BYG·DTU

Louise Jivan Shah
Jan Hansen

Højtydende solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET

Sagsrapport
BYG·DTU SR-02-26
2002
ISSN 1393-402x

Louise Jivan Shah
Jan Hansen

Højtydende solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning

Department of Civil Engineering
DTU-building 118
2800 Kgs. Lyngby
http://www.byg.dtu.dk

2002

I. Forord

I samarbejde med AquaHeat A/S blev en varmtvandsbeholder til små solvarme-anlæg til brugsvandsopvarmning udviklet i 1999. Varmtvandsbeholderen blev udformet så den opfylder stort set alle krav til en optimalt udformet soltank. Beholderen, "den ideelle beholder", blev afprøvet i Prøvestationen for Solenergis lagerprøvestand i 2000, og den opnåede den største beholderfaktor nogen sinde.

I denne rapport sammenlignes et solvarmeanlæg, baseret på den ideelle beholder, med et nyt "SolKit" anlæg fra Schweiz, som forventes at være et af de højstydende anlæg på det europæiske marked.

Undersøgelserne er en del af SolEnergiCentrets aktiviteter inden for Assistanceordningen 2000. Projektet er finansieret af Energistyrelsens basistilskud til SolEnergiCentret.

Projektgruppe:

Louise Jivan Shah, civ.ing., PhD
Simon Furbo, civ.ing., PhD
Jan Hansen, Stud.Polyt.
Martin Dandanell, maskinarbejder
Lars Kæstel Jørgensen, elektronikmekaniker
Anne Rasmussen, korrespondent

II. Resumé

I samarbejde med AquaHeat A/S blev en varmtvandsbeholder til små solvarme-anlæg til brugsvandsopvarmning udviklet i 1999. Beholderen, som blev benævnt ”den ideelle beholder”, blev afprøvet i Prøvestationen for Solenergis lagerprøvestand i 2000 og den opnåede den højeste beholderfaktor i Prøvestationens levetid på 1.15.

I denne rapport sammenlignes et solvarmeanlæg baseret på den ideelle beholder med et nyt avanceret ”Hoval-Solkit” anlæg fra Schweiz, som forventes at være et af de højest ydende anlæg på det europæiske marked.

Anlæggene er installeret i BYG.DTU’s udendørs prøvestand for solvarmeanlæg, og de er testet under ens prøvningsbetingelser. Der er udført målinger på anlæggene i ca. 6 måneder. For måleperioden har det ideelle anlæg en nettoydelse på 628 kWh og en anlægsydelse på 573 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 70.6% og 64.5%. Hoval-Solkit anlæggets ydelser er hhv. 682 kWh og 633 kWh. Dvs. at Hoval-Solkit anlægget har ca. 8.5% større nettoydelse og 10.4% større anlægsydelse i måleperioden.

Hoval-Solkit anlæggets årsydelse er beregnet med simuleringsprogrammet TRNSYS. Ud fra målingerne på anlægget er simuleringsmodellen af anlægget verificeret. Der er opnået god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede resultater.

Modellen er benyttet til at beregne årsydelser for anlæggene, med vejrdata fra det danske referenceår TRY, og beregningerne er sammenlignet med tidligere beregninger for det ideelle anlæg og for andre tidligere afprøvede anlæg.

Beregningerne viste, at Hoval-Solkit anlægget har den højeste anlægsydelse af alle de undersøgte anlæg. Det ideelle anlæg har også en god ydelse i betragtning af at solfangeren for dette anlæg har et lille areal. Beregningerne viste også, at Hoval-Solkit anlæggets anlægsydelse kan forbedres med ca. 6% til 14% afhængigt af forbrugsstørrelsen, hvis kuldebroerne i lagerets top og sider elimineres.

For at sammenligne den ideelle beholder med Hoval-Solkit anlæggets beholder er årsydelsen for et anlæg med den ideelle beholder og med Hoval-Solkit solfangeren beregnet. Disse beregninger viste, at anlægget med den ideelle beholder vil have en bedre ydelse end Hoval-Solkit anlægget.

Det kan således konkluderes, at den ideelle beholder er en af de bedste solvarmebeholdere, ikke kun på det danske marked, men i hele det Europæiske marked.

III. Summary

In collaboration with AquaHeat A/S, a storage tank for small solar domestic hot water (SDHW) systems was developed in 1999. The tank, named ”The Ideal Tank”, was tested at the Solar Energy Testing Laboratory at the Technological Institute in Denmark, and it reached a ’storage factor’ of 1.15, which is the highest factor ever given in the lifetime of the Solar Energy Testing Laboratory.

In this report, a solar heating system based on the ideal tank is compared with a new advanced ”Hoval-Solkit” solar heating system from Switzerland. This Swiss system is expected to be one of the best performing systems on the European marked.

The systems were installed in BYG.DTU’s outdoor test facility for SDHW systems and they have been tested under identical conditions. Measurements have been carried out on the systems for about 6 months. For the whole measuring period the net utilized solar energy of the ideal system was 628 kWh and the system performance 573 kWh, corresponding to solar fractions of 70.6% and 64.5%, respectively. The performances of the Hoval-Solkit system were 682 kWh and 633 kWh, respectively. Thus, the net utilized solar energy for the Hoval-Solkit system has been 8.5% larger and the thermal performance 10.4% larger than for the ideal system.

Calculations have been made of the yearly thermal performances for the Hoval-Solkit system with the simulation program TrnSys. The simulation model of the system has been verified from the measurements on the system, and a good degree of similarity between measured and calculated results has been achieved.

The model has been used for calculating the yearly thermal performances of the system, with weather data from the Danish Test Reference Year TRY, and the results of the calculations have been compared with previous results for the Ideal system and previous tested systems.

The calculations showed that the Hoval-Solkit system has the highest thermal performance of all the investigated systems. In addition, the ideal system has a high thermal performance – considering that the collector area in the system is small. Further, the calculations showed that the thermal performance of the Hoval-Solkit system could be increased with approximately 6% to 14% depending on the hot water consumption, if the thermal bridges in the top and sides of the storage tank are eliminated.

To compare the ideal tank with the Hoval-Solkit tank, the yearly thermal performance is calculated for a SDHW system with the ideal tank and with the Hoval-Solkit collector. These calculations showed that the system with the ideal tank has a better performance than the Hoval-Solkit system.

Thus, it can be concluded that the ideal tank is one of the best solar domestic hot water tanks in the Danish market as well as in the European market.

IV. Indholdsfortegnelse

I. Forord i
II. Resumé ii
III. Summary iii
IV. Indholdsfortegnelse iv
1 Indledning 1
2 Solvarmeanlæggenes prøvningsbetingelser 2
2.1 Prøvestanden 2
2.2 Prøvningsbetingelser 3
2.3 Testperioder til validering af Hoval-Solkit simuleringsmodellen 4
3 Solvarmeanlæggene 5
3.1 Hoval-Solkit 5
3.1.1 Opbygning 5
3.1.2 Måledata 6
3.1.3 EDB-model af solvarmeanlægget 7
3.1.4 Validering af EDB-model 8
3.1.5 Årsydelse for anlægget 15
3.2 Anlæg Ideel 17
3.2.1 Måledata 17
3.2.2 Årsydelse for anlægget 18
4 Sammenligning af Hoval-Solkit anlægget og det ideelle anlæg 21
4.1 Målinger 21
4.2 Beregninger 23
5 Årsydelser for forskellige afprøvede anlæg 24
6 Konklusion 28
7 Referencer 29

1 Indledning

I samarbejde med AquaHeat A/S blev en varmtvandsbeholder til små solvarme-anlæg til brugsvandsopvarmning udviklet i 1999 [Shah, L. J. m.fl. (2000)]. Varmtvandsbeholderen blev udformet så den opfylder stort set alle krav til en fornuftigt udformet soltank.

Beholderen, som blev benævnt "den ideelle beholder", blev afprøvet i Prøvestationen for Solenergis lagerprøvestand i 2000 [Nielsen, J.E. (2000)], og den opnåede en beholderfaktor på 1.15, hvilket er den største beholderfaktor en soltank nogensinde har fået tildelt.

I 2001 blev et solvarmeanlæg baseret på den ideelle beholder afprøvet i BYG.DTU's udendørs prøvestand for solvarmeanlæg. Parallelt blev et lille traditionelt low flow anlæg testet. Det "ideelle" anlæg blev sammenlignet med det "traditionelle" anlæg, og målingerne viste at det ideelle anlæg havde en 31% større nettoydelse og en 45% større anlægsydelse [Shah, L. J. (2001)].

I denne rapport sammenlignes anlægget yderligere med et nyt "SolKit" anlæg fra Schweiz, som forventes at være et af de højest ydende anlæg på det europæiske marked.

Rapporten er opbygget således:

- I afsnit 2 beskrives anlægsprøvestanden samt solvarmeanlæggenes prøvningsbetingelser.
- I afsnit 3 beskrives det schweiziske solvarmeanlægs opbygning, målinger, simuleringsmodeller samt beregnede årsydelser.
- I afsnit 4 sammenlignes måleresultaterne for det ideelle anlæg og det schweiziske anlæg.
- I afsnit 5 sammenholdes resultaterne fra dette projekt med tilsvarende resultater fra tidligere afprøvede anlæg.
- Endelig finder man i afsnit 6 konklusionerne fra dette projekt

2 Solvarmeanlæggenes prøvningsbetingelser

2.1 Prøvestanden

Prøvestanden er opbygget på BYG.DTU's forsøgsareal. Prøvestanden består af et stativ til montering af solfangere samt en hal bagved solfangerstativet, hvor lagertankene og måleudstyr er placeret. Solfangerstativet er vist i Figur 2-1. Stativet hælder 45° fra vandret og vender mod syd. Prøvestanden bliver i daglig tale kaldt PTF'en (PTF=Pilot Test Facility).

Figur 2-1: PTF'ens solfangerstativ.

Solfangerne placeres ovenpå en bølgeeternitplade, således at vindeffekterne på bagsiden af solfangerne er som ved en normal placering på et hustag. Rørene fra solfangerne på stativet trækkes ind i bygningen via nogle bjælker til påhæftning.

Placering af lagerbeholdere:
Beholderne er placeret op ad en skillevæg bag hvilken måle- og tappesystemets tekniske installationer er placeret. Hver beholder placeres i en bås, hvor der er til- og afgang for brugsvand og suppleringsvarme til beholdere med indbyggede varmevekslerspiraler.

Tappesystem og suppleringsvarme:
Der kan for hvert anlæg tappes varmt brugsvand. Aftapningen styres fra PC'ere som giver signal til magnetventilerne i tappekredsene.

Suppleringsvarmen består af indbyggede el-patroner og evt. varmevekslerspiraler. El-patronerne benyttes uden for fyringssæsonen og varmevekslerspiralerne benyttes i fyringssæsonen. Suppleringsvarmen til varmevekslerspiralerne tages fra en el-opvarmet lagertank på ca. 3 m³. Lagerbeholderen holdes på 60-70°C. Suppleringsvarmen fra varmevekslerspiralerne styres også fra PC'ere. Suppleringsvarmen fra el-patronerne styres af solvarmeanlæggenes respektive styresystemer.

Måleudstyr
Temperaturerne måles ved hjælp af Kobber/Konstantan termotråd (type TT). Temperaturdifferenserne i solfangerkreds, tappekreds og kreds for suppleringsvarme måles med termosøjler (Kobber/Konstantan) med 5 tråde. Herved opnås større målenøjagtighed. Målepunkterne i væskekredsene er placeret

i dykrør. Dykrør i tappekredsene er femdobbelte (der er et rør til hver tråd) for at opnå så hurtig reaktionstid som muligt.

Temperaturmålepunkterne i solvarmetankene er Kobber/Konstantan termotråde placeret i et glasrør, som er ført ind i tanken enten gennem toppen eller bunden. Glasrørsplaceringerne er foretaget i de studse i tankene, der i forvejen har været ledige i beholderne (f.eks. studse til en cirkulationsledning som ikke er tilsluttet).

Termotråde og termosøjler er ført til dataloggersystemet, som er placeret i et separat kontor i bygningen. Spændingen fra termotrådene og termosøjlerne måles i 5 stk. Fluke Hydra dataloggere. Målenøjagtigheden på termotrådene anslås til ca. ± 0.5 K. Målenøjagtigheden på termosøjlerne anslås til ca. ± 0,03 K.

Flow i solfangerkreds, tappekreds og kreds for suppleringsvarme måles ved hjælp af Clorius Combimeter 1,5 EPD energi- og flowmålere. Målerne udsender pulser, som tælles af dataloggersystemet. I tappekredsene og kredsene for suppleringsvarme udsender målerne 1 puls for hver 0,1 liter. I solfangerkredsene udsender målerne 1 puls for hver liter. Flowmålerne har en nøjagtighed på ca. 2-3%.

Energimængderne dannes i dataloggersystemet ud fra flowmålingerne, temperaturdifferenserne over de respektive termosøjler og ud fra funktioner for varmekapacitet og massefylde for væsken. Varmekapaciteten og massefylden for solfangervæsken er afhængig af glykolprocenten. Denne bestemmes med jævne mellemrum.
Målinger fra termosøjlerne samt flowmålingerne indgår i energiberegningerne, og de største usikkerheder på energiberegningerne, består i målefejl som følge af følerrørenes varmekapacitet, varmeledning til omgivelserne samt som følge af tidsskridtet mellem hvert scan (20 sek.). Energimængderne forventes dog at stemme inden for ca. 5%.

Solindfald:
Der måles totalt og diffust solindfald på solfangerstativet i solfangernes plan (45° hældning, syd). Solindfaldet måles med Kipp & Zonen solarimetre Type CM5. Det diffuse solindfald måles ved hjælp af et solarimeter med en skyggering med en diameter på 45 cm og en bredde på 7 cm. Solarimetrene har en nøjagtighed på ± 2-3%.

Måle- og styresystem:
Datalogningen styres af to PC'ere med udviklet (på Laboratoriet for Varmeisolering) software til formålet. I PC'erne er der et IEEE-488 interface kort for kommunikation med dataloggerne, hvortil termotråde og termosøjler er tilsluttet. Dataloggerne er af typen Fluke Hydra (type 2620A Data Acquisition Unit) og omsætter direkte spændingen fra termotrådene og termoelementerne til temperaturer (idet PC'erens temperatur benyttes som referencetemperatur til termosøjlerne). Derudover aflæses spændingen fra solarimetrene. Denne spænding omregnes til strålingsværdier i PC'erne.

I hver Fluke Hydra er der endvidere 10 relæer, som styres af PC'erne. Relæerne benyttes til at styre magnetventilerne, som åbner og lukker for den automatiske tapning af brugsvandet samt for den supplerende varme.

2.2 Prøvningsbetingelser

Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 1.53 kWh, i alt 4.59 kWh svarende til 100 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes på 50.5°C.

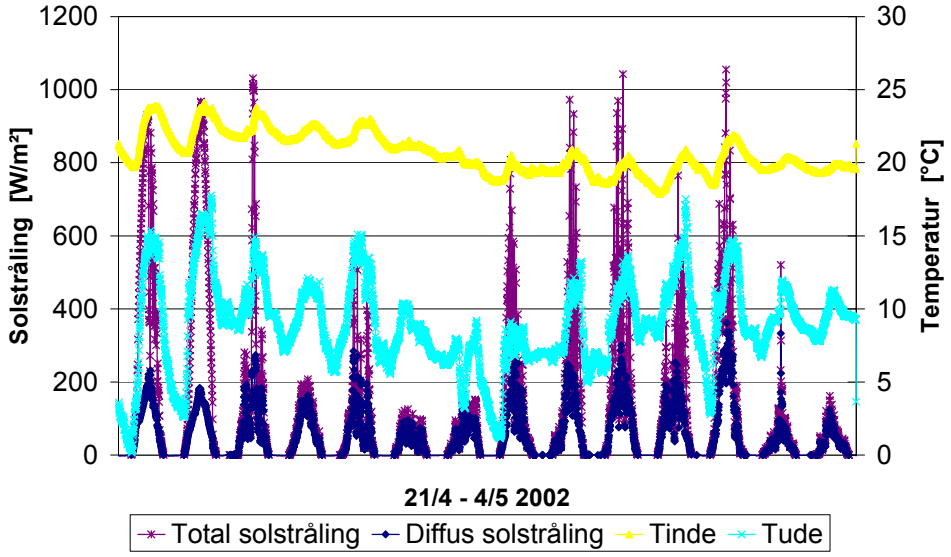
Idet omgivelserne, tappetidspunkter og termostatsetpunktet for lagertemperaturen i toppen af lageret er ens for begge anlæg, afprøves anlæggene under ens forhold.

2.3 Testperioder til validering af Hoval-Solkit simuleringsmodellen

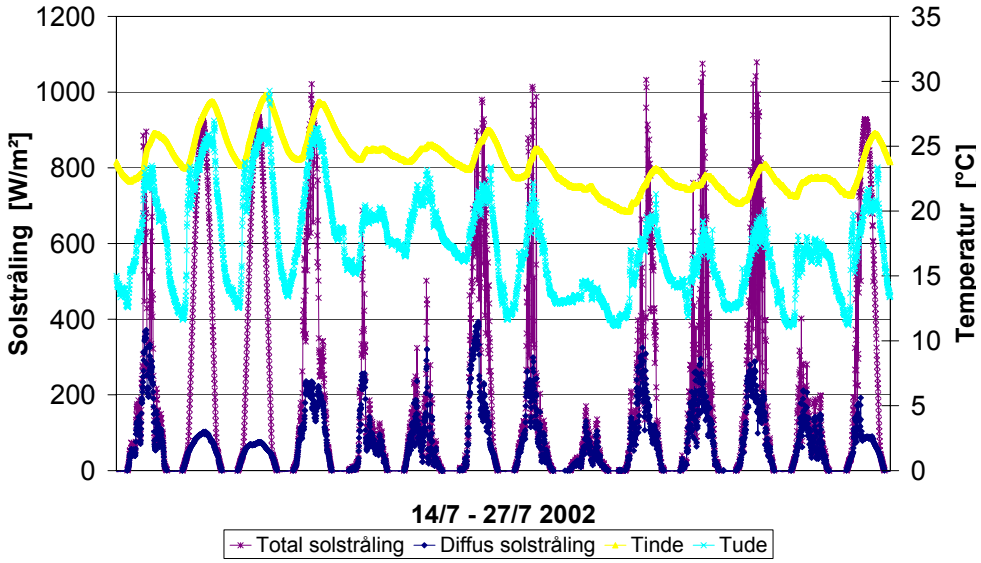
Der er udvalgt to perioder til at validere EDB-modellen af solvarmeanlægget med. Perioderne er følgende:

Periode 1: 21. april - 4. maj 2002
Periode 2: 14. juli - 27. juli 2002

I Figur 2-2 og Figur 2-3 ses solbestrålingsstyrken samt ude- og indetemperaturerne for de to perioder.



Figur 2-2: Totalt og diffust solindfald i periode 1.



Figur 2-3: Totalt og diffust solindfald i periode 2.

3 Solvarmeanlæggene

3.1 Hoval-Solkit

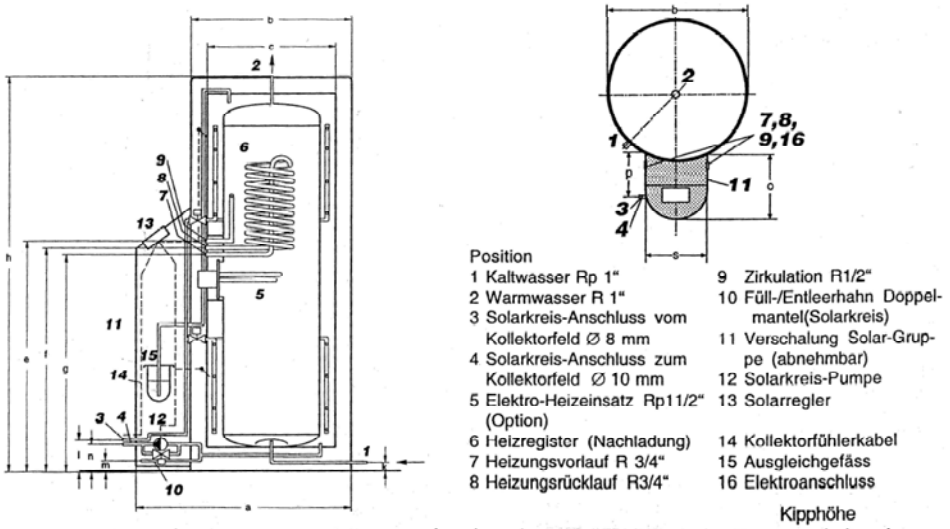
3.1.1 Opbygning

Anlægget er et schweizisk markedsført low flow anlæg med en 4.2 m² solfanger (transparent areal). Solfangeren er installeret på en 45° hældende sydvendt flade. Lagertanken er en lodretstående cylindrisk kappebeholder med varmevekslerspiral til suppleringsvarme. Beholderen har yderligere et elvarmelegeme til suppleringsvarme, men dette er ikke anvendt i testperioden.

Beholderens totale volumen er 470 l, heraf er 74 l placeret i kappen. Der er 2 indløb til kappen, og en magnetventil styrer hvilket indløb der skal være åbent. Afhængig af solfangervæskens temperatur kan væsken således enten strømme ind i et øvre indløb til kappen eller i et nedre indløb i kappen. Hvert indløb er inde i kappen forbundet med 2 stratifikationsrør, som skal sikre bedst mulig temperaturlagdeling. Hvis solfangervæsken er varmere end temperaturen i toppen af beholderen vil det øverste indløb åbne, og hvis solfangervæsken er koldere end temperaturen i toppen af beholderen (men varmere end temperaturen i bunden af beholderen) vil det nederste indløb åbnes. Yderligere, hvis temperaturen i toppen af beholderen overstiger 65°C, vil det nederste indløb være åbent.

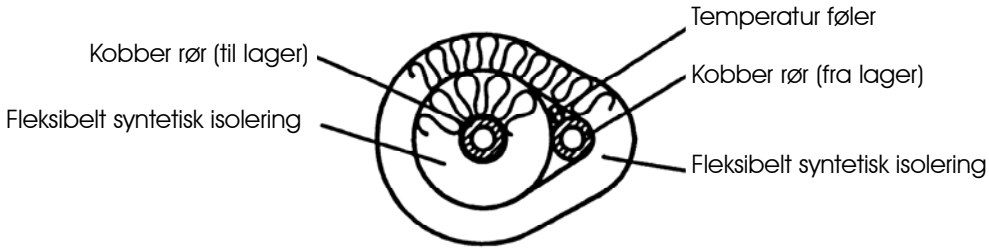
Pumpen i solfangerkredsen starter når temperaturdifferensen mellem toppen af solfangeren og bunden af beholderen er større end 5 K og stopper når temperaturdifferensen er mindre end 2 K. Hvis temperaturen i toppen af beholderen overstiger 70°C vil cirkulationspumpen stoppe. Ligeledes vil pumpen stoppe hvis temperaturen i solfangeren overstiger 110°C, og pumpen starter først igen når denne temperatur er faldet til 95°C. Ved kogning i solfangeren presses væsken tilbage i en opsamlingsbeholder. Cirkulationspumpens og styresystemets effektforbrug er totalt 56 W. En skitse af lageret er vist i Figur 3-1.

Solfangeren er forbundet til lagertanken via ca. 22 m solfangerskreds, af typen Flextube©, se Figur 3-2. Figur 3-3 og Figur 3-4 viser fotos af anlæggets solfanger og beholder.



Typ	a	h	øb	øc	e	f	g	i	k	l	m	n	o	p	s	Kipphöhe verschalt	ohne
500-4/6	1060	1940	790	590	1030	1072	988	871	44	84	50	80	280	150	390	2130	2030

Figur 3-1: Hoval-Solkit anlæggets lager.



Figur 3-2: Principskitse af en Flextube© solfangerkreds.

Figur 3-3: Solfangerne på solfangerstativet.

Figur 3-4: Hoval-Solkit beholderen.

3.1.2 Måledata

Temperaturmålinger:
Der er tre målepunkter i toppen, midten og bunden af lagertanken. Målepunkterne er anbragt i en glasstav, som er indført i tanken gennem toppen. Derudover måles fremløbstemperaturer og returtemperaturer for hhv. solfanger og lager.

Energimålinger:
I Tabel 3-1 er følgende værdier gengivet:

- Totalt solindfald på solfanger
- Solvarme overført til lageret
- Suppleringsvarme
- Energi tappet fra lageret
- Energiforbrug til cirkulationspumpe og styresystem
- Nettoydelse (=tappet energi÷supplerende energi)

- Anlægsydelse (=tappet energi÷supplerende energi÷energiforbrug til pumpe og styresystem)
- Nettodækningsgrad (=nettoydelse/tappet energi)
- Anlægsdækningsgrad (=anlægsydelse/tappet energi)

Det ses af målingerne, at anlægget i måleperioden har haft en nettoydelse på 981 kWh samt en anlægsydelse på 918 kWh. Dette giver, for hele måleperioden, en nettodækningsgrad og en anlægsdækningsgrad på hhv. 76.7% og 71.7%.

Ugenr	Solindfald	Solvarme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styre-system	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
9-10	154	62	40	64	2.6	38	24	22	37.9	33.9
11-12	199	109	27	92	7.7	45	65	57	70.2	61.9
13-14	341	60	1	31	2.7	30	31	28	98.3	89.5
15-16	164	50	12	44	3.2	17	32	29	73.4	66.1
17-18	169	58	13	44	1.8	27	31	29	69.9	65.8
19-20	304	161	62	200	5.9	23	138	132	69.1	66.1
21-22	280	110	15	93	4.2	32	78	74	83.9	79.3
23-24	348	92	1	64	3.0	29	63	60	98.2	93.6
25-26	295	95	0	65	3.4	30	65	62	100.0	94.9
27-28	268	95	7	65	3.7	37	58	54	89.3	83.5
29-30	252	86	2	65	3.0	23	64	60	97.7	93.0
31-32	299	94	0	65	3.1	29	65	61	100.0	95.2
33-34	352	102	0	65	3.3	36	65	62	100.0	94.9
35-36	292	100	0	65	3.8	35	65	61	100.0	94.2
37-38	307	116	0	83	4.0	33	83	79	100.0	95.2
39-40	168	47	13	43	2.0	17	30	28	68.9	64.3
41-42	148	57	33	65	2.3	25	32	30	49.6	46.0
43-44	95	0	73	65	3.1	8	-8	-11	-12.4	-17.2
Total	**4434**	**1494**	**299**	**1279**	**62.9**	**513**	**981**	**918**	**76.7**	**71.7**

Tabel 3-1: Målte værdier for anlægget.

3.1.3 EDB-model af solvarmeanlægget

Til bestemmelse af årlige ydelser samt forbedringsmuligheder for solvarmeanlægget er en EDB-model af anlægget udformet. Modellen opbygges i simuleringsprogrammet TRNSYS [Klein S.A et al. (1996)]. Modellen valideres med målte data fra perioderne 21/4 – 4/5 2002 og 14/7 – 27/7 2002, jvf. afsnit 2.2. I det følgende er input til EDB-modellen beskrevet:

Solfangerkredsen:

Effektivitetsudtrykket for solfangeren er:

$$\eta = 0.834 - 3.82\cdot(T_m-T_a)/G - 0.0093\cdot(T_m-T_a)^2/G$$

hvor

η	er solfangereffektiviteten	[-]
T_m	er solfangervæskens middeltemperatur	[°C]
T_a	er den omgivende lufts temperatur	[°C]
G	er bestrålingsstyrken på solfangeren	[W/m²]

Effektivitetens vinkelafhængighed, i forhold til solindfaldet, bestemmes af følgende udtryk:

$$K_i = 1 + b_0\left(\frac{1}{\cos(i)} - 1\right)$$

hvor

K_i	er indfaldsvinkelkorrektionen	[-]
i	er indfaldsvinklen	[°]
b_0	er en konstant = 0.1259	[-]

Volumenstrømmen i solfangerkredsen er ud fra målingerne bestemt til:

$$v = 0.25 \text{ l/min/m}^2$$

Rørene i solfangerkredsen består af 22 m fremløbsrør til lageret, og 22 m returrør fra lageret. Heraf er 2x6 m indendørs. Rørene er 6 mm kobberrør, der er isoleret med 20 mm isoleringen som antages at have en λ-værdi på 0.039 W/mK.

Pumpen i solfangerkredsen og styresystemet har et totalt effektforbrug på 56 W. Solfangerkredsen styres af en differenstermostat med et start/stop-setpunkt på 5K/2K. De øvrige styringsmæssige egenskaber, som er beskrevet i afsnit 3.1.1, er også indlagt i modellen via to 'Type 2 Controllers' og to 'Equations'.

Lageret:

Lageret er modelleret med Type 140 [Drück, H. & Pauschinger, T. (1997)]. Lageret er i modellen inddelt i 50 vandrette lag. Kappen er opdelt i to forbundne kapper som begge modelleres med perfekt lagdeling. Således er der eet indløb til hver kappe, og udløbet fra den øverste kappe er direkte forbundet til den nederste kappe. Herved opnås god overensstemmelse med lagerets faktiske opbygning.

Varmetabskoefficienterne på lagerets top, sider og bund er hhv. 0.39 W/K, 2.28 W/K og 2.36 W/K. Det svarer til beholderens isoleringsgrad, hvortil der er lagt en kuldebro i toppen på 0.25 W/K og en kuldebro på siderne på 0.89 W/K. Kuldebroerne beskriver det forøgede varmetab som følge af rørgennembrydninger gennem isoleringen.

Setpunktet for suppleringsvarmen for toppen af lageret er 50.5°C.

Startværdier for temperaturen i lagertankens forskellige lag er fastlagt ud fra de målte temperaturer.

3.1.4 Validering af EDB-model

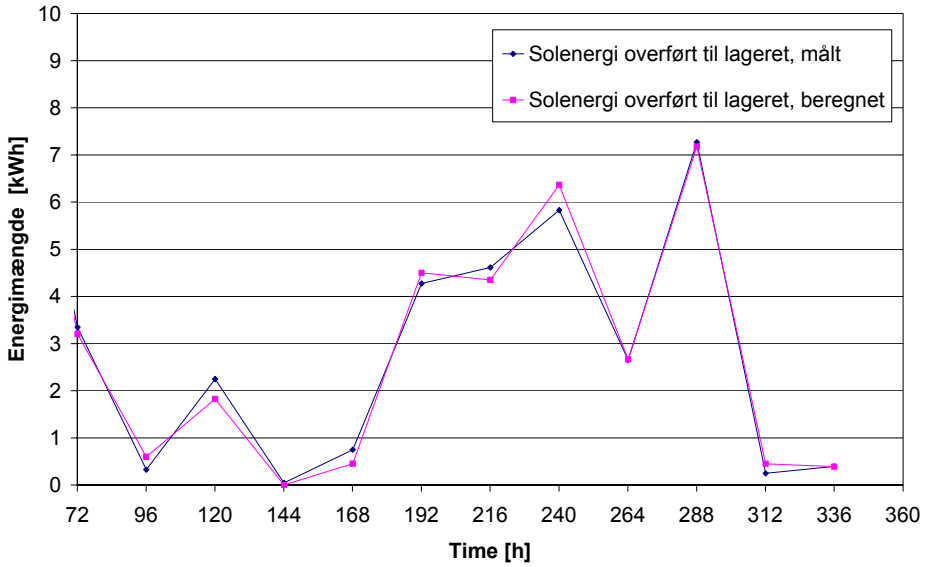
Formålet med valideringen af EDB-modellen er, at udforme en model der svarer så godt til solvarmeanlægget, at man kan beregne anlæggets årsydelser. Desuden kan modellen benyttes til at undersøge, hvorledes ændringer i anlægsudformningen påvirker ydelsen.

EDB-modellen af anlægget valideres mod målte energistørrelser og temperaturer. Energistørrelserne er som følger: Solvarme tilført solfangervæsken, solvarme tilført lageret, supplerende varme tilført lageret, energimængde tappet fra lageret og anlæggets nettoydelse. De målte temperaturer der benyttes til valideringen er: Temperaturen i toppen, midten og bunden af lageret (T7, T6 og T5), solfangervæskens fremløbstemperatur til lageret (T2) og solfangervæskens returtemperatur fra lageret (T3).

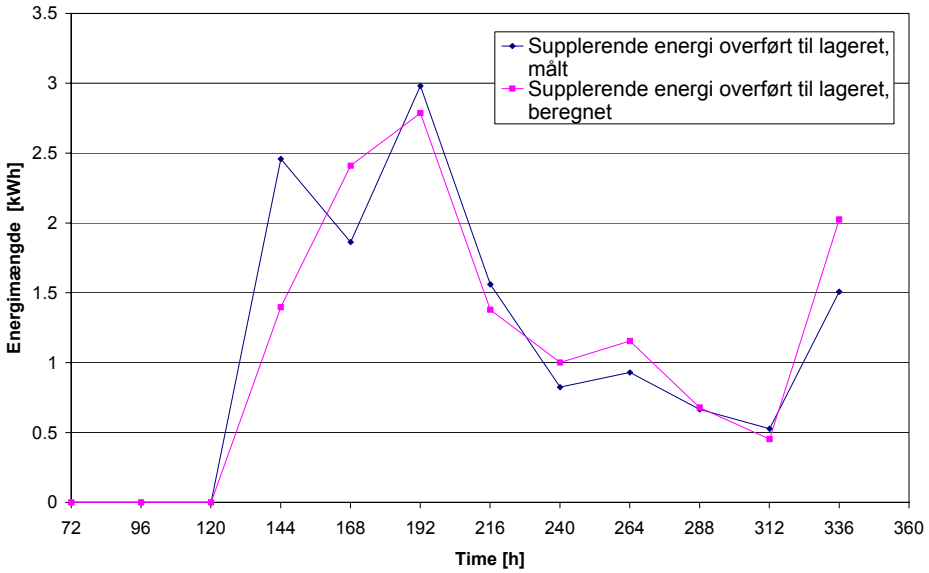
Periode 1:

Figur 3-5 viser den målte og beregnede daglige energioverførsel fra solfangervæsken til lageret. I Figur 3-6 ses den målte og beregnede daglige supplerende energimængde tilført lageret, og Figur 3-7 viser den målte og beregnede daglige tappede energimængde. Endelig viser Figur 3-8 den målte og

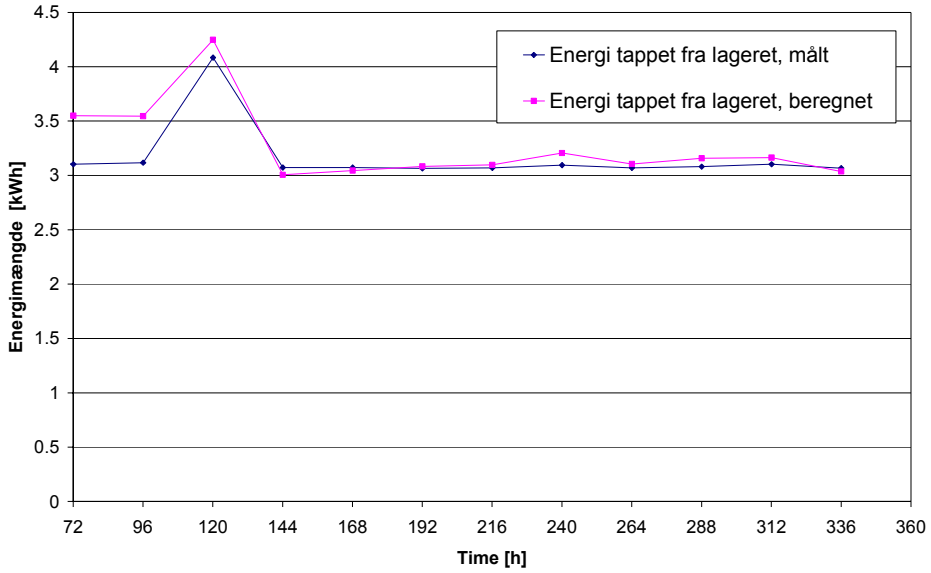
beregnede daglige nettoydelse for anlægget. De tre første dage er ikke medtaget i valideringen, da disse dage anvendes til indsvinging af modellen.



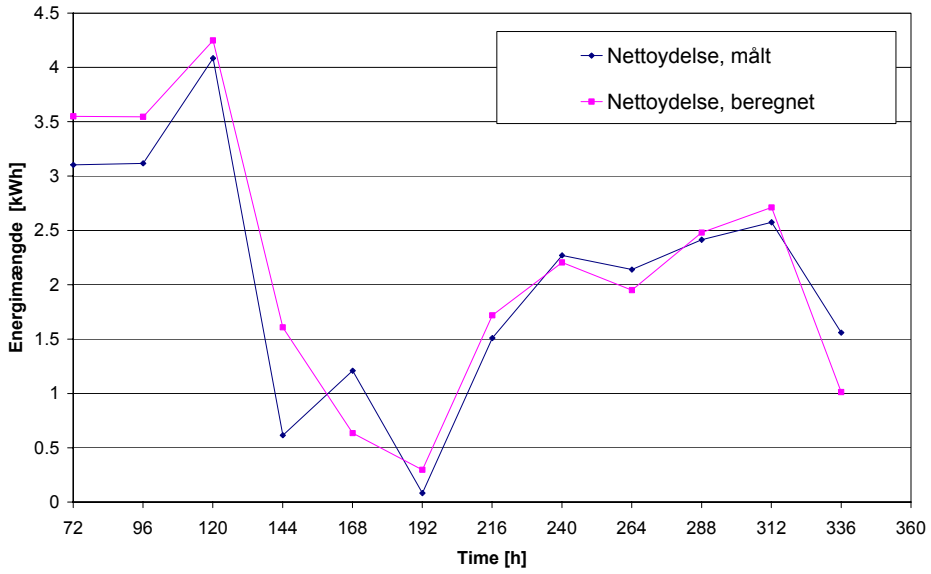
Figur 3-5: Solenergi tilført lageret.



Figur 3-6: Supplerende energi tilført lageret.



Figur 3-7: Energimængde tappet fra lageret.



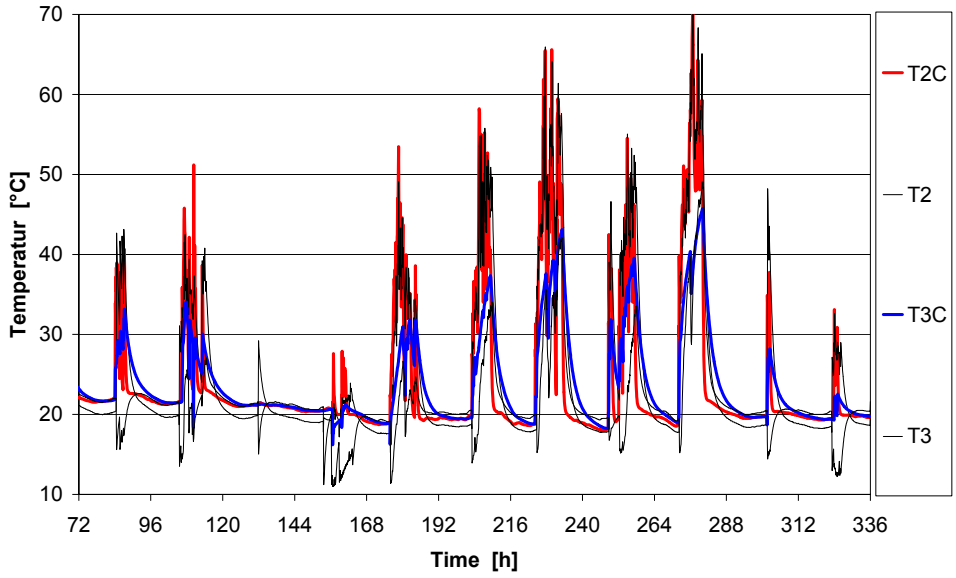
Figur 3-8: Nettoydelse for anlægget.

Det ses, at der er en god overensstemmelse mellem de målte og beregnede størrelser. I Tabel 3-2 er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene ligger inden for måleusikkerhederne på energistørrelserne, jvf. afsnit 2.

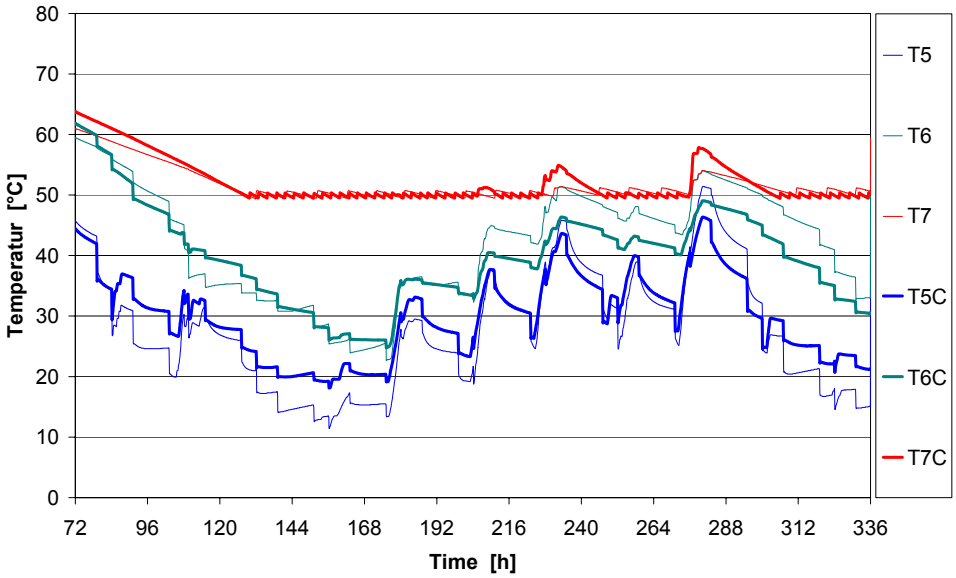
	Målt	Beregnet	Forskel [%]	Forskel [kWh]
Solenergi tilført lageret	28.7	28.8	-0.3%	-0.1
Supplerende energi tilført lageret	13.3	13.3	0.0%	0
Energi tappet fra lageret	34.9	35.7	-2.3%	-0.8
Nettoydelse	21.6	22.4	-3.7%	-0.8

Tabel 3-2: Summerede energimængder for forsøgsperiode 1, målt og beregnet.

Figur 3-9 viser de målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer til og fra lageret. Figur 3-10 viser de målte og beregnede temperaturer i lageret. Sammenligningen af temperaturerne viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens.



Figur 3-9: Fremløbstemperaturer og returtemperaturer til og fra lageret.

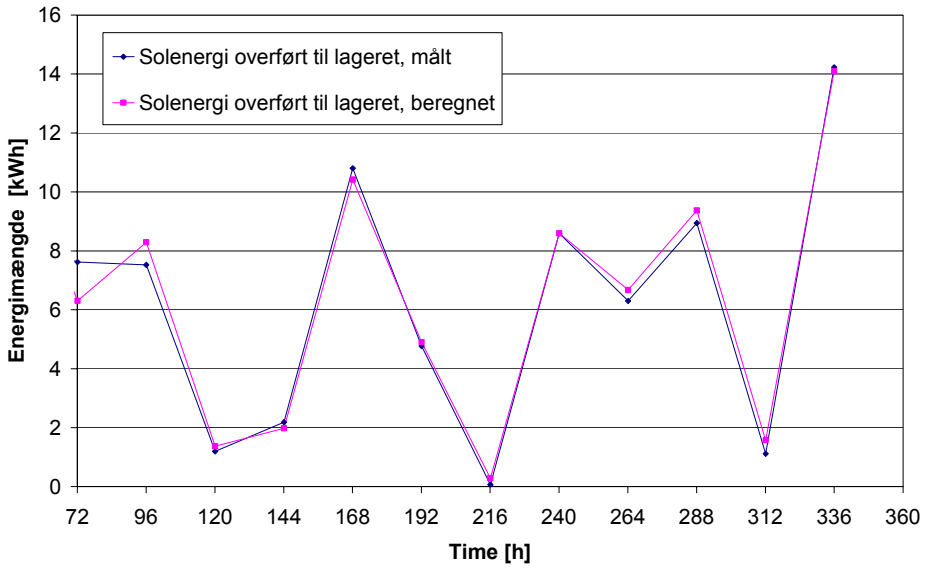


Figur 3-10: Temperaturerne i lageret.

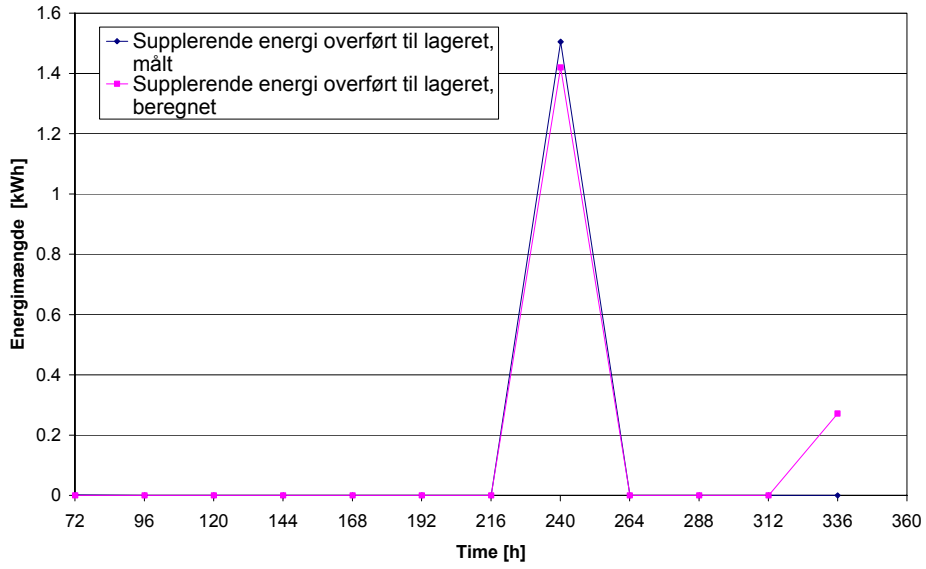
<u>Periode 2:</u>

Figur 3-11 viser den målte og beregnede daglige energioverførsel fra solfangervæsken til lageret. I Figur 3-12 ses den målte og beregnede daglige supplerende energimængde tilført lageret, og Figur 3-13 viser den målte og

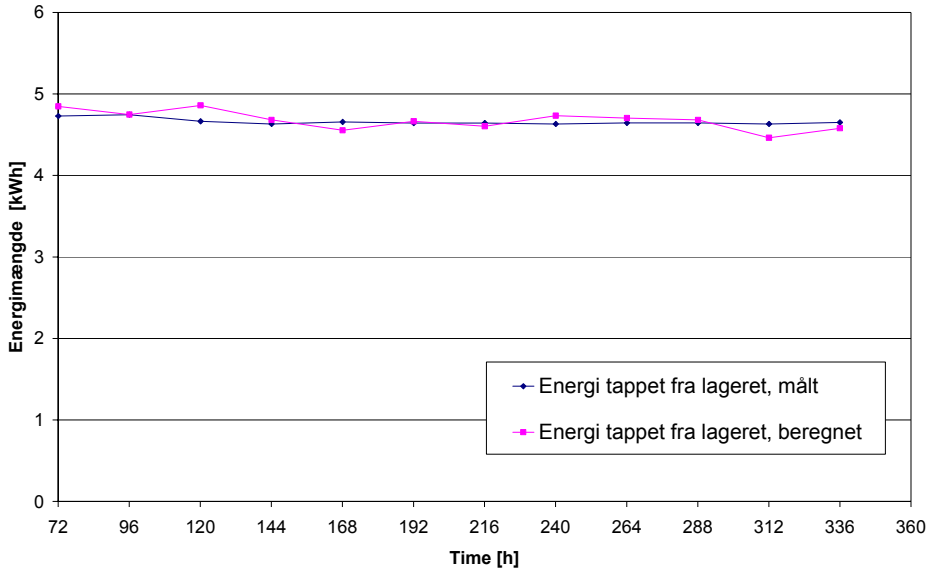
beregnede daglige tappede energimængde. Endelig viser Figur 3-14 den målte og beregnede daglige nettoydelse for anlægget.



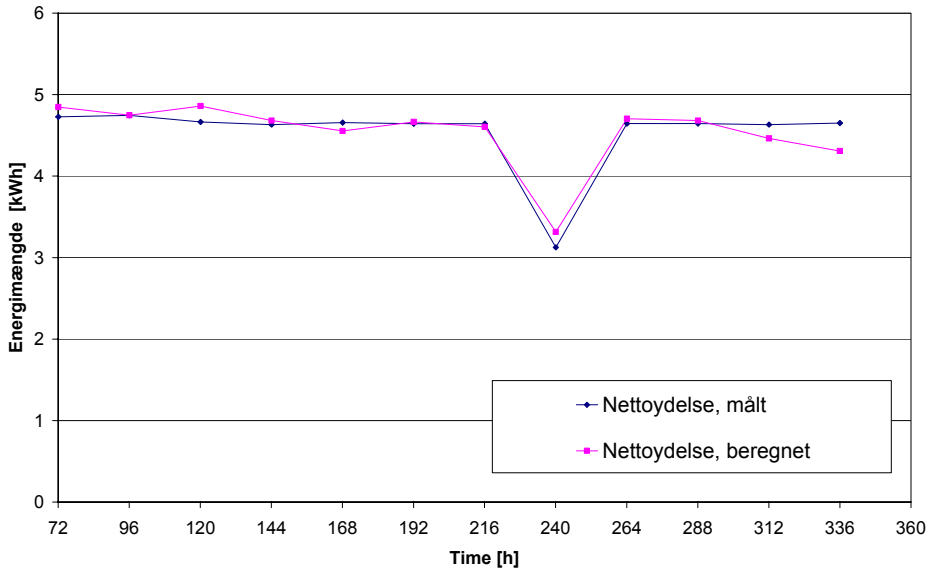
Figur 3-11: Solenergi tilført lageret.



Figur 3-12: Supplerende energi tilført lageret.



Figur 3-13: Energimængde tappet fra lageret.



Figur 3-14: Nettoydelse for anlægget.

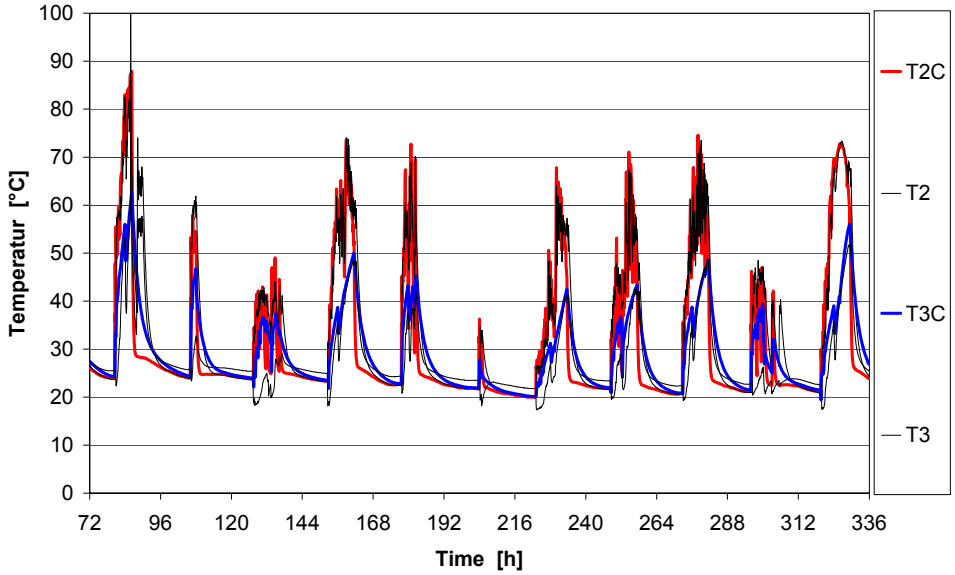
Det ses, at der er en god overensstemmelse mellem de målte og beregnede størrelser. I Tabel 3-3 er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene ligger inden for måleusikkerhederne på energistørrelserne. Dette gælder dog ikke for den supplerende energikilde.

	Målt	Beregnet	Forskel [%]	Forskel [kWh]
Solenergi tilført lageret	65.7	67.6	-2.9%	-1.9
Supplerende energi tilført lageret	1.5	1.7	-13.3%	-0.2
Energi tappet fra lageret	51.2	51.3	-0.2%	-0.1
Nettoydelse	49.7	49.6	0.2%	0.1

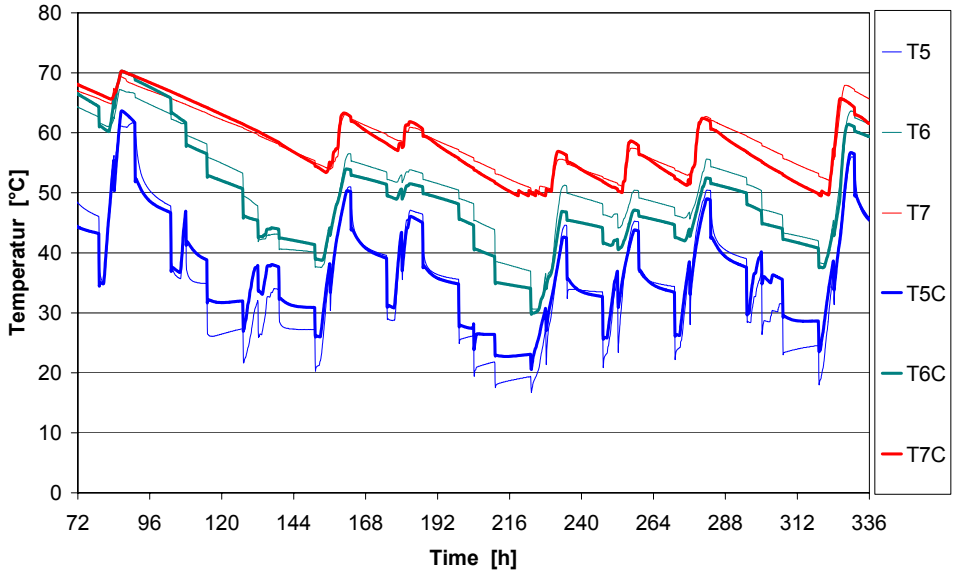
Tabel 3-3: Summerede energimængder over forsøgsperiode 2, målt og beregnet.

Figur 3-15 viser de målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer til og fra lageret. Figur 3-16 viser de målte og beregnede temperaturer i lageret. Sammenligningen af temperaturerne viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens.

På grundlag af overensstemmelsen mellem målte og beregnede energimængder og temperaturer for begge perioder vurderes det, at EDB-modellen kan anvendes til simulering af et helt år med de danske referencevejrdata TRY.



Figur 3-15: Fremløbstemperatur til lageret og returtemperatur fra lageret.



Figur 3-16: Temperaturerne i lageret.

3.1.5 Årsydelse for anlægget

I det følgende beregnes anlæggets årsydelse. Modellen beskrevet i afsnit 3.1.3 anvendes med den ændring, at koldtvandstemperaturen er konstant 10°C (før blev den målte koldtvandstemperatur benyttet).

Beregning 1:

Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 1.53 kWh, i alt svarende til 100 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Det svarer til en daglig tapning på 4.59 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes på 50.5°C.

I Tabel 3-4 er følgende månedlige værdier gengivet: Totalt solindfald på solfanger, solvarme overført til lageret, suppleringsvarme, energi tappet fra lageret, energiforbrug til cirkulationspumpen i solfangerkredsen, energiforbrug til styresystemet, nettoydelse (=tappet energimængde÷supplerende energimængde), anlægsydelse (=tappet energimængde÷supplerende energimængde÷energiforbrug til pumpe og styresystem), nettodækningsgrad (=nettoydelse/tappet energimængde) samt anlægsdækningsgrad (=anlægs-ydelse/tappet energimængde).

Det ses, at anlægget har en årlig nettoydelse på 1069 kWh og en årlig anlægsydelse på 999 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 63.7% og 59.6%.

Periode	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styresystem	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
JAN	113	36	117	142	1.6	10	26	24	18.0	16.9
FEB	253	89	76	129	3.6	36	53	49	41.2	38.4
MAR	315	109	73	142	5.0	40	69	64	48.5	45.0
APR	558	189	30	138	7.6	80	108	101	78.5	72.9
MAJ	649	221	4	142	8.2	83	138	130	97.2	91.4
JUN	735	222	2	138	7.8	87	136	128	98.5	92.9
JUL	649	220	7	142	8.6	85	135	127	95.0	88.9
AUG	617	220	8	142	8.3	85	135	126	94.4	88.6
SEP	444	182	17	138	7.5	62	120	113	87.3	81.9
OKT	288	119	59	142	5.0	36	83	78	58.3	54.8
NOV	166	64	101	138	3.6	28	37	33	26.5	23.9
DEC	144	55	114	142	2.9	26	29	26	20.2	18.2
TOTAL	**4930**	**1727**	**608**	**1677**	**69.7**	**658**	**1069**	**999**	**63.7**	**59.6**

Tabel 3-4: Beregnede månedlige energimængder for Hoval-Solkit anlægget med et varmtvandsforbrug på 100 l/dag.

Beregning 2:

Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 2.44 kWh, i alt svarende til 160 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Det svarer til en daglig tapning på 7.32 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes stadig på 50.5°C.

I Tabel 3-5 er resultaterne gengivet. Det ses, at anlægget nu har en årlig nettoydelse på 1562 kWh og en årlig anlægsydelse på 1480 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 58.2% og 55.1%.

Periode	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styresystem	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
JAN	113	40	191	228	1.8	3	37	35	16.0	15.2
FEB	253	100	130	206	4.1	24	76	72	36.9	34.9
MAR	315	122	135	228	5.5	29	93	88	40.9	38.5
APR	558	222	62	221	8.9	64	158	149	71.7	67.7
MAJ	649	269	20	228	9.9	61	208	198	91.2	86.9
JUN	735	280	13	221	9.5	73	207	198	94.0	89.6
JUL	649	270	23	228	10.4	65	205	194	89.9	85.3
AUG	617	274	23	228	9.9	69	205	195	89.8	85.4
SEP	444	213	52	221	8.7	45	168	159	76.2	72.3
OKT	288	136	117	228	6.1	26	111	105	48.6	45.9
NOV	166	72	168	221	4.0	19	53	49	24.0	22.2
DEC	144	60	186	228	3.1	18	41	38	18.2	16.9
TOTAL	**4930**	**2058**	**1122**	**2684**	**82.0**	**496**	**1562**	**1480**	**58.2**	**55.1**

Tabel 3-5: Beregnede månedlige energimængder for Hoval-Solkit anlægget med et varmtvandsforbrug på 160 l/dag.

Beregning 3:

Der tappes brugsvand fire gange dagligt kl. 7:00, 12:00, 17:00 og 19:00. Aftapningen sker i fire lige store energimængder á 2 kWh, i alt svarende til 200 l/dag opvarmet fra 10°C til 45°C. Det svarer til en daglig tapning på 8 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes nu på 45.5°C.

I Tabel 3-6 ses det, at anlægget har en årlig nettoydelse på 1805 kWh og en årlig anlægsydelse på 1718 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 61.5% og 58.5%.

Periode	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styresystem	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
JAN	113	40	201	249	1.9	-8	48	46	19.3	18.6
FEB	253	104	135	225	4.2	14	90	86	40.1	38.2
MAR	315	128	138	249	5.8	17	111	106	44.7	42.4
APR	558	235	59	241	9.4	53	182	173	75.4	71.5
MAJ	649	281	15	249	10.4	46	235	224	94.1	90.0
JUN	735	294	10	241	10.2	62	232	221	96.0	91.8
JUL	649	286	17	249	11.2	53	233	221	93.3	88.9
AUG	617	285	19	249	10.4	55	230	220	92.4	88.2
SEP	444	225	47	241	9.4	31	194	185	80.4	76.6
OKT	288	143	119	249	6.6	13	130	123	52.1	49.5
NOV	166	75	175	241	4.1	9	66	62	27.5	25.8
DEC	144	62	196	249	3.1	8	53	50	21.4	20.1
TOTAL	**4930**	**2158**	**1130**	**2935**	**86.5**	**353**	**1805**	**1718**	**61.5**	**58.5**

Tabel 3-6: Beregnede månedlige energimængder for Hoval-Solkit anlægget med et varmtvandsforbrug på 200 l/dag.

Forbedringsmuligheder:

Hvis anlægget virkelig skal forbedres skal lagertanken isoleres således at kuldebroerne langs med siderne og i toppen elimineres. Varmetabskoefficienterne på lagerets top, sider og bund er hhv. 0.39 W/K, 2.28 W/K og 2.36 W/K. Det svarer til beholderens isoleringsgrad, hvortil der er lagt en kuldebro i toppen på 0.25 W/K og en kuldebro på siderne på 0.89 W/K. Hvis disse kuldebroer fjernes fås varmetabskoefficienter på blot 0.14 W/K og 1.47 W/K for hhv. lagerets top og sider.

Der er lige som i ovenstående gennemført 3 sæt beregninger hvor der tappes hhv. 100 l/dag v. 50°C, 160 l/dag v. 50°C og 200 l/dag v. 45°C. I Tabel 3-7 ses beregningsresultaterne, hvor "Forbedret" angiver resultaterne for anlægget uden kuldebroer. Af tabellen fremgår det, at Hoval-Solkit anlæggets anlægsydelse kan forbedres med ca. 6% til 14% afhængigt af forbrugsstørrelsen, hvis kuldebroerne i lagerets top og sider elimineres.

Anlæg og Forbrug	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styresystem	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
Hoval-Solkit, 100 l/dag v. 50°C	4930	1727	608	1677	70	658	1069	999	64	60
Forbedret, 100 l/dag v. 50°C	4930	1603	477	1677	65.7	403	1200	1135	71.6	67.7
Forskel [%]	0.0	-7.2	-21.6	0.0	-5.7	-38.8	12.3	13.6	12.3	13.6
Hoval-Solkit, 160 l/dag v. 50°C	4930	2058	1122	2684	82	496	1562	1480	58	55
Forbedret, 160 l/dag v. 50°C	4930	1982	975	2684	79.6	274	1709	1629	63.7	60.7
Forskel [%]	0	-4	-13	0	-2.9	-45	9	10	9.4	10.1
Hoval-Solkit, 200 l/dag v. 45°C	4930	2158	1130	2935	86	353	1805	1718	61	59
Forbedret, 200 l/dag v. 45°C	4930	2084	1022	2935	84.3	170	1913	1829	65.2	62.3
Forskel [%]	0.0	-3.4	-9.6	0.0	-2.6	-51.8	6.0	6.4	6.0	6.4

Tabel 3-7: Beregnede årlige ydelser for Hoval-Solkit anlægget uden kuldebroer langs med siderne og i toppen af beholderen.

3.2 Anlæg Ideel

Anlægsopbygning, modelvalidering og årsberegninger er beskrevet i [Shah, L. J. (2001)]. For overskuelighedens skyld er anlægsopbygningen og årsberegningerne kort resumeret nedenfor.

Solvarmeanlægget er opført i prøvestanden i 2000 af Institut for Bygninger og Energi. Anlægget er et low flow anlæg med en canadisk solfanger med et transparent areal på 2.78 m². Solfangeren er installeret på en 45° hældende sydvendt flade. Lagertanken er en lodretstående cylindrisk kappebeholder med et el-varmelegeme til suppleringsvarme. Beholderen har yderligere en varmevekslerspiral til suppleringsvarme. Beholderens brugsvandsvolumen er 152 l og der er 28 l i kappen.

Figur 3-17: Solfangerpanelet på solfangerstativet.

Solfangeren er forbundet til lagertanken via 13.3 m fremløbsrør til lageret, og 15.3 m returrør fra lageret. Heraf er 2 x 3.5 m indendørs. Rørene er 18/16 mm kobberrør, der er isoleret med 16 mm PUR-skum. Solfangerkredsen er forsynet med en Grundfos cirkulationspumpe (Type UPS 25-40), som igennem hele måleperioden har kørt på trin 1. Dog benyttes trin 3 i forbindelse med opstart af pumpen. Når temperaturen i bunden af lageret overstiger 85°C, skifter pumpen ligeledes til trin 3. Herved undgås en overophedning af lageret. Endvidere skifter pumpen til trin 3 når temperaturen i solfangeren overstiger 90°C.

Cirkulationspumpen styres af en differenstermostat, der måler temperaturforskellen mellem udløbstemperaturen fra solfangeren og temperaturen i bunden af kappen. Differenstermostaten har et start/stop setpunkt på 10/2 K. Figur 3-17 og Figur 3-18 viser fotos af anlæggets solfanger og beholder.

Figur 3-18: Ideel beholderen.

3.2.1 Måledata

I Tabel 3-8 er følgende værdier gengivet:

- Totalt solindfald på solfanger

- Solvarme overført til lageret
- Suppleringsvarme
- Energi tappet fra lageret
- Energiforbrug til cirkulationspumpe og styresystem
- Nettoydelse (=tappet energi÷supplerende energi)
- Anlægsydelse (=tappet energi÷supplerende energi÷energiforbrug til pumpe og styresystem)
- Nettodækningsgrad (=nettoydelse/tappet energi)
- Anlægsdækningsgrad (=anlægsydelse/tappet energi)

Det ses af målingerne, at anlægget i måleperioden har haft en nettoydelse på 790 kWh samt en anlægsydelse på 721 kWh. Dette giver, for hele måleperioden, en nettodækningsgrad og en anlægsdækningsgrad på hhv. 74.3% og 67.9%.

Ugenr	Solindfald	Solvarme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styre-system	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
9-10	102	33	36	64	2.3	5	28	26	43.6	40.0
11-12	131	62	32	89	2.9	6	56	54	63.7	60.5
13-14	226	38	1	31	2.1	9	29	27	95.5	88.7
15-16	109	30	18	42	2.7	7	24	21	56.8	50.3
17-18	112	27	15	42	3.3	0	28	24	65.2	57.4
19-20	201	57	4	45	4.2	16	41	37	90.1	80.8
21-22	185	60	6	64	4.8	2	58	53	90.5	83.0
23-24	230	65	5	64	4.8	6	59	54	92.1	84.6
25-26	195	62	5	64	5.2	3	59	54	91.5	83.5
27-28	177	58	14	64	5.1	8	50	45	77.5	69.5
29-30	167	57	13	64	4.6	6	51	47	79.7	72.5
31-32	198	65	4	64	4.8	4	61	56	94.5	87.0
33-34	233	76	4	64	5.1	15	60	55	94.1	86.2
35-36	193	65	1	64	4.8	2	63	58	97.9	90.5
37-38	203	68	2	64	4.6	5	63	58	97.7	90.5
39-40	111	29	23	43	2.6	9	20	17	46.4	40.3
41-42	98	31	38	65	2.4	4	27	24	41.2	37.5
43-44	63	19	51	64	2.2	5	14	12	21.4	18.0
Total	**2935**	**902**	**273**	**1063**	**68.5**	**112**	**790**	**721**	**74.3**	**67.9**

Tabel 3-8: Målte værdier for anlægget.

3.2.2 Årsydelse for anlægget

I det følgende beregnes anlæggets årsydelse. Modellen er beskrevet og valideret i Shah, L. J. (2001).

Beregning 1:
Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 1.53 kWh, i alt svarende til 100 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Det svarer til en daglig tapning på 4.59 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes på 50.5°C.

I Tabel 3-9 er følgende månedlige værdier gengivet: Totalt solindfald på solfanger, solvarme overført til lageret, suppleringsvarme, energi tappet fra lageret, energiforbrug til cirkulationspumpen i solfangerkredsen, energiforbrug til styresystemet, nettoydelse (=tappet energimængde÷supplerende energimængde), anlægsydelse (=tappet energimængde÷supplerende energimængde÷energiforbrug til pumpe og styresystem), nettodækningsgrad (=nettoydelse/tappet energimængde) samt anlægsdækningsgrad (=anlægsydelse/tappet energimængde).

Det ses, at anlægget har en årlig nettoydelse på 952 kWh og en årlig anlægsydelse på 854 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 56.7% og 50.9%.

Periode	Solind-fald [kWh]	Sol-varme til lager [kWh]	Suppl. varme til lager [kWh]	Energi tappet fra lager [kWh]	Energi til pumpe og styresystem [kWh]	Varmetab [kWh]	Netto-ydelse [kWh]	Anlægs-ydelse [kWh]	Netto-dæknings-grad [%]	Anlægs-dæknings-grad [%]
JAN	74	17	122	143	3	-4	20	17	14.3	12.3
FEB	165	44	84	129	5	-1	45	40	34.6	30.9
MAR	208	56	87	143	6	0	56	49	39.0	34.6
APR	374	107	42	138	10	7	96	86	69.4	62.1
MAJ	439	131	20	143	12	10	123	111	86.1	78.0
JUN	498	143	12	138	12	16	126	114	91.6	82.8
JUL	440	136	16	143	12	13	126	114	88.7	80.0
AUG	419	139	17	143	12	12	125	114	87.9	79.7
SEP	299	108	36	138	10	6	102	92	74.3	66.8
OKT	190	66	75	143	7	1	68	60	47.7	42.4
NOV	107	33	103	138	5	-2	35	31	25.5	22.1
DEC	95	27	113	143	4	-3	30	26	20.8	18.0
TOTAL	3309	1007	726	1678	98	53	952	854	56.7	50.9

Tabel 3-9: Beregnede månedlige energimængder for det ideelle anlæg med et varmtvandsforbrug på 100 l/dag.

Beregning 2:

Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 2.44 kWh, i alt svarende til 160 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Det svarer til en daglig tapning på 7.32 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes stadig på 50.5°C.

I Tabel 3-10 er resultaterne gengivet. Det ses, at anlægget nu har en årlig nettoydelse på 1233 kWh og en årlig anlægsydelse på 1128 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 45.9% og 42.0%.

Periode	Solind-fald [kWh]	Sol-varme til lager [kWh]	Suppl. varme til lager [kWh]	Energi tappet fra lager [kWh]	Energi til pumpe og styresystem [kWh]	Varmetab [kWh]	Netto-ydelse [kWh]	Anlægs-ydelse [kWh]	Netto-dæknings-grad [%]	Anlægs-dæknings-grad [%]
JAN	74	19	204	228	3	-5	24	21	10.4	9.1
FEB	165	49	154	206	5	-3	52	47	25.4	23.0
MAR	208	62	163	228	7	-3	65	59	28.7	25.8
APR	374	130	94	221	11	1	127	116	57.4	52.5
MAJ	439	160	70	228	12	3	158	145	69.2	63.8
JUN	498	187	41	221	13	6	180	166	81.4	75.3
JUL	440	175	55	228	14	5	173	159	75.8	69.8
AUG	419	176	57	228	13	4	171	159	75.1	69.6
SEP	299	128	93	221	11	1	128	117	57.8	52.8
OKT	190	77	148	228	8	-2	80	72	35.3	31.8
NOV	107	37	180	221	5	-4	41	36	18.6	16.4
DEC	95	29	194	228	4	-5	34	30	15.0	13.2
TOTAL	3309	1229	1452	2685	105	-4	1233	1128	45.9	42.0

Tabel 3-10: Beregnede månedlige energimængder for det ideelle anlæg med et varmtvandsforbrug på 160 l/dag.

Beregning 3:

Der tappes brugsvand fire gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i fire lige store energimængder á 2 kWh, i alt svarende til 200 l/dag opvarmet fra 10°C til 45°C. Det svarer til en daglig tapning på 8 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes nu på 45.5°C.

I Tabel 3-11 ses det, at anlægget har en årlig nettoydelse på 1326 kWh og en årlig anlægsydelse på 1213 kWh. De to ydelser svarer til dækningsgrader på hhv. 45.1% og 41.3%.

Periode	Solind-fald [kWh]	Sol-varme til lager [kWh]	Suppl. varme til lager [kWh]	Energi tappet fra lager [kWh]	Energi til pumpe og styresystem [kWh]	Varmetab [kWh]	Netto-ydelse [kWh]	Anlægs-ydelse [kWh]	Netto-dæknings-grad [%]	Anlægs-dæknings-grad [%]
JAN	74	19	224	249	3	-7	25	23	10.2	9.0
FEB	165	50	170	225	5	-5	55	50	24.5	22.3
MAR	208	63	181	249	7	-5	69	62	27.6	24.9
APR	374	135	106	241	11	-2	136	125	56.2	51.6
MAJ	439	168	80	249	13	-1	170	156	68.0	62.6
JUN	498	200	45	241	15	2	196	181	81.2	74.9
JUL	440	188	60	249	16	1	189	173	75.9	69.4
AUG	419	187	62	249	14	0	187	173	75.0	69.2
SEP	299	133	106	241	11	-3	136	124	56.2	51.6
OKT	190	78	165	249	8	-5	84	76	33.7	30.4
NOV	107	37	198	241	5	-6	43	38	17.9	15.9
DEC	95	30	213	249	4	-7	36	32	14.5	12.9
TOTAL	3309	1288	1611	2936	113	-37	1326	1213	45.1	41.3

Tabel 3-11: Beregnede månedlige energimængder for det ideelle anlæg med et varmtvandsforbrug på 200 l/dag.

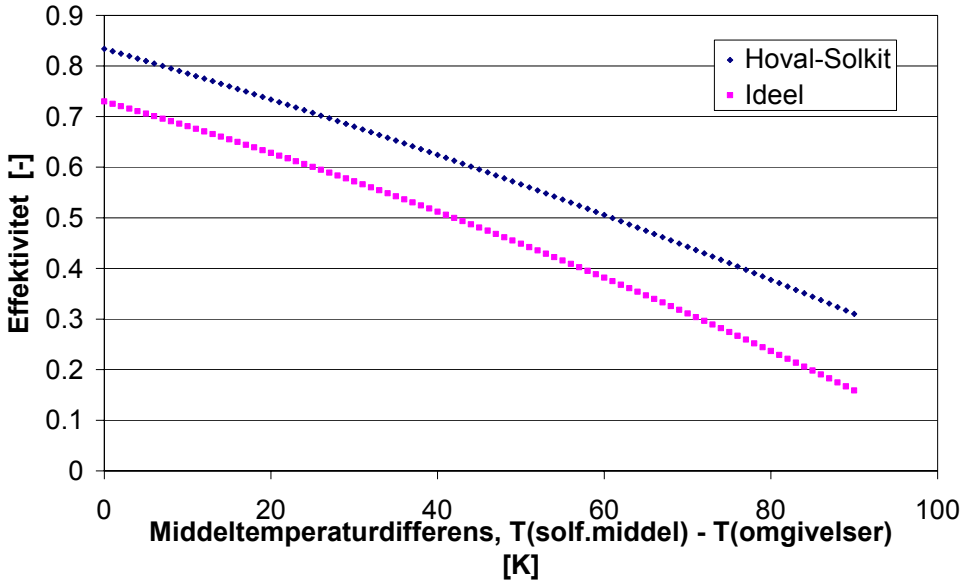
4 Sammenligning af Hoval-Solkit anlægget og det ideelle anlæg

I dette kapitel sammenlignes målingerne og beregningerne for Hoval-Solkit anlægget og det ideelle anlæg.

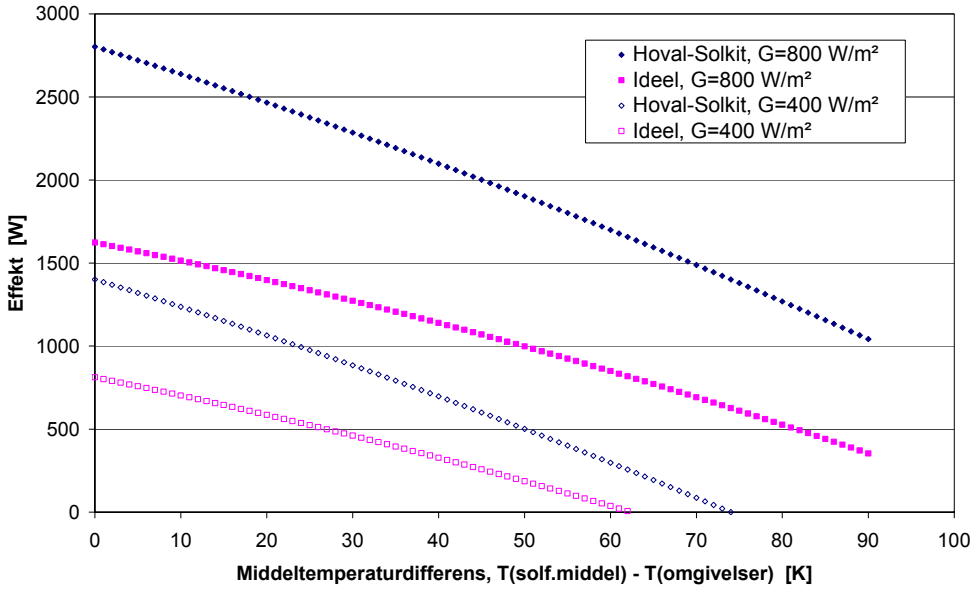
4.1 Målinger

Solfangerne i de to anlæg er ikke identiske. Solfangeren i Hoval-Solkit anlægget har en højere effektivitet end solfangeren i det ideelle anlæg, som er opbygget med en gammel canadisk solfanger. Yderligere er solfangerarealet i det Hoval-Solkit anlægget større end solfangerarealet i det ideelle anlæg.

I Figur 4-1 ses de to solfangereffektiviteter og i Figur 4-2 ses effekten afgivet fra de to solfangere ved bestrålingsstyrker på hhv. 800 W/m² og 400 W/m². I disse figurer fremgår det, at de to solfangeres ydelser er langt fra ens, idet solfangeren i det ideelle anlæg yder mindre end solfangeren i Hoval-Solkit anlægget. Derfor forventes de højeste ydelser fra Hoval-Solkit anlægget.



Figur 4-1: De to solfangeres effektivitetskurver.



Figur 4-2: Effekter afgivet fra de to solfangere ved forskellige bestrålingsstyrker.

Tabel 4-1 opsummerer måleresultaterne. For hele måleperioden har det ideelle anlæg en nettoydelse på 790 kWh og en anlægsydelse på 721 kWh. Hoval-Solkit anlæggets ydelser er hhv. 981 kWh og 918 kWh. Dvs. at Hoval-Solkit anlægget har ca. 24.2% større nettoydelse og 27.2% større anlægsydelse. Til det skal det bemærkes, at anlæggene ikke har kørt fuldstændig identisk, idet varmtvandsforbruget i Hoval-Solkit anlægget er 20.4% større end i det ideelle anlæg.

Hvis man ser bort fra de perioder hvor varmtvandstapningen varierer i de to anlæg (uge 19-22 og 37-38, jf. Tabel 3-1 og Tabel 3-8), viser Tabel 4-2 at det ideelle anlæg har en nettoydelse på 628 kWh og en anlægsydelse på 573 kWh. Hoval-Solkit anlæggets ydelser er hhv. 682 kWh og 633 kWh. Dvs. at Hoval-Solkit anlægget har ca. 8.5% større nettoydelse og 10.4% større anlægsydelse.

I øvrigt kan man af Tabel 4-2 se, at solindfaldet på Hoval-Solkit anlæggets solfangere er 51.1% større end for det ideelle anlægs solfangere, men der overføres 54.5% mere solenergi til lageret i Hoval-Solkit anlægget sammenlignet med det ideelle anlæg. Det passer fint overens med at solfangerne i Hoval-Solkit anlægget er noget bedre end solfangeren i det ideelle anlæg.

Yderligere er det interessant, at varmetabet i Hoval-Solkit anlægget er meget større end varmetabet i det ideelle anlæg. Og det er nok den primære årsag til at Hoval-Solkit anlægget ikke er så meget bedre end det ideelle anlæg.

Anlæg	Solindfald	Solvarme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styre-system	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
Ideel	2935	902	273	1063	68.5	112	790	721	74.3	67.9
Hoval-Solkit	4434	1494	299	1279	62.9	513	981	918	76.7	71.7
Forskel [%]	51.1	65.6	9.4	20.4	-8.1	358.3	24.2	27.2	3.2	5.7

Tabel 4-1: Målte energimængder for det ideelle anlæg og Hoval-Solkit anlægget.

Anlæg	Solindfald	Solvarme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styre-system	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
Ideel	2345	717	261	889	54.8	89	628	573	70.6	64.5
Hoval-Solkit	3543	1107	222	904	48.7	425	682	633	75.4	70.0
Forskel [%]	51.1	54.4	-14.9	1.6	-11.1	378.8	8.5	10.4	6.8	8.6

Tabel 4-2: Målte energimængder for det ideelle anlæg og Hoval-Solkit anlægget for de perioder hvor anlæggene har opereret under identiske forsøgsbetingelser.

4.2 Beregninger

I Tabel 4-3 er de beregnede årsydelser for Hoval-Solkit anlægget og det ideelle anlæg sammenlignet. Der er som tidligere beskrevet taget udgangspunkt i tre forskellige tappeprofiler. Som forventet ses det at Hoval-Solkit anlægget yder mere end det ideelle anlæg. Ved nærlæsning i tabellen kan det ses, at det især er den større tilførte solenergimængde, som bevirker at Hoval-Solkit anlægget yder mere end det ideelle anlæg. Omvendt kan det også ses, at merydelsen reduceres kraftigt pga. det store varmetab i Hoval-Solkit anlægget.

<u>100 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C:</u>
Det ideelle anlæg kan forventes at have en årlig nettoydelse på 952 kWh og en årlig anlægsydelse på 854 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 56.7% og 50.9%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige ydelser er hhv. 1069 kWh og 999 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 63.7% og 59.6%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige merydelser bliver således 12.3% (nettoydelse) og 17% (anlægsydelse).

<u>160 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C:</u>
Det ideelle anlæg kan forventes at have en årlig nettoydelse på 1233 kWh og en årlig anlægsydelse på 1128 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 45.9% og 42.0%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige ydelser er hhv. 1562 kWh og 1480 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 58.2% og 55.1%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige merydelser bliver således 26.7% (nettoydelse) og 31.2% (anlægsydelse).

<u>200 l/dag opvarmet fra 10°C til 45°C:</u>
Det ideelle anlæg kan forventes at have en årlig nettoydelse på 1326 kWh og en årlig anlægsydelse på 1213 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 45.1% og 41.3%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige ydelser er hhv. 1805 kWh og 1718 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 61.5% og 58.5%. Hoval-Solkit anlæggets forventede årlige merydelser bliver således 36.1% (nettoydelse) og 41.7% (anlægsydelse).

Anlæg og Forbrug	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. varme til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe og styresystem	Varmetab	Netto-ydelse	Anlægs-ydelse	Netto-dæknings-grad	Anlægs-dæknings-grad
[-]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
Ideel, 100 l/dag v. 50°C	3309	1007	726	1678	98.1	53	952	854	56.7	50.9
Hoval-Solkit, 100 l/dag v. 50°C	4930	1727	608	1677	69.7	658	1069	999	63.7	59.6
Forskel [%]	49.0	71.5	-16.2	0.0	-29.0	-	12.3	17.0	12.3	17.1
Ideel, 160 l/dag v. 50°C	3309	1229	1452	2685	105.0	-4	1233	1128	45.9	42.0
Hoval-Solkit, 160 l/dag v. 50°C	4930	2058	1122	2684	82.0	496	1562	1480	58.2	55.1
Forskel [%]	49.0	67.4	-22.7	0.0	-21.9	-	26.7	31.2	26.8	31.3
Ideel, 200 l/dag v. 45°C	3309	1288	1611	2936	112.9	-37	1326	1213	45.1	41.3
Hoval-Solkit, 200 l/dag v. 45°C	4930	2158	1130	2935	86.5	353	1805	1718	61.5	58.5
Forskel [%]	49.0	67.5	-29.8	0.0	-23.4	-	36.1	41.7	36.2	41.7

Tabel 4-3: Beregnede årsydelser for anlæggene.

5 Årsydelser for forskellige afprøvede anlæg

Det ideelle anlæg og Hoval-Solkit anlægget er afprøvet i prøvestanden under realistiske prøvningsbetingelser i 2002. I 1995 - 2001 er yderligere 17 solvarmeanlæg (inkl. det ideelle anlæg) afprøvet i prøvestanden [Andersen, E. (1997)], [Furbo, S. (1995)], [Qin, L. , Furbo, S. (1997)], [Qin, L., Furbo, S. (1999)], [Shah, L. J. (1996)], [Shah, L. J. (1997)], [Shah, L. J. (2001)].

De bestemte årlige anlægsydelser for de i alt 18 afprøvede anlæg er gengivet i Tabel 5-1. Der tappes brugsvand tre gange dagligt kl. 7:00, 12:00 og 19:00. Aftapningen sker i tre lige store energimængder á 2.44 kWh, i alt svarende til 160 l/dag opvarmet fra 10°C til 50°C. Det svarer til en daglig tapning på 7.32 kWh. Temperaturen i toppen af lagertankene holdes på 50.5°C.

Det kan være vanskeligt at sammenligne anlægsydelserne, idet såvel solfangerareal som solfangereffektivitet varierer meget fra anlæg til anlæg. Figur 5-1 viser solfangereffektiviteterne for anlæggenes solfangere, og Figur 5-2 - Figur 5-3 viser teoretisk beregnede effektafgivelser fra anlæggenes solfangere, ved bestrålingsstyrker på hhv. 800 W/m² og 400 W/m², alt sammen ved en indfaldsvinkel på 0°.

Det ses, at der er stor forskel på både solfangereffektiviteterne og på effektafgivelserne for de forskellige anlægs solfangere. Jo større solfangernes effektafgivelser er, jo større er anlægsydelserne - alt andet lige. På basis af Figur 5-2 og Figur 5-3 må det derfor forventes, at anlæggene for Ar-Con Solvarme, Solahart Scandinavia og Hoval-Solkit er de bedst ydende anlæg.

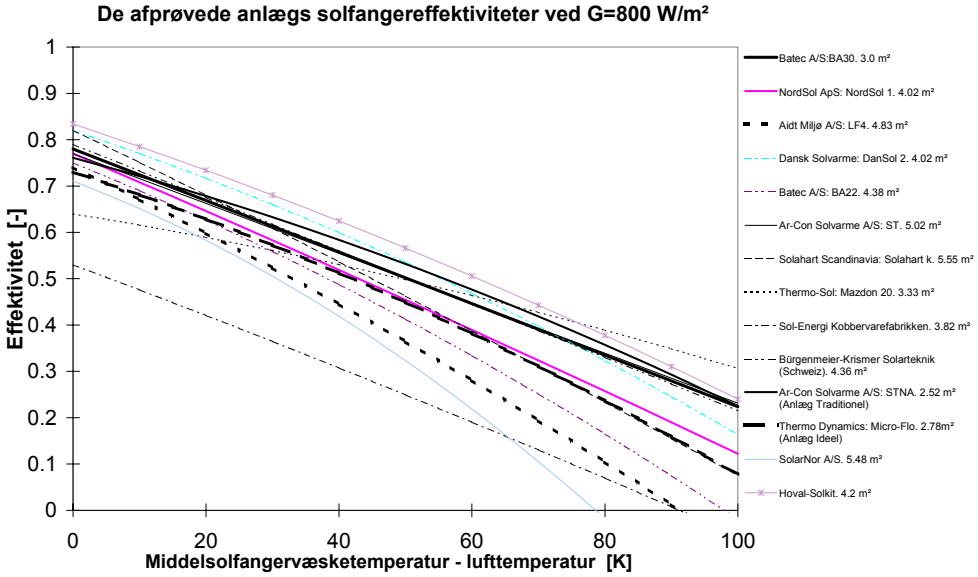
I Tabel 5-1 ses det, at Hoval-Solkit anlægget har den bedste anlægsydelse af de afprøvede anlæg. Det ideelle anlæg har også en god ydelse – med den lille solfanger taget i betragtning.

For at sammenligne den ideelle beholder med Hoval-Solkit anlæggets beholder er årsydelsen for et anlæg med den ideelle beholder og med Hoval-Solkit solfangeren beregnet (næstsidste kolonne i Tabel 5-1). Her ses det, at det ideelle anlæg med Hoval-Solkit solfangeren faktisk har en bedre ydelse end Hoval-Solkit anlægget. Anlægget er også bedre end det gamle Solkit anlæg (forgængeren til Hoval-Solkit), som ellers altid ”har ligget nr. 1” i Danmark.

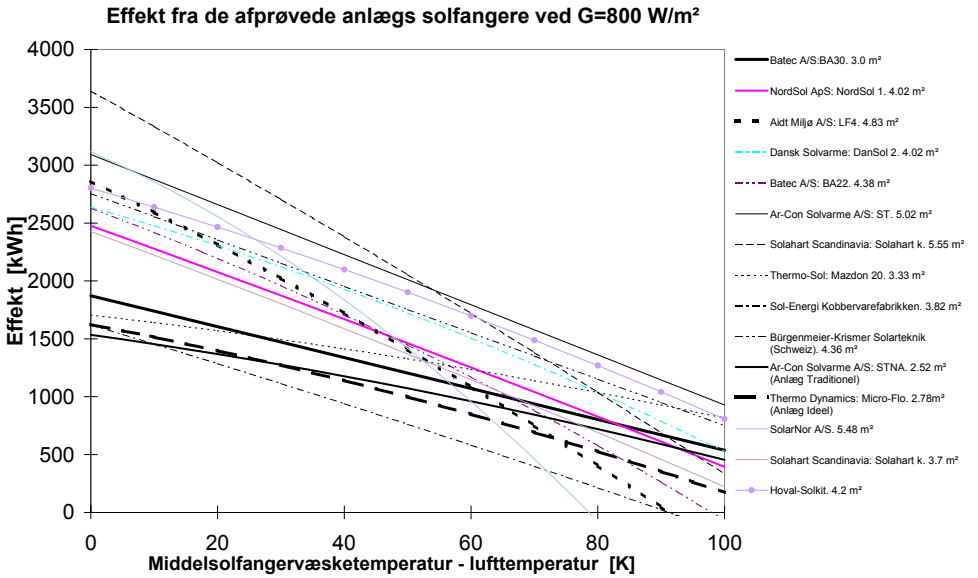
I Figur 5-4 ses beregnede årlige nettoydelser pr. m² solfanger for anlæggene. Af denne figur fremgår det tydeligt, at det ideelle anlæg med Hoval-Solkit solfangeren samt de to schweiziske anlæg er de bedste anlæg. Desuden fremgår det, at det nye og det gamle Solkit anlæg er stort set ensydende. Dog vil den nye Hoval-Solkit anlæg opnå en højere ydelse end det gamle Solkit anlæg, hvis kuldebroerne i lageret blev elimineret (se også sidste kolonne i Tabel 5-1).

Fabrikat	Test Anlæg 1 Batec / Nilan	Test Anlæg 2 Batec / Nilan	Test Anlæg 3 Batec / Nilan	Nordsol ApS	Aidt Miljø A/S	Dansk Solvarme A/S	Batec A/S	Ar-Con Solvarme A/S	Solahart Scandinavia ApS	Thermo-Sol ApS	Sol-Energi Kobbervare fabrikken	SolKit (Schweiz)	SolarNor A/S (Norge)	Solahart Scandinavia ApS	Batec A/S	Anlæg Traditionel ArCon solfanger	Anlæg Ideel Canadisk solfanger	Hoval-Solkit (Schweiz)	Anlæg Ideel **Hoval-Solkit** solfanger	Hoval-Solkit **Uden kuldebroer** (Schweiz)
Afprøvnings-periode	1996 - 1997	1996 - 1997	1996 - 1997	1996	1995	1995	1995	1995	1995	1995	1995	1995 - 1997	1997	1997	1998	2000	2000	2002	Teoretisk	Teoretisk
Solfanger-areal [m²]	3	3	3	4.02	4.83	4.02	4.38	5.02	5.55	3.33	3.82	4.36	5.48	3.7	4.38	2.52	2.72	4.2	4.2	4.2
Beholder-type	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Spiral-beholder	Kappe-beholder	Spiral-beholder	Spiral-beholder	Spiral-beholder	Spiral-beholder	276 l beholder nedykket i 129 l tank	Spiral-beholder	Kappe-beholder	Spiral-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder	Kappe-beholder
Beholder-volumen [l]	175/28.9	175/8.8	175/6.0	265/12.2	265/16.5	280	250/50	280	280	280	280	405	285	265/12.2	285	175/6.0	152/28	470/74	152/28	470/74
Supplerende energikilde	El-patron	El-patron	El-patron	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron	El-patron	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral	El-patron Varmevek-slerspiral
Kendetegn	Low flow anlæg	Low flow anlæg	Low flow anlæg	Low flow anlæg	Low flow anlæg	Spiral-anlæg	Tømmeanl. Low flow anlæg	Spiral-anlæg	Spiral-anlæg	Vakuum-solfanger	Solcelledrevet cirkulationspumpe	Low flow anlæg	Tømmeanl. Risle-solfanger	Low flow anlæg	-	Low flow anlæg	Low flow anlæg	Low flow anlæg Avanceret styring	Low flow anlæg	Low flow anlæg Avanceret styring
Nettoydelse [kWh/år]	1151	1088	1017	1301	1153	1203	1246	1514	1293	1402	937	1577	1119	1276	1269	1059	1242	1562	1637	1709
Energi til pumpe og styresystem [kWh/år]	149	154	144	84	74	85	104	130	166	129	0	112	188	91	78	137	105	82	85	80
Anlægsydelse [kWh/år]	1002	934	873	1217	1079	1118	1142	1384	1127	1273	937	1465	931	1185	1191	922	1137	1480	1552	1629
Nettodæk-ningsgrad [%]	42.9	40.5	37.9	48.5	42.9	44.8	46.4	56.4	48.2	52.2	34.9	58.7	41.7	47.5	47.3	39.4	46.3	58.2	61	63.7
Anlægsdæk-ningsgrad [%]	37.3	34.8	32.5	45.3	40.2	41.6	42.5	51.5	42	47.4	34.9	54.6	34.7	44.1	44.4	34.3	42.3	55.1	57.8	60.7

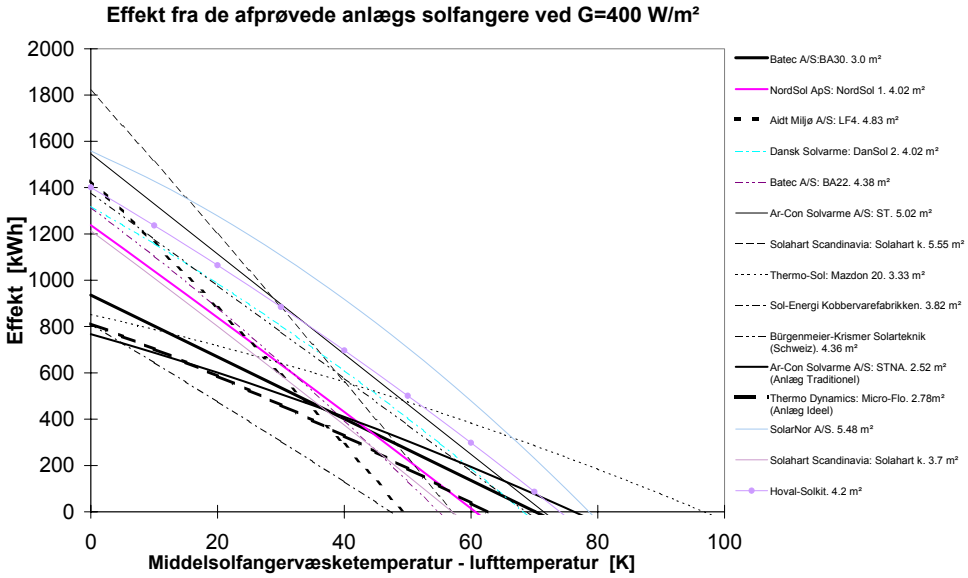
Tabel 5-1: Beregnede anlægsydelser for 18 afprøvede solvarmeanlæg.



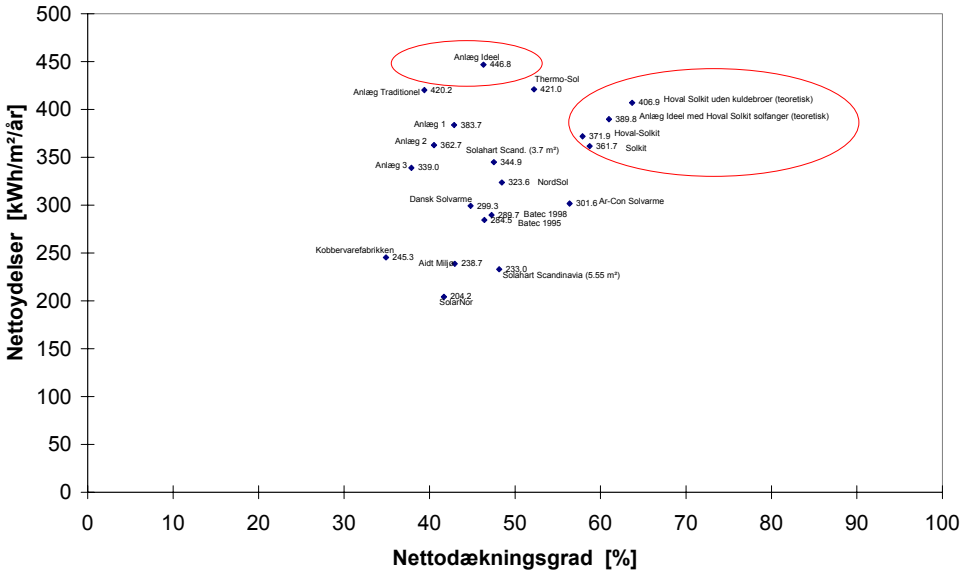
Figur 5-1: Solfangereffektiviteter for 14 solfangere, ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m², som funktion af forskellen mellem middel-solfangervæsketemperaturen og lufttemperaturen.



Figur 5-2: Effekt fra de afprøvede anlægs solfangere, ved en bestrålingsstyrke på 800 W/m², som funktion af forskellen mellem middel-solfangervæsketemperaturen og lufttemperaturen.



Figur 5-3: Effekt fra de afprøvede anlægs solfangere, ved en bestrålingsstyrke på 400 W/m², som funktion af forskellen mellem middel-solfangervæsketemperaturen og lufttemperaturen.



Figur 5-4: Årlige nettoydelser pr. m² solfanger, som funktion af nettodækningsgraden, for de afprøvede anlæg.

6 Konklusion

I samarbejde med AquaHeat A/S blev en varmtvandsbeholder til små solvarme-anlæg til brugsvandsopvarmning udviklet i 1999. Beholderen, som blev benævnt ”den ideelle beholder”, blev afprøvet i Prøvestationen for Solenergis lagerprøvestand i 2000 og den opnåede den højeste beholderfaktor på 1.15. I 2001 blev et solvarmeanlæg baseret på den ideelle beholder afprøvet i BYG.DTU’s udendørs prøvestand for solvarmeanlæg. Parallelt blev et lille traditionelt low flow anlæg testet. Det ”ideelle” anlæg blev sammenlignet med det ”traditionelle” anlæg, og målingerne viste at det ideelle anlæg havde en 31% større nettoydelse og en 45% større anlægsydelse. I denne rapport sammenlignes anlægget yderligere med et nyt ”Hoval-SolKit” anlæg fra Schweiz, som forventes at være et af de højest ydende anlæg på det europæiske marked.

Det ideelle anlæg er baseret på den ideelle beholder og er et low flow anlæg med en almindelig solfanger med et transparent areal på 2.78 m². Hoval-Solkit anlægget er et avanceret schweizisk markedsført low flow anlæg med en 4.2 m² solfanger. Lagertanken er en lodretstående cylindrisk kappebeholder. Der er 2 indløb til kappen, og en magnetventil styrer hvilket indløb der skal være åbent. Afhængig af solfangervæskens temperatur kan væsken således enten strømme ind i et øvre indløb til kappen eller i et nedre indløb i kappen. Hvert indløb er inde i kappen forbundet med 2 stratifikationsrør, som skal sikre bedst mulig temperaturlagdeling.

Anlæggene er installeret i BYG.DTU’s udendørs prøvestand for solvarmeanlæg, og de er testet under ens prøvningsbetingelser, således at en direkte sammenligning af anlæggene er mulig. Der er udført målinger på anlæggene i ca. 6 måneder. For måleperioden har det ideelle anlæg en nettoydelse på 628 kWh og en anlægsydelse på 573 kWh, svarende til dækningsgrader på hhv. 70.6% og 64.5%. Hoval-Solkit anlæggets ydelser er hhv. 682 kWh og 633 kWh. Dvs. at Hoval-Solkit anlægget har ca. 8.5% større nettoydelse og 10.4% større anlægsydelse.

Hoval-Solkit anlæggets årsydelse er beregnet med simuleringsprogrammet TRNSYS. Ud fra målingerne på anlægget er simuleringsmodellen af anlægget verificeret. Dvs. at modellen er verificeret mod de målte energimængder: Solvarme tilført lageret, supplerende energimængde tilført lageret, energimængde tappet fra lageret samt anlæggets nettoydelse. Desuden er der foretaget en sammenligning af de målte og beregnede temperaturer i solfangerkredsen og i lageret. Der er opnået god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede resultater.

Modellen benyttes til at beregne årsydelser for anlæggene, med vejrdata fra det danske referenceår TRY, og beregningerne blev sammenlignet med tidligere beregninger for det ideelle anlæg og for andre afprøvede anlæg. Beregningerne viste, at Hoval-Solkit anlægget har den højeste anlægsydelse af alle de undersøgte anlæg. Det ideelle anlæg har også en god ydelse – med den lille solfanger taget i betragtning. Beregningerne viste også, at Hoval-Solkit anlæggets anlægsydelse kan forbedres med ca. 6% til 14% afhængigt af forbrugsstørrelsen, hvis kuldebroerne i lagerets top og sider elimineres.

For at sammenligne den ideelle beholder med Hoval-Solkit anlæggets beholder er årsydelsen for et anlæg med den ideelle beholder og med Hoval-Solkit solfangeren beregnet. Disse beregninger viste, at anlægget med den ideelle beholder vil have en bedre ydelse end Hoval-Solkit anlægget. Dog vil Hoval-Solkit anlægget blive bedre end et anlæg med den ideelle beholder og med Hoval-Solkit solfangeren, hvis kuldebroerne i Hoval-Solkit beholderen blev fjernet. Det kan endeligt konkluderes, at den ideelle beholder er en af de bedste solvarmebeholdere, ikke kun på det danske marked, men på hele det europæiske marked.

7 Referencer

Andersen, E. (1997) *Afprøvning af solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning for Solahart Scandinavia ApS.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Notat SR-9725. 1997.

Furbo, S. (1992) *Efficiencies of Danish Marketed Solar Collectors for Low Flow Rates.* Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark. Report no. 92-36. December 1992.

Furbo, S. (1995) *Undersøgelse af solvarmeanlægget Solkit fra Schweiz.* Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Universitet. Meddelelse 278. Juli 1995.

Drück, H. & Pauschinger, T. (1997) Multiport Store - Model for TRNSYS Type 140 version 1.90, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart.

Nielsen, J.E. (2000) *Optimeret Solvarmebeholder*. SolEnergiCentret, Teknologisk Institut. Marts 2000.

Klein S.A et al. (1996) TRNSYS 14.1, User Manual. University of Wisconsin Solar Energy Laboratory.

Qin, L. , Furbo, S. (1997) *Afprøvning af solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning for SolarNor A/S.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Notat SR-9725. 1997.

Qin, L., Furbo, S. (1999) *Afprøvning af solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning for Batec A/S.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Notat SR-9913. 1999.

Shah, L. J. (1999) *Kort brugervejledning til simuleringsprogrammet MantlSim.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Notat U-058. November 1999.

Shah, L. J. (1996) *Undersøgelse af små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Rapport R-001. Januar 1996.

Shah, L. J. (1997) *Små low flow solvarmeanlæg med kappebeholdere.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Rapport R-009. 1997.

Shah, L. J. m.fl. (2000) *Ideel Solvarmebeholder.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Rapport SR-0007. Januar 2000.

Shah, L. J. (2001) *Assistanceordningen 2000. Afprøvning af "Ideel Beholder" i solvarmeanlæg.* Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet. Rapport SR-0102. Januar 2001.