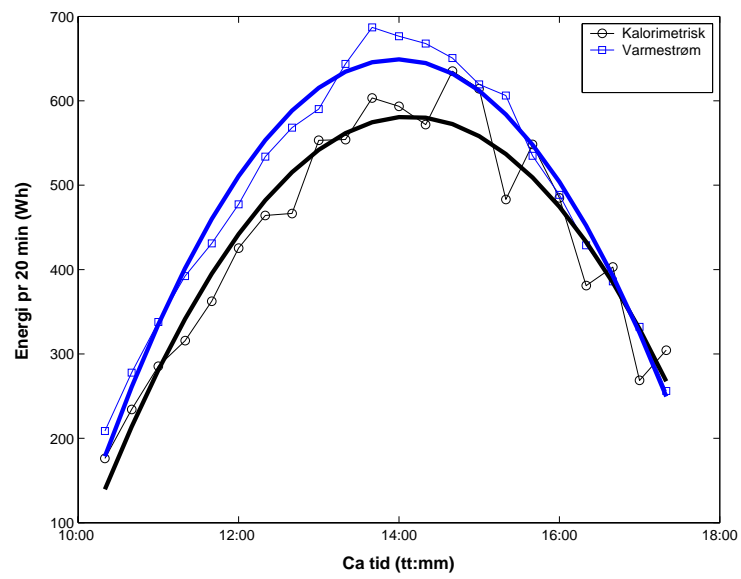
Tabell 7.1: Energiutbyttet i tidsrommet 12-16 for ulike dager er beregnet med forskjellige metoder, utifra ligningene 6.5 og 6.7 på side 45.

For disse fire timers intervallene avviker utbyttet beregnet med de to metodene med mindre enn 5%. Det er interessant å se på om de utvikler seg likt i løpet av en hel dag. Energiutbyttet for 20 minutts perioder, og tilnæringskurver for disse, er plottet i figur 7.2.

Enda tydeligere ser man utviklingen av energiutbyttet i figur 7.3, som viser den akkumulerte energien beregnet for hvert 20.minutt med de ulike metodene. I tillegg er det plottet en linje med verdier 10% lavere enn de varmemestrømmetoden gir. Disse verdiene faller sammen med verdiene gitt ved den kalorimetriske metoden. Det ser altså ut som at avviket på 5% ikke er representativt når vi ser på en lengre tidsperiode.

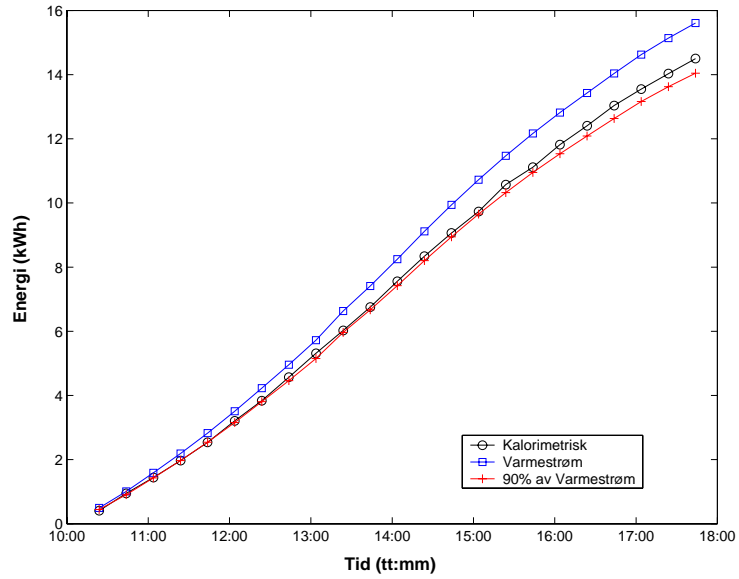


(a) 21/7-04

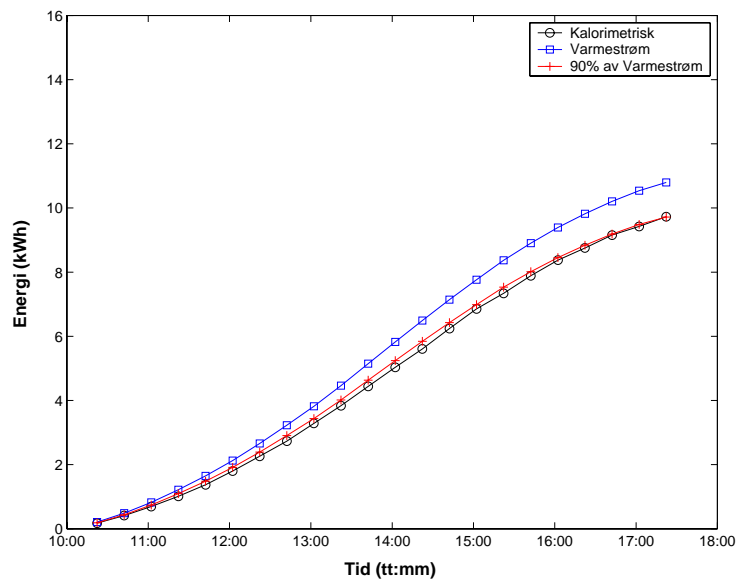


(b) 9/8-04

Figur 7.2: Energiutbyttet for 20 minutters intervall.

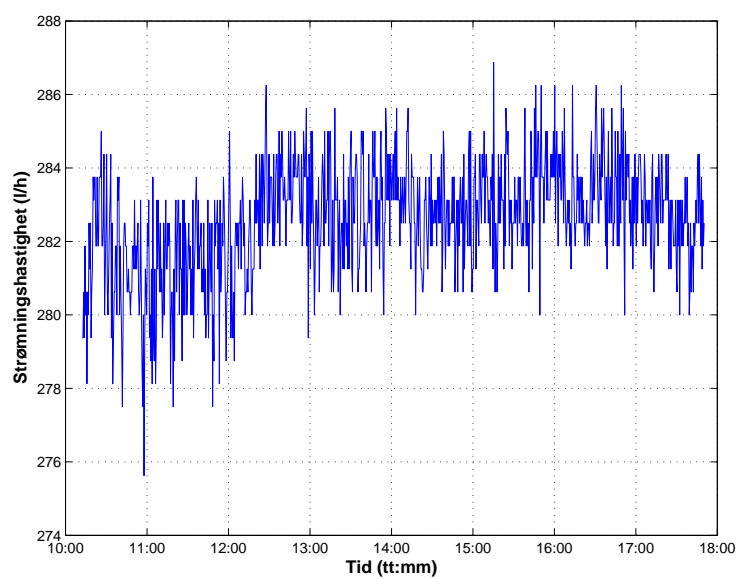
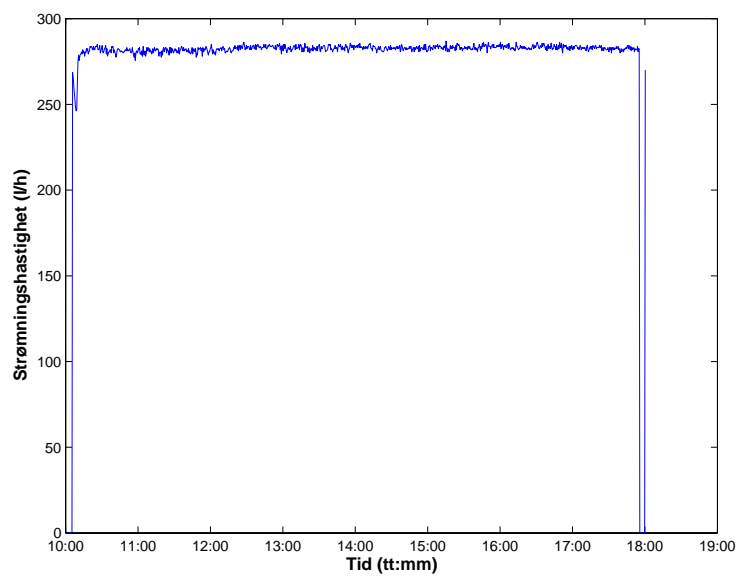


(a) 21/7-04

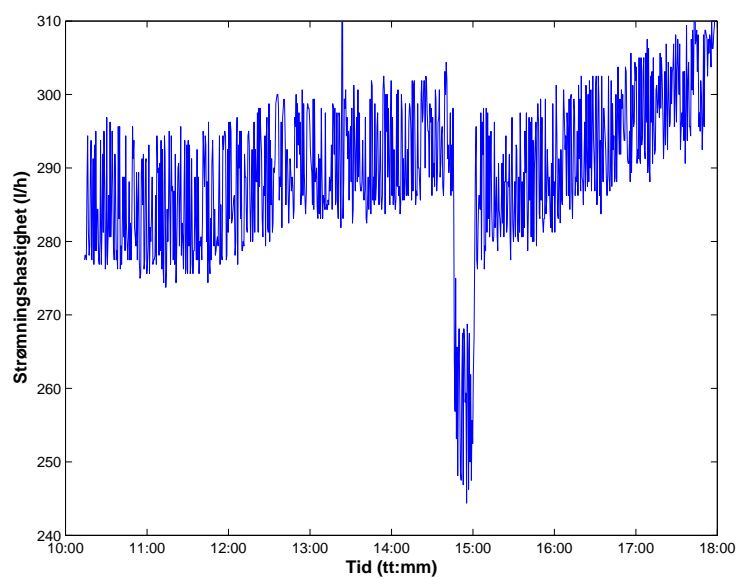
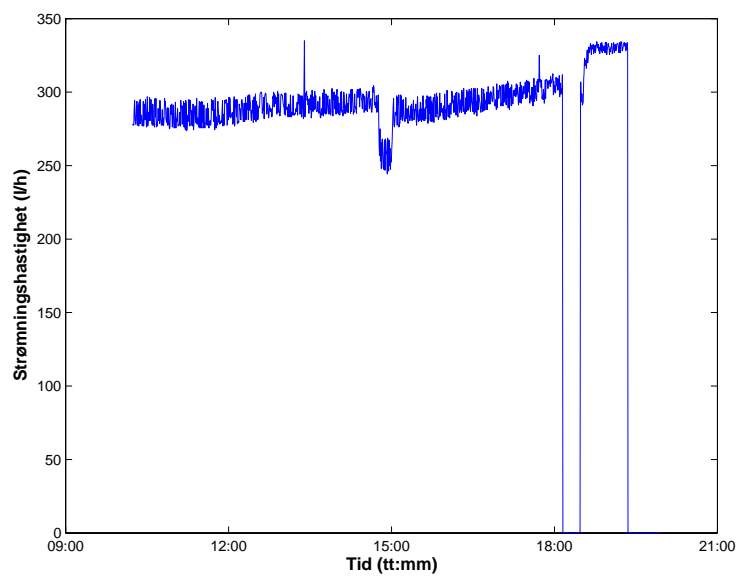


(b) 9/8-04

Figur 7.3: Den akkumulerte energien for 20 minutters intervall.



Figur 7.4: Strømningshastigheten 9/8-04.



Figur 7.5: Strømningshastigheten 21/7-04.

7.3 Strømningshastigheten

Figur 7.4 viser hvordan strømningshastigheten endrer seg på en dag. Man kan se at målin-
gene er veldig hakkete, innenfor ca ± 3 l/h. Dette skyldes dels måleapparatets usikkerhet,
dels strømningsveiens kompleksitet med overgang fra rør til trange kanaler. To dager skiller
seg ut hva \pm -verdi angår, og det er 20/7-04 og 21/7-04. Strømningshastigheten for en av
disse dagene er vist i figur 7.5, og her kan vi se at verdiene varierer med ± 10 l/h.

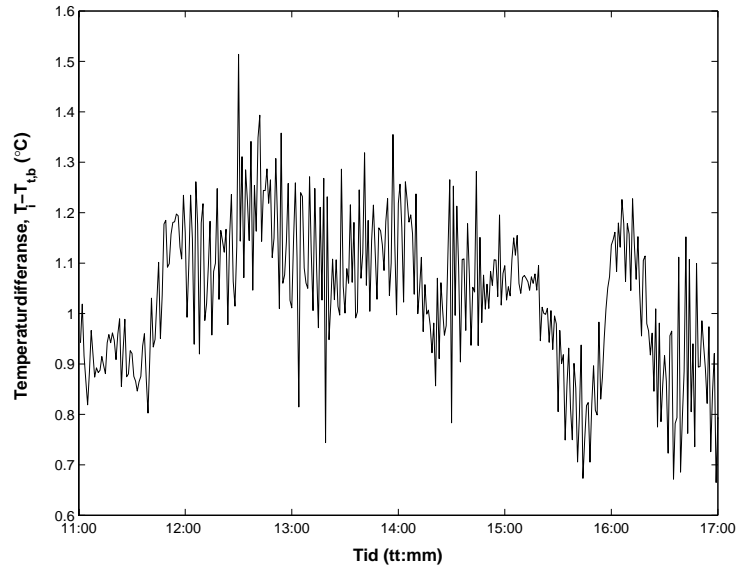
Ikke alle dager er strømningshastigheten like stabil som den vist i figur 7.4. Datamateri-
alet kan deles opp i tre kategorier med følgende strømningshastighets-karakteristikker:

1. De dagene der vannet har blitt byttet, altså når starttemperaturen på vannet er ca 15
°C, øker strømningshastigheten med bortimot 20 l/h. Dette har sammenheng med at
vannet utvider seg. Det blir lettere per volumenhet, og krever dermed mindre energi
for å løftes opp til taket. Dette stemmer godt med at på slike dager er det oppimot
fem liter overskuddsvann.
2. Systemet med relativt varmt vann ($T_i \geq 50^\circ\text{C}$) vil ha en strømningshastighet på opp
imot 8 l/h lavere de første $1-1\frac{1}{2}$ timene enn resten av dagen.
3. Når vannet holder 25-50 °C vil strømningshastigheten være jevn, innenfor de ± 3
l/h, .

7.4 Temperaturutvikling i anlegget

Differansen mellom T_i og $T_{t,b}$ er studert, og ligger på mellom $-0,4$ °C og $1,6$ °C. Høy verdi
inntreffer når vanntemperaturen er lav, og lav eller negativ verdi inntreffer når vanntem-
peraturen er høy. Denne utviklingen stemmer bra med tapsvurderingene i avsnitt 6.4.2.
Den eksperimentelt beregna energien fra pumpa vil øke temperaturen i vannet med $0,2$
°C på veien mellom tanken og innløpet på solfangeren, når $\dot{m}_a = 1,0$ l/(min m²). I tillegg
avtar eller øker temperaturen som følge av varmeveksling med omgivelsene, og mulig noe
friksjon i rør og ventil. Man ser tydelig tendensene beskrevet ovenfor, men fluktuasjonene
og avvikene er store. Et eksempel fra en dag med lav tanktemperatur er vist i figur 7.6.

Dette er tatt med fordi det av flere grunner vil være praktisk å kunne erstatte T_i med
 $T_{t,b}$. For det første er det enklere å plassere og eventuelt erstatte en sensor i tanken enn i
innløpsrøret. For det andre er det allerede plassert en sensor nederst i tanken, som sender
signaler til styreren.



Figur 7.6: Temperaturdifferansen mellom innløpet og vannet i bunnen av tanken. Data fra 21/7-04.

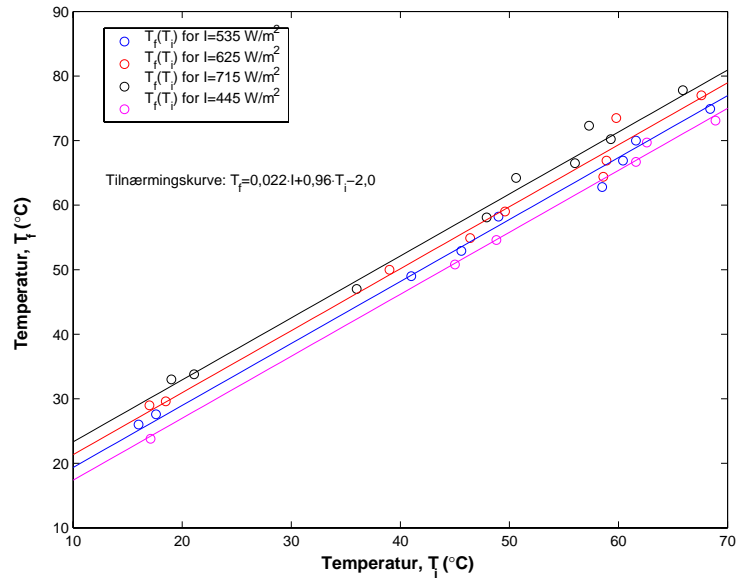
For fem dager med fint vær ble verdier for T_i , T_u og T_f notert for verdier av $I = 445, 535, 625, 715 \text{ W/m}^2$. Dermed kunne

$$T_f(T_i, I) = k_{I,f}I + k_{T_i}T_i + k_f \quad (7.1)$$

og

$$T_u(T_f, I) = k_{I,u}I + k_{T_f}T_f + k_u \quad (7.2)$$

bestemmes. For hver I -verdi ble gjennomsnittsverdier av $k_{I,f}I - k_f = k_{T_i}T_i$ beregna for ulike k_{T_i} -verdier. Ved å ta differansen mellom to slike elimineres k_f , og tilsvarende $k_{I,f}$ -verdier funnet. På grunn av usikkerheter ga en del av koeffisient-verdiene like resultat. Middelerdier ble valgt, og tilnærmingen gitt ved ligning 7.3. Kurver for disse er vist i figur 7.7. Tilsvarende ble gjort for $T_u(T_f, I)$. Her var ikke mønsteret så tydelig, fordi I -avhengigheten er mye mindre. Det var ikke mulig å bestemme noen $k_{I,u}$ -verdi. Figur 7.8 viser T_u som funksjon av T_f , og tilnærmingen er gitt ved ligning 7.4. Alle temperaturene har enheten grad celsius.

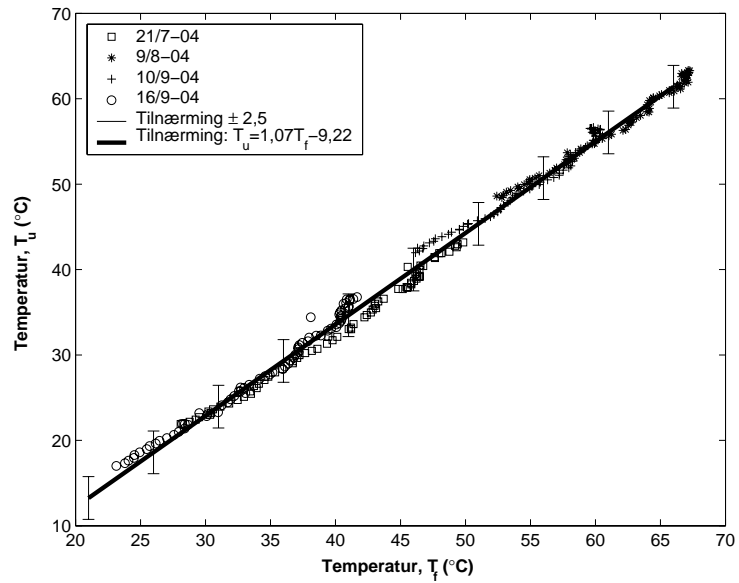


Figur 7.7: Solfangertemperaturen som funksjon av solinnstrålingen og innløpstemperaturen. Data for gitt I-verdi for fem ulike dager.

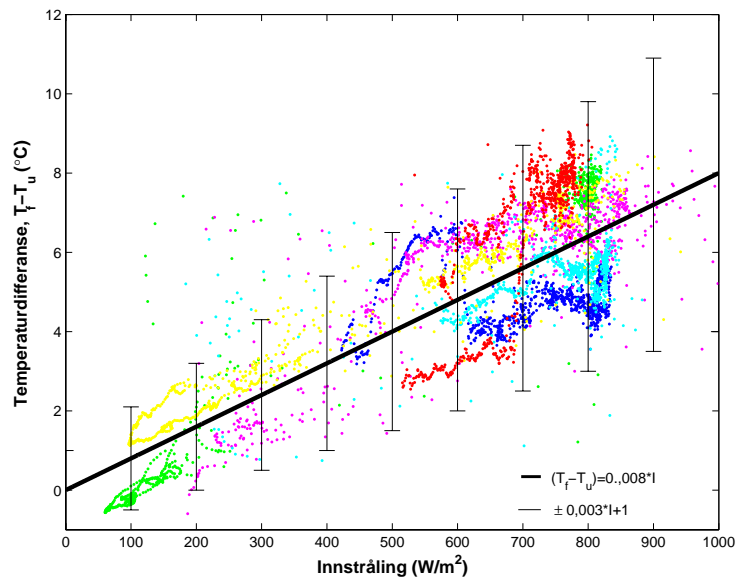
$$T_f(T_i, I) = (0,022 \pm 0,002)I + (0,96 \pm 0,02)T_i - 2 \quad (7.3)$$

$$T_u(T_f) = (1,07)T_f - 9,2 \pm 2,5 \quad (7.4)$$

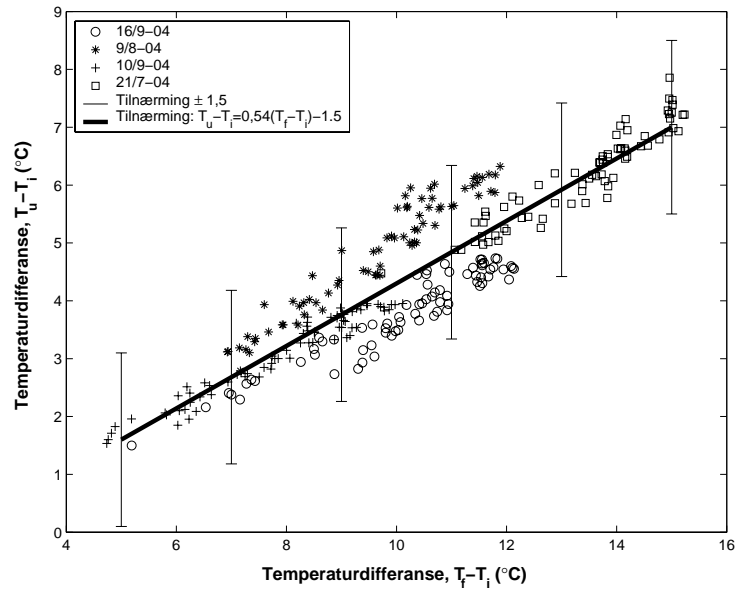
Ved å se på differansen mellom T_f og T_u kan man se den svake I-avhengigheten. Differansen mellom disse for de fleste dagene er derfor plottet som funksjon av innstrålingen i figur 7.9.



Figur 7.8: Utløpstemperaturen som funksjon av solfangertemperaturen. Det er tegn til en liten I-avhengighet. Usikkerheten er bestemt ut ifra grafen, slik at størstedelen av målingene faller innenfor.

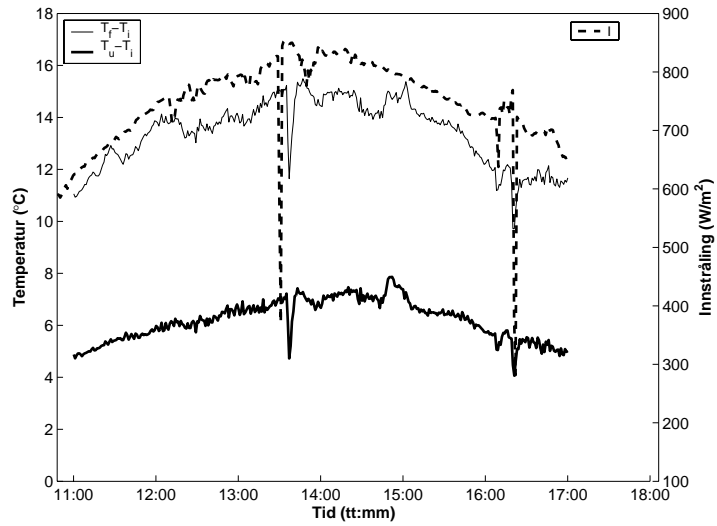


Figur 7.9: $T_f - T_u$ som funksjon av innstrålingen I for seks ulike dager. Usikkerheten er bestemt ut ifra grafen, slik at størstedelen av målingene faller innenfor.

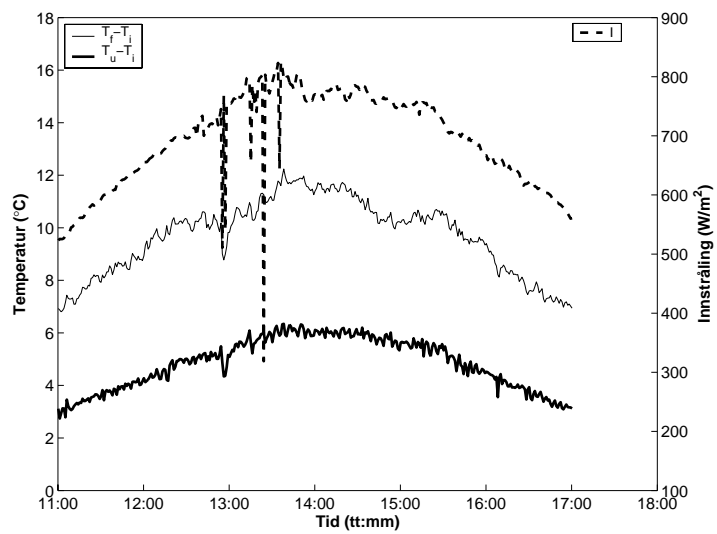


Figur 7.10: Temperaturdifferansen mellom utløp og innløp av solfangeren, som funksjon av temperaturdifferansen mellom solfangeren og innløpsvannet.

Figur 7.11 viser hvordan temperaturdifferansene mellom solfangeren og innløpsvannet, og mellom utløpsvann og innløpsvann, har likt forløp som solinnstrålingen. Det tyder på en lineær sammenheng mellom T_f og T_u , som allerede er allerede vist i figur 7.8. Figur 7.10 viser den ene temperaturdifferansen som funksjon av den andre. Usikkerheten her er $\pm 1,5$ °C. Disse er altså også lineært avhengige av hverandre, men den relative usikkerheten har økt fra 0,06 til 0,33 for gjennomsnittsverdien. Denne økte usikkerheten ser ut til å ha sammenheng med strømningshastigheten.



(a) 21/7-04

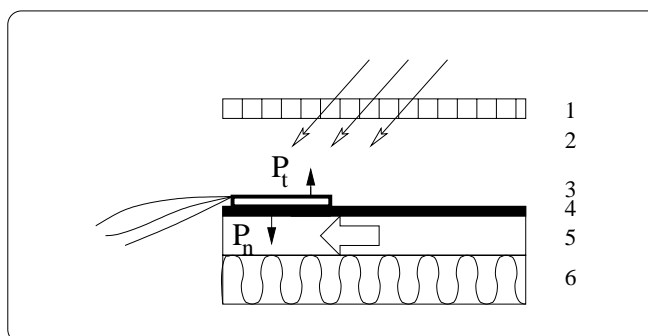


(b) 9/8-04

Figur 7.11: Solinnstrålingen (høyre akse) og temperatordifferansen mellom solfanger og innløpsvann, og mellom utløpsvann og innløpsvann (venstre akse).

7.5 Alternativ metode for bestemmelse av energiutbyttet

- 1: Dekkplate
- 2: Solinnstråling
- 3: Sensor med svart overflate og limlag
- 4: Absorbatoroverflate, 1 mm
- 5: Vannkanal
- 6: Isolasjon



Figur 7.12: Solfangeren med sensor for måling av temperaturen på absorbatorplate. P_t er effekten som tapes fra solfangeren, og P_n er effekten som tilføres vannet.

I kapittel 4.5 er varmeoverføringen i absorbatorplata forklart. Et problem som oppstår i et måleoppsett er at sensorene selv påvirker temperaturene. Det viser figur 7.12 for sensoren på absorbatorplata. Sensoren, og i dette tilfellet limet den er festa med, vil bidra med ekstra varmemotstand, og vil derfor vise noe høyere temperatur enn plata egentlig har. Både absorbatorplata og limlaget har varmemotstand $k_p = 0,2 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ [40], og tykkelse på $b \simeq 1 \text{ mm}$. Ved å bruke ligning 4.8, sette varmetapet $U_t = 5 \text{ W}/^\circ\text{C}$ og bruke innsamla data finner vi en verdi for T_{pf} . Denne ligger mellom 2 og 6 $^\circ\text{C}$ lavere enn den målte verdien T_p . Siden varmemotstanden i limlaget og absorbatorplata er den samme vil temperaturen på selve overflata være mellom 1 og 3 $^\circ\text{C}$ lavere enn det sensoren måler. Verdien varierer som følge av solinnstrålinga og temperaturdifferansen mellom plata og omgivelsene.

For å regne videre på varmeoverføringen må varmeovergangskoeffisienten h bestemmes. Dette er forsøkt gjort med ligning 4.9, men det gir verdier som svinger mellom 100 og 800 $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. I stedetfor ble den enkle formelen $\dot{Q} = hA(T_s - T_v)$ fra kapittel 3.3 benyttet. T_s er her temperaturen på flata vannet strømmer over, men siden h bestemmes eksperimentelt kan vi anta at feilen vil være liten ved å benytte temperaturen sensoren viser istedenfor. Energiutbyttet Q_{KAL} ble beregnet med den kalorimetriske metoden for perioder på tjue minutter, og det gir oss

$$h = \frac{Q_{KAL}}{A(\overline{T_f} - \overline{T_{t,b}})\Delta t} \quad (7.5)$$

Denne verdien varierer en del for datamaterialet, og det er gjennomgående at forholdet alltid er større mot slutten av dagen. Det er derfor valgt ulike konstanter for tiden før og etter maks solinnstråling, med utgangspunkt i gjennomsnittsverdier. Disse er

$$h_f = \frac{133}{A} \quad (7.6)$$

$$h_e = \frac{148}{A} \quad (7.7)$$

og den nye ligningen

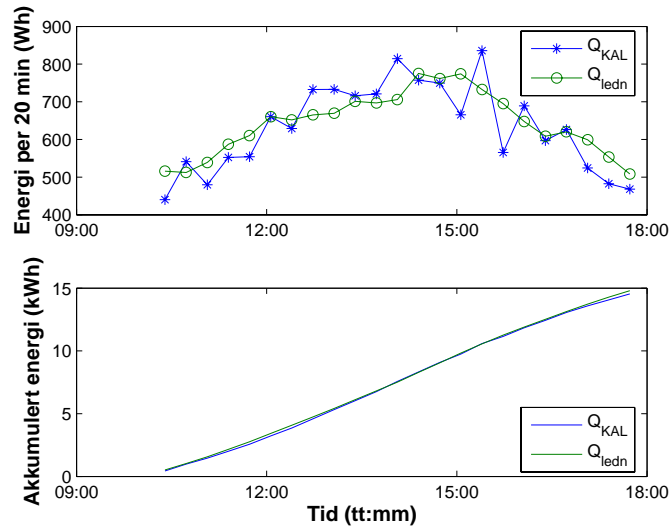
$$Q_{ledn} = h_{f/e} A (\overline{T_f} - \overline{T_{t,b}}) \Delta t \quad (7.8)$$

Energiutbyttet gitt ved ligning 7.8 er sammenlignet med energiutbyttet beregnet ved den kalorimetriske metoden for tjue minutters perioder. Disse gir svært like verdier, og dagsutbyttet er vist i tabell 7.2. Eksempler for noen dager er vist i figurene 7.13 og 7.14.

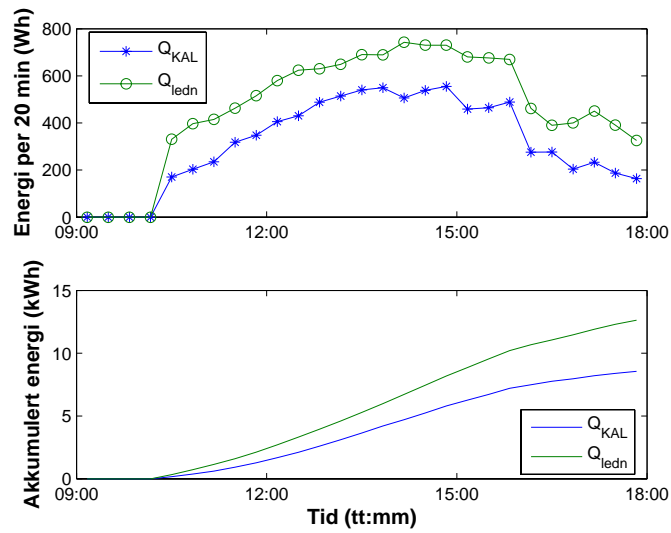
De samme koeffisientene ble brukt for å beregne utbyttet for dagene med $\dot{m}_a = 1,5$ l/(min m²). Da gir denne metoden konsekvent verdier 20% høyere enn verdiene gitt ved den kalorimetriske metoden. Dette er vist i tabell 7.3 og med figur 7.15.

Dato	$T_{\bar{t}}$ kl 9:00	$T_{\bar{t}}$ kl 18:00	Q_{KAL} (kWh)	Q_{ledn} (kWh)	ΔQ (kWh)	Avvik (%)
20/7	38,7	56,9	10,2	10,4	0,2	2
21/7	14,9	41,6	14,5	14,8	0,3	2
27/7	15,9	41,3	13,9	14,0	0,1	1
28/7	42,2	60,4	10,5	11,2	0,7	7
4/8	34,4	34,3	0,1	0,2	0,1	100
5/8	33,7	49,7	6,5	8,0	1,5	23
6/8	48,9	63,4	8,6	12,6	4,0	47
8/8	17,9	44,9	14,4	14,6	0,2	1
9/8	45,3	62,4	9,8	9,6	-0,2	-2
11/8	14,0	37,3	12,6	11,7	-0,9	-7
12/8	37,5	58,1	11,7	10,8	-0,9	-8
13/8	56,0	62,4	4,0	4,4	0,4	10
14/8	59,3	69,7	6,9	9,7	2,8	41
15/8	65,6	70,1	3,4	3,5	0,1	3
16/8	66,1	64,1	0,5	0,4	-0,1	-20
28/8	27,6	29,6	1,0	1,1	0,1	10
29/8	29,6	36,3	3,8	4,2	0,4	11
8/9	50,3	61,3	6,8	10,1	3,3	49
Sum			139,1	151,4	12,3	9

Tabell 7.2: Energiutbyttet i tidsrommet 9-18 for alle dagene beregnet med den kalorimetriske metoden (Q_{KAL}) og den alternative metoden (Q_{ledn}). Utbyttet er summert opp for 20 minutters intervaller, og kun for de intervallene der anlegget har vært i drift hele perioden. Summen av Q_{ledn} er 9% høyere enn summen av Q_{KAL} . De dager der anlegget ikke har vært i drift i tjue minutter av gangen er utelatt.



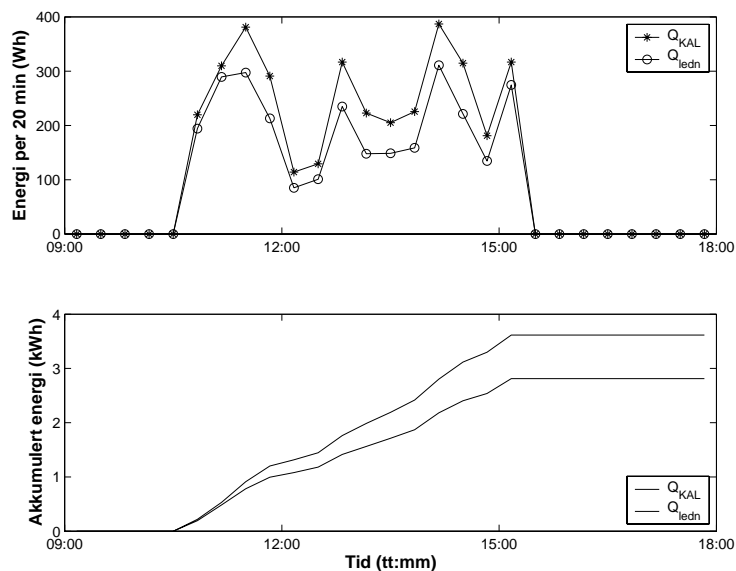
Figur 7.13: Energiutbyttet beregnet utifra h -verdi og temperaturforskjell, sammenlignet med kalorimetrisk metode. Data for 21/7-04.



Figur 7.14: Energiutbyttet beregnet utifra h -verdi og temperaturforskjell, sammenlignet med kalorimetrisk metode. Data for 6/8-04.

Dato	$T_{\bar{t}}$ kl 9:00	$T_{\bar{t}}$ kl 18:00	Q_{KAL} (kWh)	Q_{ledn} (kWh)	ΔQ (kWh)	Avvik (%)
9/9	16,7	40,1	12,9	10,0	-2,9	-22
10/9	39,5	55,3	9,2	7,4	-1,8	-20
16/9	12,9	35,4	12,2	9,8	-2,4	-20
24/9	14,9	23,2	4,6	3,8	-0,8	-17
25/9	22,9	33,0	5,8	4,3	-0,5	-9
26/9	32,1	38,4	3,6	2,8	-0,8	-23
Sum			48,3	38,1	-10,2	-21

Tabell 7.3: Energiutbyttet i tidsrommet 9-18 for dagene med $\dot{m}_a = 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$ beregnet med den kalorimetriske metoden (Q_{KAL}) og den alternative metoden (Q_{ledn}) uten justeringer for strømningshastigheten. Utbyttet er summert opp for 20 minutters intervaller, og kun for de intervallene der anlegget har vært i drift hele perioden. Summen av Q_{ledn} er 21% lavere enn summen av Q_{KAL} .



Figur 7.15: Energiutbyttet beregnet utifra h -verdi og temperaturforskjell, sammenlignet med kalorimetrisk metode. Her er strømningshastigheten $\dot{m}_a = 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$. Data for 26/9-04.

Kapittel 8

Diskusjon

Målet med dette kapitlet er å vurdere det arbeidet som er utført. Først diskuteres de erfaringene som er gjort og mulige forbedringer. Videre kobles resultatene fra forsøkene til teorien og de forventede resultatene, og løsningen av problemstillingen vurderes. Kapitlet avsluttes med en konklusjon.

8.1 Vurdering av forskningsarbeidet

8.1.1 Oppsettet

Målingene har vært utført på et reelt anlegg. Selv om ikke dimensjonene på tank og solfangere er helt realistiske, har alle faktorer som naturlig påvirker anlegget vært til stede. Sola har strålt på anlegget med sitt reelle solspekter, og vindstyrke og temperaturer har variert. Det er hovedfordelene med slike in-situ eksperimenter framfor laboratorietesting eller simuleringer. Men det gir samtidig en stor utfordring med de svært varierende værforholdene. Vanlige standarder for effektivitetsmålinger krever stasjonære forhold, noe som er så godt som umulig å oppnå i et reelt anlegg. Men i denne oppgaven, der beregning av energiutbyttet, både på dager med fint og dårlig vær, har vært tema, har disse varierende værforholdene vært nyttige.

Nå i etterkant er det mulig å se ting som kunne vært gjort annerledes, spesielt med det eksperimentelle oppsettet. For det første skyldes dette at forståelsen av hva problemstillingen innebærer har kommet gradvis, for det andre at det skal det mye til for å lage et oppsett som kan gi svar på alle spørsmål om systemet som man kan tenkes å stille seg. Under arbeidet med å kartlegge hvordan temperaturen på absorptorplata utvikla seg,

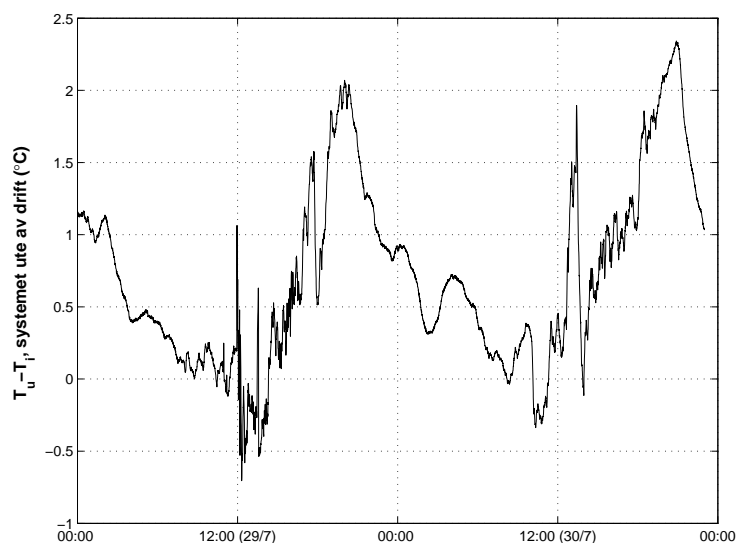
meldte det seg et ønske om flere sensorer på plata. Skulle arbeidet blitt gjort på nytt ville jeg anbefalt tre ekstra sensorer der; to nedenfor den som allerede er plassert, jevnt fordelt i strømningsretningen, og én til høyre for denne. Det ville gitt nyttig informasjon om hvordan temperaturutviklingen er på plata, og dermed også i vannet som strømmer igjennom. Siden dette kom opp for sent, er forståelsen istedenfor bygget på teoretiske betraktninger.

Underveis, og i diskusjoner i gruppa, har vi sett at noe mer arbeid burde vært lagt i konfigureringen av loggekanalene. Selve LabVIEW-programmeringen er tilfredstillende og har inneholdt de ønskede funksjonene. Men usikkerheten i temperaturmålingene kunne vært mindre ved at riktig måleintervall hadde vært stilt inn. Dette er en feilkilde vi lett kunne unngått, men som i praksis har liten innvirkning. I kapittel 5.2.4 diskuteres usikkerheten, og vi ser at usikkerheten som skyldes unøyaktig konfigurering må ligge innenfor $\pm 0,005$ °C, og dermed drukner i sensorenes usikkerhet på $\Delta T = \pm(0,3 + 0,005T)$ °C.

8.1.2 Måledata

I Tillegg A er det en oversikt over datamaterialet som viser at mengden med data har vært relativt stor. Det er lett å tenke at det kun er skyfrie dager som var interessante. Dette henger nok sammen med kravet om stasjonære forhold som gjelder for effektivitetsmålinger. Nå i ettertid kan man se at mindre gode dager er vel så viktige for å forstå samspillet mellom innstråling, ulike temperaturer og energiutbytte. I perioder kunne vannet i tanken med fordel vært bytta oftere for å få lavere temperaturer på vannet inn i solfangeren. Situasjonen med en tanktemperatur på over 55 °C ved oppstart er lite aktuell i et reelt anlegg, og har derfor ikke spilt noen viktig rolle i løsningen av hovedproblemstillingen. Men på den andre side har disse dataene, som viser svært lavt energiutbytte på slike dager, ført til refleksjoner rundt styringsprinsippene. Det viser seg at anlegget med fordel kan slås av når tanktemperaturen er høyere enn 65 °C.

Den mest interessante, men også den mest frustrerende, delen av arbeidet har vært å finne mønstrene i datamaterialet. Tilsynelatende like dager kan gi ulike verdier av for eksempel energiutbyttet. Noen dager har vært fristende å kutte ut, fordi de bare ikke passer inn eller viser uforståelige avvik. Men det er jo nettopp i disse dagene utfordringene, og også deler av svarene, ligger. Data og resultater er forsøkt presentert på en måte som ikke dekker over det ubehagelige, selv om ikke alt kan legges fram like grundig. Det er også årsaken til at supplerende figurer er tatt med i vedlegget.



Figur 8.1: Temperaturdifferansen mellom utløp- og innløpsrør når systemet er ute av drift. Dette mønsteret går igjen alle aktuelle dager.

8.1.3 Metodene

Hovedmetoden som er brukt er “plott og studér”. Det er en god metode for å få oversikt over dataene. Men samtidig er det en fare for å overse noen sammenhenger mellom de ulike størrelsene. Ved å studere både antatte sammenhenger og andre teoretiske sammenhenger som gjelder for et slikt anlegg, kan man håpe og tro at man har unngått den mulige feilen. Etterhvert da arbeidet ble mer målrettet, ble også fremgangsmåten mer strukturert, og faren for å overse viktige faktorer mindre.

I sammenligningen mellom verdier gitt ved den kalorimetrisk metode og varmestøm-metoden er det et systematisk avvik på ca 10%. Her er det to helt ulike deler av et system som er studert, og da er det alltid en stor utfordring å sammenligne verdier. Systemet virket oversiktlig med utgangspunkt i prinsippskissa i figur 4.4, men systemtapet har likevel vært større enn det vi beregnet, spesielt når tanktemperaturen er høyere enn 50 °C. Dette kan skyldes den førstegrads tilnærmingen vi gjorde i kapittel 6.4.1. Hadde isolasjonen også blitt beregna med ved bestemmelsen av varmekapasiteten til tanken i kapittel 5.1.2, ville energiutbyttet gitt ved den kalorimetrisk metode vært ca 2% høyere.

Muligheten for at avviket skyldtes feil kalibrering ble sjekket ved å studere temperaturutviklingen i de to rørene når systemet stod i ro. Det ble oppdaga at utløpsrøret viste noe høyere verdier enn innløpsrøret, og at dette avviket hadde en typisk døgnsyklus som

vist i figur 8.1. Temperaturen i disse rørene påvirkes hovedsaklig av solinnstrålingen som varmer opp det svarte materialet fra 20 til 130 °C i løpet av en dag. Når denne påvirkningen er størst, er differansen tilnærmet null. Det gir en indikasjon på at kalibreringen er korrekt. Fluktuationene ellers kan skyldes at utløpsrøret er mer beskyttet fra omgivelsene enn innløpsrøret, eller at de begge påvirkes noe av temperaturen til vannet i andre enden. Denne er størst for utløpsrøret som har innløpet til tanken øverst. Disse feilene faller bort når anlegget er i drift.

Ønsket var å finne en metode som beregnet solenergiutbyttet, og dermed hvor mye annen energi som spares ved bruk av et slikt anlegg. Energiutbyttet beregnet ved å se på temperaturøkningen i tanken gir denne verdien direkte. Derfor ble utbyttet beregnet med den kalorimetriske metoden valgt som referanseverdier, selv om bruk av varmestrømmetoden er mer utbredt. Den første hypotesen i kapittel 6.3 ble avkrefta.

8.2 Vurdering av resultatene

8.2.1 Strømningshastigheten

Konstant strømningshastighet er en forutsetning for at en beregningsmetode uten avansert måleutstyr skal kunne brukes. Derfor er resultatene i avsnitt 7.3, der \dot{m} studeres, avgjørende. Det viser seg at \dot{m} ikke er konstant for hele temperaturspekteret, og tre karakteristiske forløp settes opp.

Befinner anlegget seg i tilfelle 1 eller 2 vil \dot{m} være bort imot 7% lavere enn den antatte konstante verdien. Det vil kunne føre til et beregnet energiutbytte som er ca 7% for høyt. Men i et reelt anlegg i bruk vil forholdene være noe annerledes enn i dette testanlegget. Varmt vann vil stadig tappes, og kaldere vann fylles på. Hvordan dette påvirker driften sier ikke datamaterialet noe om, men det medfører at tilfelle 1 og 2 sjelden inntreffer. Typisk vil et anlegg i drift altså operere i tilfelle 3, der \dot{m} er konstant. Når et anlegg installeres vil det derfor være viktig å kjøre det med vanntemperatur på mellom 25 og 50 °C når strømningshastigheten skal innstilles. Etter det vil feilen ved å anta denne konstant være liten.

Ett unntak ble oppdaget i dataene for 20/7-04 og 21/7-04. Da var fluktuationene i \dot{m} -verdiene tre ganger større enn de andre dagene. En forklaring kan være at luft i systemet øker fluktuationene. Det kan også forklare at strømningshastigheten for en kortere periode den siste av disse dagene var ca 40 l/h lavere enn ellers. Luft kan samle seg og blokkere noen av kanalene. Som følge av trykkøkningen vil denne “proppen” blåses ut, og den normale

strømmen gjenopprettes. Men siden dette er de to første dagene utstyret var i bruk og vi aldri senere ser tilsvarende fluktuasjoner, er det sannsynlig at dette er en slags usikkerhet ved innkjøring av måleapparatet. Strømningshastighetsmåleren ble kjøpt brukt, og det kan ha vært rust eller andre partikler som forstyrret målingene disse dagene.

Hypotesen om konstant strømningshastighet stemmer altså ikke, men vil under reelle forhold være en god tilnærming.

8.2.2 Temperaturutvikling i anlegget

Med utgangspunkt i tre av hypotesene som ble presentert i kapittel 6.3 ble temperaturutviklingen i anlegget studert. Det ble vist at differansen mellom T_i og $T_{t,b}$ ligger på mellom -0,2 og 1,6 °C. Det vil utgjøre opptil 10% av differansen mellom solfangeren og innløpet. Det vil si at det å erstatte T_i med $T_{t,b}$ kan være en 10%-feilkilde. Ved bestemmelse av koeffisientene 7.6 og 7.7 er det $\Delta T = T_f - T_{t,b}$ som er benyttet. Når temperaturen på vannet er lavest, og dermed energiutbyttet høyest, er denne ΔT noe større enn $T_f - T_i$. Koeffisientene er derfor automatisk justert ned på grunn av det. Når vanntemperaturen er høy er utbyttet uansett lavt, og koeffisientene bidrar ikke til for lave verdier. Hypotese 3 er dermed sannsynliggjort.

Det kommer tydelig fram at verdien av T_f bestemmes av solinnstrålinga og T_i . At innstrålings-avhengigheten i $T_u(I, T_f)$ ikke er så tydelig stemmer bra med teorien som går ut på at solenergien absorberes i plata, og overføres som varme videre til vannet. Vannet varmes opp direkte som følge av økt temperatur på plata, uavhengig av om dette skyldes økt innstråling eller andre forhold. En viss I -avhengighet kan likevel detekteres, men denne ligger innenfor usikkerheten til ligning 7.4 for $T_u(T_f)$. Hypotese 4 er beholdt, mens hypotese 5 må justeres.

Temperaturdifferansen $T_u - T_i$ multiplisert med strømningshastigheten er proporsjonal med energiutbyttet. At T_u samtidig er proporsjonal med T_f var en god indikasjon på at også $T_f - T_i$ kan brukes for å beregne energiutbyttet. Det kan se merkelig ut at ikke forholdet mellom $T_u - T_i$ og $T_f - T_i$ er like lineært. Men dette kan forklares ut ifra energiligningene. Ved bruk av den siste temperaturforskjellen er det konveksjon som er utgangspunktet, og vi vet at differansen multiplisert med arealet og en konstant h er proporsjonal med energiutbyttet. Konstanten h avhenger av strømningshastigheten, men ikke nødvendigvis med en faktor 1. Derfor skulle figur 7.10 hatt ulik tilnærming for de ulike strømningshastighetene. Av tabell 7.3 ser vi at en riktig h -verdi for anlegg med $\dot{m}_a = 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$ er 20% høyere enn for anlegg med $\dot{m}_a = 1,0 \text{ l}/(\text{min m}^2)$. Det tyder på at $h \sim \sqrt{\dot{m}_a}$.

8.2.3 Beregningsmetode

Målet med oppgava var å finne en metode for å beregne energiutbyttet for et solfangeranlegg, uten altfor avansert utstyr. Vi vet at energiutbyttet er proporsjonalt med temperaturredifferansen mellom utløp og innløp til solfangerne. Når vi ser hvor lineær sammenhengen mellom utløp og fanger-temperatur er (vises i figur 7.8), bekrefter dette antagelsen om at energiutbyttet også er proporsjonalt med temperaturredifferansen mellom solfangeren og innløpet. Temperaturredifferansen mellom innløpet og bunnen i tanken er diskutert, og konklusjonen var at feilen ved å erstatte T_i med $T_{t,b}$ kan ses bort ifra. Det viser at hypotesen om at det er en lineær sammenheng mellom temperaturredifferansen og energiutbyttet er riktig.

Kapittel 7.5 presenterer resultatene fra dette arbeidet. Ved bruk av de to temperatursensorene, T_f og $T_{t,b}$, og to koeffisienter som er bestemt ut ifra datamaterialet, beregnes energien. Disse verdiene sammenlignes med utbyttet beregnet med den kalorimetrisk metode. De dagene der avviket i % er størst er det svært lavt energiutbytte. Noen dager ligger avviket på opp mot 50% selv om det er snakk om betydelig energiutbytte. Men dette er dager der initialbetingelsene er urealistiske fordi tanktemperaturen ved oppstart er nærmere 60 °C. Det kan inntreffe i reelle anlegg hvis varmen i lageret ikke benyttes. Man kan anta at det sjelden er tilfelle, og at avviket derfor vil utgjøre lite over tid. For 60% av dagene avviker verdiene gitt ved denne metoden med mindre enn 10% i forhold til verdiene gitt ved den kalorimetrisk metode.

Metoden og koeffisientene vi har kommet fram til gir altså gode resultater for det anlegget som er blitt studert. Men mer interessant er hvor anvendelig metoden vil være på andre anlegg. De to koeffisientene 7.6 og 7.7 er satt opp som avhengige av arealet A . At denne avhengigheten er akkurat slik, bygger vi på teorien, uten å ha hatt mulighet til å teste det ut. Hvordan strømningshastigheten spiller inn har vi fått en indikasjon på, men kunne med fordel vært testet for flere ulike verdier.

Når anlegget er i drift vil det ha en typisk effekt på 1-2 kW. Med tanktemperatur på 60 °C, vil tapet fra tanken være på oppimot 0,14 kW, og fra rørene ca det samme. Disse kan altså ikke sees bort ifra. Et solfangeranlegg vil typisk ha et absorberareal som er fem ganger større enn dette testanlegget. Da blir samtidig effekten femdobla, og tapene fra tank og rør vil utgjøre en mye mindre andel. For anlegg med helt andre dimensjoner må korreksjoner vurderes.

8.3 Konklusjon

Ønsket med oppgava var å komme fram til en metode der temperaturer som en styreenhet allerede måler kunne benyttes for å bestemme energiutbyttet. To kjente metoder ble sammenligna for å se hvordan disse verdiene var i forhold til hverandre. Sammenfallet var tydelig, men det var et systematisk avvik på 10%. Denne sammenligningen og studiene av hvordan temperaturen i ulike deler av anlegget utvikler seg ga et godt utgangspunkt for å komme fram til den alternative metoden.

Datamaterialet bekrefter en klar sammenheng mellom energiutbyttet og temperaturdifferansen mellom solfangeren og bunnen i tanken. Det er vist at metoden som er utarbeidet gir gode resultater, og stort sett verdier med avvik på mindre enn 10% i forhold til den kalorimetriske metoden. Store avvik kan inntreffe når tanktemperaturen er svært høy. Koeffisientene 7.6 og 7.7 er bevisst valgt for å gi mest mulig riktige verdier ved drift av anlegget i temperaturintervallet 25-55 °C.

Den virkelig store utfordringen ligger i å ta i bruk metoden i reelle anlegg. For å kunne få til det bør det sees på muligheten for temperaturavhengige koeffisienter. Dette for å hindre at metoden gir alt for høye verdier hvis anlegget er i drift uten at varmen benyttes. Koeffisientene må bestemmes for hvert anlegg, men det bør ikke medføre store problemer når dette blir gjort ved installering.

Videre utfordringer ligger i å fastlegge hvordan disse koeffisientene avhenger av arealet og strømningshastigheten. Det vil være spennende å se om antydningen om at $h \sim \sqrt{\dot{m}_a}$ fortsatt gjelder for andre strømningshastigheter.

Bibliografi

- [1] Utenriksdepartementet. *Stortingsproposisjon nr 79*. Kan lates ned fra <http://odin.dep.no/europaportalen/norsk/eos/p30005497/032001-030156/dok-bn!30005497.html>, Internett, mars 2005.
- [2] European Solar Thermal Industry. <http://www.estif.org/143.0.html>. Internett, April 2005.
- [3] S Kusui T Nagai. *An electronic integrating heat meter*. Instrumentation and Measurement 39 (1990) 785-789.
- [4] Ø Holter F Ingebretsen H Parr. *Fysikk og energiresurser*. Universitetsforlaget AS, 1998.
- [5] E Randeberg. *Norsken, svensken og dansken... En sammenligning av energibruk og -innsats i tre land*. Kan lastes ned fra http://www.fivh.no/filer/norskensvensken_r0600.pdf, Internett mars, 2005.
- [6] J Gordon, editor. *Solar energy -the state of the art*. James & James Ltd, 2001.
- [7] Statistisk sentralbyrå. <http://www.ssb.no/emner/01/03/10/husenergi/tab-2004-06-08-09.htm>. Internett, August 2004.
- [8] International Energy Agency. *Key world energy statistics*. Kan lastes ned fra <http://www.iea.org/dbtw-wpd/Textbase/nppdf/free/2004/keyworld2004.pdf>, Internett mars, 2005.
- [9] Statistisk sentralbyrå. <http://www.ssb.no/emner/10/08/10/elektrisitet/tab-2004-09-09-01.html>. Internett, August 2004.
- [10] KN Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Elsevier Science, 2 edition, 2002.

- [11] British Petroleum. <http://www.bp.com/centres/energy>. Internett, Januar 2005.
- [12] The Worldwatch Institute. *Jordens tilstand 2004*. Cappelen Forlag, 2004.
- [13] JA Duffie WA Beckman. *Solar Engeneering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [14] J Rekstad. *Forelesningsnotater fra kurset FYS375*. Høst, 2003.
- [15] *Solar Power Tower*. Info på http://rhlx01.rz.fht-esslingen.de/projects/alt_energy/sol_thermal/powertower.html, Internett april, 2005.
- [16] EW Ruyter. *Dobbelfasader*. Kan lastes ned fra <http://home.online.no/barhe/pdf/diplom.pdf>, Internett april, 2005.
- [17] W Weiss I Bergmann G Faninger. *Solar heating worldwide. Markets and Contribution to the Energy Supply 2001*. Kan lastes ned fra http://www.iea-shc.org/outputs/activities/iea_shc_solar_heating_worldwide_2001.pdf, Internett mars, 2005.
- [18] T Eldregard. *Sertifikatorordning for "grønn" varme -Prinsipielle og praktiske utfordringer*. SNF rapport nr. 2/2002.
- [19] E Bjørnstad J Grande R Sand C Wendelborg. *Evaluering av tilskuddsordningen til varmpumper, pelletskaminer og styringssystemer*. Kan lastes ned fra <http://www.enova.no/dialog.aspx?action=file&fileid=473>, Internett, april 2005.
- [20] E Lillestøl O Hunderi JR Lien. *Generell fysikk for universiteter og høyskoler. Bind 2: Varmelære og elektromagnetisme*. Universitetsforlaget AS, 2001.
- [21] Solarnors hjemmeside. www.solarnor.com.
- [22] *SOLARNOR Solfanger, teknisk datablad*. Kan lastes ned fra www.solarnor.com, Internett, Januar 2005.
- [23] CB Winn. *Controls in solar energy systems*. Solar Energy (1983).
- [24] C Cristofari G Notton P Poggi A Louche. *Influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector*. International Journal of Thermal Sciences 42 (2003) 455-469.

- [25] *European standard for determination of collector efficiency: EN12975 part 1 and 2.*
- [26] M Meir J Rekstad M Peter L Henden B Sandnes. *Determination of the performance of solar systems with the calorimetric method.* Solar Energy 73 (2002) 195-207.
- [27] AG Imenes. *Effektivitetsanalyse for termisk solenergianlegg ved kalorimetrisk metode.* Hovedfagsoppgave, NLH og UiO, 1997.
- [28] PT Tsilingiris. *Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers.* Applied Thermal Engineering 20 (2000) 1297-1314.
- [29] K Brnic. *Alenestående solvarmeanlegg med solceller til styring og drift.* Hovedfagsoppgave, Universitetet i Oslo, Januar 2005.
- [30] JA Schakenda. *Analyser av effektivitet til nyutviklet solfanger i polymermateriale.* Hovedfagsoppgave, Universitetet i Oslo, 2004.
- [31] *SOLFANGER for integrasjon i tak eller fasade.* Kan lastes ned fra www.solarnor.com, Internett, Januar 2005.
- [32] *Product catalogue -WebCAPS.* www.grundfos.no, Mars 2005.
- [33] *SOLARNOR gulv- og solvarmesystem. Brukerveiledning.*
- [34] National Instruments. *NI 4350/4351 User Manual*, 1998.
- [35] *Produktkatalog fra Elfa.* Kan leses på <http://www.elfa.se/no/index1.html>, Internett, Mai 2005.
- [36] *Produktinformasjon fra Labfacility*, Internett, Mai 2005.
- [37] National Instruments hjemmeside. www.ni.com.
- [38] B Sandnes. *Energy Efficient Production, Storage and Distribution of Solar Energy.* Doktorgradsavhandling, Universitetet i Oslo, 2004.
- [39] The Mathworks hjemmeside. www.mathworks.com.
- [40] J Rekstad. *Muntlig overlevering.* Januar, 2005.

Tillegg A

Oversikter




















Symboler

A	Bestrålt solfangerareal (m^2)
C_p	Varmekapasiteten til vann ($\text{Wh}/^\circ\text{C}$)
C_t	Varmekapasiteten til varmelageret ($\text{Wh}/^\circ\text{C}$)
h	Varmeovergangstallet fra absorbator til vannet ($\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$)
h_f	Koeffisienten i ny metode, tiden før solmiddag ($\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$)
h_e	Koeffisienten i ny metode, tiden etter solmiddag ($\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$)
I	Solinnstråling (W/m^2)
\dot{m}	Strømningshastighet (l/h)
\dot{m}_a	Strømningshastighet per areal ($\text{l}/(\text{min } \text{m}^2)$)
Q	Energi (Wh)
\dot{Q}	Effekt (W)
Q_{kal}	Energi beregnet ved den kalorimetriske metoden (Wh)
Q_{KAL}	Energi beregnet ved den kalorimetriske metoden, korrigert for tap/tilførsel i tank og rør(Wh)
Q_{ledn}	Energi beregnet ved den nye metoden (Wh)
Q_n	Nyttig energi fra solfanger (Wh)
Q_p	Varmetilførsel fra pumpe til vannet (Wh)
Q_s	Energiutbytte fra solfanger (Wh)
Q_t	Energi tilført tanken (Wh)
$Q_{t,r}$	Energitap fra rør (Wh)
$Q_{t,t}$	Energitap fra tank (Wh)

Q_{var}	Energi beregnet ved varmestrømmetoden (Wh)
Q_{VAR}	Energi beregnet ved varmestrømmetoden, korrigert for tap/tilførsel i tank og rør (Wh)
r	Reflektans
\bar{T}	Middels platetemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_a	Temperaturen utenfor laben ($^{\circ}\text{C}$)
T_f	Temperaturen til solfangeren ($^{\circ}\text{C}$)
T_i	Temperaturen på vannet i innløpet til fangeren ($^{\circ}\text{C}$)
T_l	Temperaturen inne i sol-laben ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	Temperaturen til rørenes omgivelser ($^{\circ}\text{C}$)
T_r	Temperaturen til vannet i rørene ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{t,b}$	Temperaturen i bunn av tanken ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{t,m}$	Temperaturen midt i tanken ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{t,t}$	Temperaturen i toppen av tanken ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\bar{t}}$	Middeltemperaturen i tanken ($^{\circ}\text{C}$)
T_u	Temperaturen på vannet i utløpet fra fangeren ($^{\circ}\text{C}$)
U_L	Varmetransportkoeffisient ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
V	Volumet av vannet i tanken (l)

α	Absorptans
ΔT_{off}	Temperaturdifferanse-grense for stans av anlegg ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{on}	Temperaturdifferanse-grense for start av anlegg ($^{\circ}\text{C}$)
Δt	Tidsintervall (h)
ε	Emisjonskoeffisienten
η	Solfangereffektivitet
η_0	Optisk effektivitet
λ	varmekonduktivitet ($\text{W}/(\text{m } ^{\circ}\text{C})$)
σ	Stefan-Boltzmanns konstant ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$)
τ	Transmittans

Datamaterialet 2004

Dato	Forhold	Ca \dot{m}_a (l/min m ²)	Δt (s)	T_i (°C) start	Filnavn	Kommentar
20/7		1,0	10	39	kal_200704.txt	\dot{m} -fluktuasjoner
21/7		1,0	10	15	kal_210704.txt	\dot{m} -fluktuasjoner
27/7		1,0	30	16	kal_270704.txt	
28/7		1,0	30	42	kal_270704.txt	Litt lav \dot{m}
4/8		1,0	10	34	kal_040804.txt	
5/8		1,0	10	34	kal_040804.txt	
6/8		1,0	10	49	kal_040804.txt	Litt skyer på etterm
8/8		1,0	30	18	kal_080804.txt	
9/8		1,0	30	45	kal_080804.txt	
11/8		1,0	30	14	kal_110804.txt	
12/8		1,0	30	38	kal_110804.txt	
13/8		1,0	30	56	kal_110804.txt	
14/8		1,0	30	59	kal_110804.txt	
15/8		1,0	30	66	kal_110804.txt	
16/8		1,0	30	66	kal_110804.txt	
28/8		1,0	30	28	kal_270804.txt	
29/8		1,0	30	30	kal_270804.txt	
8/9		1,0	10	50	kal_080904.txt	Anlegg på kontinuerlig
9/9		1,5	10	17	kal_090904.txt	
10/9		1,5	10	40	kal_100904.txt	
16/9		1,5	10	13	kal_160904.txt	Logging starta seint
24/9		1,5	30	15	kal_240904.txt	Logging starta seint
25/9		1,5	30	23	kal_240904.txt	
26/9		1,5	30	32	kal_240904.txt	

Tillegg B

Programmering

Matlab-kode

Dette programmet leser loggefilene og velger ut en dag og et tidrom. Energitbyttet beregnes med den kalorimetriske metoden og den nye metoden, og verdiene blir plottet i samme figur. Det er tatt utgangspunkt i et program fra Brnic [29].

```
clear
```

```
%Først leses tallene inn og lagres i variabler  
fid=fopen('~\Hovedfag/DatamFlow/kal_250704.txt','r');  
A=fscanf(fid,'%*s %*s %g %g %g %g %g %g %g %g %g %g %g %g %g %g',[15 inf]);  
status=fclose('all');  
A=A';  
[o p]=size(A);
```

```
innstr=A(1:o,1); %alle tallene i A fra 1 til o i kolonne 1 danner 'innstr'  
vind=A(1:o,2);  
relfukt=A(1:o,3);  
amb=A(1:o,4);  
inne=A(1:o,5);  
tankt=A(1:o,6);  
tankm=A(1:o,7);  
tankb=A(1:o,8);  
innlop=A(1:o,9);
```

```
utlop=A(1:o,10);
fanger=A(1:o,11);
flow=A(1:o,15);
```

```
%Så leses dato og klokkeslett inn og gjøres om til ett tall
```

```
fid=fopen('~\Hovedfag\DatamFlow\kal_250704.txt','r');
B=fscanf(fid,'%s %s %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g %*g
%*g',[16 inf]);
status=fclose('all');
B=B';
```

```
C=char(B);
dd=C(1:o,1:2); day=str2num(dd);
mm=C(1:o,4:5); month=str2num(mm);
yy=C(1:o,7:8); year=str2num(yy);
ho=C(1:o,9:10); hour=str2num(ho);
mi=C(1:o,12:13); minute=str2num(mi);
sec=C(1:o,15:16); second=str2num(sec);
tid=datetime(year,month,day,hour,minute,second);
```

```
%Etter-kalibrering
```

```
innstrHost=((innstr+0.853)./0.975).*0.88-7.3;
ambHost=((amb+5.523)./1.07).*1.02-8.44;
tank=(tankb+tankt+tankm)/3;
```

```
%Velger ut dag og tidsrom
```

```
b=1;
cont=true;
for i=1:o
if day(i)==26 & hour(i)==9 & cont==true
cont=false;
b=i
end
end
```

```
slutt=o;
cont2=true;
for i=1:o;
```

```

if day(i)==26 & hour(i)==18 & cont2==true
cont2=false;
slutt=i
end
end

dt=30; %loggeintervallet
d=1200/dt;

r=[b:d:slutt-d];
s=size(r)
dTinne= zeros(s);
flowen= zeros(s);
tiden= zeros(s);
dTank= zeros(s);
paa=zeros(s);
dTsys=zeros(s);

%løkke som sjekker om anlegget er på, og om k_f eller k_e skal brukes
k=0;
for i= b:d:slutt-d
k=k+1;
dTinne(k)= mean(tank(i:i+d)-inne(i:i+d));
tiden(k)=tid(i+d/2);
flowen(k)=mean(flow(i:i+d));
dTank(k)= tank(i+d)-tank(i);
dTsys(k)= mean(fanger(i:i+d)-tankb(i:i+d));
if hour(i)<14 & flow(i:i+d)>200
paa(k)=133;
else if hour(i)>=14 & flow(i:i+d)>200
paa(k)= 148;
else paa(k)=0;
dTank(k)=0;
dTinne(k)=0;
end
end
end

%bestemmer energien med de to metodene
dQcal=549*dTank+3.27*dTinne/3;
dQledn=(paa.*dTsys)/3;

```

```

figure
subplot(2,1,1)
plot(tiden, dQcal, '*-', tiden, dQledn, 'o-')
ylabel('Energi per 20 min (Wh)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
datetick('x', 15)
legend('Q_KAL', 'Q_ledn')

subplot(2,1,2)
plot(tiden, cumsum(dQcal)/1000, tiden, cumsum(dQledn)/1000)
ylabel('Akkumulert energi (kWh)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
datetick('x', 15)
xlabel('Tid (tt:mm)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'demi')
legend('Q_KAL', 'Q_ledn', 4)

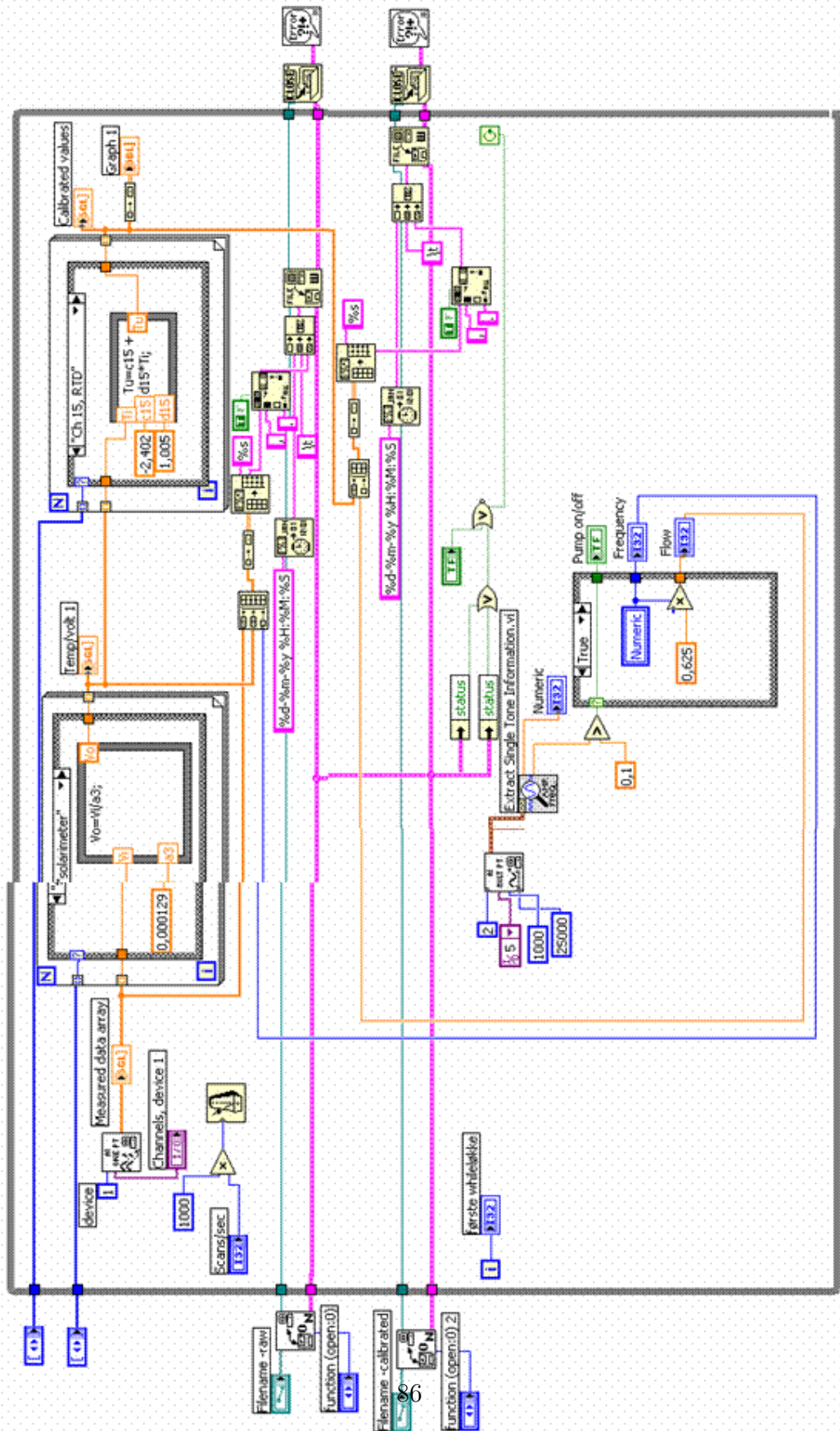
```


LabVIEW-programmet

The screenshot shows a LabVIEW program window titled 'Taklanger.vi'. The interface is organized into several functional areas:

- Menu and Toolbar:** Located at the top, it includes 'File', 'Edit', 'Operate', 'Tools', 'Browse', 'Window', and 'Help'. The toolbar contains icons for running, pausing, and other standard LabVIEW functions.
- Data Table:** A central table displays 11 channels of data. Each channel has a 'Measured voltage' and a 'Calibrated value'.

Channel	Measured voltage	Calibrated value	Description
Ch 2	78,197m	590,173	Irradiation
Ch 3	60,153m	1,809	Windspeed
Ch 4	28,634m	18,009	Relative humidity
Ch 6	110,467m	23,250	Ambient temp
Ch 7	110,247m	24,627	Indoor temp
Ch 8	121,279m	53,329	Temp tank
Ch 9	121,341m	53,483	Temp tank
Ch 10	121,384m	53,282	Temp tank
Ch 5	121,479m	53,094	Inlet absorber
Ch 12	122,366m	54,981	Outlet absorber
Ch 11	123,092m	57,817	Collector temp
- Plot Area:** A large graph titled 'Selections graph 1' is currently empty. The y-axis is labeled 'Amplitude' and ranges from 13,0 to 50,0. The x-axis is labeled 'Time' and ranges from 0 to 102. A legend below the plot lists 11 channels with their corresponding colors and device types (e.g., solarimeter, Voltage, RTD).
- Control Panel:** Located on the right side, it includes:
 - A 'STOP' button.
 - A 'Pump on/off' indicator light.
 - Input fields for 'Flow' (set to 0) and 'Frequency' (set to 0).
 - A 'Sec/scan' input field (set to 10).
 - File management controls for 'Filename -raw' and 'Filename -calibrated', both pointing to a path in 'Settings\All Users\Sollab\%DataSommer2004\'. Each has a 'function (open|0)' or 'function (open|2)' button and a 'create or replace' button.



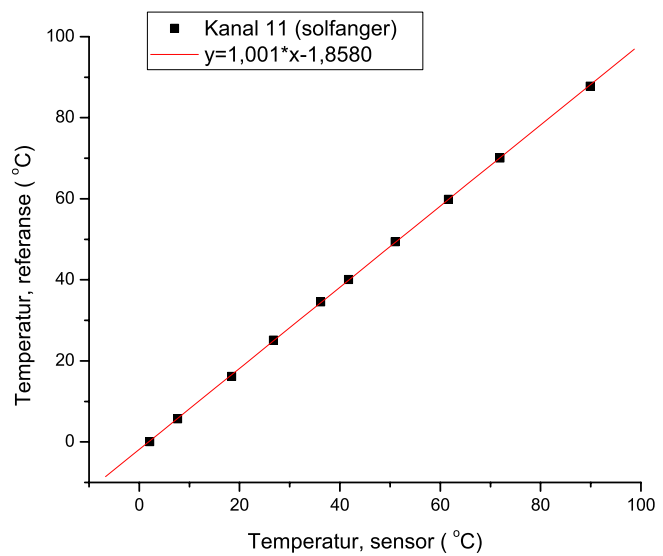
Tillegg C

Kalibreringslogg

Solfangertemperaturen (12/5 2004)

Kanal 11: Solfangertemperaturen

Referanse	Kanal 11
87,8	89,899
70,1	71,884
59,9	61,611
49,4	51,030
40,1	41,707
34,6	36,157
25,1	26,767
16,2	18,414
5,7	7,625
0,1	2,079

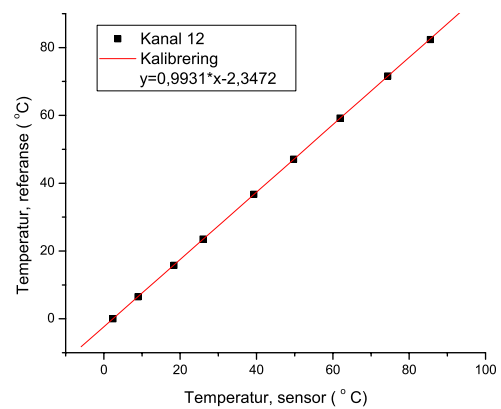
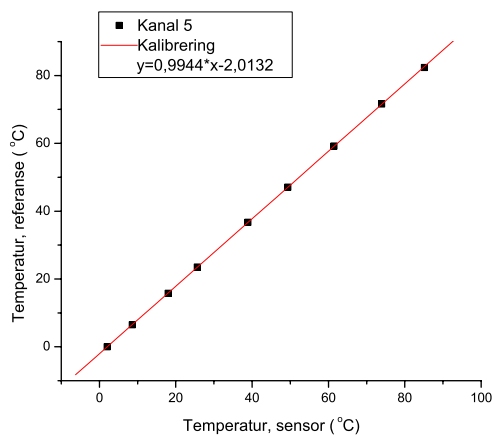


Innløp- og utløpstemperaturene (26/4 2004)

Kanal 5: Innløpstemperatur

Kanal 12: Utløpstemperatur

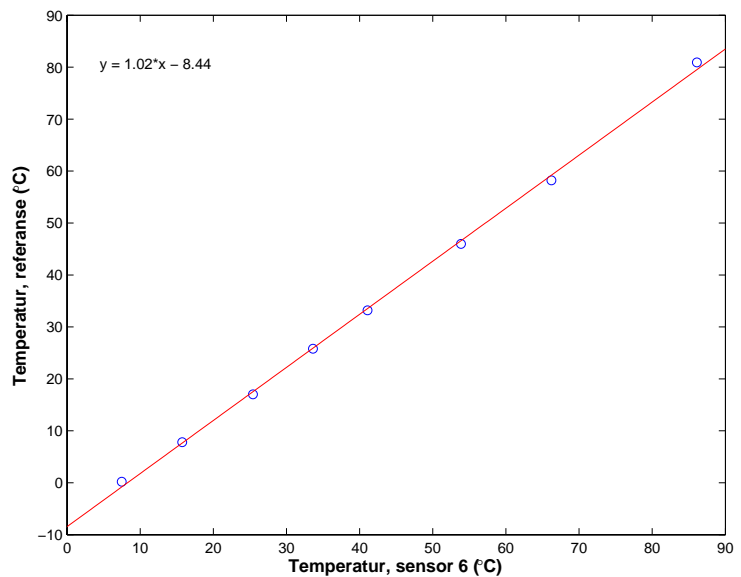
Referanse	Kanal 5	Kanal 12
82,4	85,117	85,563
71,6	73,924	74,351
59,2	61,428	61,865
47,1	49,333	49,723
36,7	38,879	39,270
23,5	25,645	26,012
15,8	18,007	18,368
6,5	8,593	8,937
0	2,036	2,378



Utetemperaturen (18/11 2004)

Kanal 6: Utetemperaturen (etterkalibrering)

Referanse	Kanal 6
80,1	86,111
58,2	66,216
46,2	53,860
33,2	41,092
25,8	33,612
17,0	25,405
7,5	15,751
0,2	7,474



Innetemperaturen og tanktemperaturene (vår 2004)

Kanal 7: Innetemperaturen

Kanal 8: Temperaturen tank, topp

Kanal 9: Temperaturen tank, middel

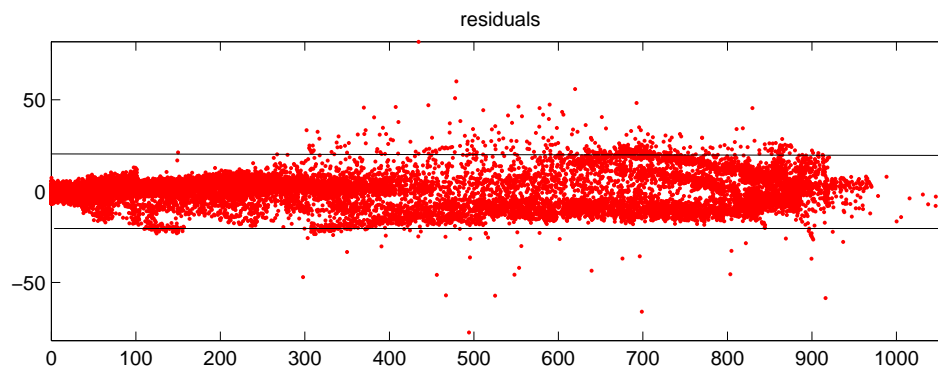
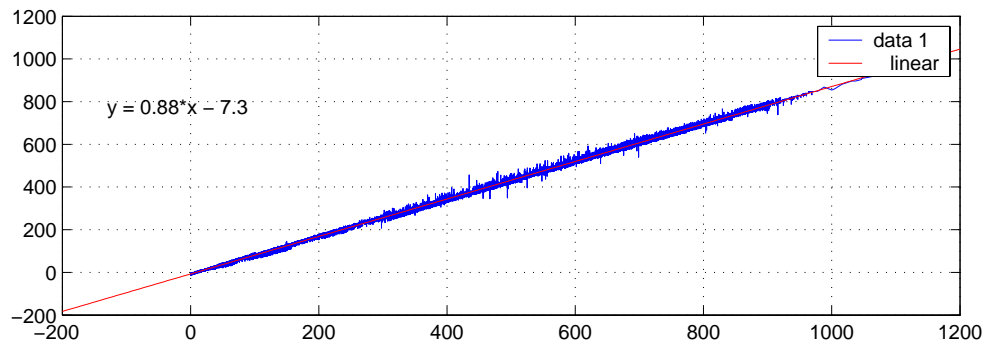
Kanal 10: Temperaturen tank, bunn

Det henvises til Schakenda [30].

Pyranometer (september 2004)

Kanal 2: Solinnstrålingen (ettekalibrering)

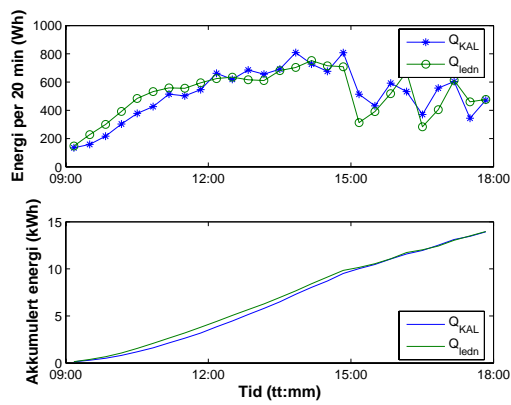
Solinnstrålinga ble logga flere dager, og hver dag gir ulike kalibreringsfaktorer. Det ble valgt å plote hele perioden i samme graf. Usikkerheten er på 5%.



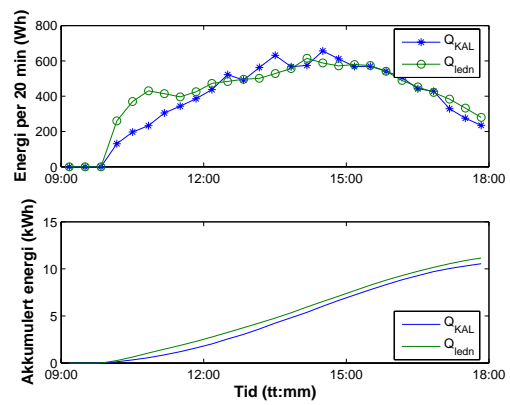
Tillegg D

Supplerende grafer

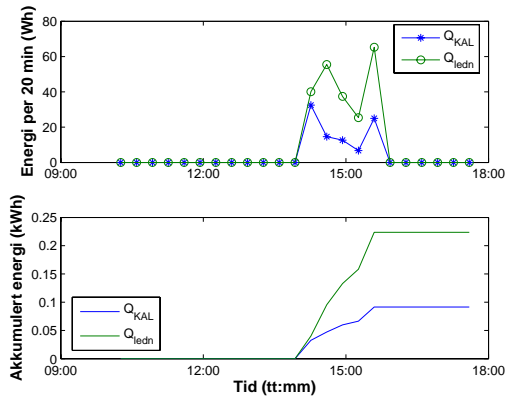
Her følger plott av energiutbyttet gitt ved den nye metoden og ved den kalorimetriske metoden for en rekke ulike dager.



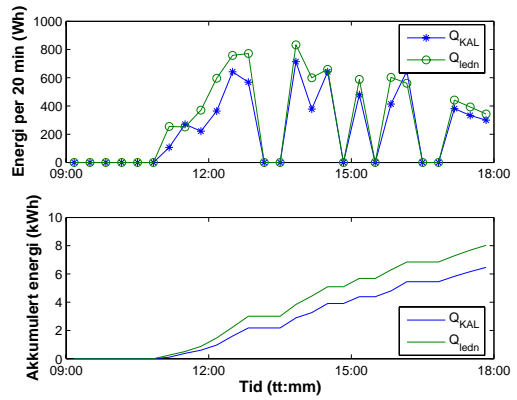
(c) 27/7-04



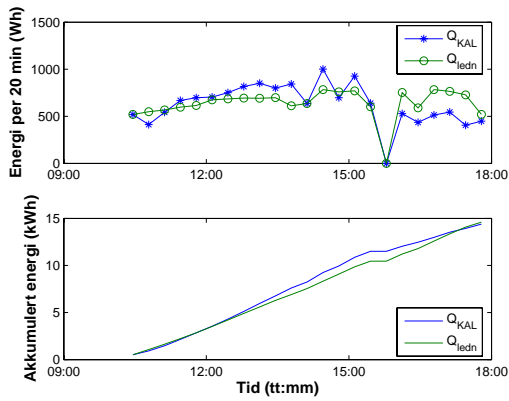
(d) 28/7-04



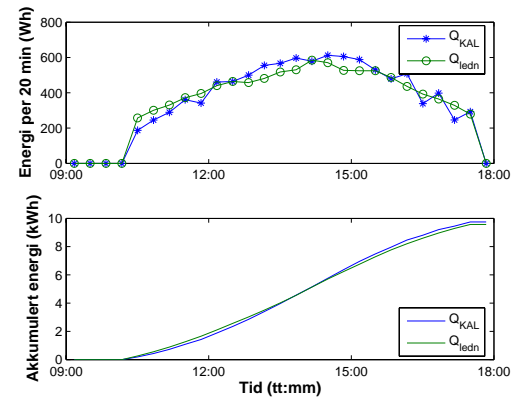
(e) 4/8-04



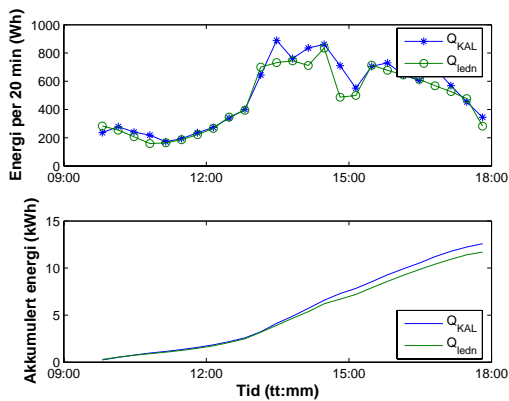
(f) 5/8-04



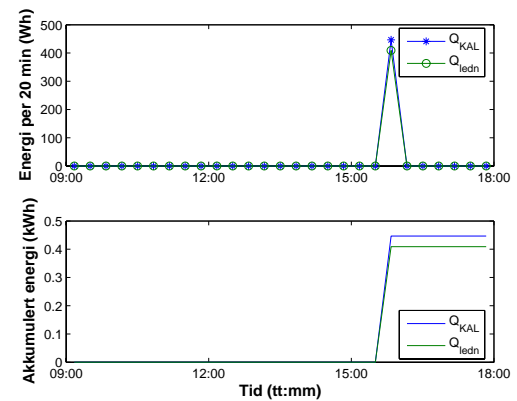
(g) 8/8-04



(h) 9/8-04

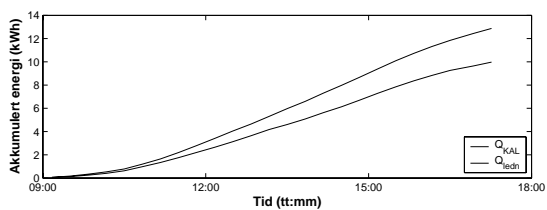
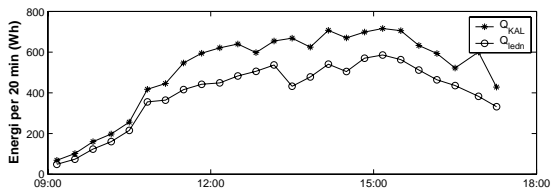


(i) 11/8-04

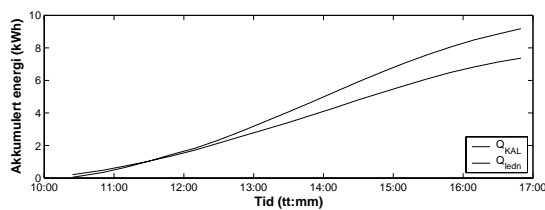
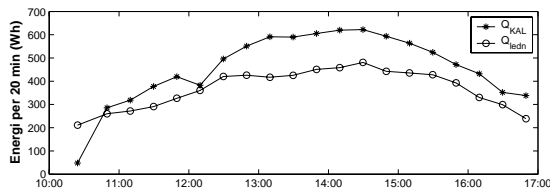


(j) 16/8-04

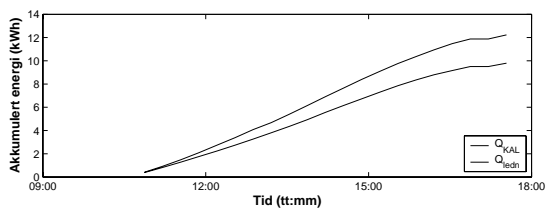
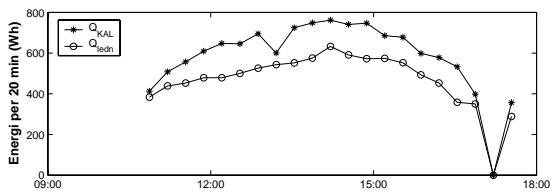
Dager der anlegget har kjørt med $\dot{m}_a = 1,5 \text{ l}/(\text{min m}^2)$



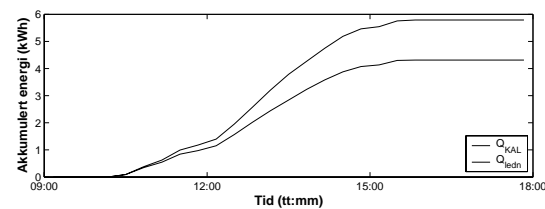
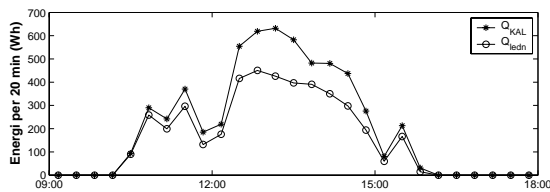
(k) 9/9-04



(l) 10/9-04



(m) 16/9-04



(n) 25/9-04