

ELSA ANDERSEN
SØREN KUNDSSEN
SIMON FURBO
NIELS KRISTIAN VEJEN

INTELLIGENTE SOLVARMEANLÆG
Udvikling og afprøvning

Rapport
BYG•DTU R-005
2001

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-060-2

I Forord

Denne rapport beskriver arbejdet med udvikling af intelligente solvarmeanlæg inden for projektet "Intelligent soltank".

Projektet, som er gennemført ved Institut for Bygninger og Energi på Danmarks Tekniske Universitet, er finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi, sags nr. 51181/97-0063.

Projektet afsluttes med denne rapport. Derudover er der udarbejdet 3 papers:

- "Development of a smart solar tank". Simon Furbo & Elsa Andersen. ISES Solar World Congress. Jerusalem, juli 1999.
- "Small domestic hot water systems based on smart solar tanks". Simon Furbo & Søren Knudsen. Eurosun 2000 Congress. København, juni 2000.
- "CFD-modelling of a smart solar tank for SDHW systems". Søren Knudsen. Eurosun 2000 Congress. København, juni 2000.

Endelig er projektets resultater blevet præsenteret ved Danvakmøderne den 20. maj 1999 i Lyngby og den 22. november 2000 i Helsingør.

I projektet er forskelligt udformede varmtvandsbeholdere baseret på en eller flere elpatroner som supplerende energikilde med avanceret styring testet i instituttets testfaciliteter. Matematiske modeller af de intelligente solvarmeanlæg er opstillet og valideret ved hjælp af forsøgene. Med de validerede modeller er der foretaget beregninger af ydelsen for solvarmeanlæg baseret på intelligente soltanke med det formål at optimere anlægsudformning og styringsstrategi. På basis af undersøgelserne er der opført to forskelligt udformede forsøgsanlæg med intelligente soltanke hos forbrugere. Der er gennemført målinger af ydelsen af anlæggene igennem det første driftsår.

Projektgruppe:

Elsa Andersen, civ.ing.

Søren Knudsen, civ.ing.

Simon Furbo, civ.ing., lich.tech.

Niels Kristian Vejen, civ.ing.

Martin Dandanell, maskinarbejder.

Lars Kæstel Jørgensen, elektromekaniker.

Gitte Nellemose, teknisk tegner.

Anita Andersen, teknisk tegner.

II Resumé

Formålet med undersøgelserne i denne rapport er at udvikle og afprøve intelligente solvarmeanlæg hvor forsyningen af supplerende energi styres på en fleksibel måde som tilpasses størrelsen af varmtvandsforbruget samt forbrugsmønsteret, således at solvarmeanlæggene bliver velegnet til store såvel som små forbrug.

Rapporten er inddelt i fem overordnede afsnit der hver beskriver de udførte undersøgelser. De fem afsnit omhandler: udvikling og afprøvning af lagertanke, prøvning af solvarmeanlæg baseret på udvalgte lagertanke, validering af beregningsprogrammer for intelligente solvarmeanlæg, optimering af anlægsudformning og styringsstrategi med de validerede beregningsprogrammer samt prøvning af to intelligente solvarmeanlæg i praksis.

I alle de udviklede lagertanke er det forsøgt at opvarme lagertanken fra toppen og nedefter og ikke som i de traditionelle lagertanke hvor opvarmningen foregår fra det nederste niveau af den supplerende energikilde og opefter. Denne opvarmningsform er helt essentiel fordi kun på denne måde er det muligt at styre størrelsen af det supplerende volumen således at anlægget bliver velegnet til både store og små forbrug.

Erfaringerne fra en undersøgelse er umiddelbart implementeret i næste undersøgelse. Således er designet af enkelte anlæg ændret undervejs.

De forventede fordele ved intelligente solvarmeanlæg er:

- Reduceret supplerende energiforbrug i forhold til tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg, fordi der kun tilføres den mængde supplerende energi som der er behov for umiddelbart før forventet tapning.
- Reduceret varmetab i forhold til tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg, fordi det supplerende volumen i toppen af lagertanken ikke konstant er opvarmet til et højt temperaturniveau.
- Rigtig god temperaturlagdeling i lagertanken og dermed forøget solfangerydelse fordi opvarmningen af vandet i lagertanken foregår fra toppen af lagertanken.
- Reduceret beholdervolumen i forhold til tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg og dermed reduceret risiko for legionella.

På baggrund af undersøgelserne i dette projekt kan det konkluderes at:

- Intelligente solvarmeanlæg har et mindre supplerende energiforbrug end tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg.
- Intelligente solvarmeanlæg har et mindre varmetab end tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg.
- Det er muligt at opbygge en rigtig god temperaturlagdeling ved både store og små supplerende volumener når opvarmningen foregår fra toppen af lagertanken.
- Der er opbygget velegnede simuleringsprogrammer til optimering af anlægsdesign samt driftsstrategi for intelligente solvarmeanlæg.
- En forbruger der anskaffer sig et intelligent solvarmeanlæg skal være indstillet på aktivt at tage del i styringen af anlægget, fordi anlæggets ydelse er stærkt afhængig af, at styringen bliver foretaget korrekt.

III Summary

The purpose of the project described in this report is to develop and test smart solar domestic hot water systems (SDHW systems) where the energy supply from the auxiliary energy supply system is controlled in a flexible way fitted to the hot water consumption in such a way, that the SDHW systems are suitable for large as well as small hot water demands.

In a smart SDHW system the auxiliary energy supply system is controlled in a smart way. The auxiliary energy supply system heats up the water in the hot water tank from the top and only the hot water volume needed by the consumers is heated. Further the water is heated immediately before tapping. The control system includes a number of temperature sensors which cover the temperatures in the auxiliary heated volume. Based on these temperatures the energy content in the hot water tank is calculated. Only water heated to a temperature above 50°C contributes to the total energy content in the hot water tank. Further the control system includes a timer that only allows the auxiliary energy supply system to be active in certain time periods and only if the energy content in the hot water tank is lower than wanted. In this way the water in the tank is heated immediately before the expected time of tapping and only the hot water volume needed is heated.

The report is divided into five main sections. The sections deals with: developing and testing storage tanks, laboratory test of SDHW systems based on some of the developed storage tanks, validation of simulation programs for smart solar heating systems, optimisation of system design and control strategy and measurements on two smart SDHW systems installed in single family houses.

In all the developed hot water tanks, attempt is made to heat the water in the tank from the top of the tank and not as in traditional tanks where the water is heated from the lowest level of the auxiliary energy supply system, normally a helix or a electrical heating element placed in the tank. It is very important that the water is heated from the top of the tank because only in this way, the size of the auxiliary volume can be controlled, which makes the SDHW system suitable for large as well as small hot water demands.

The gained experience in one part of the project is immediately implemented in the following parts of the project. Therefore the design of some of the SDHW systems has been changed during the project.

The expected advantages by using smart SDHW systems are:

- Reduced auxiliary energy use compared to the auxiliary energy use in a similar traditional SDHW system.
- Reduced heat loss compared to the heat loss in a similar traditional SDHW system.
- Really good thermal stratification and due to that, and the way the tank is heated, a higher collector performance.
- Reduced domestic water volume in the tank compared to traditional SDHW systems and therefore a reduced risk of legionella.

Based on the results in the project it can be concluded that:

- A smart SDHW system has a lower auxiliary energy consumption than a similar traditional SDHW system.
- A smart SDHW system has a reduced heat loss from the hot water tank compared to the tank heat loss for a similar traditional SDHW system because the top of the hot water tank is not constantly heated to a high temperature level.
- It is possible to build up a good thermal stratification both for large and for small auxiliary heated volumes when the water is heated from the top of the tank.
- The simulation programs, which are developed in the project, are suitable as tools for system design and analysis for smart SDHW systems.
- A consumer that buys a smart SDHW system must be willing to take active part in the control of the system, because the thermal performance of the system strongly depends on the correct control parameters.

IV Symbolliste

Symbol:

ρ	Massefylde	[kg/m ³]
c_p	Specifik varmekapacitet	[J/kgK]
V	Volumen	[m ³]
T	Temperatur	[°C]
H	Højde	[m]
N	Antal	[-]
v	Volumenstrøm pr. m ² solfanger	[l/min/m ²]
D	Diameter	[m]
λ	Varmedningsevne	[W/mK]
Q	Energiindhold	[kWh]
η	Effektivitet	[-]
G	Solbestrålingsstyrke	[W/m ²]
k_g	Infaldsvinkelkorrektion	[-]
i	Infaldsvinkel	[°]

Indeks:

i	Nummer
a	Omgivelser
m	Middel

V Indholdsfortegnelse

I	FORORD	I
II	RESUMÉ	II
III	SUMMARY	III
IV	SYMBOLLISTE	V
V	INDHOLDSFORTEGNELSE.....	VI
1	INDLEDNING	8
2	PRØVNING AF LAGERTANKE.....	11
2.1	LAGERTANK 1, MED ELPATRON I SIDEARM OG SIDEARM PÅ KAPPE.....	12
2.2	LAGERTANK 2, MED ELPATRON I SIDEARM OG SIDEARM PÅ BRUGSVAND	13
2.3	LAGERTANK 3, MED LODRET TREDELT INTERN ELPATRON.....	15
2.4	LAGERTANK 4, MED LODRET TREDELT INTERN ELPATRON I PLASTRØR	15
2.5	LAGERTANK 5, MED SKRÅ TREDELT ELPATRON	15
2.6	LAGERTANK 6, MED VANDRET ELPATRON SAMT LODRET ELPATRON I PLASTRØR	16
2.7	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 1)	16
2.7.1	<i>Kogning i sidearm.....</i>	17
2.7.2	<i>Naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds.....</i>	21
2.8	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 2)	22
2.8.1	<i>Test af kontraventiler</i>	25
2.9	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 3)	28
2.10	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 4)	31
2.11	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 5)	35
2.12	FORSØGSRESULTATER (LAGERTANK 6)	37
2.13	SAMMENFATNING AF FORSØGSRESULTATER	39
3	PRØVNING AF SOLVARMEANLÆG	44
3.1	PRØVNINGSBETINGELSER	45
3.2	MÅLERESULTATER	45
4	VALIDERING AF BEREGNINGSPROGRAMMER.....	52
4.1	INTELLIGENT SOLVARMEANLÆG MED SIDEARM	52
4.1.1	<i>Testperiode</i>	54
4.1.2	<i>Prøvning og validering af EDB-model for intelligent solvarmeanlæg med sidearm</i>	59
4.1.3	<i>Validering af EDB-model.....</i>	63
4.2	INTELLIGENT SOLVARMEANLÆG MED TO INTERNE ELPATRONER	78
4.2.1	<i>Testperiode</i>	79
4.2.2	<i>Prøvning og validering af EDB-model for intelligent anlæg med to interne elpatroner</i> <i>81</i>	
4.2.3	<i>Validering af EDB-model.....</i>	83
5	BEREGNINGER.....	89

5.1	SAMMENLIGNING MED MARKEDSFØRTE TRADITIONELLE KAPPEBEHOLDERE	89
5.1.1	<i>Variation af tappemønster og varmtvandsforbrug</i>	<i>91</i>
5.2	OPTIMERING AF INTELLIGENT SOLVARMEANLÆG MED ELPATRON I SIDEARM	100
5.2.1	<i>Kappehøjde.....</i>	<i>100</i>
5.2.2	<i>Placering af udløb til sidearm.....</i>	<i>101</i>
5.2.3	<i>Effekt fra elpatron.....</i>	<i>102</i>
5.2.4	<i>Indløbstemperatur fra sidearm.....</i>	<i>103</i>
5.2.5	<i>Styresystemets nedre grænse for energiindhold i lagertank</i>	<i>104</i>
5.2.6	<i>Volumenstrøm i sidearm</i>	<i>104</i>
5.2.7	<i>Beholdervolumen</i>	<i>105</i>
5.3	OPTIMERING AF INTELLIGENT SOLVARMEANLÆG MED TO INTERNE ELPATRONER.....	106
5.3.1	<i>Kappehøjde.....</i>	<i>107</i>
5.3.2	<i>Placering af indløb til det lodrette rør.....</i>	<i>107</i>
5.3.3	<i>Effekt fra elpatroner.....</i>	<i>108</i>
5.3.4	<i>Udløbstemperatur fra lodret rør.....</i>	<i>109</i>
5.3.5	<i>Styreform: Energistyring eller temperaturstyring.....</i>	<i>110</i>
5.3.6	<i>Nedre grænse for styresystem ved hhv. energi- og temperaturstyring</i>	<i>111</i>
5.3.7	<i>Volumenstrøm i lodret rør.....</i>	<i>112</i>
5.3.8	<i>Beholdervolumen</i>	<i>113</i>
5.4	SAMMENFATNING AF BEREKNINGER.....	114
6	INTELLIGENTE SOLVARMEANLÆG I PRAKSIS	117
6.1	INTELLIGENT STYRESYSTEM	123
6.2	MÅLESYSTEM	124
6.3	MÅLINGER	124
6.3.1	<i>Måleresultater</i>	<i>124</i>
6.4	VURDERING AF SOLVARMEYDELSER	131
7	POTENTIALET FOR INTELLIGENTE SOLVARMEANLÆG	141
8	KONKLUSION.....	144
9	REFERENCER.....	146

1 Indledning

Tidligere gennemførte undersøgelser af små solvarmeanlægs ydelser i praksis, i laboratorium og teoretisk har vist, at små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning ikke i praksis yder som forventet. Det kan der være en lang række årsager til. Anlæggene kan være designet eller installeret forkert, enkeltkomponenter som ventiler eller lignende kan være defekte, solfangeren kan være beliggende i skyggefulde omgivelser osv. En meget vigtig årsag til små ydelser er små varmtvandsforbrug. Det gennemsnitlige forbrug af varmt vand er igennem de sidste mange år faldet betragteligt, således er det gennemsnitlige forbrug pr. person faldet fra 49 l/dag til 31 l/dag – for en familie ligger forbruget på 60-150 l/dag [1], [2] og [3]. Det har bevirket at ellers udmærkede anlæg har en ringe eller sågar negativ ydelse fordi anlæggene er overdimensionerede, dvs. dimensioneret for et forbrug der er langt større end det faktiske. Forbruget kendes normalt ikke før et solvarmeanlæg installeres og desuden vil forbruget variere igennem solvarmeanlæggets levetid. Variationer i forbruget kan skyldes at en families adfærd ændres, at antallet af hjemmeboende børn øges eller reduceres, at en ny familie flytter ind og overtager solvarmeanlægget eller noget helt fjerde. For at være på den sikre side vælges derfor ofte en stor lagertank med et supplerende volumen på 60 l - 100 l. Resultatet er et dyrt solvarmeanlæg som for små forbrug resulterer i reduceret ydelse [4].

På baggrund af disse erkendelser er de såkaldte intelligente solvarmeanlæg udviklet. Begrebet intelligent solvarmeanlæg er udtryk for et solvarmeanlæg hvor den supplerende energitilførsel styres på en fleksibel måde således at varmetilførslen fra den supplerende energikilde tilpasses forbrugers varmtvandsforbrug. Styringen består af en timerstyring af den supplerende energitilførsel samt registrering af energiindholdet i lagertanken. Herudover foregår opvarmningen af brugsvand fra toppen af lagertanken.

De umiddelbare fordele ved et intelligent solvarmeanlæg er, at størrelsen af det suppleringsopvarmede volumen kan varieres. Det kan lade sig gøre fordi opvarmningen sker fra toppen af lagertanken og det betyder samtidig, at det kun er nødvendigt at tilføre så meget supplerende energi, at behovet for varmt vand dækkes. Timeren sikrer, at den supplerende energi tilføres umiddelbart før der skal tappes varmt vand fra anlægget. Det bevirker, at den del af lagertanken der er forbeholdt solfangeren altid er så stor som overhovedet muligt. Lagertankens øverste del er således ikke konstant opvarmet af den supplerende energikilde. Det medfører, at temperaturniveauet i lagertanken generelt er lavt hvilket reducerer varmetabet fra lagertanken, øger effektiviteten af solfangeren og muliggør en reduktion af lagertankens volumen.

I dette projekt er forskellige udformninger af intelligente solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning med en eller flere elpatron(er) som supplerende energikilde(r) undersøgt.

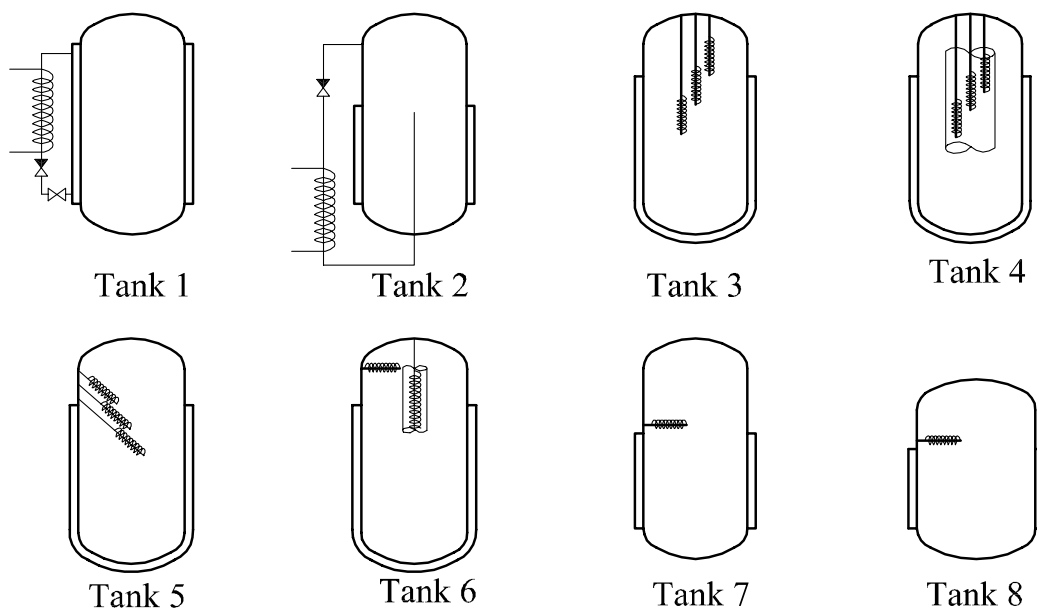
Elpatron(er) er valgt som supplerende energikilde(r) for at gøre udviklingsarbejdet af det intelligente solvarmeanlæg så enkelt som muligt.

For alle anlæggene gælder at lagertanken som første trin i undersøgelsen er testet i lagerprøvestanden ved Institut for Bygninger og Energi, IBE. Efterfølgende er enkelte af anlægstyperne testet side om side under ens realistiske driftsbetingelser i IBE's prøvestand for solvarmeanlæg.

Der er undersøgt 6 forskellige udformninger af lagertanke til intelligente solvarmeanlæg. De undersøgte lagertanke er:

- Lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på kappe
- Lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på brugsvand
- Lagertank med lodret tredelt elpatron
- Lagertank med lodret tredelt elpatron i plastrør
- Lagertank med skrå tredelt elpatron
- Lagertank med vandret elpatron samt lodret elpatron i plastrør

Figur 1-1 viser principskitser af de 6 forskellige udformninger af lagertanken til intelligente solvarmeanlæg samt to lagertanke til traditionelle anlæg, lagertank 7 og lagertank 8. Lagertankenes karakteristika ses i **Tabel 1-1**.



Figur 1-1: Principskitse af de undersøgte lagertanktyper.

Endvidere er solvarmeanlæg baseret på opvarmningsprincippet anvendt i lagertank 1, 2 og 6 testet i IBE's prøvestand for solvarmeanlæg. Som reference er et traditionelt anlæg testet side om side med de intelligente anlæg. **Tabel 1-2** viser karakteristika for de afprøvede solvarmeanlæg.

Lagertank	Lagertank 1 (Kogning/Naturlig cirkulation)	Lagertank 2 (Naturlig cirkulation)	Lagertank 3, 4, 5 og 6 (Interne elpatroner)	Lagertank 7 / Lagertank 8 (Traditionelle tanke)
Vægt (tom) [kg]	81,2	81,2	-	79,3 / 78,6
Beholdervolumen [l]	175	175	250	175 / 175
Kappevolumen [l]	58,5	28,9	66,5	12,2 / 6
Beholdervolumen over kappe [l]	9	81	17	81 / 81
Suppleringsvolumen	Varierende	Varierende	Varierende	70 / 70
Effekt fra elpatron [W]	1200	1200	1000-3200	1200 / 1200
Beholderhøjde [m]	1,536	1,536	1,650	1,536 / 0,967
Indvendig diameter [m]	0,394	0,394	0,444	0,394 / 0,494
Godstykkeelse [m]	0,003	0,003	0,003	0,003 / 0,003
Kappebredde [m]	0,0335	0,037	0,0235	0,0105 / 0,0105
Godstykkeelse, kappe [m]	0,003	0,003	0,003	0,003 / 0,003
Varmeoverførende areal [m ²]	1,615	0,715	2,310	0,877 / 0,628
Isoleringstykkeelse Top/sider/bund [m/m/m]	0,20/0,05/0,00 (Mineraluld)	0,20/0,05/0,00 (Mineraluld)	0,20/0,05/0,00 (Mineraluld)	0,20/0,05/0,03 (Mineraluld)
Rørdimension sidearm ["]	¾	¾ og 1	-	-
Isoleringstykkeelse sidearm [m]	0,030 (Mineraluld)	0,030 (Mineraluld)	-	-

Tabel 1-1: Karakteristika for de undersøgte lagertanke.

Anlæg	Anlæg 1, intelligent solvarmeanlæg	Anlæg 2, intelligent solvarmeanlæg	Anlæg 3, traditionelt solvarmeanlæg	Anlæg 4, intelligent solvarmeanlæg
Solfangerfabrikant	Batec A/S	Batec A/S	Batec A/S	Batec A/S
Solfangertype	BA30	BA30	BA30	BA30
Absorbertype	Parallel koblete kobber-Strip	Parallel koblete kobber-Strip	Serpentin koblete kobber-Strip	Parallel koblete kobber-Strip
Solfangervæske	40 % Propylenglykol/vand	26 % Propylenglykol/vand	40 % Propylenglykol/vand	40 % Propylenglykol/vand
Solfangerareal [m ²]	3,00	3,00	3,00	3,00
Lagertanktype	Lagertank 1 med elpatron i sidearm og sidearm på kappen	Lagertank 2 med elpatron i sidearm og sidearm på brugsvandet	Lagertank 7 / Lagertank 8	Lagertank 7 med en vandret elpatron og en lodret elpatron i et plastrør.

Tabel 1-2: Karakteristika for de afprøvede solvarmeanlæg baseret på de undersøgte lagertanke.

Rapporten beskriver arbejdet med måling på anlæggene, samt det teoretiske arbejde med opstilling og validering af en EDB model af et intelligent solvarmeanlæg samt resultaterne af teoretiske årssimuleringer med anlægget under forskellige driftsbetingelser.

Resultaterne beskriver hvordan de forskellige opvarmningsprincipper påvirker temperaturlagdelingen og varmeoverføringen i lagertankene og dermed ydelsen for solvarmeanlæg baseret på de undersøgte lagertanke.

2 Prøvning af lagertanke

Indledningsvis er der arbejdet med følgende to lagertankprincipper:

1. Lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på kappe
2. Lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på brugsvand

Dernæst er der arbejdet med følgende lagertankprincipper med forskellige udformninger af en eller flere interne elpatroner:

3. Lagertank med lodret tredelt elpatron
4. Lagertank med lodret tredelt elpatron i plastrør
5. Lagertank med skrå tredelt elpatron
6. Lagertank med vandret elpatron samt lodret elpatron i plastrør

I de efterfølgende afsnit er de enkelte lagertanke og opvarmningsprincipper samt fordele og ulemper ved disse nærmere beskrevet. Dernæst er resultaterne af opvarmningsforsøg under forskellige driftsbetingelser vist.

De forskellige lagertanktyper og opvarmningsprincipper vurderes ud fra hvor meget energi der skal tilføres før et vist energiindhold er opbygget i lagertanken. Energiindholdet defineres som energien af brugsvand med temperaturer over 50°C:

$$Q = \rho \cdot c_p \cdot \sum_{i=1}^N V_i \cdot (T_i - 10), \text{ hvor } T_i > 50^\circ \text{C}$$

hvor

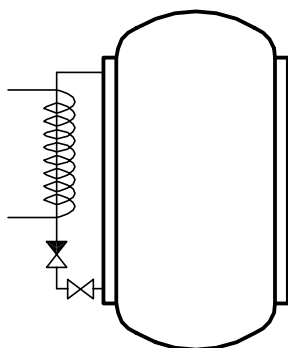
ρ	:	Massefylde for vand	[kg/m ³]
c_p	:	specifik varmekapacitet for vand	[J/kgK]
V_i	:	Delvolumen i lagertank	[m ³]
T_i	:	Temperatur af delvolumen i	[°C]
i	:	Delvolumen nummer	[-]
N	:	Antallet af delvolumener i lagertanken	[-]

Eksempel:

En lagertank med et vandvolumen på 180 l er opvarmet således at de øverste 20 l har temperaturen 52°C. De underliggende 20 l har temperaturen 50,5°C. De resterende 140 l har temperatur mindre end 50°C. Energiindholdet i lagertanken ved de angivne temperaturer er:

$$Q = \frac{4200 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{3600 \text{ s/h}} \cdot (0,02 \text{ m}^3 \cdot (52^\circ \text{C} - 10^\circ \text{C}) + 0,02 \text{ m}^3 \cdot (50,5^\circ \text{C} - 10^\circ \text{C})) = 1,93 \text{ kWh}$$

2.1 Lagertank 1, med elpatron i sidearm og sidearm på kappe



Med det første lagertankprincip – lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på kappe – er det muligt af tilføre den supplerende energi på to forskellige måder:

- ved naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kredsen eller
- ved kogning i sidearmen.

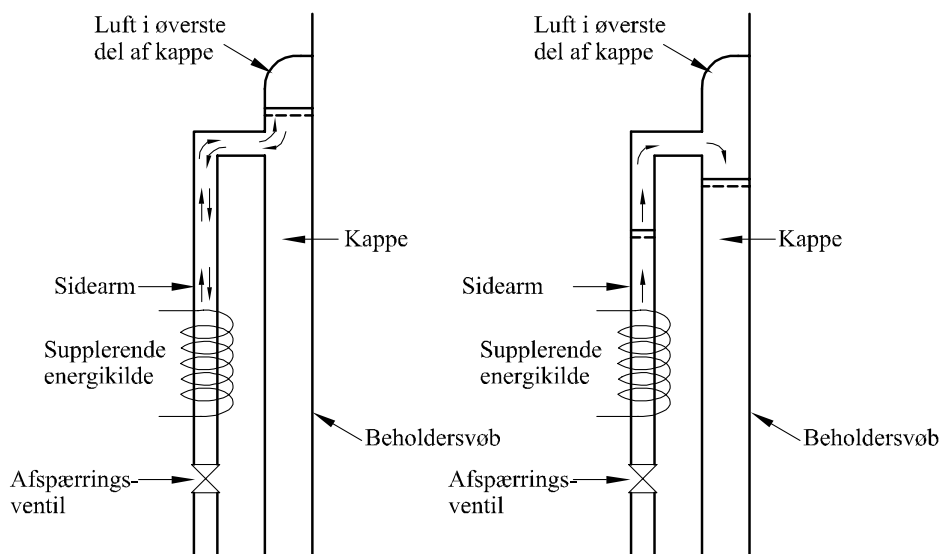
En kontraventil nederst i sidearmen forhindrer baglæns cirkulation i sidearmen i perioder hvor toppen af beholderen og toppen af kappen er varm uden at elpatronen er i drift. Med afspærringsventilen i bunden af sidearmen er det muligt, af forhindre cirkulation i sidearm-

kappe-kredsen og dermed opnå kogning i sidearmen.

Førstnævnte princip går i al sin enkelthed ud på, at solfangervæsken opvarmes i sidearmen hvorefter den cirkulerer gennem kappen hvor den afkøles. Cirkulationen foregår ved det naturlige drivtryk der opstår når væsken opvarmes i sidearmen. Det andet princip opnås når cirkulation i sidearm-kappe-kredsen forhindres. Ved hjælp af en afspærringsventilen i bunden af sidearmen, se figuren, forhindres naturlig cirkulation i kredsen hvorefter temperaturen i sidearmen stiger indtil væsken koger. Kogningen medfører, at en del af væsken fordampes i sidearmen og fortættes på den koldere beholdervæg. Den afkølede væske glider tilbage i sidearmen og opvarmes på ny. Med dette princip opnås en optimal varmeovergang mellem damp og beholdervæg samt en optimal varmeoverføring idet dampen, på grund af den ved fordampning optagne fordampningsvarme, indeholder mere energi end den varme væske. Det er klart, at den væske der her benyttes ikke kan være en glykol-vand blanding, men må være rent vand. Af samme årsag må solvarmeanlægget hvor lagertankprincippet med kogning i sidearmen benyttes være et tømmeanlæg for at undgå frostskafer i solfangeren og rørkredsen i vinterperioder.

Princippet i et tømmeanlæg er, at der kun er væske i solfangeren når solen skinner. Når solen ikke skinner er der luft i solfangeren samt i den del af rørføringen der befinder sig udendørs. Når solen skinner starter en pumpe for cirkulationen og luften i solfangeren presses ned i en tømmebeholder. Den øverste del af kappen kan udmærket anvendes som tømmebeholder, men det medfører at det varmeoverførende areal reduceres.

I forbindelse med anvendelse af lagertankprincippet med kogning og kappe som tømmebeholder, kan der opstå situationer, hvor sikkerheden omkring anlæggets drift ikke er i orden. **Figur 2-1** viser de mulige forhold i kappe og sidearm når solkredsen er i drift og den øverste del af kappen fungerer som tømmebeholder. Til venstre i figuren har sidearmen indløb i kappen under den del af kappen der anvendes som tømmebeholder. Til højre i figuren er dette ikke tilfældet.



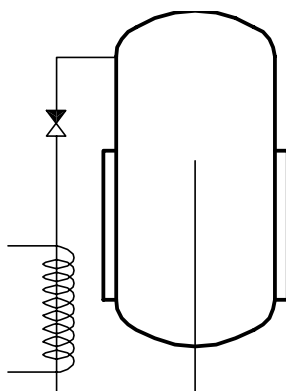
Figur 2-1: Principskitse af mulige forhold i sidearm og kappe når solkredsen er i drift.

Til venstre i **Figur 2-1** ses forholdene i sidearm og kappe som de bør være når solkredsen er i drift. Elpatronen i sidearmen er helt omsluttet af vand under hele opvarmningsforløbet. Til højre i **Figur 2-1** er vandstanden i kappen faldet til under det niveau hvor sidearmen er tilsluttet. Det betyder, at elpatronen i sidearmen i løbet af relativ kort tid vil være kogt tør. Det fordampede vand vil kondensere på beholdervæggen i kappen og på grund af den lave vandstand i kappen forblive i kappen.

Det er selvfølgelig muligt at udforme solvarmeanlægget med en separat tømmebeholder for derigennem at undgå det her omtalte problem. Eller at styre cirkulationspumpen i solkredsen så den ikke er i drift når elpatronen er i drift. Sidstnævnte styringsstrategi er imidlertid uheldig hvis effekten fra elpatronen er lille og forbruget primært ligger i dagtimerne, fordi solkredsen i dette tilfælde er for lidt i drift og dermed yder for lille et bidrag til opvarmning af brugsvandet.

Forsøgsresultater med lagertank 1 er vist i Afsnit 2.7.

2.2 Lagertank 2, med elpatron i sidearm og sidearm på brugsvand



Med det andet lagertankprincip – lagertank med elpatron i sidearm og sidearm på brugsvand – overføres den supplerende energi ved at brugsvand opvarmes ved gennemløb i en sidearm hvori en elpatron er anbragt. Cirkulationen foregår ved det naturlige drivtryk der opstår når vandet opvarmes i sidearmen.

En kontraventil i toppen af sidearmen, se figuren, forhindrer baglæns cirkulation i sidearmen i perioder hvor toppen af beholderen er varm og elpatronen ikke er i drift.

Det opvarmede vand ledes ind i toppen af beholderen og under opvarmningsforløbet vokser det supplerende volumen ved, at varmekontakten langsomt skubbes nedefter i beholderen.

Indløbstemperaturen i toppen af beholderen er en funktion af flowet i sidearmen. Flowet er bestemt af den afgivne effekt fra elpatronen, tryktabet i rørkreds, ventiler, tværsnitsændringer og bøjninger samt det drivende temperaturpotentiale skabt af temperaturforskelle i kredsen.

I første omgang foregik indløb i sidearmen fra bunden af lagertanken. Det viste sig at være en uhensigtsmæssig udformning af lagertanken fordi det hele tiden var det koldeste vand i lagertanken der skulle opvarmes til en brugbar temperatur. Det medførte et for stort supplerende energiforbrug. Endvidere var der i perioden med opvarmning fra den supplerende energikilde et nedadrettet flow i hele lagertanken. I vinterperioder hvor solkredsen trods alt bidrager med en forvarmning af vandet i lagertanken, resulterede dette bidrag fra solen ikke i tilstrækkelig grad i et reduceret energiforbrug. Det skyldtes dels det nedadrettede flow i lagertanken og den måde hvorpå energiindholdet i lagertanken defineres. Solen kunne f.eks. have forvarmet vandet til 30°C. 30°C varmt vand har i henhold til definitionen af energiindholdet i lagertanken energien 0 kWh. Under opvarmning med den supplerende energikilde i sidearmen var det stadig det koldeste vand i bunden af lagertanken der blev opvarmet. Det af solen forvarmede vand blev langsomt ført nedefter i beholderen og fik således ikke stor indflydelse på solvarmeanlæggets ydelse.

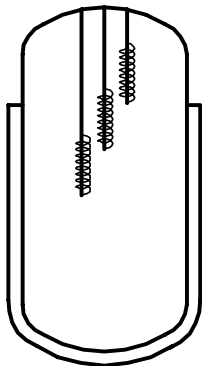
Denne erkendelse førte til en ændret udformning af lagertanken, hvor det vand der opvarmes til en brugbar temperatur udtages fra ca. midten af lagertanken. Under opvarmningen ledes vandet fra ca. midt i lagertanken ind i et plastrør af POM og videre ind i sidearmen. POM-røret er ført ind igennem lagertankens bund. For at reducere opvarmning af den nederste del af lagertanken når sidearmen er i drift er POM-røret udformet med en godstykkelse på 20 mm og er dermed godt isoleret.

Der er nogle negative effekter når temperaturen i sidearmen bliver for høj. Høje temperaturer i sidearm og dermed i beholderen øger varmetabet fra sidearm og beholder. Udfældningen af kalk i brugsvand er en funktion af temperaturen af vandet og kalkudfældningen vokser eksponentielt med voksende temperatur. Kalk er et selvforstærkende problem, fordi udfældningen af kalk i sidearmen vil reducere flowet og dermed hæve temperaturen. En lagertank af denne type forventes at kræve mere vedligeholdelse end en traditionel lagertank. En enkel måde at klare vedligeholdelsesproblemet på er, at placere en påfyldningsventil over varmelegemet og en aftapningsventil under varmelegemet i sidearmen så kalken fra tid til anden kan skylles ud.

En ikke uvæsentlig fordel ved denne type lagertank er, at elpatronen i sidearmen let kan udskiftes med en varmeveksler tilsluttet en anden og billigere energiform.

Forsøgsresultater med lagertank 2 er vist i Afsnit **2.8**.

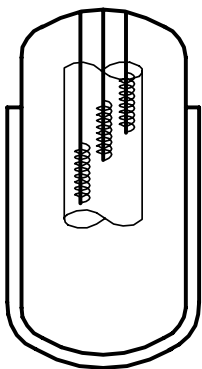
2.3 Lagertank 3, med lodret tredelt intern elpatron



Med denne udformning af lagertanken er det muligt, at tilføre den supplerende energi i forskellige niveauer og på denne måde regulere størrelsen af det supplerende volumen. Det supplerende volumen er dog begrænset til tre størrelser, svarende til det nederste niveau af de tre elpatroner. Opvarmningen sker fra det nederste niveau af den aktive elpatron og der opbygges en temperaturlagdeling fra dette niveau og opefter. Der opbygges en kraftig temperaturlagdeling når den eller de øverste varmelegemer er tændt, og det er i dette tilfælde ikke muligt, at begrænse temperaturstigningen i toppen. Når det nederste varmelegeme er tændt opbygges næsten ingen temperaturlagdeling over det nederste niveau af varmelegemet.

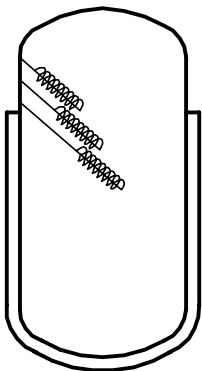
Dvs. jo længere nede i lagertanken den aktive elpatron er placeret des mindre bliver temperaturlagdelingen i lagertanken fra det nederste niveau af elpatronen og opefter, se Afsnit 2.9 hvor forsøgsresultaterne er vist.

2.4 Lagertank 4, med lodret tredelt intern elpatron i plastrør



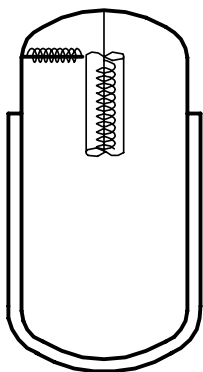
Med et rør omkring elpatronen opnås, at det varme vand ledes ud i toppen af lagertanken. Desuden skabes der et nedadrettet flow i den del af lagertanken hvor røret er placeret. Det er således muligt, at opvarme et vilkårligt volumen i den øverste del af lagertanken. Flowet i plastrøret varierer med placeringen af den aktive elpatron. Det største flow og dermed den mindste temperaturstigning opnås når den nederste elpatron er aktiv. Det mindste flow og dermed den største temperaturstigning opnås når den øverste elpatron er aktiv. Det er med denne udformning samt en hensigtsmæssig styringsstrategi endvidere muligt, at begrænse temperaturstigningen i toppen af lagertanken, se Afsnit 2.10 .

2.5 Lagertank 5, med skrå tredelt elpatron



Med skrå elpatroner er det muligt at tilføre den supplerende energi i forskellige niveauer i lagertanken og på denne måde regulere størrelsen af det supplerende volumen. Opvarmningen sker fra det nederste niveau af den aktive elpatron og der opbygges en temperaturlagdeling fra dette niveau. Når den øverste elpatron er i drift opbygges den kraftigste temperaturlagdeling og det er ikke muligt at begrænse temperaturstigningen i toppen. Når de underliggende elpatroner er i drift nærmer temperaturlagdelingen sig den lagdeling der haves med en vandret elpatron i en traditionel lagertank, dvs. stort set ingen temperaturlagdeling over elpatronens niveau, se Afsnit 2.11.

2.6 Lagertank 6, med vandret elpatron samt lodret elpatron i plastrør



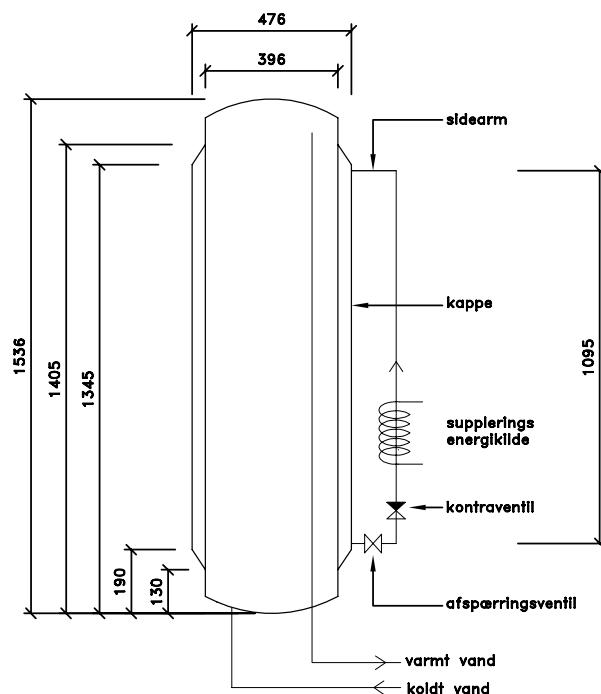
Med den sjette lagertanktype er det muligt at styre både størrelse og temperatur af det supplerende volumen. Den vandrette elpatron opvarmer volumenet over sig og toppen af plastrøret – f.eks. 20 liter. Når det ønskede temperaturniveau i toppen er nået slukkes den vandrette elpatron og den lodrette elpatron i plastrøret tændes. Hvis temperaturen af brugsvandet ved udløb fra plastrøret er lavere end den ønskede temperatur i toppen af lagertanken eftervarmes vandet af den vandrette elpatron. Hvis temperaturen af brugsvandet ved udløb fra plastrøret er højere end temperaturen i toppen af lagertanken stiger temperaturniveauet i toppen af lagertanken.

Hvis flowet i plastrøret bliver for stort vil temperaturstigningen af vandet der løber igennem plastrøret blive for lille og de to elpatroner vil hurtigt få opvarmet hele det maksimale supplerende volumen.

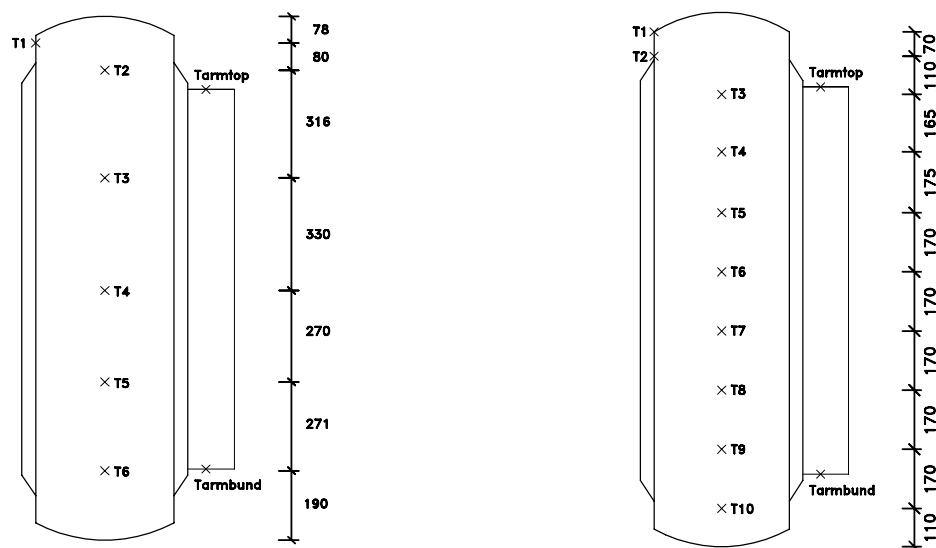
Forsøgsresultaterne er vist i Afsnit 2.12.

2.7 Forsøgsresultater (lagertank 1)

Figur 2-2 viser en målskitse af lagertanken. **Figur 2-3** viser målepunkternes placering under forsøg med kogning i sidearm og med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds.



Figur 2-2: Skitse af lagertank 1. Sidearmen består af et ¾" stålør. Alle mål er i mm.



Figur 2-3: Målepunkternes placering under forsøg. Til venstre ses placeringen af målepunkterne under forsøg med kogning i sidearm. Til højre ses placeringen af målepunkter under forsøg med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds. Alle mål i mm.

2.7.1 Kogning i sidearm

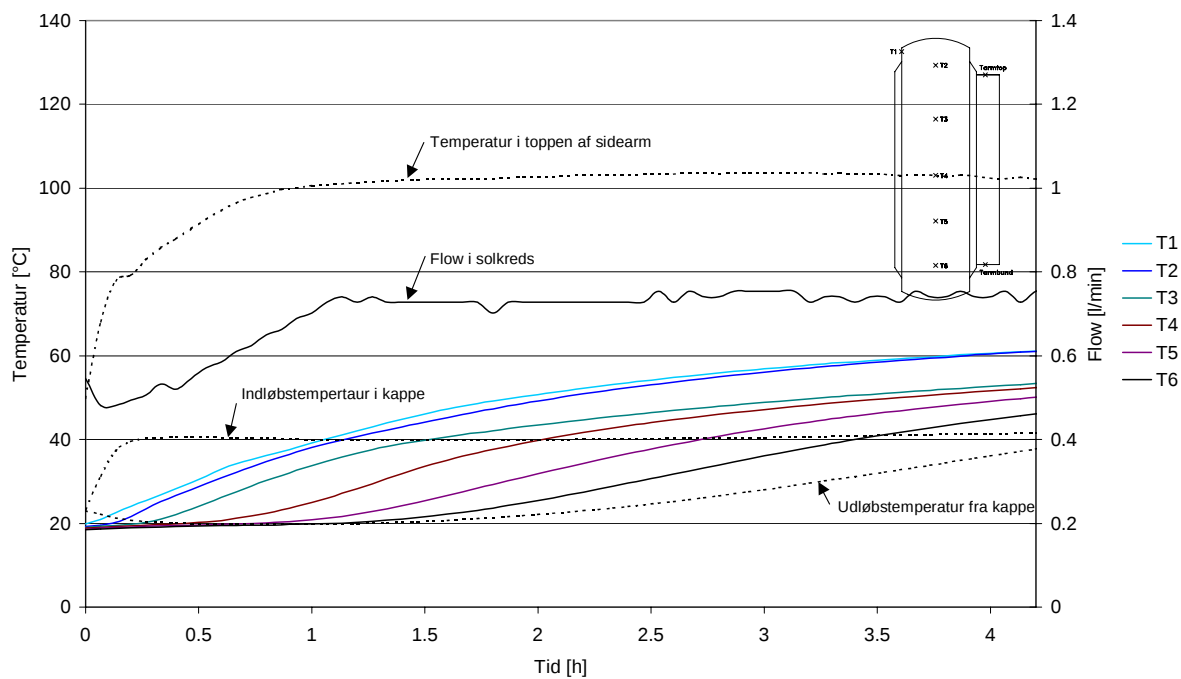
Temperaturlagdelingen i lagertanken er undersøgt for forskellige driftsbetingelser: For fastholdt fremløbstemperatur i solkredsen er volumenstrømmen i solkredsen varieret samtidig med at varmelegemet i sidearmen har været i drift således at der opstod kogning i sidearmen. For drift med elpatron alene således at der opstår kogning i sidearmen. Vandstanden i kappen var afpasset således at indløbet fra sidearmen foregik under vandspejlsniveauet i kappen. Elpatronen kunne således ikke koges tør under forsøgene.

De forskellige forsøg med tilførsel af supplerende energi samtidig med at solkredsen er i drift er:

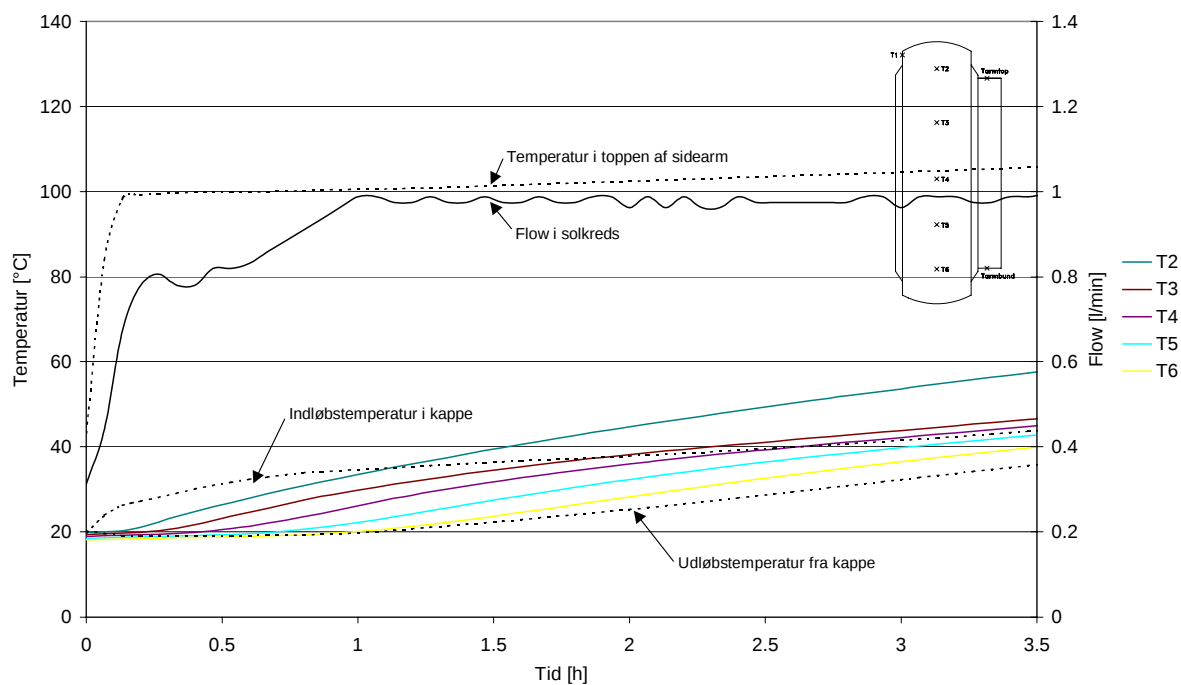
- Indløbstemperatur i kappe = 40°C. Flow i solkreds = 0,7 l/min. Kogning i sidearm.
- Indløbstemperatur i kappe = 40°C. Flow i solkreds = 1,0 l/min. Kogning i sidearm.
- Indløbstemperatur i kappe = 50°C. Flow i solkreds = 0,6 l/min. Kogning i sidearm.
- Indløbstemperatur i kappe = 50°C. Flow i solkreds = 0,7 l/min. Kogning i sidearm.
- Indløbstemperatur i kappe = 60°C. Flow i solkreds = 1,0 l/min. Kogning i sidearm.

Indløb i kappen foregår i toppen af kappen. Udløb fra kappen foregår fra bunden af kappen. Indløb i kappen er placeret lige ovenfor udløb fra kappen. Kappens ind- og udløb er placeret en kvart omkreds fra ind- og udløb i sidearmen.

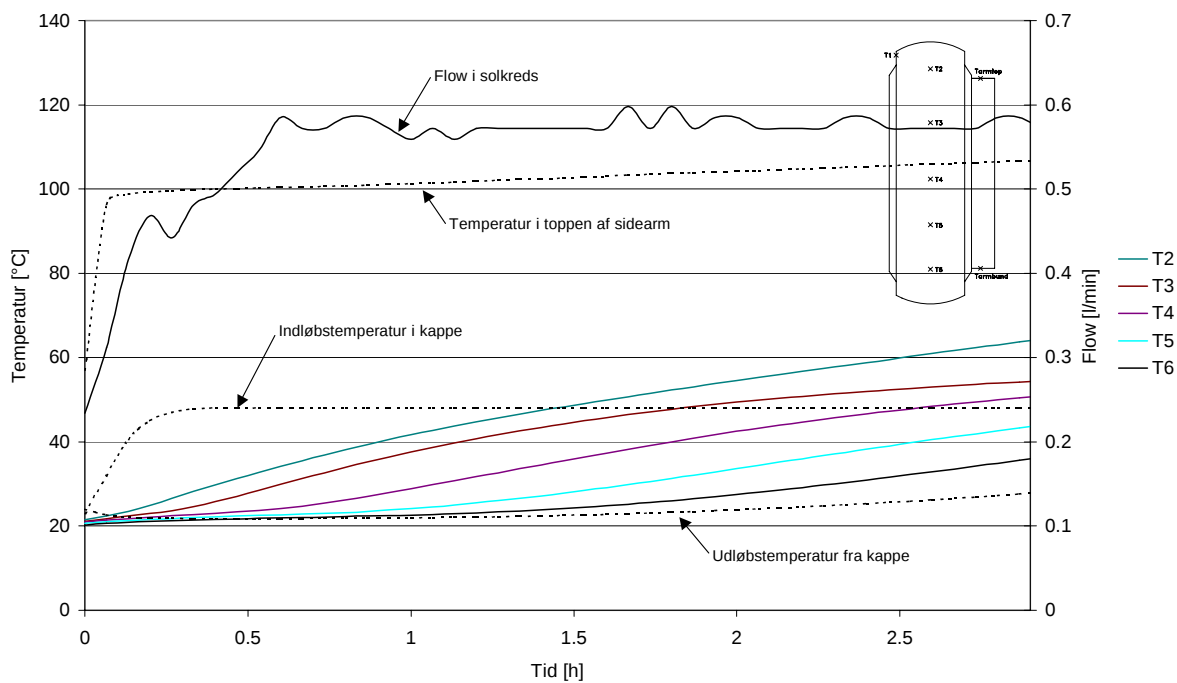
Figur 2-4 til Figur 2-8 viser resultaterne af forsøgene med kogning i sidearm og solkreds i drift. **Figur 2-9** viser temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearmen, uden samtidig drift af solkreds.



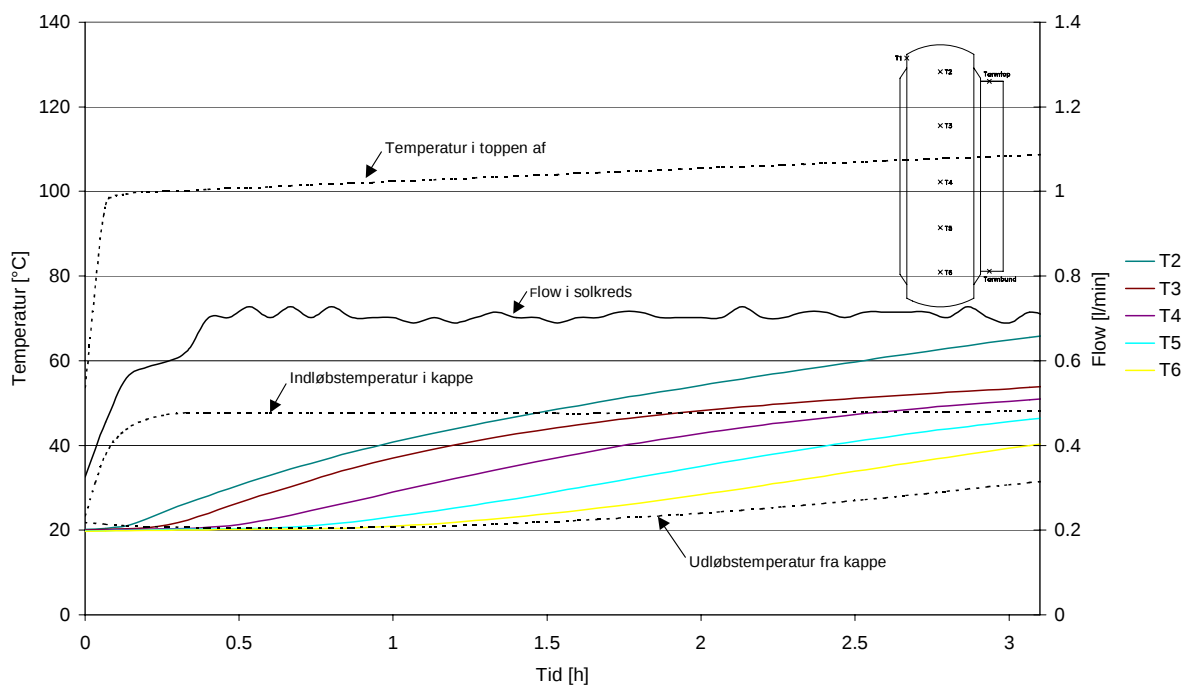
Figur 2-4: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm og flow i solkreds. Bemærk at kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.



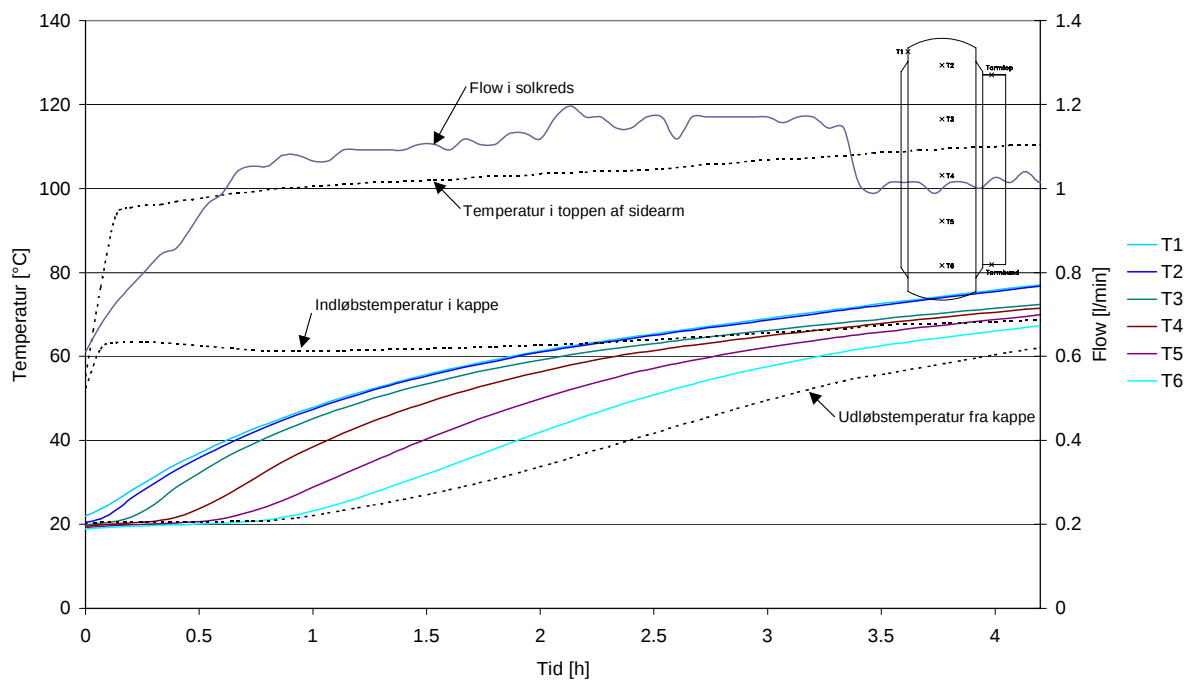
Figur 2-5: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm og flow i solkreds. Bemærk at kurven for T1 samt kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.



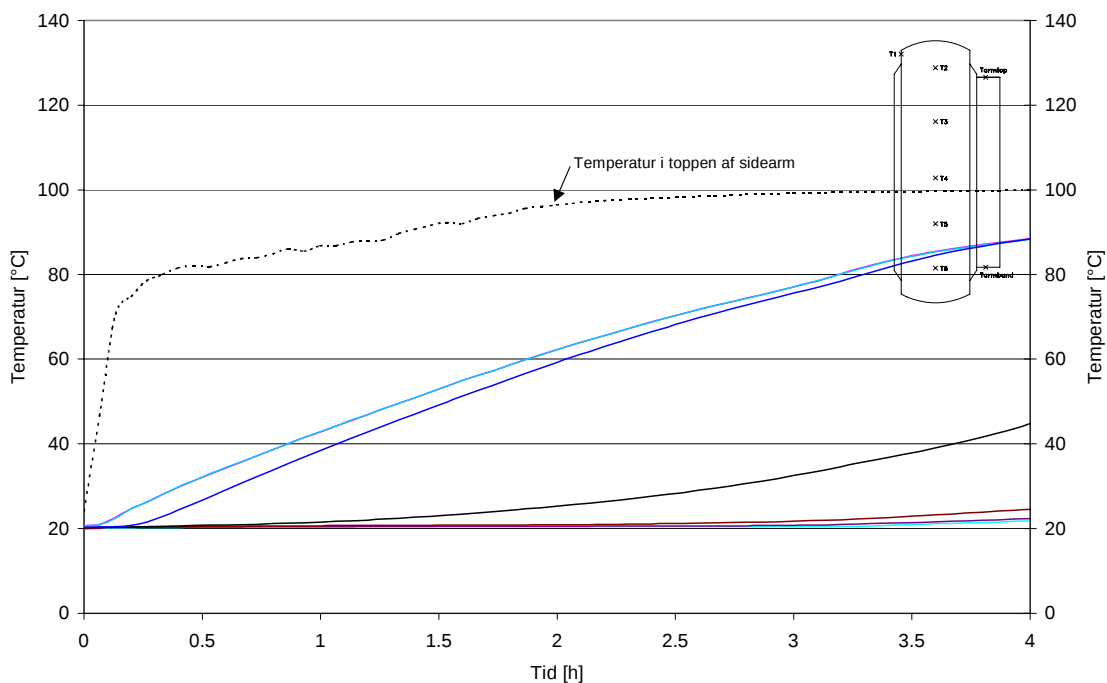
Figur 2-6: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm og flow i solkreds. Bemærk at kurven for T1 samt kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.



Figur 2-7: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm og flow i solkreds. Bemærk at kurven for T1 samt kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.



Figur 2-8: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm og flow i solkreds. Bemærk at kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.



Figur 2-9: Temperaturlagdelingen i lagertanken med kogning i sidearm uden flow i solkreds. Bemærk at kurven for Tarmbund ikke er vist i figuren. Målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken kan ses i Figur 2-3.

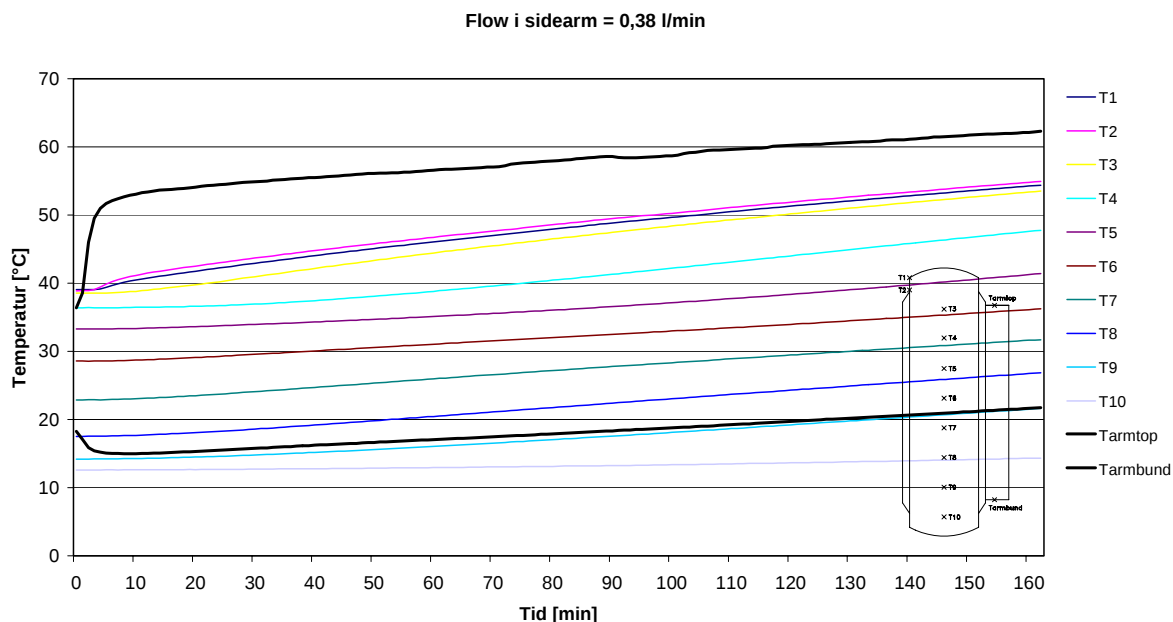
Af **Figur 2-4** til **Figur 2-8** ses at temperaturlagdelingen ikke opbygges så godt når solkredsen er i drift samtidig med at der tilføres supplerende energi fra varmelegemet i sidearmen. Når solkredsen er i drift føres varmen fra den supplerende energikilde i sidearmen nedefter i kappen og en større del af vandet i lagertanken opvarmes til et lavere temperaturniveau. En lav fremløbstemperatur fra solkredsen bevirker at temperaturen i kappen falder yderligere.

I **Figur 2-9** ses temperaturlagdelingen i lagertanken når den tilførte energi udelukkende kommer fra kogning i sidearmen. Det er tydeligt at temperaturlagdelingen opbygges fantastisk godt ved denne driftsbetingelse. Imidlertid tilføres varmen ved denne driftsbetingelse kun til vandet i den del af lagertanken der er beliggende over indløbet fra sidearmen og temperaturen i toppen bliver meget høj. For at få opvarmet et større vandvolumen i lagertanken til et lavere temperaturniveau er det nødvendigt at begynde at cirkulere vandet i sidearm-kappe-kredsen.

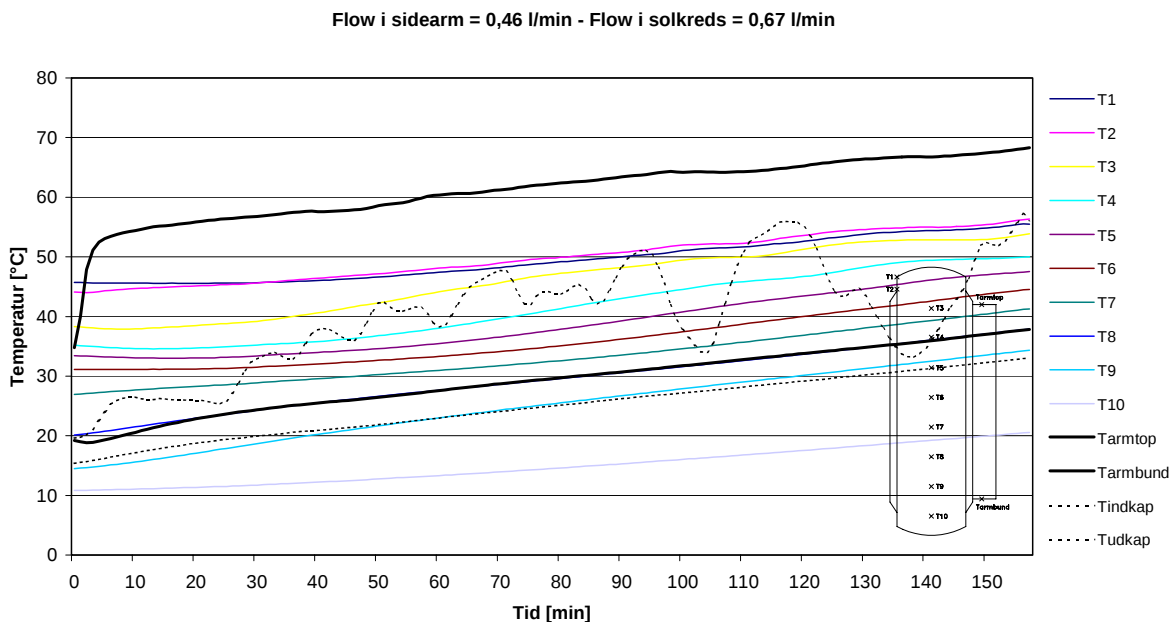
2.7.2 Naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds

Temperaturlagdelingen i lagertanken under opvarmning med sidearm-kappe-kredsen med og uden flow i solkredsen er undersøgt. Forsøgene er foretaget i prøvestanden for solvarmeanlæg og således under reelle vejrforhold.

Figur 2-10 viser resultaterne af forsøg med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kredsen uden samtidig flow i solkredsen og **Figur 2-11** viser forsøg med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kredsen og flow i solkreds.



Figur 2-10: Temperaturlagdelingen i lagertank 1 med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds.



Figur 2-11: Temperaturlagdelingen i lagertank 1 med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kreds samt flow i solkreds.

De to forsøg er udført samme dag. Det ene er udført tidligt om morgenen og det andet er udført om formiddagen. Bemærk at volumenstrømmen i sidearmen er højere når solkredsen er i drift end når solkredsen ikke er i drift. Det skyldes sandsynligvis at pumpen i solkredsen øger volumenstrømmen i sidearmen.

Det ses, at temperaturlagdelingen ikke opbygges så godt under disse driftsbetingelser.

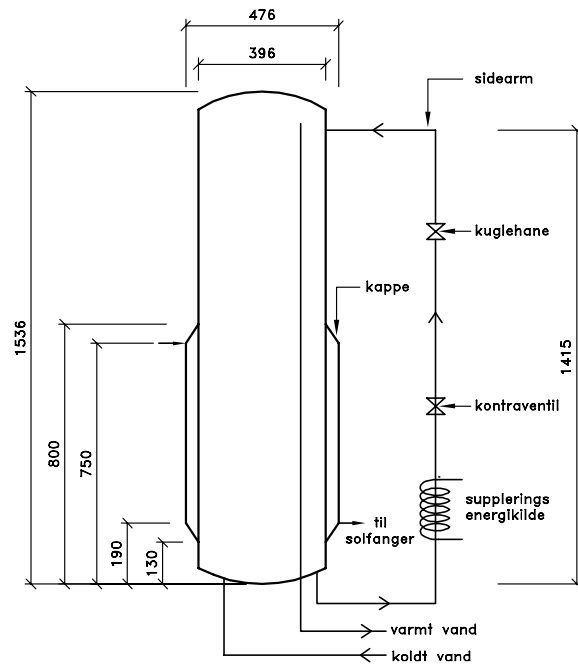
2.8 Forsøgsresultater (lagertank 2)

Temperaturlagdelingen i lagertanken er undersøgt for forskellige driftsbetingelser: For forskellige indstillinger af en kuglehaneventil i sidearmen og dermed forskellige flow i sidearmen. Indløbet i sidearmen foregår fra bunden af lagertanken. De udførte forsøg med forskellige indstillinger af kuglehaneventilen i sidearmen er:

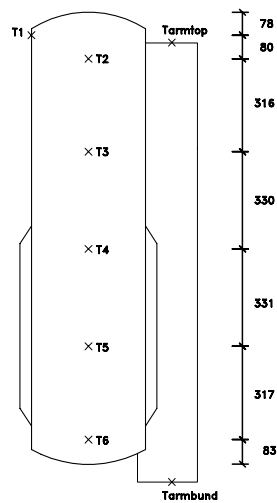
- Åben ventil
- $\frac{1}{2}$ åben ventil
- $\frac{1}{4}$ åben ventil

Figur 2-12 viser en målskitse af lagertanken. Sidearmen har ved disse forsøg dimensionen $\frac{3}{4}$ ".

Figur 2-13 viser placeringen af de enkelte temperaturfølere. T2 til T6 er anbragt i en glasstav der er ført ind i beholderen. T1, Tarmtop og Tarmbund er anbragt udenpå henholdsvis beholder og rør i god termisk kontakt med stålet.

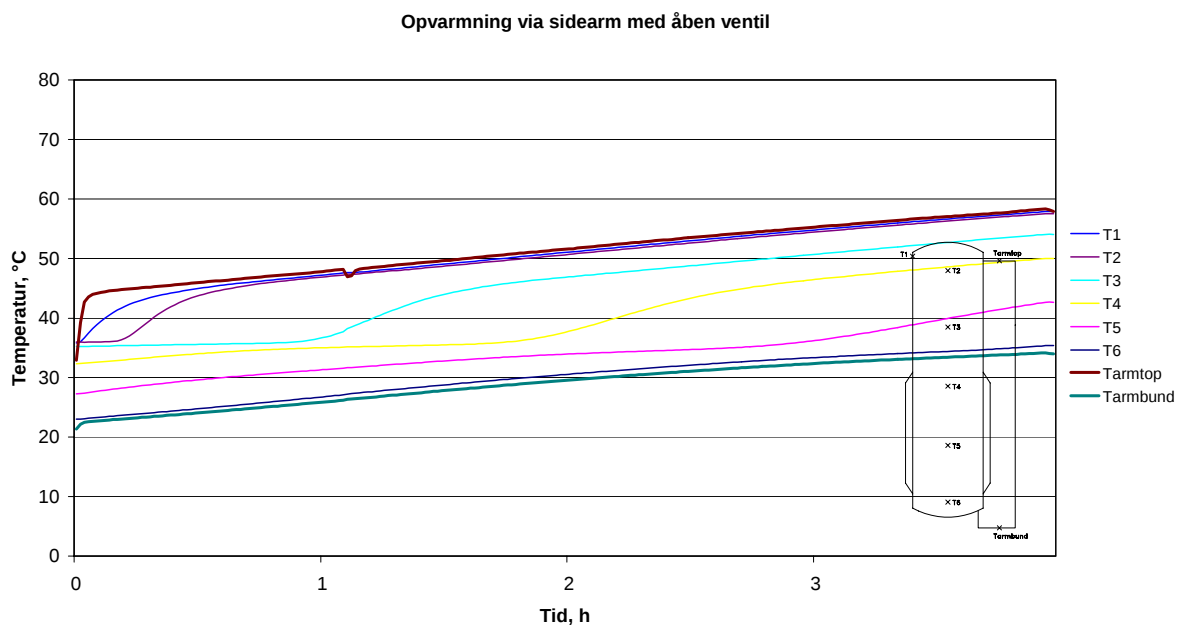


Figur 2-12: Skitse af lagertank 2. Sidearmen består af et $\frac{3}{4}$ " stålrør. Alle mål i mm.

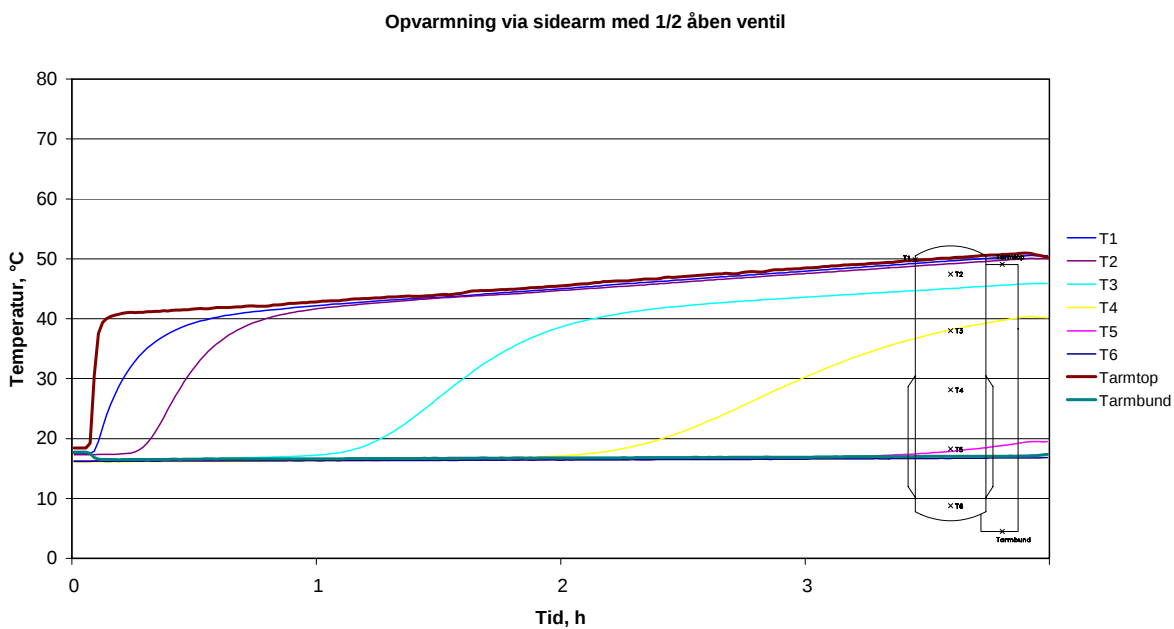


Figur 2-13: De enkelte temperaturføleres placering i lagertanken under forsøg i lagerprøvestanden.

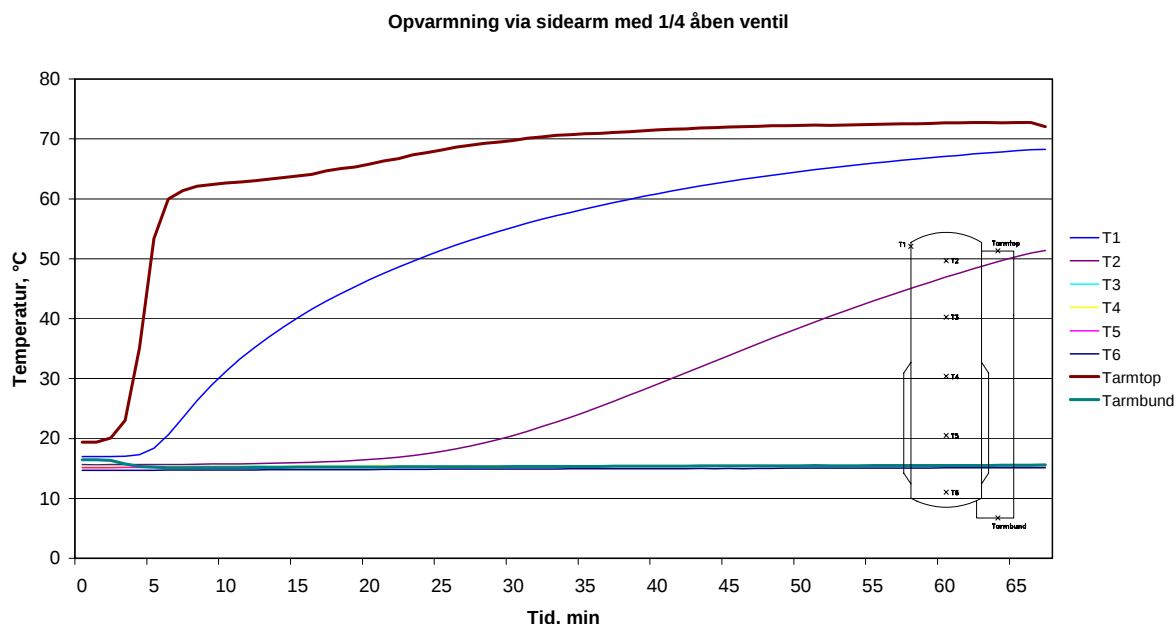
Figur 2-14 til Figur 2-16 viser resultatet af forsøgene med forskellige flow i sidearmen.



Figur 2-14: Temperaturlagdelingen i lagertanken med åben kuglehaneventil.



Figur 2-15: Temperaturlagdelingen i lagertanken med 1/2 åben kuglehaneventil.



Figur 2-16: Temperaturlagdelingen i lagertanken med 1/4 åben kuglehaveventil.

Bemærk at temperaturen i lagertanken ved start af opvarmningen via sidearmen ikke er den samme i alle tre forsøg samt at opvarmningsperiodens længde varierer fra forsøg til forsøg.

Det ses at temperaturniveauet i lagertanken er meget afhængigt af ventilindstillingen i sidearmen og dermed af flowet i sidearmen. Jo mere åben ventilen er des højere bliver flowet. Jo større flowet i sidearmen er des mindre er temperaturstigningen over elpatronen. Samtidig sker temperaturstigningen i en større del af beholderen. Det vil sige, at størrelsen af det suppleringsopvarmede volumen samt temperaturniveauet i lagertanken afhænger af flowet i sidearmen.

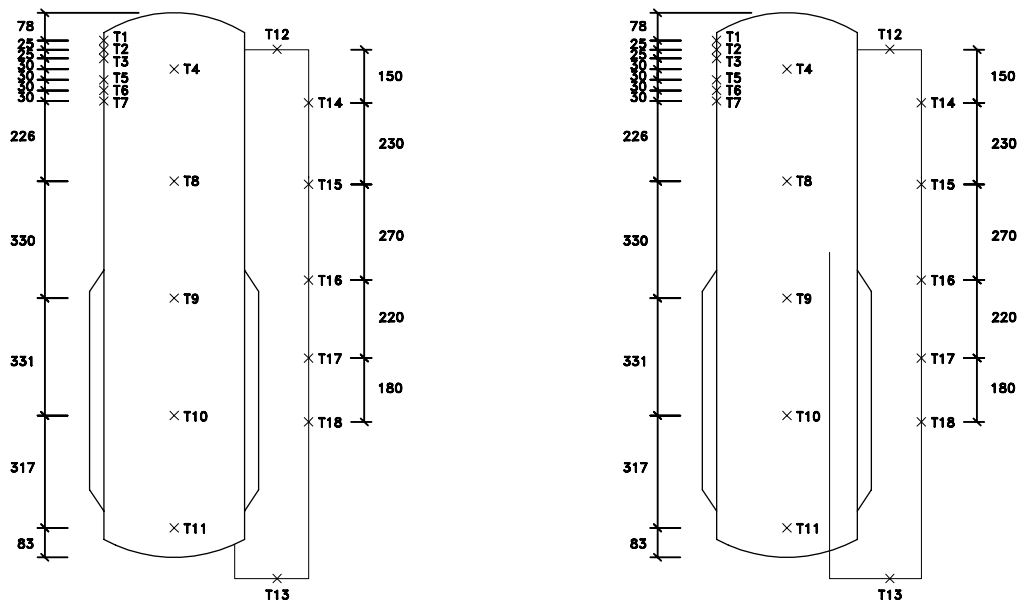
2.8.1 Test af kontraventiler

I væskerørkredse vil der altid være en risiko for uønsket transport af energi. Det kan f.eks. være tilfældet i en solfangerkreds en stjerneklar nat. Himmelstrålingstemperaturen, hvilket vil sige den temperatur som forsiden af solfangeren har varmetab til i form af stråling, kan være meget lavere end den omgivende lufttemperatur. Det betyder at solfangervæsken der befinder sig i solfangeren bliver meget koldere og dermed tungere end væsken i den øvrige del af solfangerkredsen. Betingelsen for baglæns cirkulation er skabt. Solfangervæsken vil blive afkølet i solfangeren hvorefter den ved baglæns cirkulation i solkredsen vil blive opvarmet ved gennemløb i lagertankens varmeveksler, f.eks. en kappe, for igen at blive afkølet i solfangeren. I sidearmen på de testede lagertanke vil baglæns cirkulation kunne forekomme i perioder hvor elpatronen er slukket og temperaturen i toppen af beholderen er høj. Varm væske vil flyde ud i sidearmen hvor det afkøles hurtigere end væsken i beholderen. Dermed bliver den tungere end væsken i lagertanken i samme niveau. Den tungere væske synker ned i sidearmen og ny varm væske fra beholderen flyder ud i sidearmen. Sådanne cirkulationer kan resultere i enorme varmetab. Baglæns cirkulation kan imidlertid let forhindres med en kontraventil.

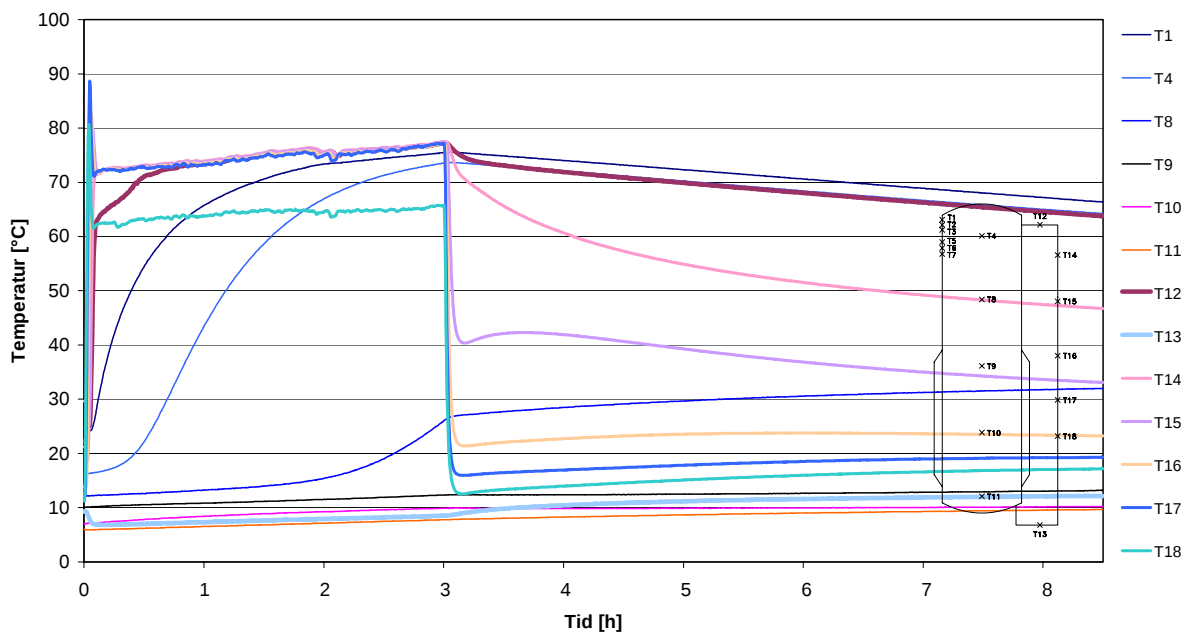
For at undgå baglæns cirkulation i sidearmen i perioder hvor elpatronen er slukket og temperaturen i toppen af beholderen er høj, er der monteret en kontraventil. Kontraventilen skal sikre at væsken i sidearmen kun kan løbe en vej, nemlig fra bunden af beholderen til toppen af beholderen. Kontraventilen består af et lille rørstykke med gevind i begge ender. Inde i ventilen er der i den ene ende, den ende der skal vende opad, monteret et lille gitter. I den anden ende er der en lille indsnævring. Herimellem er der en kugle. Kuglen kan enten være oppe eller nede. Når væsken strømmer er kuglen oppe ved det lille gitter. Kuglen er mindre end gitteret og tillader således væsken at passere i den rigtige retning. Når cirkulationen bringes til ophør falder kuglen ned foran hullet i den anden ende og forhindrer derved cirkulation i den modsatte retning. Imidlertid er det naturlige flow i sidearmen lille hvilket betyder at kuglen ikke må være for tung. På den anden side skal kuglen være tungere end vandet for at falde ned og blokere for baglæns cirkulation i sidearmen. Den anvendte kontraventil er af typen Konus fra firmaet Knudsen & Co. A/S med en kugle af polyamid med en densitet på $1,14 \text{ g/cm}^3$. Kuglen er således en anelse tungere end vandet.

For at verificere at der ikke sker baglæns cirkulation i sidearmen i tidsrum hvor brugsvandet i toppen af beholderen er varmt og elpatronen, der i tændt tilstand bevirker cirkulation, er slukket, er der udført et opvarmningsforsøg med efterfølgende henstand i mange timer. For bedre at kunne studere temperaturudviklingen under forsøget er der anbragt en række ekstra følere udenpå beholderen og udenpå sidearmen med god termisk kontakt til beholder og sidearm.

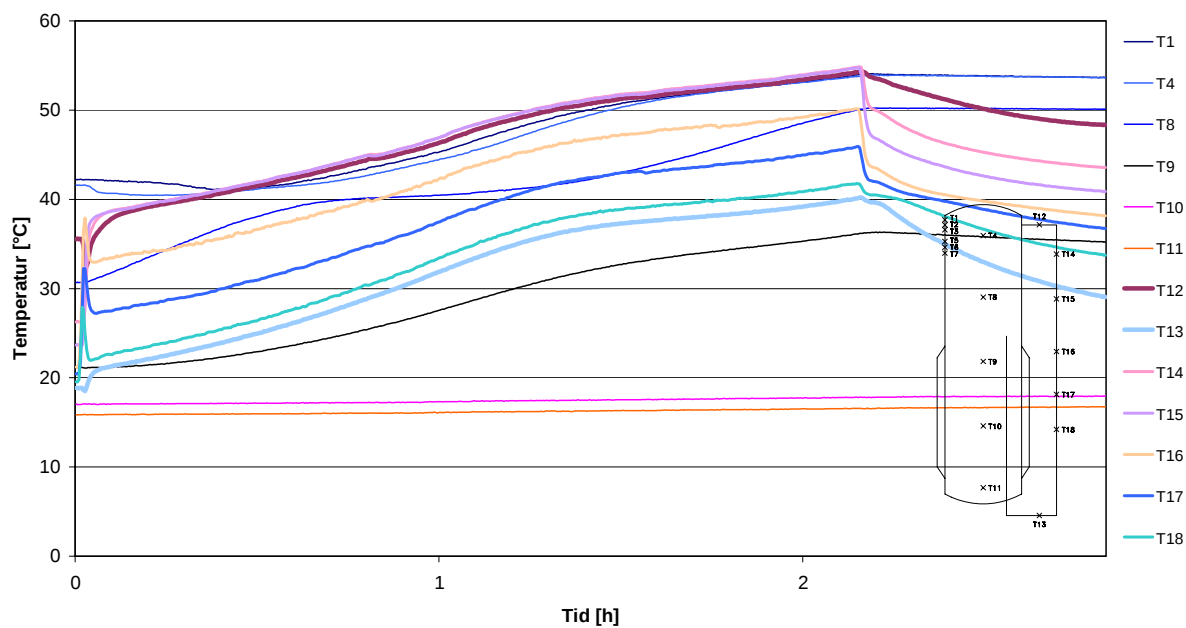
Figur 2-17 viser målepunkternes placering og **Figur 2-18** viser resultatet af det udførte forsøg med $\frac{3}{4}$ " kontraventil i sidearmen og sidearm med udtag i bunden af lagertanken. **Figur 2-19** viser resultatet af det udførte forsøg med 1" kontraventil i sidearmen og POM-rør i lagertanken.



Figur 2-17: Principskitse af lagertank med ekstra målepunkter. Til venstre ses lagertanken med udtag i sidearm i bunden af lagertanken. Til højre ses lagertanken med udtag i sidearm midt i lagertanken. Alle mål i mm.



Figur 2-18: Temperaturer i lagertank og sidearmen under opvarmning via sidearm og efterfølgende afkøling. Kontraventilen og sidearmen har dimensionen $\frac{3}{4}$ ". De tynde kurver viser temperaturer i lagertanken og de tykke kurver temperaturer i sidearmen. Sidearmen har udtag i bunden af lagertanken. De enkelte temperaturføleres placering fremgår af Figur 2-17. Bemærk at kurverne for T2, T3, T5, T6 og T7 af hensyn til overskueligheden i figuren ikke er vist.



Figur 2-19: Temperaturer i lagertank og sidearmen under opvarmning via sidearm og efterfølgende afkøling. Kontraventilen og sidearmen har dimensionen 1". Udtaget i sidearmen foregår fra midt i beholderen via POM-røret. De enkelte temperaturføleres placering fremgår af Figur 2-17. Bemærk at kurverne for T2, T3, T5, T6 og T7 af hensyn til overskueligheden i figuren ikke er vist.

I **Figur 2-18** ses det, at temperaturen i bunden af sidearmen under opvarmningen er den samme som temperaturen i bunden af beholderen. I det øjeblik elpatronen slukkes falder temperaturen i sidearmen. Det skyldes i første omgang at vandet fortsætter med at cirkulere i et lille stykke tid efter at elpatronen er slukket. Dernæst skyldes det naturligvis varmetab til omgivelserne. Temperaturen i toppen af sidearmen følger derefter temperaturen i målepunkt nr. 2 (T2). Dette er helt naturligt idet sidearmen netop er tilsluttet i dette niveau. Den næstøverste temperatur i sidearmen (T14) falder med en hældning der er stejlere end hældningen på temperaturkurverne inde i lagertanken.

I **Figur 2-19** ses det at temperaturen i bunden af sidearmen følger temperaturen midt i lagertanken mellem temperaturfølerne T8 og T9. Det ses endvidere at temperaturerne i bunden af sidearmen stiger under opvarmningen. Det skyldes at det vand der løber ind i sidearmen udtages fra ca. midt i lagertanken via et POM-rør der er ført ind igennem bunden af lagertanken. I det øjeblik elpatronen slukkes falder temperaturen i sidearmen. Det skyldes i første omgang at vandet fortsætter med at cirkulere i et lille stykke tid efter at elpatronen er slukket. Dernæst skyldes det naturligvis varmetab til omgivelserne. Temperaturen i toppen af sidearmen falder, i modsætning til forsøget med $\frac{3}{4}$ " kontraventil, hurtigere end temperaturen i lagertanken i pågældende niveau. Det skyldes muligvis at temperaturføleren i toppen af sidearmen er anbragt længere væk fra lagertanken, dog stadig på den vandrette del af sidearmen, efter at dimensionen af sidearmen er ændret fra $\frac{3}{4}$ " til 1".

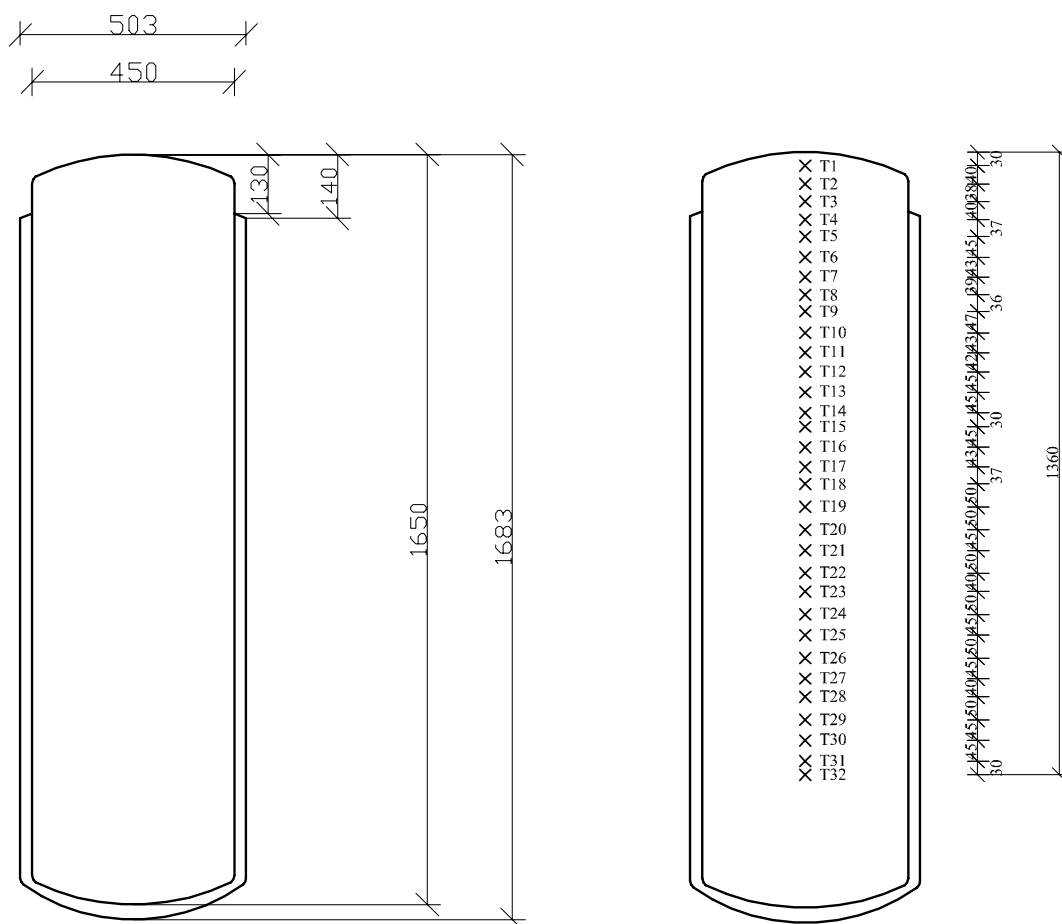
Ved et lignende forsøg [6], hvor der rent faktisk var baglæns cirkulation i sidearmen var hældningen på temperaturkurverne i sidearmen vandret indtil en ventil blev lukket. Det er ikke tilfældet her. På den baggrund konkluderes det at kontraventilerne virker og at der således ikke sker baglæns cirkulation i sidearmen når elpatronen er slukket.

I **Figur 2-18** ses det at temperaturen i bunden af sidearmen stiger lidt efter at elpatronen er slukket. Det skyldes alene at omgivelsestemperaturen er væsentligt højere end temperaturen i bunden af sidearmen og at der således her tilføres varme fra omgivelserne.

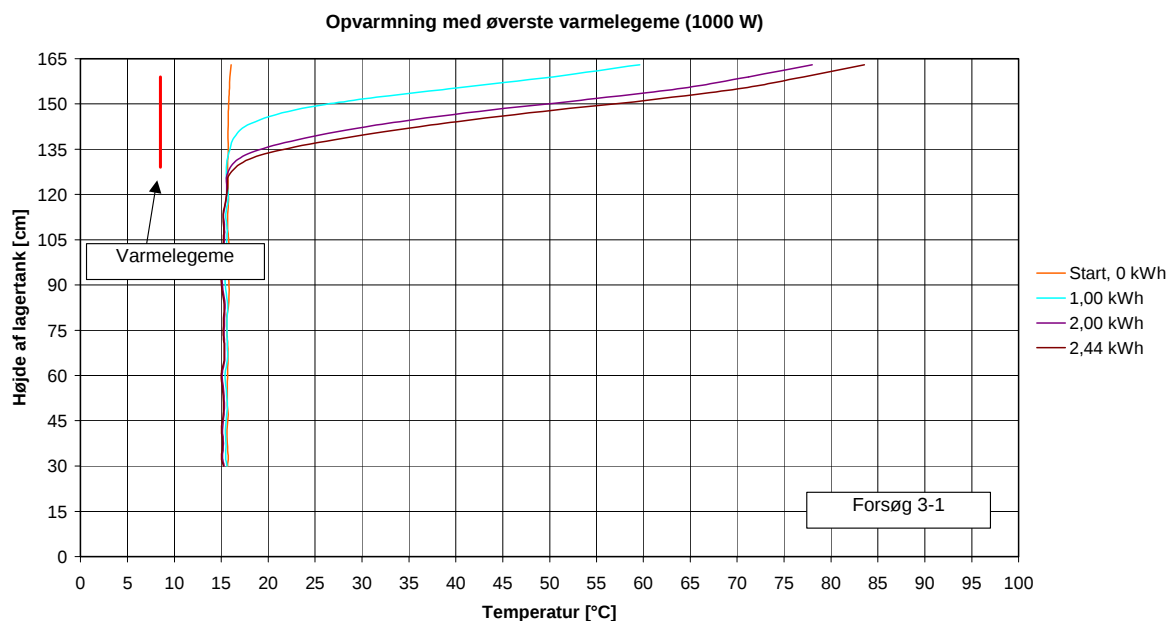
2.9 Forsøgsresultater (lagertank 3)

Der er gennemført en række opvarmningsforsøg, hvor lagertanken ved starten af opvarmningen har en lav ensartet temperatur i hele lagertankens udstrækning.

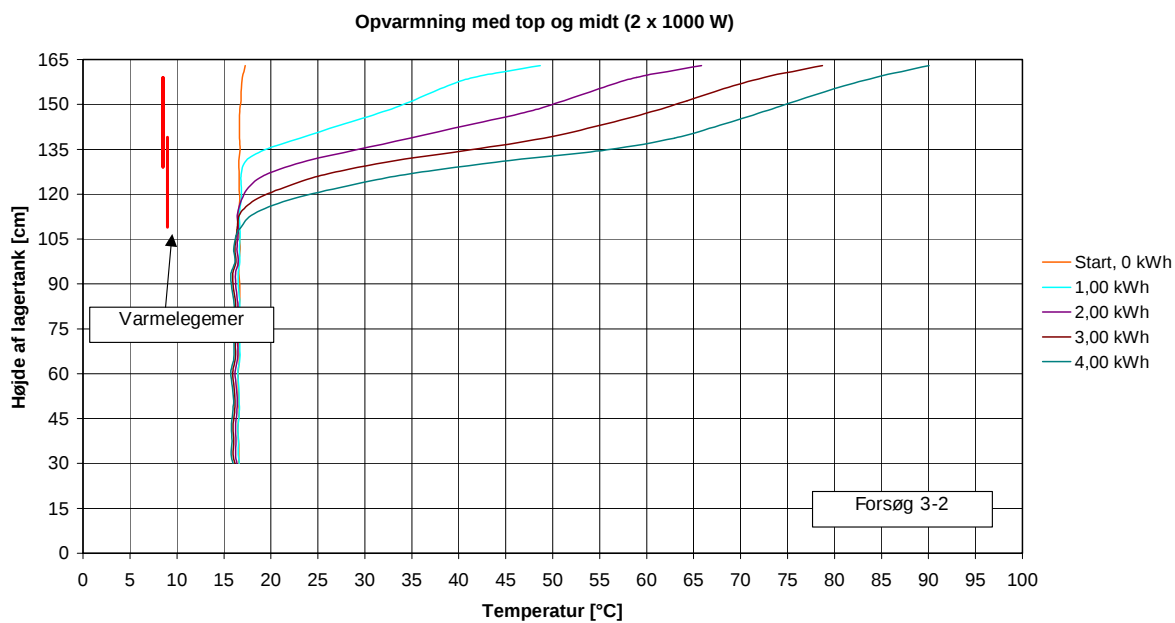
Figur 2-20 viser en målskitse af lagertanken samt målepunkternes nøjagtige placering i lagertanken. **Figur 2-21** til **Figur 2-23** viser temperaturlagdelingen igennem en opvarmning i lagertank 3 som funktion af den anvendte driftsstrategi og den af varmelegemet afsatte energi.



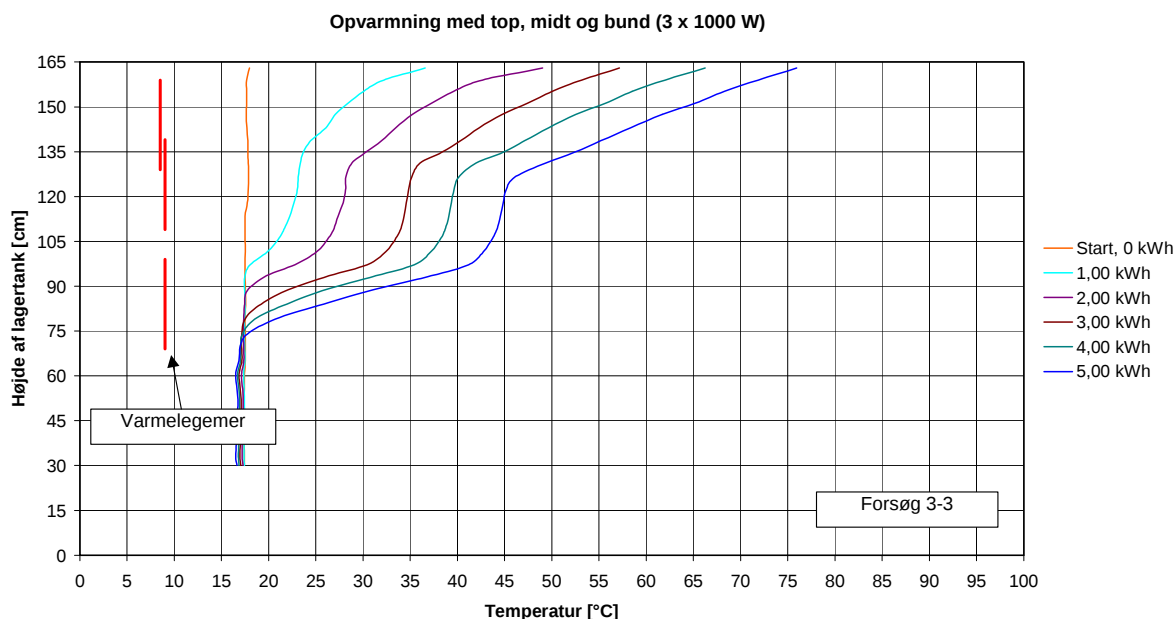
Figur 2-20: Til venstre i figuren ses en skitse af lagertank 3 (samt lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6) med mål. Til højre i figuren ses den nøjagtige placering af målepunkterne i lagertank 3 (samt lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6). Alle mål i mm.



Figur 2-21: Temperaturlagdelingen i lagertank 3 som funktion af den af varmelegemet afsatte energi. Kun det øverste varmelegeme er tændt.



Figur 2-22: Temperaturlagdelingen i lagertank 3 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi. De to øverste varmelegemer er tændt.



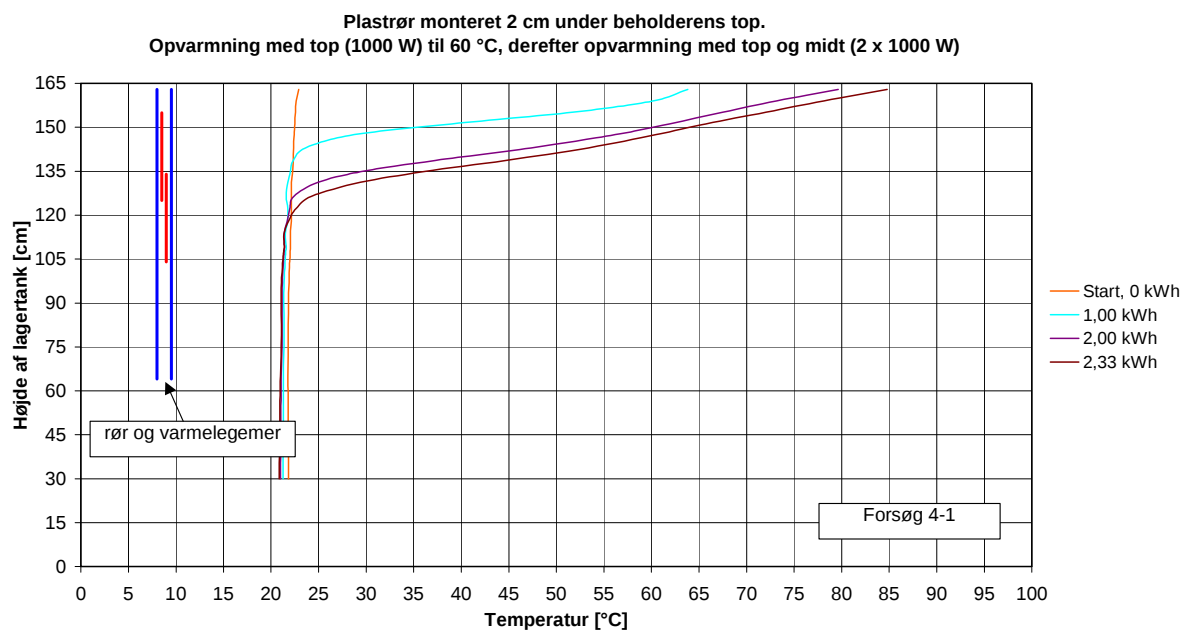
Figur 2-23: Temperaturlagdelingen i lagertank 3 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi. Alle tre varmelegemer er tændt.

Det ses, at der opbygges en temperaturlagdeling over det nederste niveau af den eller de aktive varmelegemer. Det ses endvidere, at temperaturlagdelingen er kraftigst over det øverste varmelegeme og at temperaturlagdelingen i lagertanken bliver mindre jo dybere i lagertanken det nederste aktive varmelegeme er placeret.

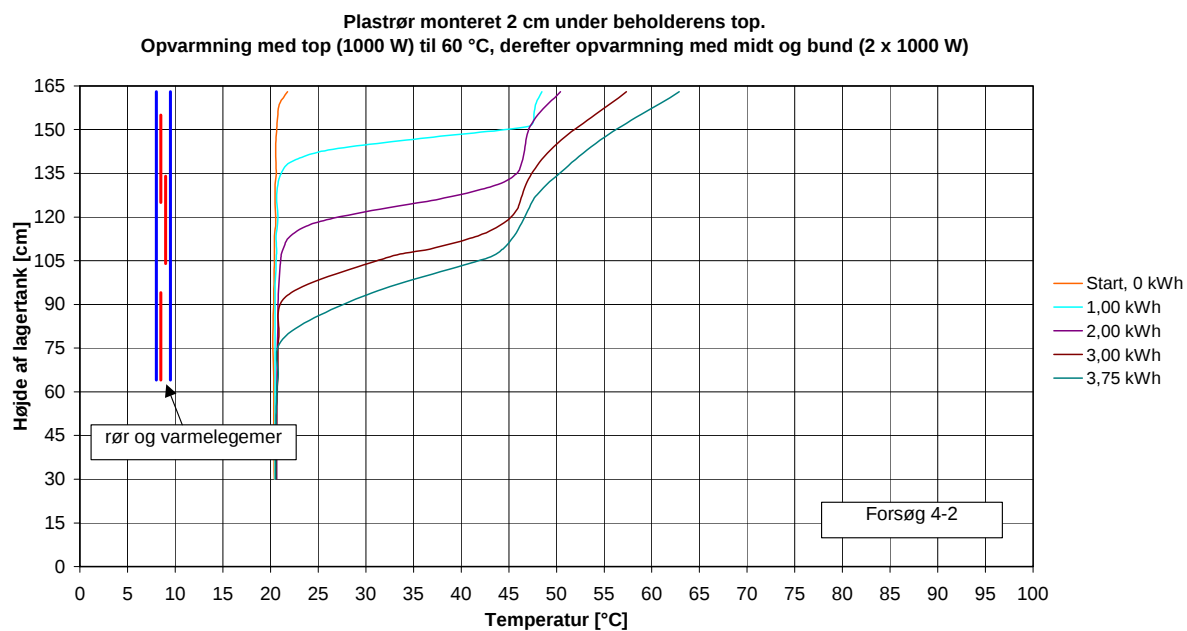
2.10 Forsøgsresultater (lagertank 4)

Der er gennemført en række opvarmningsforsøg, hvor lagertanken ved starten af opvarmningen har en lav ensartet temperatur i hele lagertankens udstrækning.

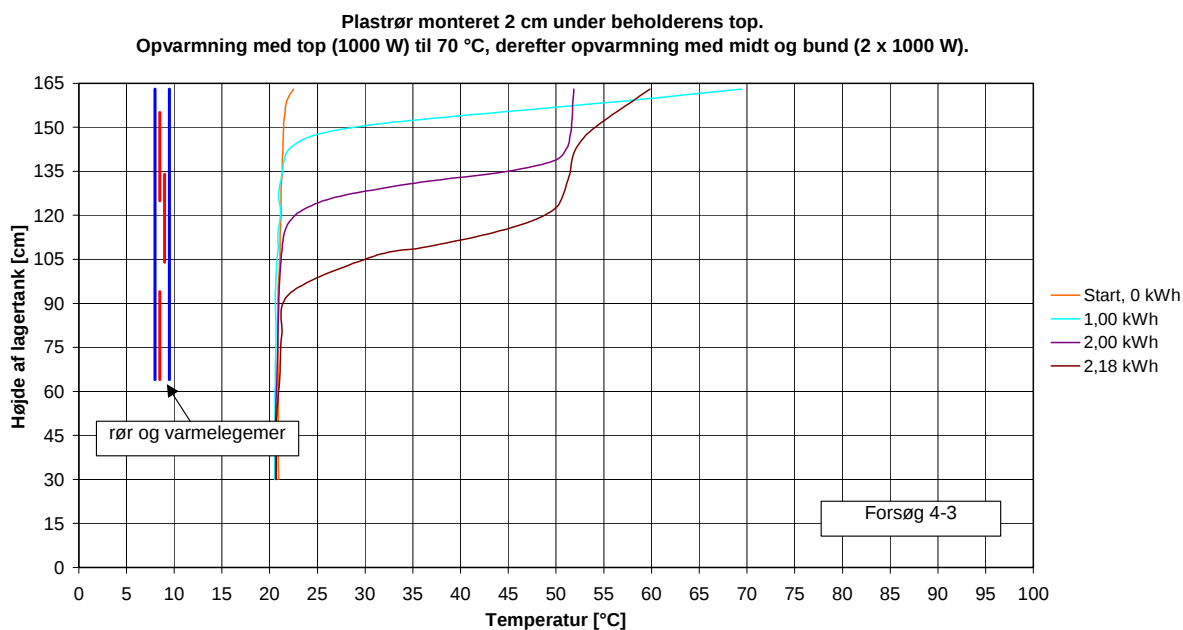
Figur 2-24 til **Figur 2-30** viser temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den anvendte driftsstrategi og den af varmelegemet afsatte energi. **Figur 2-20** viser en målskitse af lagertanken. Røret er udført i POM med en indre diameter på 18,5 mm og en ydre diameter på 51,8 mm.



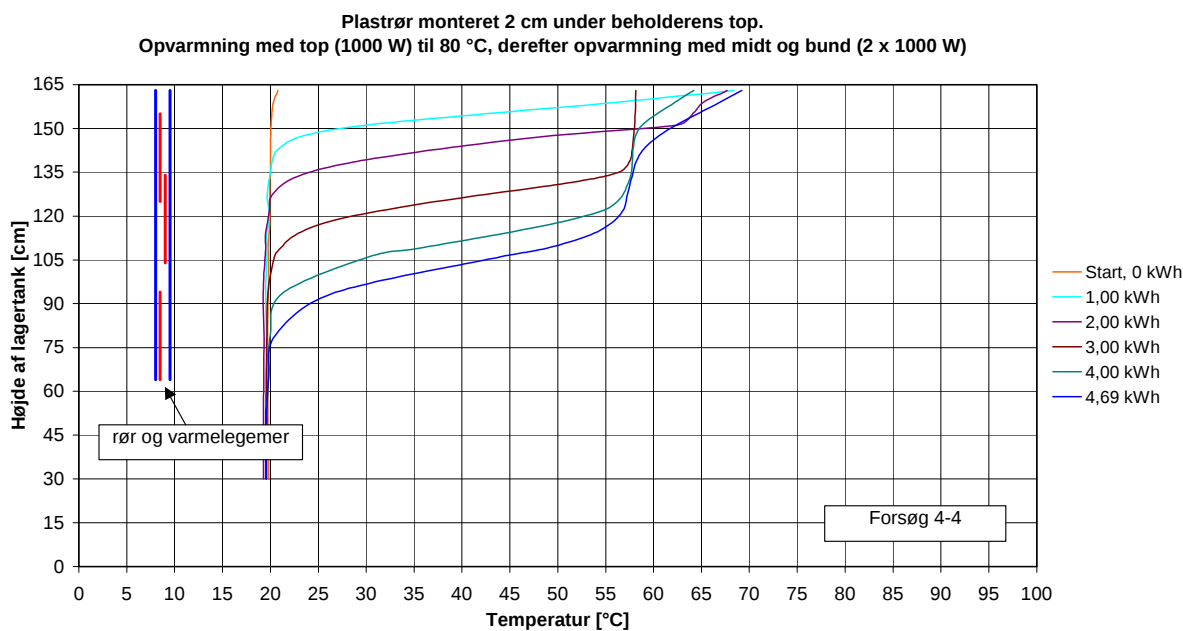
Figur 2-24: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



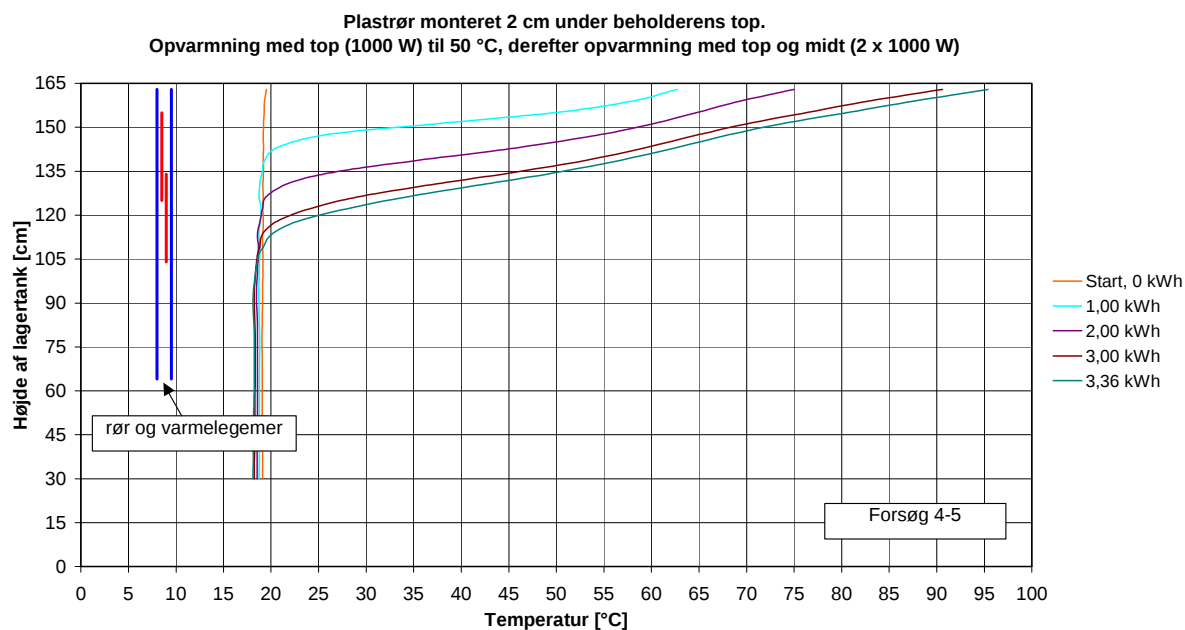
Figur 2-25: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



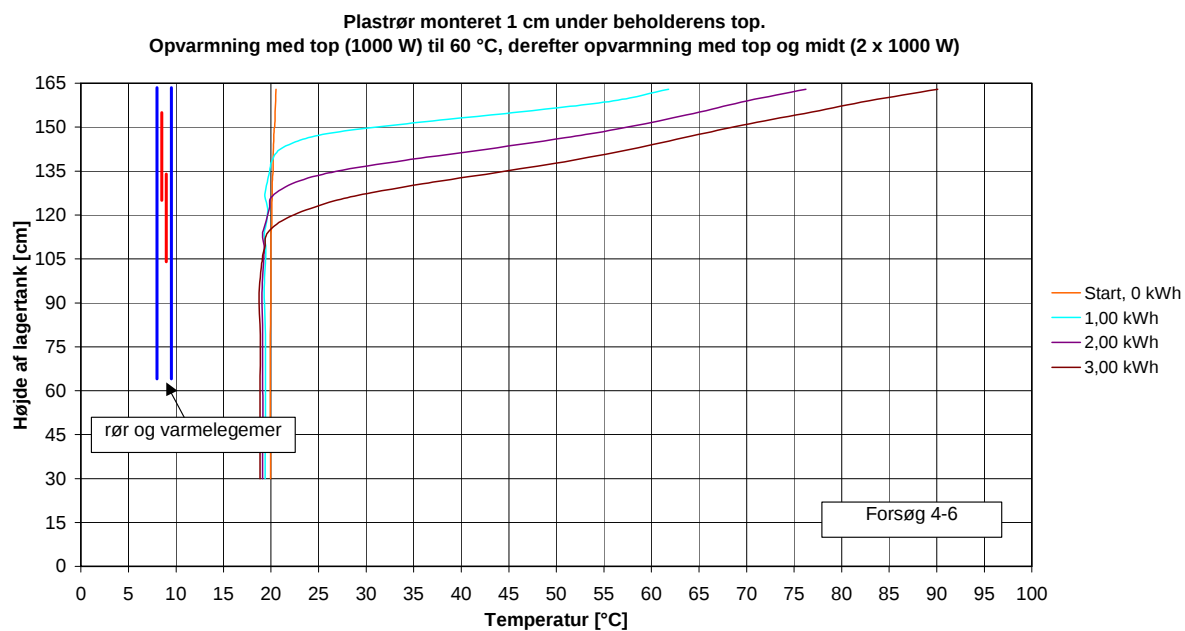
Figur 2-26: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



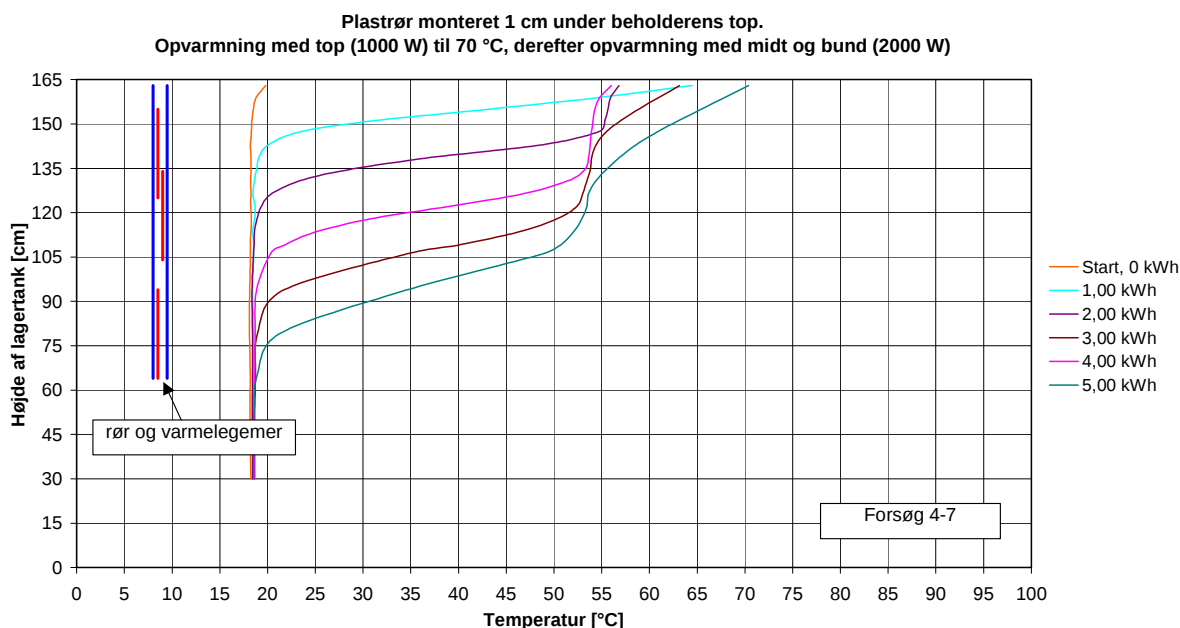
Figur 2-27: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



Figur 2-28: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



Figur 2-29: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi



Figur 2-30: Temperaturlagdelingen i lagertank 4 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.

Af figurerne ses det at temperaturlagdelingen i lagertanken opbygges forskelligt afhængig af den anvendte driftsstrategi. Når det øverste varmelegeme er alene er tændt stiger temperaturen kraftigt i toppen af lagertanken. Det samme gør sig gældende når kun de to øverste varmelegemer er tændt. Det skyldes at volumenstrømmen i røret er for lille på grund af et for lille drivtryk. Når kun de to nederste varmelegemer er tændt øges volumenstrømmen i røret på grund af et øget drivtryk og varmekontakten i toppen af lagertanken forskydes nedefter i lagertanken. Når varmekontakten når ned i niveau med det nederste varmelegeme falder drivtrykket og dermed volumenstrømmen i røret og temperaturen stiger i toppen af lagertanken.

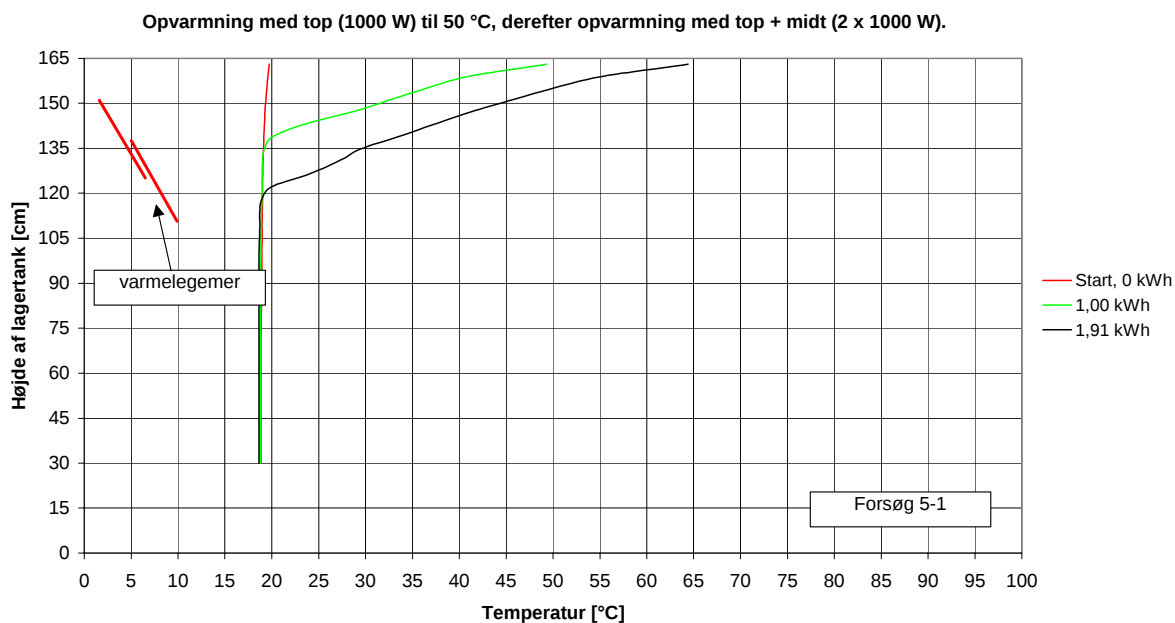
Det ses, at det er muligt at variere det suppleringsopvarmede volumen mellem toppen og bunden af røret omkring varmelegemerne.

2.11 Forsøgsresultater (lagertank 5)

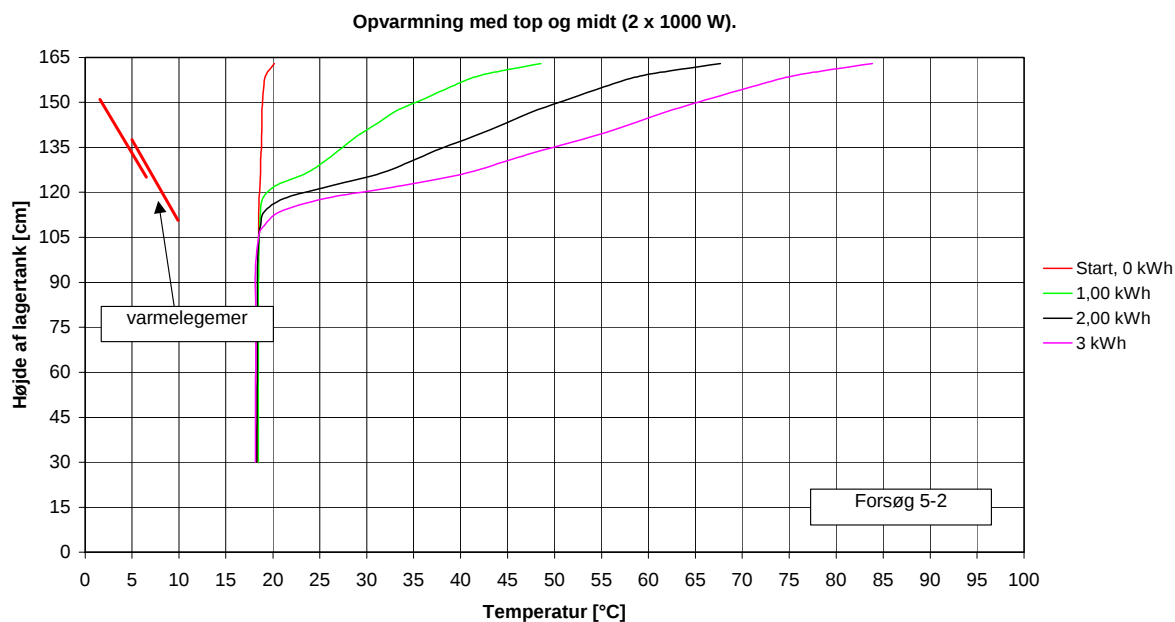
Der er gennemført en række opvarmningsforsøg, hvor lagertanken ved starten af opvarmningen har en lav ensartet temperatur i hele lagertankens udstrækning.

Figur 2-31 til **Figur 2-33** viser temperaturlagdelingen i lagertank 5 som funktion opvarmningsstrategien og af den af varmelegemet afsatte energi. **Figur 2-20** viser en målskitse af lagertanken.

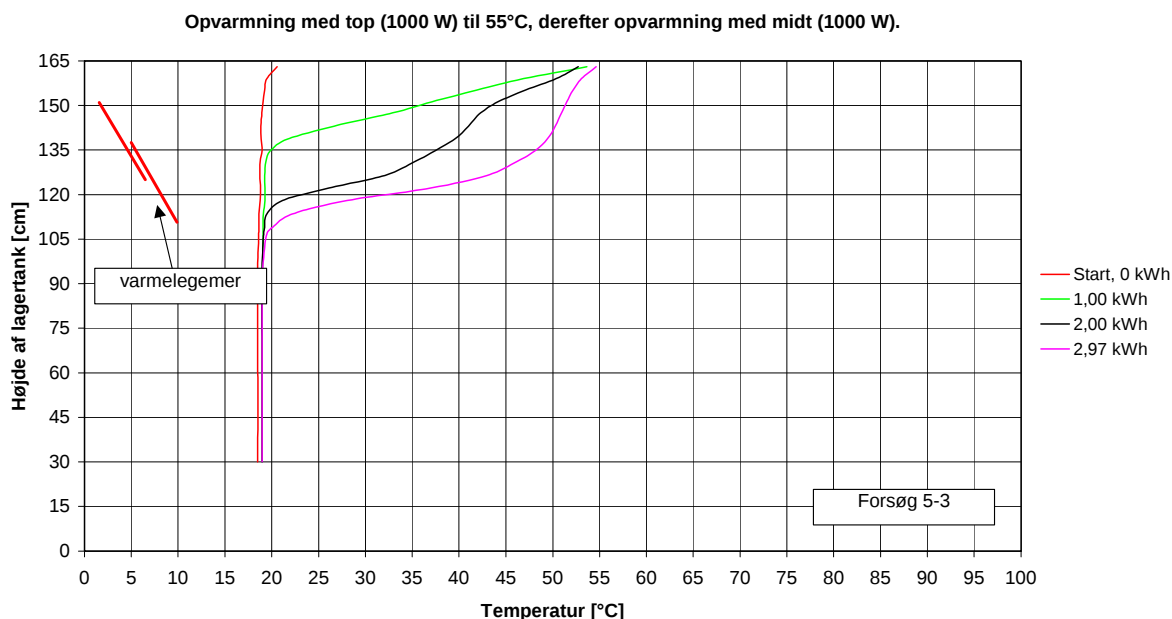
Af figurerne ses at der opbygges en stor temperaturlagdeling i den del af beholderen der ligger over det nederste niveau af det eller de tændte varmelegemer. Af **Figur 2-33** ses at temperaturlagdelingen over det tændte varmelegeme aftager når det tændte varmelegeme befinder sig længere nede i beholderen således at temperaturforholdene i lagertanken nærmer sig temperaturforholdene i en traditionel lagertank med et vandret varmelegeme, se **Figur 1-1**, tank 7.



Figur 2-31: Temperaturlagdelingen i lagertank 5 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



Figur 2-32: Temperaturlagdelingen i lagertank 5 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



Figur 2-33: Temperaturlagdelingen i lagertank 5 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.

Af figurene ses at der opbygges en kraftig temperaturlagdeling i toppen af lagertanken når kun det øverste varmelegeme er tændt. Det samme gør sig gældende når de begge de øverste varmelegemer er tændt. Når det midterste varmelegeme alene er tændt bliver temperaturlagdelingen mindre.

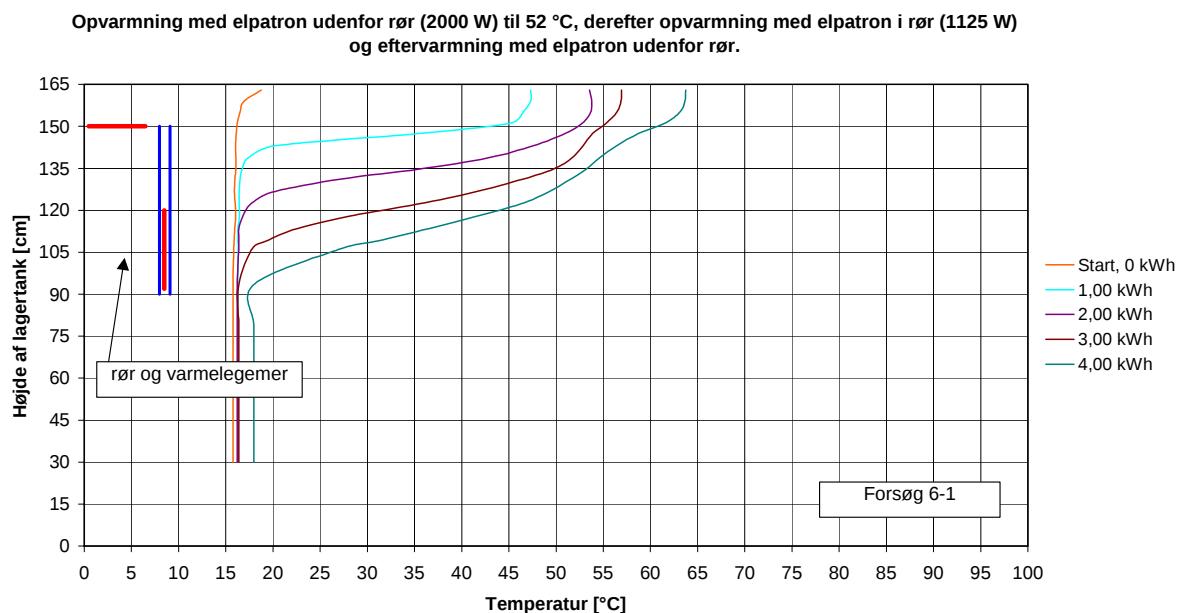
Opvarmningen går fra nederste niveau af det eller de aktive varmelegemer så det er ikke muligt, at opvarme et vilkårligt volumen med denne udformning af lagertanken.

2.12 Forsøgsresultater (lagertank 6)

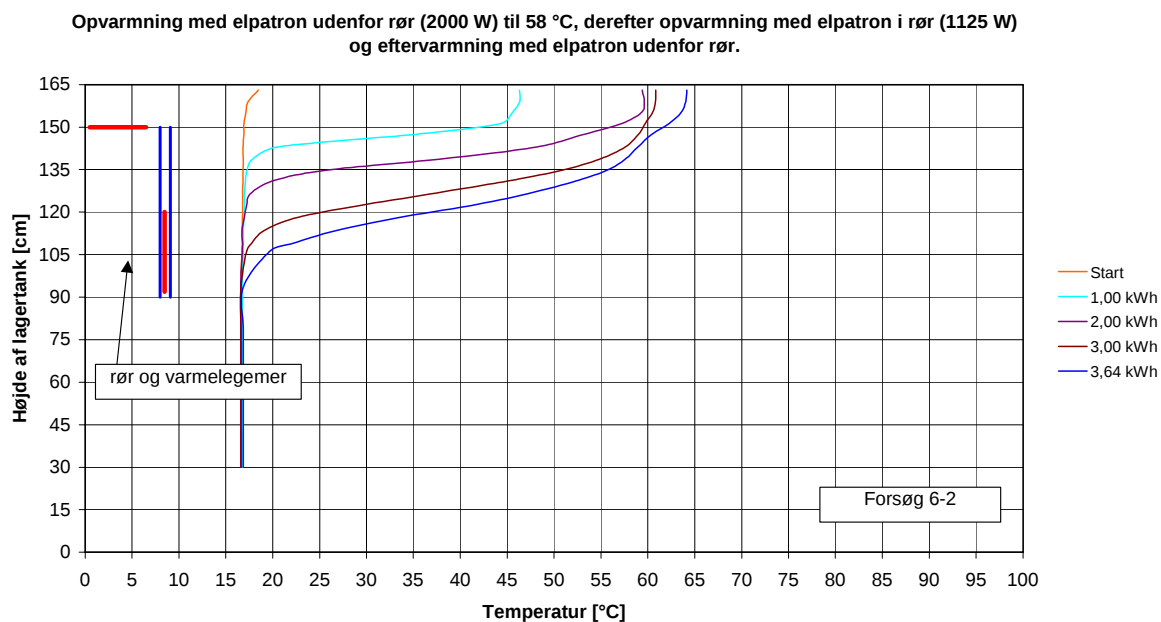
Der er gennemført en række opvarmningsforsøg, hvor lagertanken ved starten af opvarmningen har en lav ensartet temperatur i hele lagertankens udstrækning.

Figur 2-34 og **Figur 2-35** viser temperaturlagdelingen i lagertank 6 som funktion af den anvendte driftsstrategi og den af varmelegemet afsatte energi. **Figur 2-20** viser en målskitse af lagertanken.

Af figurene ses at det er muligt, at opvarme et vilkårligt volumen til en ønsket temperatur. Det vandrette varmelegeme opvarmer det ovenover liggende vandvolumen til en ønsket temperatur hvorefter det lodrette varmelegeme i plastrøret skaber en cirkulation der langsomt øger det supplerende volumen, ved den ønskede temperatur, indtil det ønskede energiindhold i lagertanken er nået. Hvis temperaturen ved udløb fra plastrøret er lavere end den ønskede temperatur i toppen af lagertanken eftervarmes vandet af det vandrette varmelegeme hvorved det ønskede temperaturniveau holdes, se **Figur 2-35**. Hvis temperaturen ved udløb fra plastrøret er højere end temperaturen i toppen af lagertanken, etableret af det vandrette varmelegeme, stiger temperaturen i toppen af lagertanken. Det er netop tilfældet i **Figur 2-34**.



Figur 2-34: Temperaturlagdelingen i lagertank 6 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.



Figur 2-35: Temperaturlagdelingen i lagertank 6 som funktion af den af varmelegemerne afsatte energi.

2.13 Sammenfatning af forsøgsresultater

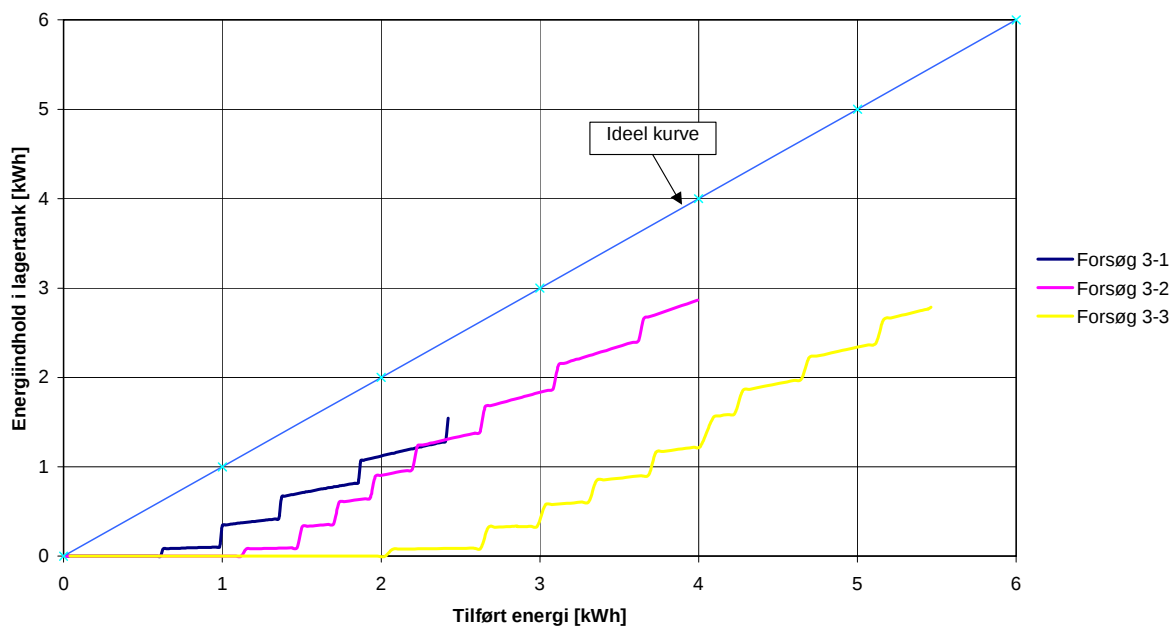
Som det fremgår af fremstillingen af temperaturlagdelingen i de forskellige lagertanke ved forskellige driftsbetingelser, er der stor forskel på hvor godt temperaturlagdelingen opbygges i den enkelte lagertank. Det væsentlige spørgsmål er dog: hvor meget energi skal der tilføres en lagertank ved en given driftsbetingelse før det ønskede energiindhold over en given temperatur er opbygget i lagertanken ?

For at kunne sammenligne de afprøvede opvarmningsprincipper er energiindholdet over 50°C afbildet som funktion af den tilførte energimængde igennem opvarmningen. Det ideelle opvarmningsforløb er afbildet i en kurve der skærer y-aksen i punktet (0,0) med hældningen 1.

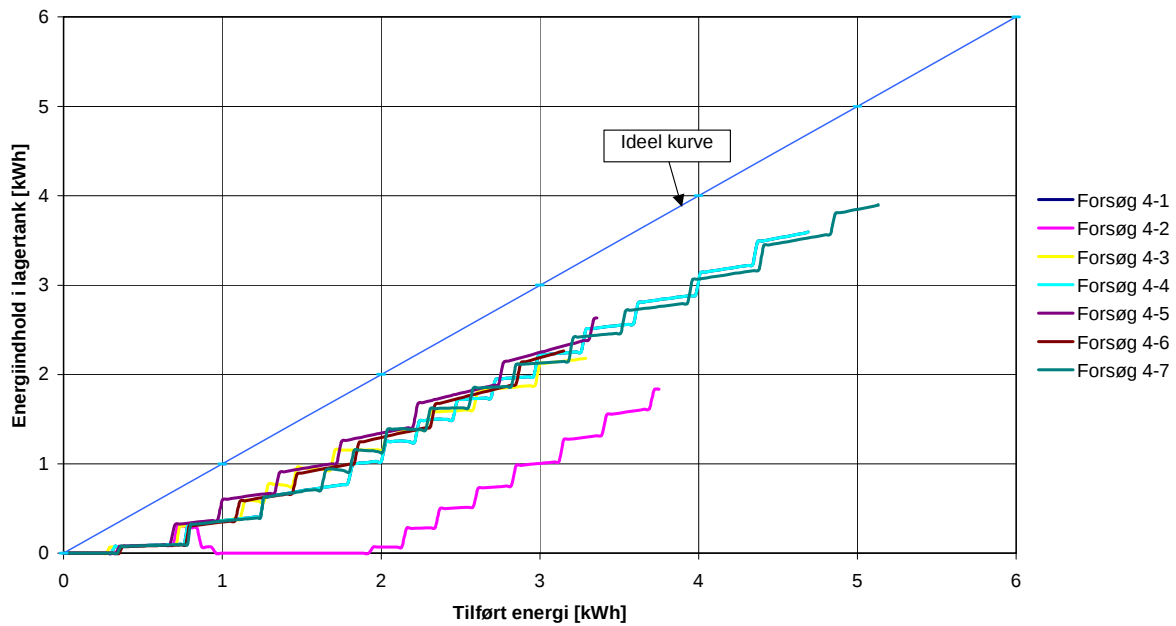
Udgangspunktet for hvert opvarmningsforsøg er en ensartet lav temperatur i hele lagertanken. Af **Figur 2-21** til **Figur 2-35** ses, at der er en ensartet lav temperatur i de afprøvede lagertanke før hvert opvarmningsforsøg, men at starttemperaturen varierer fra ca. 15°C til ca. 22°C. Det har naturligvis indflydelse på resultaterne, idet der skal tilføres mest energi til det koldeste vand i lagertanken for at opvarme det til en brugbar temperatur. Der skal således tilføres ca. 25 % mere energi til brugsvandet med starttemperaturen 15°C end der skal tilføres til brugsvandet med starttemperaturen 22°C. Det er imidlertid kun i forsøgene udført med lagertank 4 at starttemperaturen er for høj. I de øvrige forsøg varierer starttemperaturen mellem ca. 15°C og ca. 18°C. Det vurderes, at resultaterne med rimelighed kan sammenlignes på den ovenover angivne måde.

Figur 2-36 viser sammenfatningen af forsøgsresultaterne med lagertank 3, **Figur 2-37** viser sammenfatningen af forsøgsresultaterne med lagertank 4, **Figur 2-38** viser sammenfatningen af forsøgsresultaterne med lagertank 5 og **Figur 2-39** viser sammenfatningen af forsøgsresultaterne med lagertank 6. **Figur 2-40** viser sammenfatningen af forsøgsresultaterne med lagertank 3, lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6 og **Figur 2-41** viser sammenfatningen af de bedste af forsøgsresultaterne med lagertank 3, lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6.

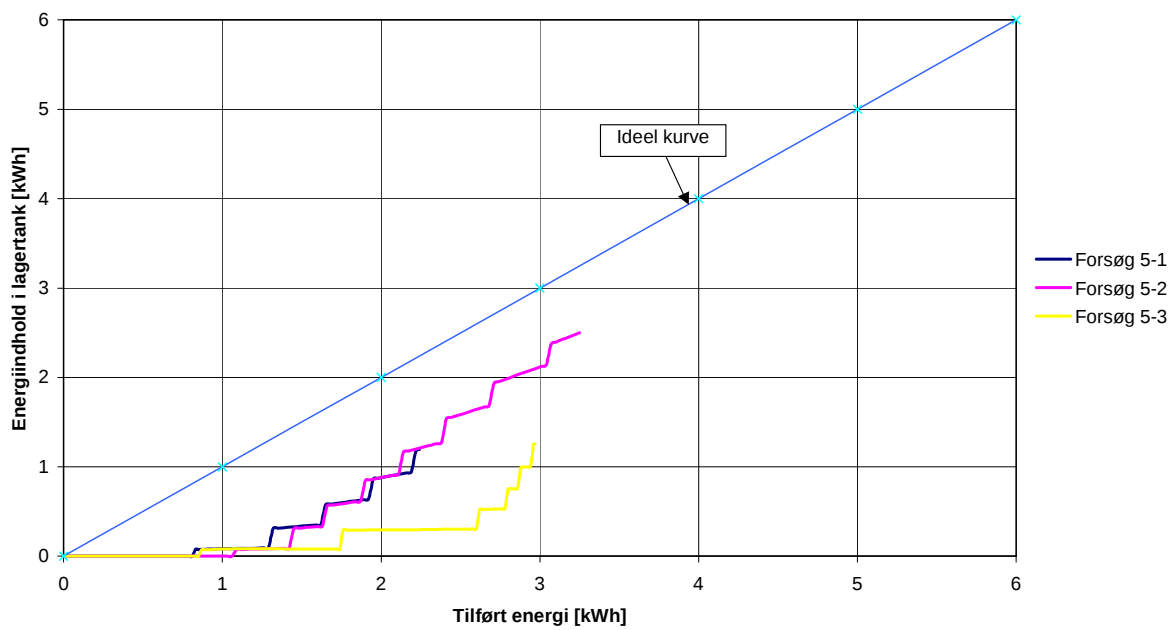
Forsøgsresultaterne med lagertank 1 og lagertank 2 er ikke sammenfattet på tilsvarende vis. Det skyldes, at der under forsøgene med disse lagertanke er indsat for få målepunkter i lagertanken til at energiindholdet kan bestemmes med tilstrækkelig stor nøjagtighed. I forsøgene med lagertank 1 og lagertank 2 er der anvendt en glasstav med 5 målepunkter samt 1 målepunkt udenpå lagertanken mens der i forsøgene med de øvrige lagertanke er anvendt en senere fremstillet glasstav med 32 målepunkter. I forsøget med lagertank 1 med naturlig cirkulation i sidearm-kappe-kredsen er der anvendt en glasstav med 8 målepunkter samt 2 målepunkter udenpå lagertanken, men udgangspunktet for opvarmningen er ikke en ensartet temperatur i hele lagertanken.



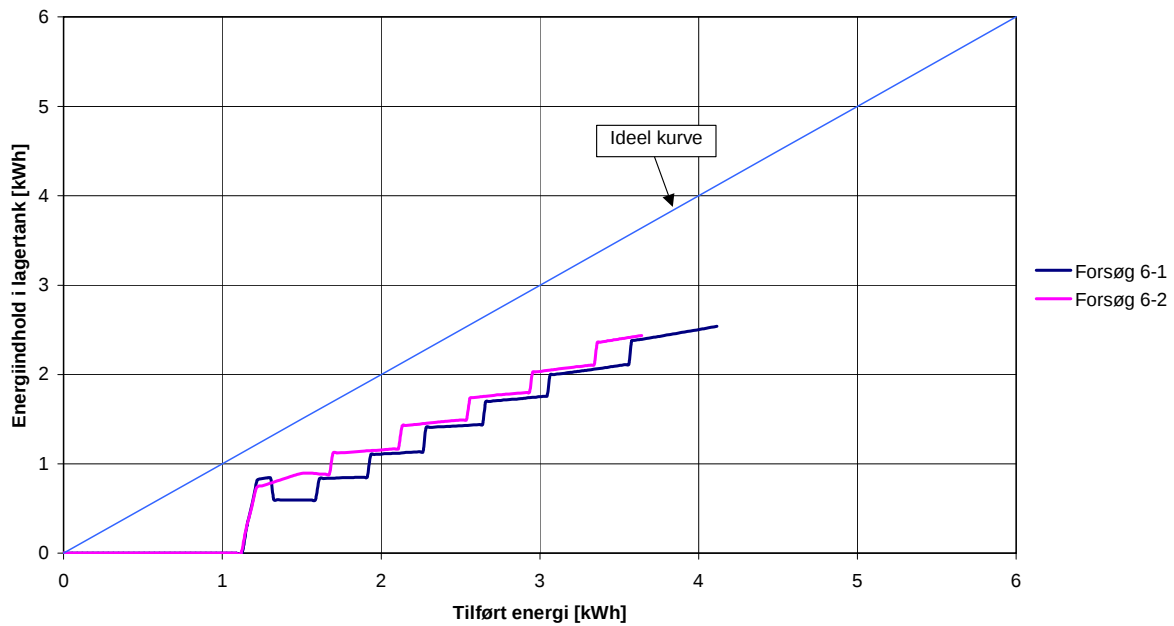
Figur 2-36: Sammenfatning af forsøgene med lagertank 3.



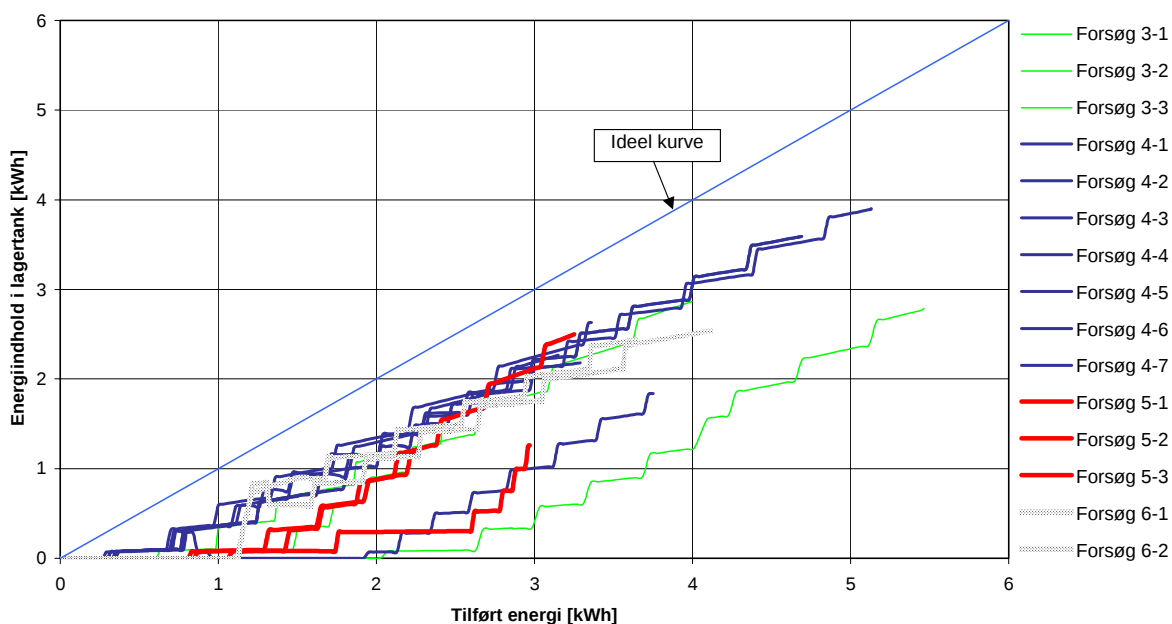
Figur 2-37: Sammenfatning af forsøgene med lagertank 4.



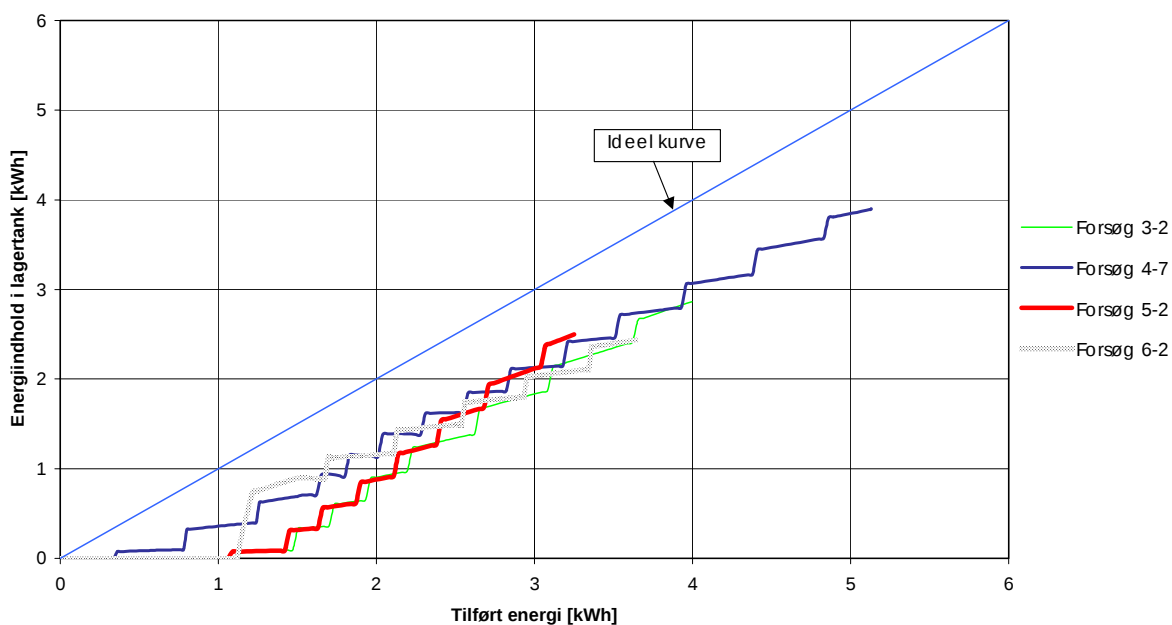
Figur 2-38: Sammenfatning af forsøgene med lagertank 5.



Figur 2-39: Sammenfatning af forsøgene med lagertank 6.



Figur 2-40: Sammenfatning af forsøgene med lagertank 3, lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6.



Figur 2-41: Sammenfatning af de bedste forsøg med lagertank 3, lagertank 4, lagertank 5 og lagertank 6. Starttemperaturen varierer mellem ca. 17°C og ca. 18°C i de viste forsøg.

Det ses, at der ikke er væsentlig forskel på forholdet mellem den tilførte energi og det opbyggede energiindhold i lagertanken under forsøgene med forskellige lagertanktyper og driftsstrategier når den tilførte energi energimængde er større end 2 kWh. Forskellen ligger i starten af opvarmningsforløbet hvor det kan ses, at der i lagertank 4 hurtigst etableres et vist energiindhold.

Det er der ikke noget underligt i fordi det volumen der i starten af opvarmningsforløbet opvarmes af det øverste varmelegeme er meget lille.

Under forsøgene med lagertank 6 går der lidt længere tid før der opbygges et anvendeligt energiindhold i lagertanken. Det skyldes at det volumen der i første omgang opvarmes af det vandrette varmelegeme er større end i lagertank 4.

Under forsøgene med lagertank 3 opbygges der også hurtigt et anvendeligt energiindhold i lagertanken når kun det øverste varmelegeme er aktivt, men som vist er det med denne udformning af lagertanken ikke muligt at begrænse temperaturstigningen i toppen af lagertanken samt regulere størrelsen af det suppleringsopvarmede volumen vilkårligt.

Lagertank 4 og lagertank 6 har de bedste udformninger af de afprøvede lagertanke. Lagertank 3 og lagertank 5 har de dårligste udformning af de afprøvede lagertanke.

Der arbejdes videre med to af de afprøvede lagertanktyper. De testes i instituttets prøvestand for solvarmeanlæg samt i praksis.

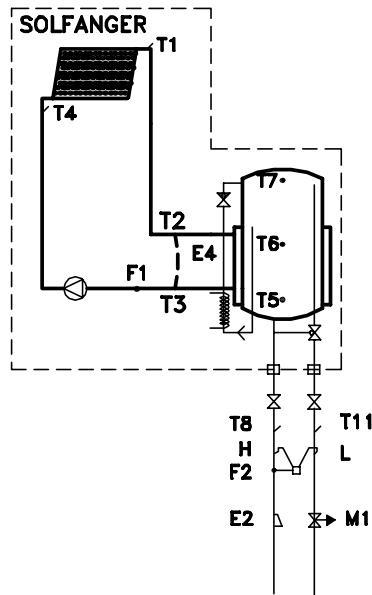
Lagertank 2 er valgt fordi det med denne udformning af lagertanken er muligt at opvarme et vilkårligt volumen og fordi den supplerende energikilde, elpatronen, nemt kan udskiftes med en varmeveksler tilsluttet en anden og billigere energikilde.

Dernæst er lagertank 6 valgt frem for lagertank 4. Det skyldes primært nogle praktiske forhold. Varmelegemerne skal kunne tages ud af lagertanken i forbindelse med kalkafrensning uden at lagertanken skal tømmes helt og lægges ned. Derudover er der mindstekrav til afstanden mellem en svejsning på lagertanken og en ny gennembrydning af lagertanken. Endebundene og den lodrette del af lagertanken er samlet med en svejsning. Af styrkemæssige grunde er mindsteafstanden mellem denne svejsning og en ny gennembrydning 80 mm. Af hensyn til de kuldebroer der opstår når isoleringen på lagertanken gennembrydes er det mest hensigtsmæssigt at indføre varmelegemerne gennem siden af lagertanken frem for gennem toppen hvor vandet er varmest. Således kan lagertank 6 nemt udføres i praksis mens dette ikke er tilfældet med lagertank 4.

Desuden er et solvarmeanlæg baseret på lagertank 1 testet i prøvestanden for solvarmeanlæg. Lagertank 1 har i testperioden kørt med både kogning og naturlig cirkulation i sidearm-kappekredsen.

3 Prøvning af solvarmeanlæg

Solvarmeanlæggene 1, 2, 3 og 4, se **Tabel 1-2**, er afprøvet i IBE's prøvestand for solvarmeanlæg under ens realistiske prøvningsbetingelser. For detaljeret at kunne følge driften af solvarmeanlæggene, er der installeret måleudstyr i anlæggene. **Figur 3-1** viser en principskitse af det intelligente solvarmeanlæg 2 installeret i prøvestanden med måleudstyr.



Figur 3-1: Principskitse af intelligent solvarmeanlæg med måleudstyr.

I **Figur 3-1** er de målte størrelser:

- Solfangervæskens returtemperatur fra solfangeren (T1)
- Solfangervæskens fremløbstemperatur til lageret (T2)
- Solfangervæskens returtemperatur fra lageret (T3)
- Solfangervæskens fremløbstemperatur til solfangeren (T4)
- Temperaturen i bunden af lageret (T5)
- Temperaturen i midten af lageret (T6)
- Temperaturen i toppen af lageret (T7)
- Koldtvandstemperaturen (T8)
- Varmtvandstemperaturen (T11)
- Volumenstrømmen i solkredsen (F1)
- Volumenstrømmen i tappekredsen (F2)
- Energimængden der overføres til lageret (E4)
- Energimængden der tages fra lageret (E2)

Endvidere er det supplerende energiforbrug, volumenstrømmen i sidearmen, den totale og den diffuse solbestrålingsstyrke på solfangeren samt inde- og udetemperaturen målt. For yderligere detaljer omkring prøvestanden og måleudstyret henvises til [7].

3.1 Prøvningsbetingelser

Der tappes brugsvand tre gange daglig 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 tappet energimængde på 7,32 kWh.

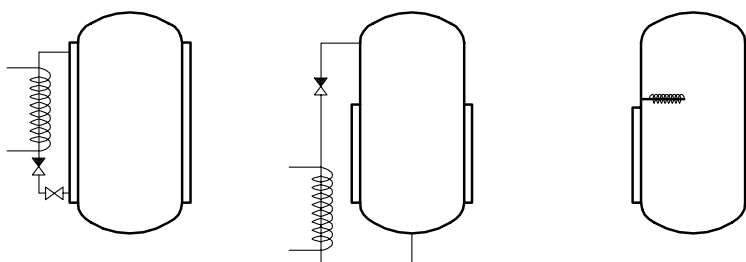
I det traditionelle solvarmeanlæg holdes temperaturen i toppen af lagertanken konstant på 50,5°C af den supplerende energikilde.

I de intelligente anlæg opvarmes lagertanken fra toppen og nedefter umiddelbart før aftapning. Det er størrelsen af den supplerende energikilde samt størrelsen af energiindholdet der skal etableres i lagertanken, der afgør hvornår opvarmningen startes. En elpatron på 1200 W skal, hvis vandet i lagertanken er koldt, bruge omkring 2,5 timer på at etablere et energiindhold på 2,44 kWh, når der samtidig påregnes et vist varmetab fra sidearm og lagertank. Dvs. at starttidspunktet for en elpatron på 1200 W, når det ønskede energiindhold er 2,44 kWh, er 2,5 timer før tappetidspunktet uanset størrelsen af energiindholdet i lagertanken ved starttidspunktet. Sluttidspunktet for timeren ligger umiddelbart før tappetidspunktet. I perioden mellem timerens start- og sluttidspunkt sørger styresystemet for at elpatronen kun er aktiv såfremt det ønskede energiindhold i lagertanken ikke er til stede. Temperaturniveauet i toppen af lagertanken efter opvarmning afhænger af vandets temperatur ved indløb i sidearmen og dermed temperaturforholdene i lagertanken før opvarmning.

3.2 Måleresultater

Der er foretaget målinger i hele 1999, dog er der højest målt på tre anlæg samtidig. Undervejs i forløbet er der opstået nye ideer, eller den eksisterende udformning af lagertanken har vist sig at være uhensigtsmæssig. Derfor er lagertankene ombygget op til flere gange i prøveperioden.

I perioden 1/1 til 29/3 1999 er solvarmeanlæg 1, 2 og 3 testet. Detaljer omkring lagertanke og solvarmeanlæg kan ses i **Tabel 1-1** og **Tabel 1-2**. **Figur 3-2** viser en principskitse af anlæggenes lagertanke i perioden.



Figur 3-2: Principskitse af lagertank 1, 2 og 7 som de var udformet i perioden 1/1 – 29/3 1999.

Solvarmeanlæg 1 er i perioden baseret på lagertank 1 med kogning i sidearmen. Af samme årsag er anlægget udformet som et tømmeanlæg med vand som solfangervæske i solkredsen. Den øverste del af kappen er benyttet som tømmebeholder. For at undgå problemet omtalt i Afsnit 2.1 hvor elpatronen kan koge tør hvis vandstanden i kappen falder til et niveau der ligger under det niveau hvor sidearmen er tilsluttet kappen er der anvendt en driftsstrategi hvor pumpen i solkredsen sættes ud af drift når timeren på den supplerende energikilde er aktiv. Det viste sig at være en dårlig driftsstrategi fordi pumpen i solkredsen stort set aldrig var i drift. Effekten fra elpatronen i

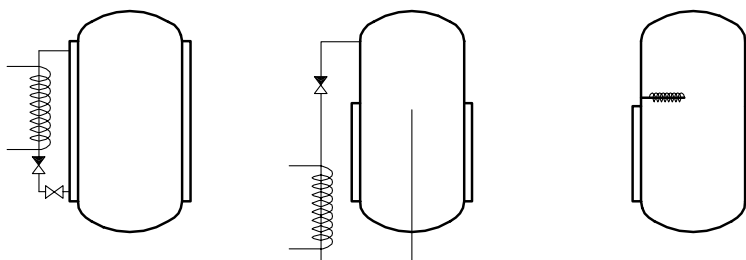
sidearmen er 1200 W og det betyder at timeren er aktiv i 2,5 timer før hver tapning, dvs. hele formiddagen og en stor del af eftermiddagen uanset vejrforholdene.

Solvarmeanlæg 2 er i perioden baseret på lagertank 2 med naturlig cirkulation i sidearmen. Sidearmen består af et $\frac{3}{4}$ " stålrør og har udtag i bunden af lagertanken hvilket betyder, at det konstant er det koldeste vand i lagertanken der opvarmes til en brugbar temperatur. Som omtalt i Afsnit 2.2 resulterer energibidraget fra solkredsen ved denne udformning af lagertank 2 ikke i tilstrækkelig grad til et reduceret supplerende energiforbrug.

Solvarmeanlæg 3 er i perioden baseret på lagertank 7 og er således et helt traditionelt anlæg med en termostatstyret elpatron som supplerende energikilde.

Den daglige tappede energimængde fra anlæggene ligger i hele perioden på det ønskede niveau – 7,32 kWh, men desværre har indstillingen af det ønskede energiindhold i lagertanken været sat for lavt i perioden hvilket har betydet, at varmtvandstemperaturen under tapning fra de intelligente anlæg har været for lav. De intelligente anlæg har på baggrund af den lave varmtvandstemperatur under tapning haft for gunstige driftsbetingelser og der er således ikke det rigtige grundlag for sammenligning af de tre anlægs ydelser. På trods af for gunstige driftsbetingelser for de intelligente anlæg har det traditionelle anlæg en bedre nettoydelse (= tappet energimængde fra lagertanken – supplerende energimængde tilført lagertanken) i perioden. Det kan derfor konkluderes at de afprøvede udformninger af intelligente solvarmeanlæg ikke er velegnede.

I perioden 14/4 til 31/5 1999 er solvarmeanlæg 1, 2 og 3 testet. Detaljer omkring lagertanke og solvarmeanlæg kan ses i **Tabel 1-1** og **Tabel 1-2**. **Figur 3-3** viser en principskitse af anlæggenes lagertanke i perioden.



Figur 3-3: Principskitse af lagertank 1, 2 og 7 som de var udformet i perioden 14/4 – 31/5 1999.

Solvarmeanlæg 1 er i perioden baseret på lagertank 1 med naturlig cirkulation i sidearm-kappekredsen. Anlægget fungerer ikke længere som tømmeanlæg og der er påfyldt den sædvanlige frostvæske bestående af en propylenglykol-vand blanding. Styringsstrategien for pumpen i solkredsen er ændret således at pumpen er i drift når solfangeren kan producere varme.

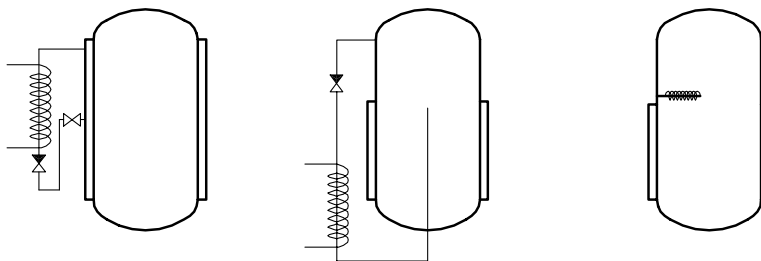
Solvarmeanlæg 2 er i perioden baseret på lagertank 2 med naturlig cirkulation i sidearmen. Sidearmen består af et $\frac{3}{4}$ " stålrør. Lagertanken er ændret således at det vand der opvarmes til en brugbar temperatur udtages fra ca. midt i beholderen. Det foregår via POM-røret som er ført ind igennem bunden af lagertanken. POM-røret er udført med en godstykkelse på godt 20 mm og er således godt isoleret. Det minimerer en uønsket opvarmning af vandet i den nederste del af lagertanken samt en uønsket temperaturreduktion af brugsvandet der strømmer igennem POM-røret. POM-røret har en indvendig diameter på 18,5 mm og en udvendig diameter på 51,8 mm.

Solvarmeanlæg 3 er udformet som i foregående måleperiode.

Den daglige tappede energimængde fra anlæggene ligger i hele perioden på det ønskede niveau – 7,32 kWh, men som i forrige periode har indstillingen af det ønskede energiindhold i lagertanken været sat for lavt for de intelligente solvarmeanlæg. Der er således ikke det rigtige grundlag for sammenligning af de tre anlægs ydelser.

I to korte sammenhængende perioder à fem dage er den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra de intelligente anlæg målt til 30°C mens den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra det traditionelle anlæg er målt til 47,5°C. I begge perioder har det traditionelle anlæg ydet det samme som det intelligente anlæg 1 mens det intelligente anlæg 2 har ydet 23 % mere. Det kan derfor konkluderes at det intelligente anlæg baseret på lagertank 1 med sidearmen koblet til kappen ikke er velegnet. Tidligere udførte beregninger af denne type solvarmeanlæg viser også, at dette koncept ikke er velegnet [11].

I perioden 1/6 til 27/8 1999 er solvarmeanlæg 1, 2 og 3 testet. Detaljer omkring lagertanke og solvarmeanlæg kan ses i **Tabel 1-1** og **Tabel 1-2**. **Figur 3-4** viser en principskitse af anlæggenes lagertanke i perioden.



Figur 3-4: Principskitse af lagertank 1, 2 og 7 som de var udformet i perioden 1/6 – 27/8 1999.

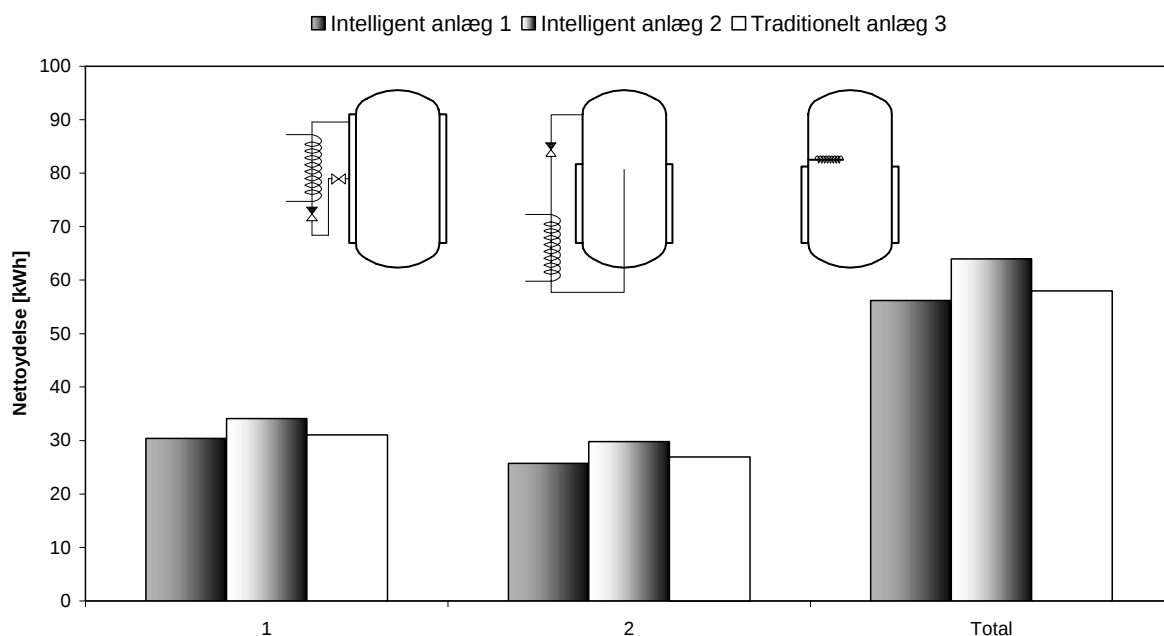
Solvarmeanlæg 1 er i perioden baseret på lagertank 1 med naturlig cirkulation i sidearm-kappekredsen. Lagertanken er ombygget således at indløbet i sidearmen foregår fra midt på kappen hvor det før foregik fra bunden af kappen. Ændringen er et forsøg på at reducere det supplerende energiforbrug ved at lade varmere væske løbe ind i sidearmen samt begrænse opvarmningen af vandet i den nederste del af lagertanken.

Solvarmeanlæg 2 og solvarmeanlæg 3 er udformet som i forgående måleperiode.

Den daglige tappede energimængde fra anlæggene ligger i hele perioden på det ønskede niveau – 7,32 kWh.

For to korte sammenhængende måleperioder à fem dage er den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra de intelligente anlæg målt til 43°C mens den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra det traditionelle anlæg er målt til 47,5°C. Det vurderes at ydelserne fra de tre anlæg i de nævnte måleperioder med rimelighed kan sammenlignes.

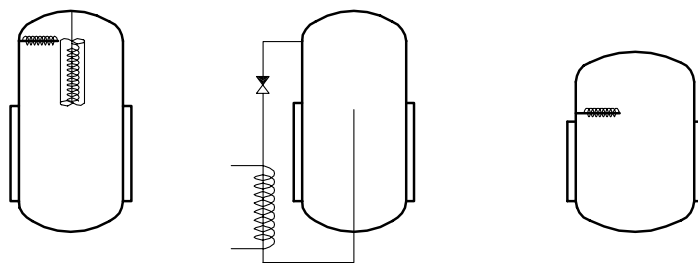
Figur 3-5 viser nettoydelsen for de tre anlæg i de to korte måleperioder.



Figur 3-5: Nettoyedelsen for de tre afprøvede anlæg i perioden 15/6 – 24/6 1999.

Det ses at det intelligente solvarmeanlæg 1 har en dårligere ydelse end det traditionelle solvarmeanlæg 3. Det intelligente solvarmeanlæg 2 har en ydelse der er 10 % højere end ydelsen for det traditionelle solvarmeanlæg 3.

I perioden 24/11 til 31/12 1999 er solvarmeanlæg 4, 2 og 3 testet. Detaljer omkring lagertanke og solvarmeanlæg kan ses i **Tabel 1-1** og **Tabel 1-2**. **Figur 3-6** viser en principskitse af anlæggenes lagertanke i perioden.



Figur 3-6: Principskitse af lagertank 7, 2 og 8 som de var udformet i perioden 24/11 1999 – 18/3 2000.

Solvarmeanlæg 4 er i perioden baseret på lagertank 7 med opvarmningsprincippet testet i lagertank 6. Den vandrette elpatron har en effekt på 1200 W. Den lodrette elpatron har en effekt på 1200 W. Omkring den lodrette elpatron er der et PVC-plastrør med dimensionen 1". Volumen over den vandrette elpatron og det øverste niveau af plastrøret er 17 liter.

Solvarmeanlæg 2 er i perioden baseret på lagertank 2 med naturlig cirkulation i sidearmen. Dimensionen på sidearmen er øget fra ¾" til 1". Dimensionen på sidearmen er øget fordi teoretiske beregninger med et årssimuleringsprogram der kan regne på et solvarmeanlæg med denne lagertank viste, at ydelsen for anlægget ville øges hvis volumenstrøm i sidearmen øgedes [12]. I solkredsen er

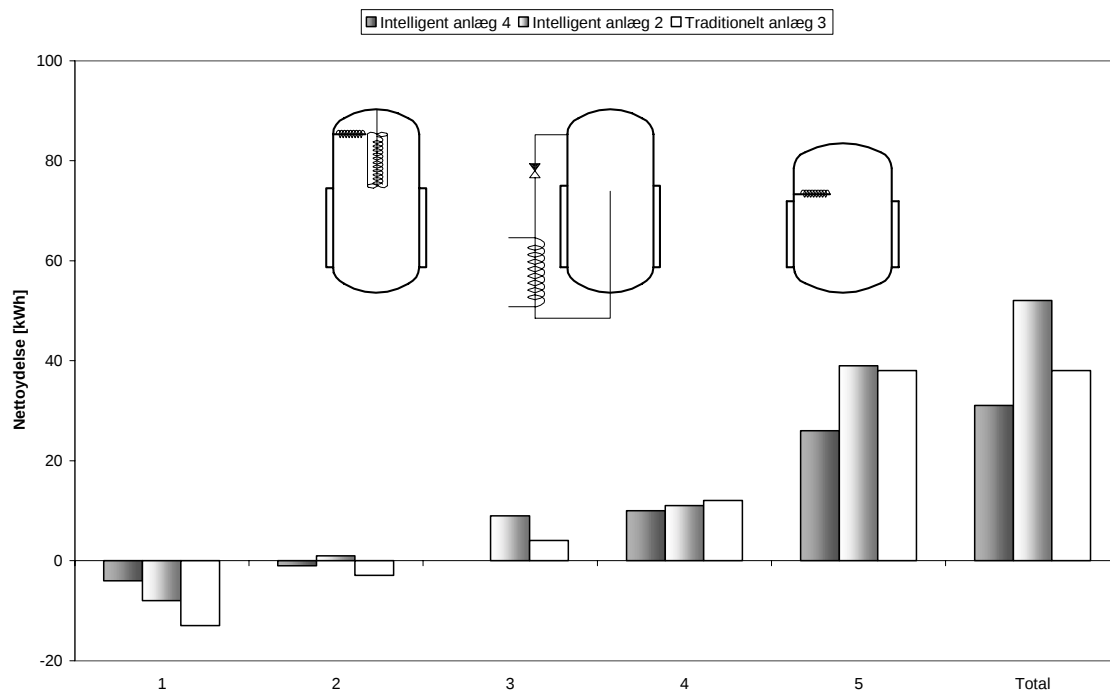
der installeret en ventil der regulerer volumenstrømmen i solkredsen således, at udløbstemperaturen fra solfangeren holdes konstant.

Solvarmeanlæg 3 er i perioden baseret på lagertank 8. Lagertank 8 har som lagertank 7 et volumen på 175 liter.

Den daglige tappede energimængde fra anlæggene ligger i hele perioden på det ønskede niveau – 7,32 kWh.

For fem længere sammenhængende måleperioder er den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra de intelligente anlæg målt til 45°C mens den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra det traditionelle anlæg er målt til 48°C. Det vurderes at ydelserne fra de tre anlæg i de nævnte måleperioder kan sammenlignes.

Figur 3-7 viser nettoydelsen for de tre anlæg i de fem måleperioder.



Figur 3-7: Nettoydelsen for de tre afprøvede anlæg i perioden 25/11 1999 – 18/3 2000.

Det ses af Figur 3-7, at det intelligente solvarmeanlæg 2 har været det bedste anlæg i perioden 25. november 1999 til 18. marts 2000. Det intelligente solvarmeanlæg 2 har i den periode ydet 37 % mere end det traditionelle solvarmeanlæg 3, mens det intelligente solvarmeanlæg anlæg 4 har ydet 18 % mindre end det traditionelle solvarmeanlæg 3. Endvidere ses det, at det intelligente solvarmeanlæg 4 i den første måleperiode havde en højere ydelse end de to øvrige anlæg, og herefter blev anlægget dårligere og dårligere sammenlignet med de to øvrige anlæg. Det skyldes, at der har været to overskyggende problemer med driften af det intelligente anlæg 4, dels har ydelsen fra solfangeren været lav og samtidig har der været meget høje temperaturer i toppen af anlæggets beholder.

Udformningen med en lodret elpatron i et lodret 1" PVC-plastrør i beholderen i det intelligente anlæg 4 har givet nogle meget høje temperaturer i toppen af beholderen. Flowarealet mellem røret og elpatronen er forholdsvis lille, og der, hvor røret er fastgjort til elpatronen, spærres der yderligere for flowet. Efter den 18. marts 2000 er der ydermere konstateret, at i den korte tid, som det intelligente anlæg 4 har været i drift, er det lodrette rør kalket fuldstændig til. Figur 3-8 viser kalken i røret. Det resulterede i starten af måleperioden i temperaturer i toppen af beholderen på omkring 70°C, mens der sidst i måleperioden er observeret temperaturer på op til 80-90°C. De meget høje temperaturer i beholderen er ikke hensigtsmæssige, da de giver et forøget varmetab. At temperaturerne i toppen af beholderen er blevet højere i løbet af måleperioden, tyder på, at der er kommet mere og mere kalk i det lodrette rør. Problemet med kalk i røret kan f.eks. løses ved at benytte et rør med en større diameter således at gennemstrømningsarealet forøges, eller ved at benytte en elpatron med lavere effekt pr. overfladeareal hvorved overfladetemperaturen af elpatronen formindskes. I de følgende undersøgelser blev PVC-plastrøret dog bare fjernet, således at der ikke var noget rør udenom den lodrette elpatron.



Figur 3-8: Kalken uden om den lodrette elpatron i beholderen i det intelligente anlæg 4.

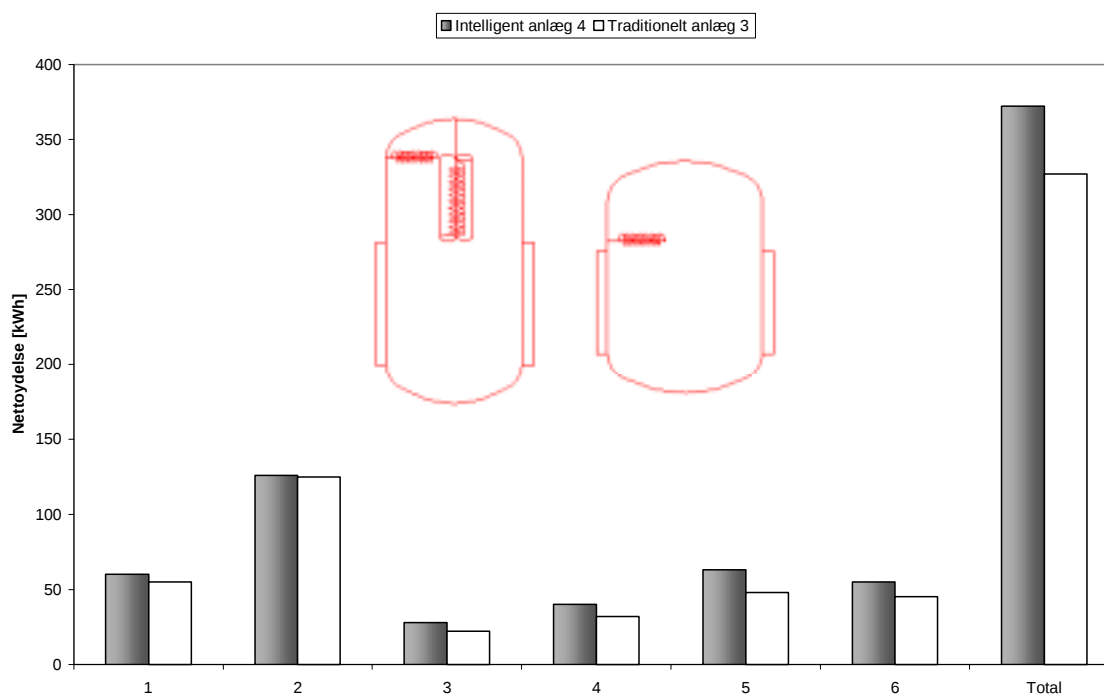
I perioden 31/3 til 14/8 2000 er solvarmeanlæg 4 og 3 testet. Detaljer omkring lagertanke og solvarmeanlæg kan ses i Tabel 1-1 og Tabel 1-2. Principskitserne af lagertank 7 og 8 er vist i Figur 3-6.

Solvarmeanlæg 4 er i perioden baseret på lagertank 7 med opvarmningsprincippet testet i lagertank 6. Den vandrette elpatron har en effekt på 1200 W. Den lodrette elpatron har en effekt på 1200 W. Da røret udenom den lodrette elpatron kalkede til som vist i Figur 3-8 er røret for denne måleperiode blevet fjernet.

Solvarmeanlæg 3 er i perioden baseret på lagertank 8. Lagertank 8 har som lagertank 7 et volumen på 175 liter.

Den daglige tappede energimængde fra de to anlæg ligger i starten af perioden på de ønskede 7,32 kWh. I midten af perioden blev den ønskede dagligt tappede energimængde sat ned til 4,575 kWh (svarer til 100 l/dag), og herefter lå den daglige tappede energimængde fra de to anlæg på dette ønskede niveau.

For måleperioden 31/3 – 14/8 2000 er den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra det intelligente anlæg målt til 46°C, mens den laveste varmtvandstemperatur under tapning fra det traditionelle anlæg er målt til 47°C. Det vurderes, at ydelserne fra de to anlæg i den nævnte måleperiode kan sammenlignes. Måleperioden er inddelt i 6 kortere sammenhængende måleperioder, og Figur 3-9 viser nettoydelsen for de to anlæg i de seks måleperioder.



Figur 3-9: Nettoyedelsen for de to afprøvede anlæg i perioden 31/3 – 14/8 2000.

Det ses, at det intelligente solvarmeanlæg 4 efter at det tilkalkede rør er fjernet har en højere ydelse end det traditionelle solvarmeanlæg 3. Nettoyedelsen for det intelligente solvarmeanlæg 4 er 14 % højere end nettoydelsen for det traditionelle solvarmeanlæg 3.

4 Validering af beregningsprogrammer

Som udgangspunkt for udvikling af programmet til beregning af ydelsen for intelligente solvarmeanlæg er simuleringsprogrammet KappePTF benyttet [9]. KappePTF er en reduceret udgave af årssimuleringsprogrammet Mantlsim [8], der beregner årsydelsen for et low flow solvarmeanlæg med vejrdata fra test reference year, TRY. KappePTF kan beregne ydelsen for et low flow solvarmeanlæg med reelle vejrdata målt i instituttets prøvestand for solvarmeanlæg.

Programmet KappePTF er udvidet således at programmet kan beregne ydelsen for et intelligent solvarmeanlæg med reelle vejrdata. Til beregning af årsydelsen for et intelligent solvarmeanlæg er programmet Kappsol udvidet. Begge programmer er udvidet så de kan beregne ydelsen for intelligente solvarmeanlæg, hvor den supplerende energikilde består af henholdsvis en elpatron i sidearm eller to interne elpatroner.

Programmerne anvender en inputfil der beskriver lagertank, solfanger, rørføring, materialeparametre som varmeledningsevne, varmekapacitet og densitet for væsker og stål samt styringsstrategi. KappePTF anvender foruden reelle vejrdata den målte koldtvandstemperatur og den målte indetemperatur som input til beregningen.

4.1 Intelligent solvarmeanlæg med sidearm

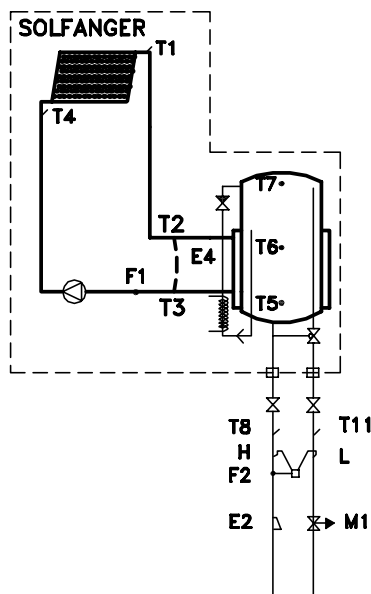
Der er i det efterfølgende foretaget validering af EDB-modellen for solvarmeanlæg 2 baseret på lagertank 2.

Solvarmeanlægget er opført i IBE's prøvestand for solvarmeanlæg [7] i 1998. Anlægget var til at begynde med et traditionelt forsøgsanlæg hvor forskellige anlægsudformninger og driftsstrategier blev afprøvet. Senere er anlægget udviklet til en prototype af et intelligent solvarmeanlæg.

Anlægget er et low flow anlæg, som består af et solfangerpanel med et transparent areal på 3 m², samt en lagertank på 175 l + 28,9 l i kappen. Den supplerende energikilde, en elpatron, er anbragt i en sidearm, se **Figur 4-1**. Lagertanken er detaljeret beskrevet under "Lagertank 2" i **Tabel 1-1**.

Solfangeren, type BA 30 fra firmaet Batec A/S, består af 4 mm hærdet jernfattigt glas som dæklag, samt en valset rørplade med selektiv belægning som absorber. Rørene i solfangeren er forbundet parallelt og solfangeren er lodretstående, se **Figur 4-2**. Solfangeren er installeret på en 45° hældende sydvendt tagflade uden skygger.

Figur 4-1 viser en principskitse af solvarmeanlægget.



Figur 4-1: Principskitse af anlægget med målepunkter. Bemærk at Figur 4-1 er identisk med Figur 3-1.

Solfangeren er forbundet til lagertanken via 15,1 m fremløbsrør til lageret, og 17,9 m returrør fra lageret. Heraf er 5,1 m henholdsvis 4,6 m indendørs. Rørene er 10/8 mm kobberør, der er isoleret med 10 mm PUR-skum.

Solfangerkredsen er forsynet med en Grundfos cirkulationspumpe (Type UPS 25-40), som igennem hele måleperioden har kørt på trin 2.

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 10/7 K.

EDB-modellen for solvarmeanlægget er valideret for tre perioder, se afsnit 4.1.1 I de sidste to måleperioder er solfangerkredsen endvidere forsynet med en temperaturstyret ventil med det formål at regulere flowet således at solfangervæskens fremløbstemperatur til lagertanken holdes konstant. Der styres efter en fremløbstemperatur til lagertanken på 60°C. I perioder hvor 60°C ikke kan nå køres med en minimumsvolumenstrøm i solkredsen på 0,4 l/min. I perioder hvor temperaturen ikke kan holdes nede på 60°C er volumenstrømmen i solkredsen 1,8 l/min.

Cirkulationspumpens, el-patronens og styresystemets effektforbrug fremgår af **Tabel 4-1**.

Enhed	Effektforbrug [W]
Cirkulationspumpe	52
El-patron	1200
Styresystem (on/off)	1,9/1,2

Tabel 4-1: Effektforbrug for cirkulationspumpe, elpatron og styresystem.

Figur 4-2 og Figur 4-3 viser fotos af anlæggets solfanger og varmelager.



Figur 4-2: Anlæggets solfanger. Solfangeren der hører til anlægget er solfangeren i midten. Øverst i højre hjørne ses de to solarimetre der måler den totale og den diffuse solbestrålingsstyrke på solfangeren. Solarimeteret der måler den diffuse solbestrålingsstyrke er forsynet med en skyggering der skærmer af for den direkte solbestråling. Skyggeringens placering justeres manuelt igennem året.



Figur 4-3: Anlæggets varmelager (lagertank 2). Til venstre i billedet ses sidearmen på lagertanken og øverst i sidearmen ses hanen på kuglehaneventilen.

4.1.1 Testperiode

Der er udvalgt en periode til at validere en EDB model for anlæg 2 med indløb i sidearm fra midt i beholder og to perioder til validering af en EDB model af anlæg 2 med indløb i sidearm fra midt i beholder samt styring af fremløbstemperaturen fra solkredsen. De tre perioder er henholdsvis:

- Periode 1: 1. april – 10. april 1999
- Periode 2: 8. september – 23. september 1999
- Periode 3: 22. oktober – 7. november 1999

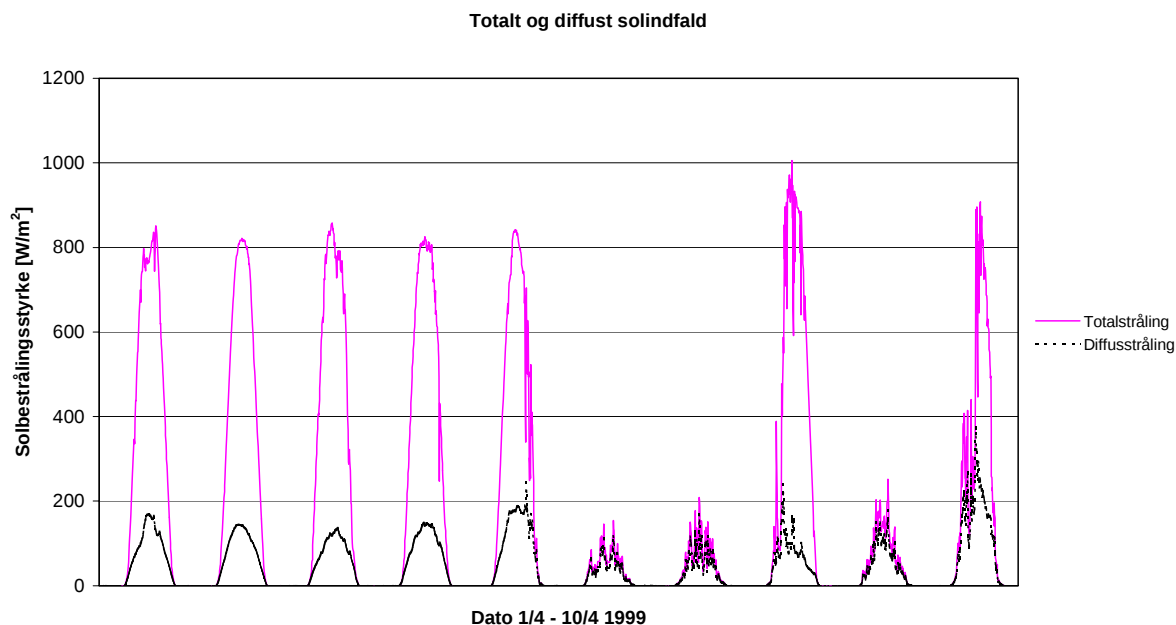
Perioderne er valgt ud fra følgende krav:

- der skal være varierende solindfald på solfangeren. Derved undgås systematiske fejl i EDB-modellerne.
- tapningen af brugsvand fra anlæggene skal være uden fejl.

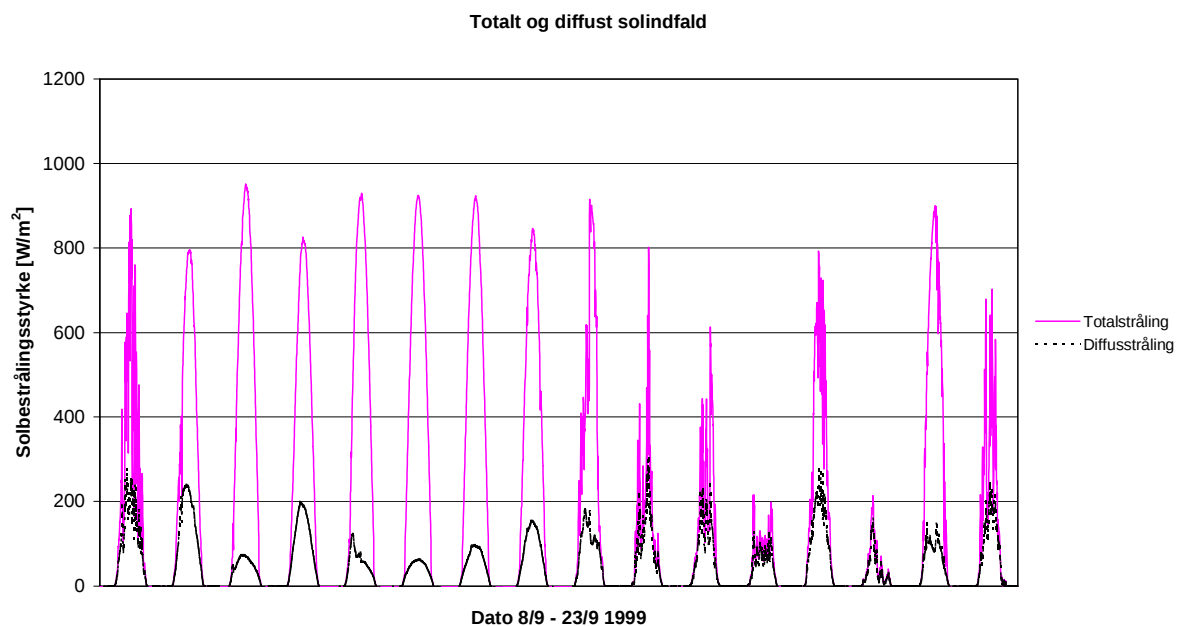
I **Figur 4-4**, **Figur 4-5** og **Figur 4-6** ses solbestrålingsstyrken for de tre perioder. Det ses, at bestrålingsstyrken, som ønsket, varierer meget.

Figur 4-7, **Figur 4-8** og **Figur 4-9** viser udeluftens og indeluftens temperatur i de tre perioder.

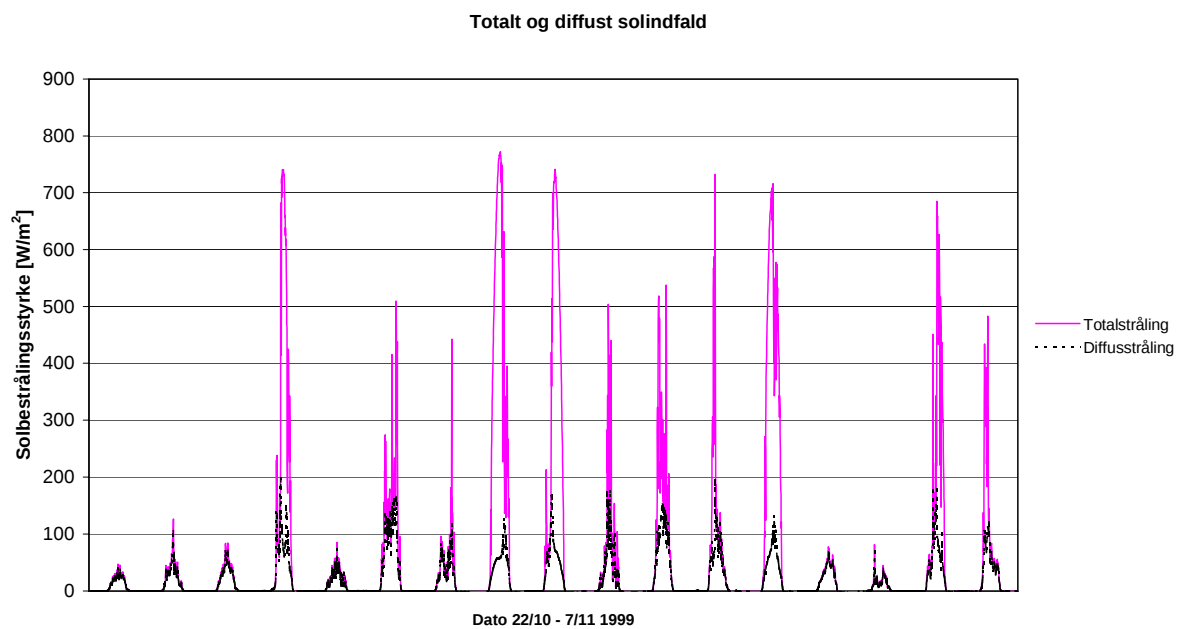
Figur 4-10, **Figur 4-11** og **Figur 4-12** viser den tappede energimængde fra anlægget i de tre perioder. Det ses, at den tappede energimængde, som ønsket, ligger nær de 7,32 kWh/dag.



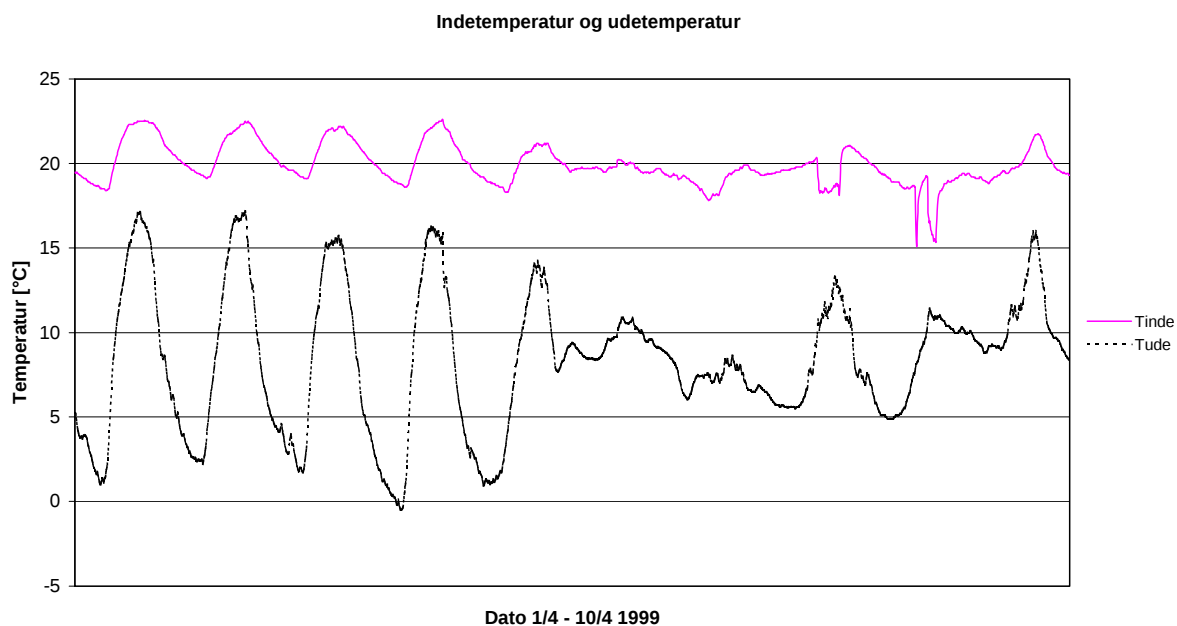
Figur 4-4: Totalt og diffust solindfald i perioden 1. april – 10. april 1999.



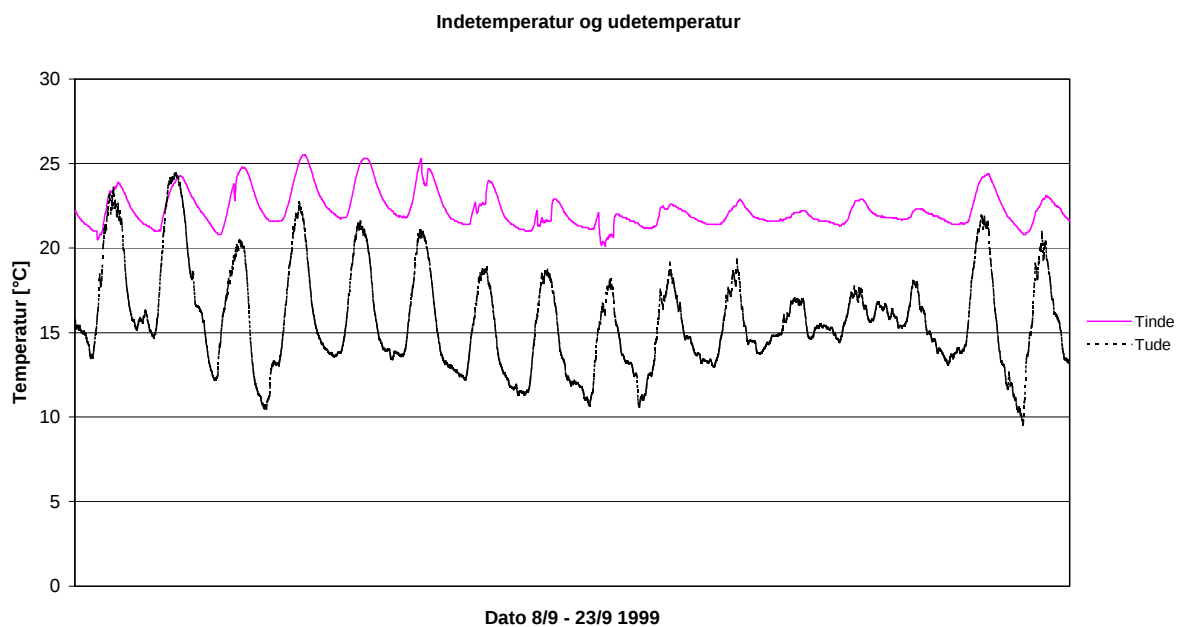
Figur 4-5: Totalt og diffust solindfald i perioden 8. september – 23. september 1999.



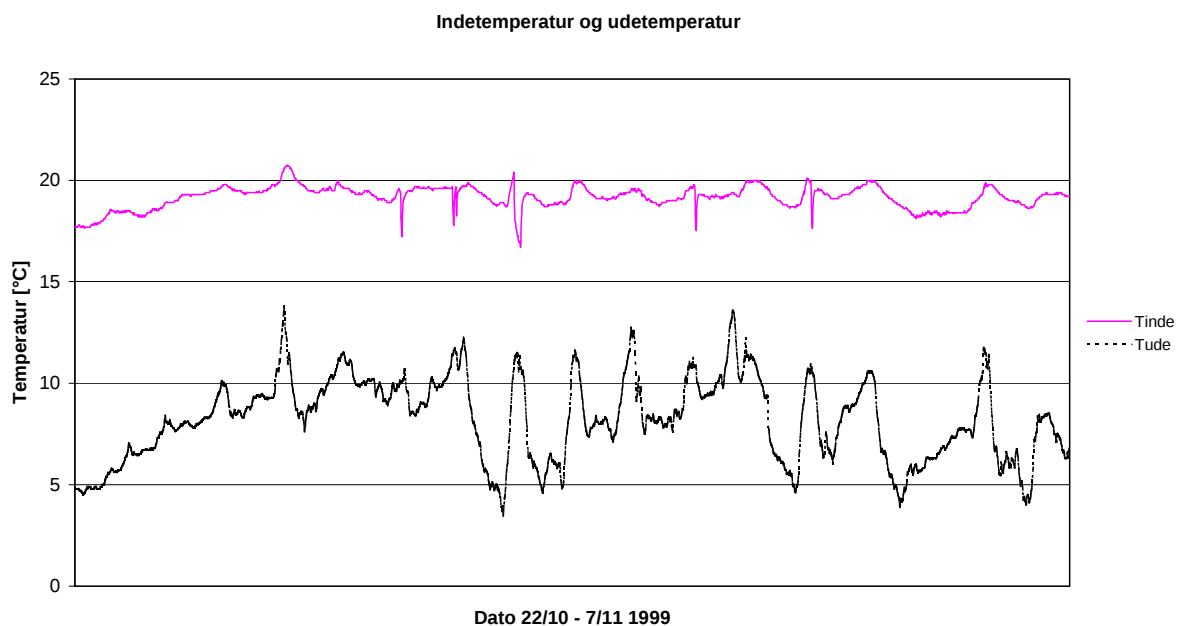
Figur 4-6: Totalt og diffust solindfald i perioden 22. oktober – 7. november 1999.



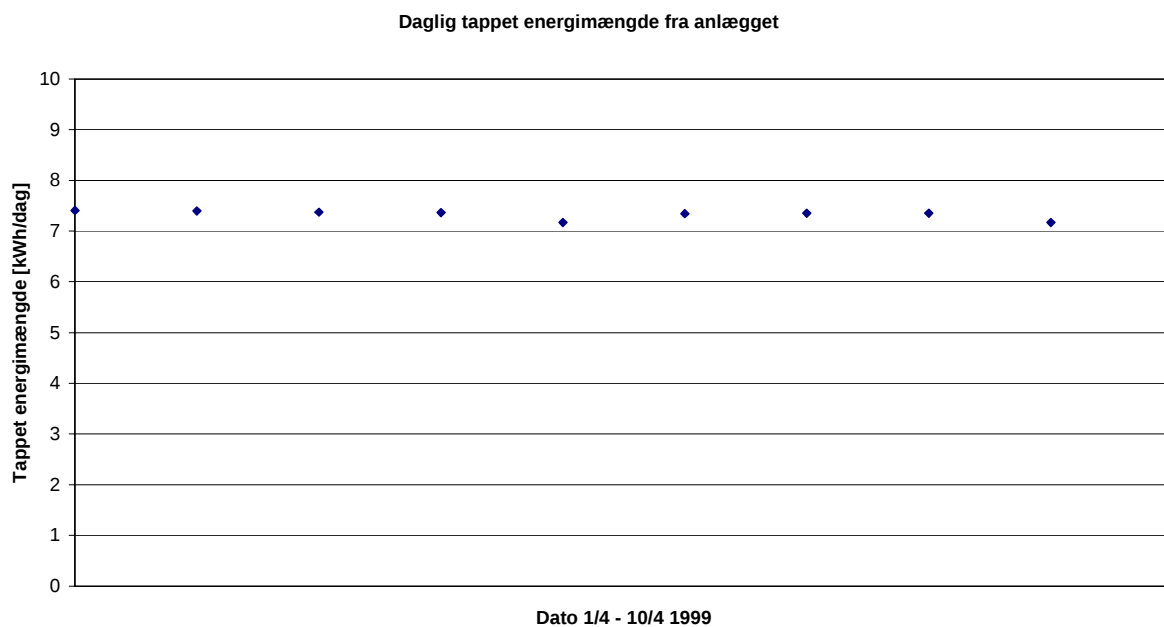
Figur 4-7: Udendørs og indendørs lufttemperatur i perioden 1. april – 10. april 1999.



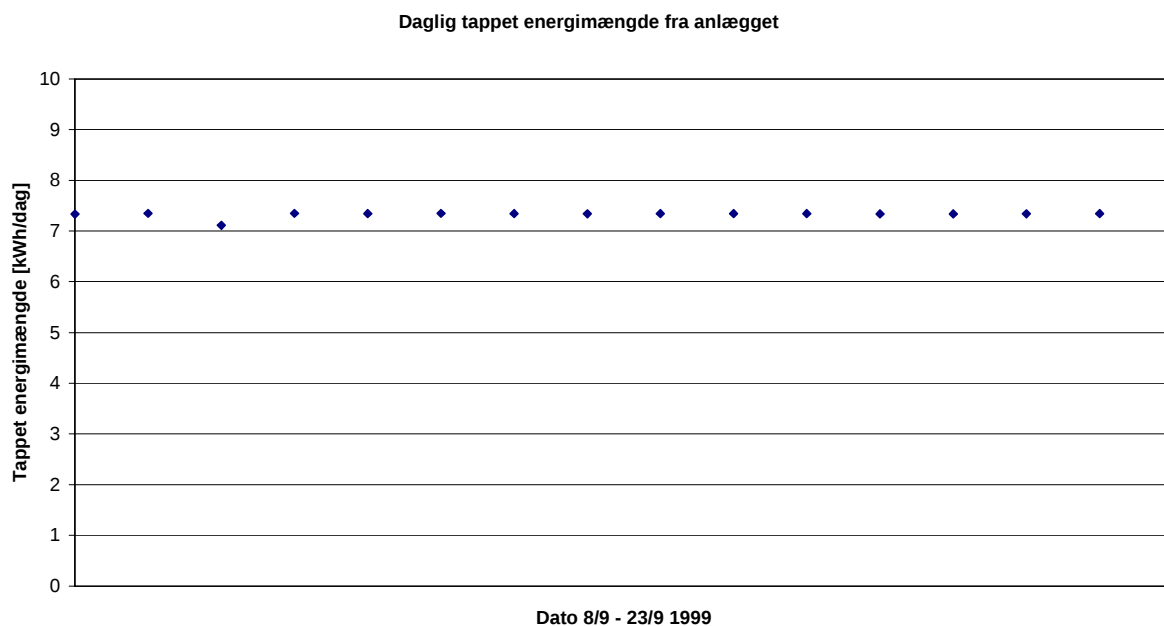
Figur 4-8: Udendørs og indendørs lufttemperatur i perioden 8. september – 23. september 1999.



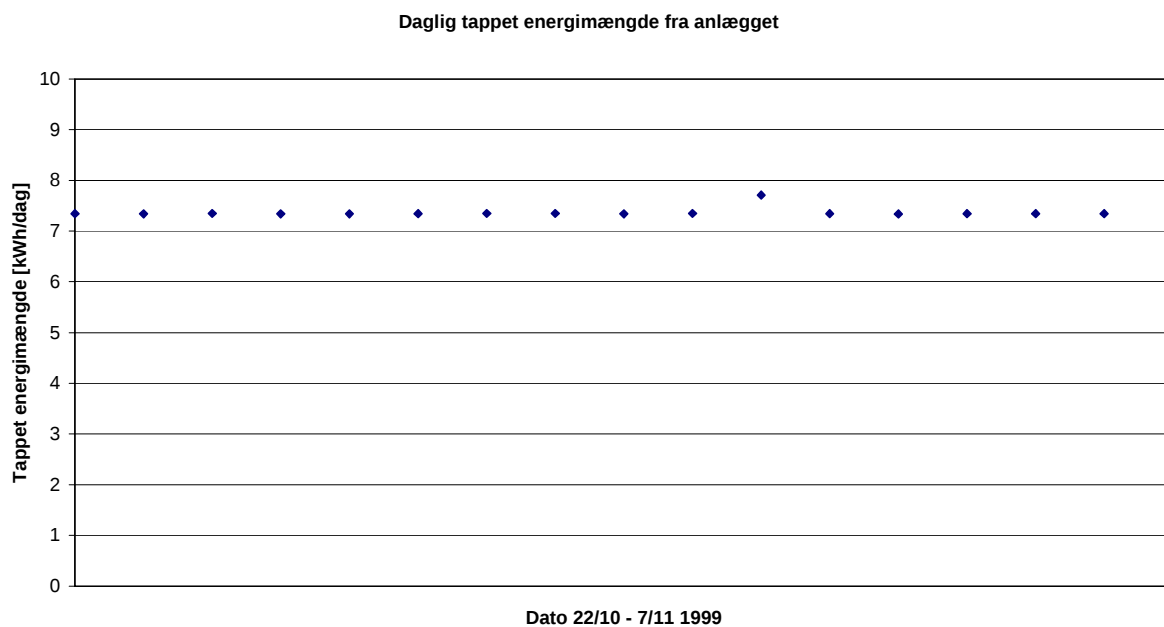
Figur 4-9: Udendørs og indendørs lufttemperatur i perioden 22. oktober – 7. november 1999.



Figur 4-10: Daglig tappet energimængde fra lagertanken i perioden 1. april – 10. april 1999.



Figur 4-11: Daglig tappet energimængde fra lagertanken i perioden 8. september – 23. september 1999.

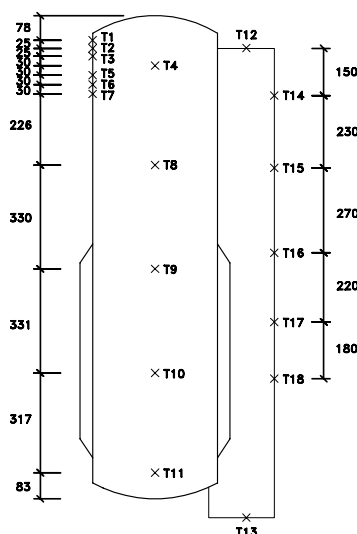


Figur 4-12: Daglig tappet energimængde fra lagertanken i perioden 22. oktober – 7. november 1999.

4.1.2 Prøvning og validering af EDB-model for intelligent solvarmeanlæg med sidearm

4.1.2.1 Måledata

I **Figur 4-1** er målepunkterne i solvarmeanlægget vist og i **Figur 4-13** er målepunkterne i lagertanken vist. Bemærk at **Figur 4-13** er identisk med **Figur 2-17**.



Figur 4-13: Målepunkterne i lagertanken under prøvning i prøvestanden for solvarmeanlæg.

Der er 11 målepunkter i lagertanken. Nogle af målepunkterne er anbragt uden på lagertanken i god termisk kontakt med lagertanken. De resterende målepunkter er anbragt i en glasstav, som er ført ind i tanken gennem bunden af tanken. Målepunkternes placering i tanken fremgår af **Tabel 4-2**.

Målepunkt	Betegnelse i Figur 4-1	Afstand fra bunden af tanken [mm]
1	T7	1476
2	-	1451
3	-	1426
4	-	1396
5	-	1366
6	-	1336
7	-	1306
8	T6	1066
9	-	736
10	T5	405
11	-	88

Tabel 4-2: Placering af temperaturfølere i lagertanken.

T12 – T18 er temperaturfølere placeret uden på sidearmen i god termisk kontakt med stålet.

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

Periode 1999	Solind-fald	Sol-varme til lager	Suppl. energi til lager	Energi tappet fra lager	Energi til pumpe	Energi til styre-system	Netto- ydelse	Anlægs- ydelse	Netto- dæknings grad	Anlægs- dæknings grad
--------------	-------------	---------------------	-------------------------	-------------------------	------------------	-------------------------	---------------	----------------	----------------------	-----------------------

	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]	[%]
1/4 –10/4	130	52	30	73	3,55	0,34	43	39	59	53

Tabel 4-3: Målte værdier for anlægget i måleperiode 1.

Periode 1999	Solind-fald [kWh]	Sol-varme til lager [kWh]	Suppl. energi til lager [kWh]	Energi tappet fra lager [kWh]	Energi til pumpe [kWh]	Energi til styre-system [kWh]	Netto- ydelse [kWh]	Anlægs- ydelse [kWh]	Netto- dæknings grad [%]	Anlægs- dæknings grad [%]
26/8–31/8	63	26	19	44	0,31	0,18	25	25	57	57
1/9–30/9	382	159	91	220	5,25	0,93	129	123	59	56
1/10–14/10	108	42	76	103	1,82	0,43	27	25	26	24
22/10–10/11	74	28	137	147	2,23	0,61	10	7	7	5
12/11–28/11	45	16	123	125	1,27	0,51	4	2	3	2
30/11–19/12	34	10	153	147	0,99	0,59	-6	-8	-4	-5
Total	706	281	599	786	11,9	3,3	189	174	24	22

Tabel 4-4: Målte værdier for anlægget i perioden 26/8 – 19/12 1999.

Der er målt på anlægget i hele 1999, men målingerne foretaget i den første halvdel af året er desværre ikke i orden. Der er tappet den ønskede energimængde fra lageret, men varmtvandstemperaturen under tapningerne faldt til et for lavt temperaturniveau i de perioder som ikke er medtaget i tabellerne. Grænsen for brugsvandets anvendelsestemperatur er i denne forbindelse sat til 45°C.

4.1.2.2 EDB-model af solvarmeanlægget

For at bestemme solvarmeanlæggets årlige ydelse samt hvilken indflydelse ændring i anlægsudformning eller driftsstrategi giver anledning til er en EDB-model af anlægget udformet. Modellen bruges i det detaljerede simuleringsprogram, der kort er beskrevet i afsnit 4. Modellen valideres med målte data fra perioderne: 1. april – 10. april, 8. sep. – 23. sep. og 22. okt. – 7. nov. 1999. I det følgende er input til EDB-modellen beskrevet:

Solfangerkredsen:

I en tidligere undersøgelse baseret på den selvsamme solfanger er nedenstående effektivitetsudtrykket for den afprøvede solfanger fundet [10]. Simuleringsprogrammet benytter ikke det egentlige effektivitetsudtryk, men et lineariseret udtryk ved en temperaturdifferens på 50 K. Nedenstående effektivitetsudtryk er lineariseret ved en temperaturdifferens mellem middeltemperaturen i solfangeren og omgivelsestemperaturen på 50 K:

$$\eta = 0,78 - 4,45 \cdot (T_m - T_a) / G$$

hvor

η	er solfangereffektiviteten	[-]
T_m	er solfangervæskens middeltemperatur	[°C]
T_a	er den omgivende lufts temperatur	[°C]
G	er bestrålingsstyrken på solfangeren	[W/m ²]

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

$$k_g = 1 - (\tan(i/2))^{4,2}$$

hvor

k_g er indfaldsvinkelkorrektionen [-]
 i er indfaldsvinklen [°]

Solfangeren har været utæt overfor regn i måleperioden. Det er registreret i form af mere eller mindre kondens på indersiden af dæklaget. Kondensdannelsen har været mest udtalt i vinterperioder hvor den relative luftfugtighed er størst. Foruden at reducere soltransmittansen kan kondens bevirke at den selektive belægning på absorberen nedbrydes. Endvidere vil isoleringsevnen af isoleringen i solfangerkassen reduceres med stigende vandindhold. Solfangeren har derfor ikke været så effektiv som ovenover angivet. Ved de efterfølgende simuleringer er starteffektiviteten η_0 reduceret indtil en passende overensstemmelse mellem beregnede og målte ydelser i solfangeren er opnået. Varmetabskoefficienten er ikke ændret. Der er opnået en passende overensstemmelse mellem beregnede og målte ydelser i solfangeren med en starteffektiviteten η_0 på 0,76.

Væsken i solfangerkredsen er en propylenglykol/vand-blanding med forskelligt propylenglykolindhold i de tre perioder for hvilke EDB-modellen valideres. Indholdet af propylenglykol er 40 vægt% i periode 1 og 26 vægt% i periode 2 og periode 3.

Volumenstrømmen i solfangerkredsen er ud fra målinger i periode 1 bestemt til:

$$0,17 \text{ l/min/m}^2$$

Volumenstrømmen i solfangerkredsen i periode 2 og periode 3 varierer med temperaturen ved udløb fra solfangeren. Der styres efter en udløbstemperatur på 60°C. Ud fra målinger er minimum og maksimum volumenstrøm bestemt til:

$$0,13 \text{ l/min/m}^2 \text{ og } 0,60 \text{ l/min/m}^2$$

Rørene i solfangerkredsen består af 15,1 m fremløbsrør til lageret, og 17,9 m returrør fra lageret. Heraf er 5,1 m hhv. 4,6 m indendørs. Rørene er 10/8 mm kobberør og isoleret med PUR-skum med en λ -værdi på 0,037 W/mK.

Pumpen i solfangerkredsen har et effektforbrug på 52 W. Solfangerkredsen styres af en differenstermostat med et start/stop setpunkt på 10/7 K.

Lageret:

Lagertanken har et volumen på 175 liter med en indvendig højde/diameter på 1,440/0,394 = 3,65.

Kappen har et volumen på 28,9 liter med en indvendig bredde/højde på 0,037/0,569 m.

Godstykkelsen er overalt 3 mm. Beholderen er i toppen isoleret med 200 mm, på siderene med 50 mm mineraluld med en λ -værdi på 0,045 W/mK. Bunden er uisoleret. Sidearmen er isoleret med 30 mm isoleringsskåle af mineraluld med en λ -værdi på 0,045 W/mK .

I simuleringerne er anvendt en effekt på 1200 W for el-patronen.

Startværdien for temperaturen i lagertanken er sat til 20°C. Det medfører at den første dag i perioden ikke kan anvendes til validering, men i stedet benyttes som beregningsmæssig indsvingningsperiode.

4.1.3 Validering af EDB-model

Formålet med validering af EDB-modellen er, at udforme en model der svarer så godt til solvarmeanlægget, at anlæggets årsydelse kan beregnes. Desuden kan modellen benyttes til at undersøge, hvorledes ændringer i anlægsudformningen samt driftsstrategien påvirker ydelsen.

EDB-modellen af anlægget valideres mod målte energistørrelser og temperaturer. Energistørrelserne er som følger:

Solvarme tilført solfangervæskan

Solvarme tilført lageret

Supplerende energi tilført lageret

Energimængde tappet fra lageret

Nettoydelse = energimængde tappet fra lageret – supplerende energi tilført lageret

De målte temperaturer der benyttes til valideringen er:

Temperaturen i toppen af lageret (T7)

Solfangervæskens fremløbstemperatur til solfangeren (T4)

Solfangervæskens returtemperatur fra solfangeren (T1)

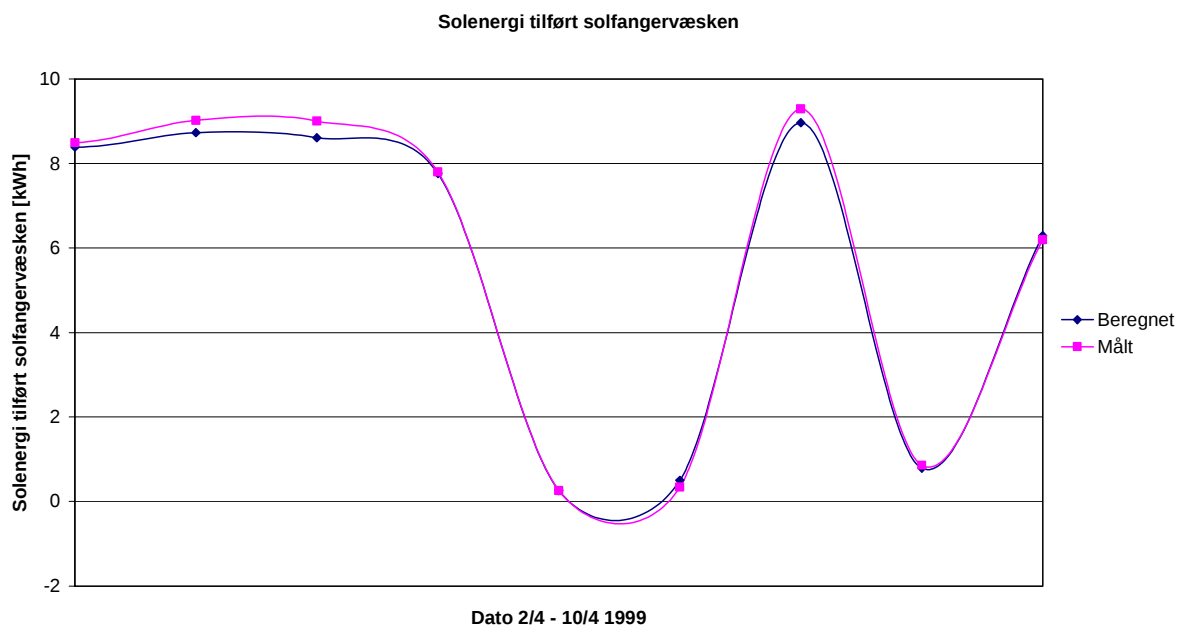
Solfangervæskens fremløbstemperatur til lageret (T2)

Solfangervæskens returtemperatur fra lageret (T3)

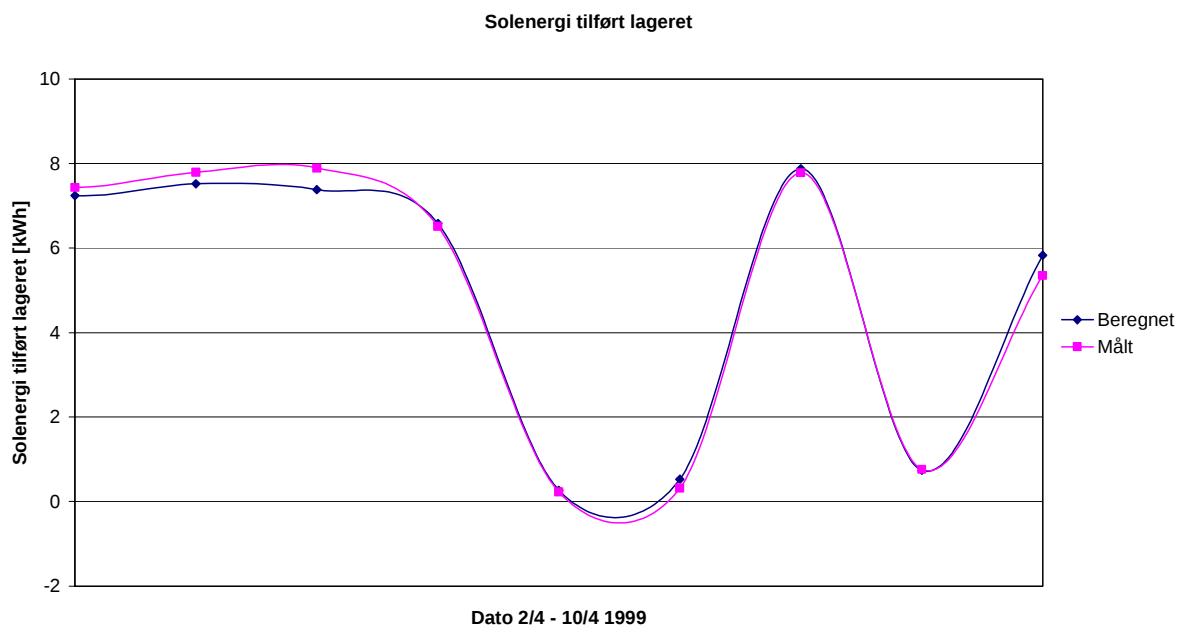
Angivelserne i parenteserne refererer til signaturen i **Figur 4-13**.

4.1.3.1 Validering af EDB-model i måleperiode 1 (1. april – 10. april 1999)

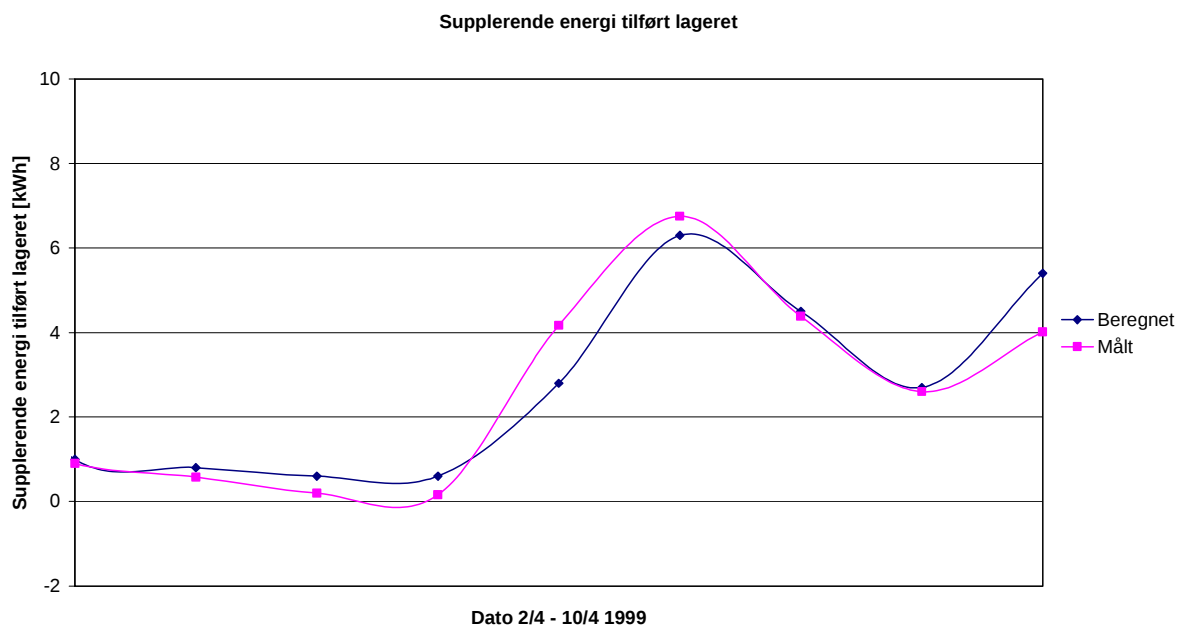
I **Figur 4-14** ses den målte og beregnede daglige energitilførsel til solfangervæskan i solfangeren. **Figur 4-15** viser den målte og beregnede daglige energioverførsel fra solfangervæskan til lageret. I **Figur 4-16** ses den målte og beregnede daglige supplerende energimængde tilført lageret, og **Figur 4-17** viser den målte og beregnede daglige tappede energimængde. Endelig viser **Figur 4-18** den målte og beregnede daglige nettoydelse for anlægget. Det fremgår, at den første dag i forsøgsperioden ikke er medtaget i graferne. Det skyldes, at denne dag benyttes som en beregningsmæssig indsvingningsperiode.



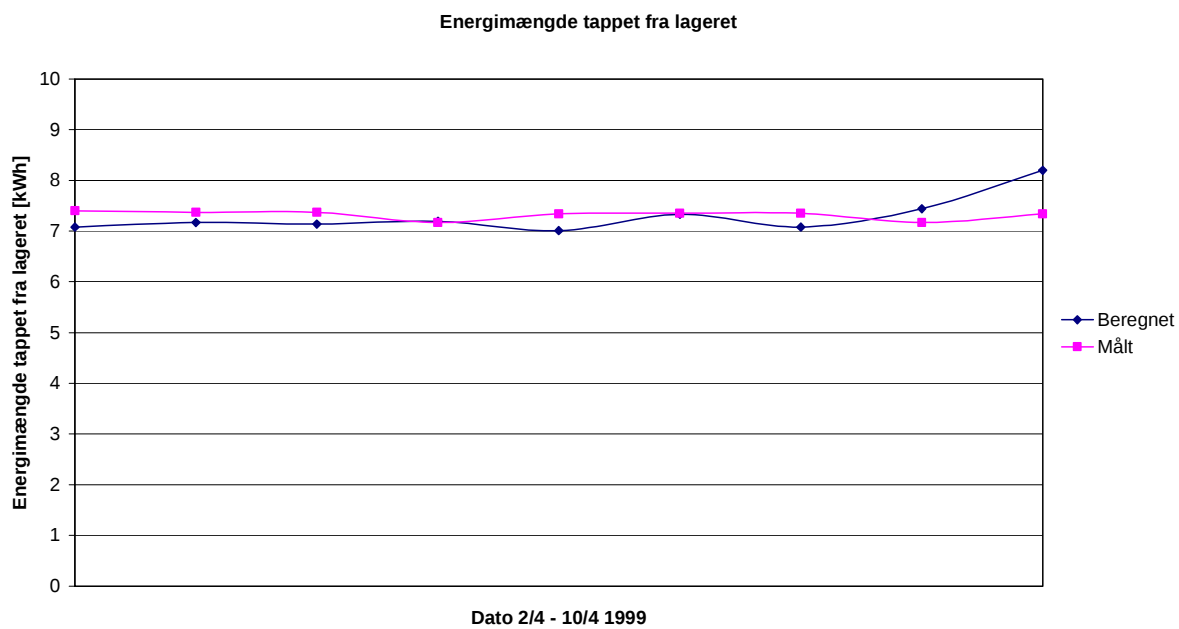
Figur 4-14: Solenergi tilført solfangervæsken i periode 1.



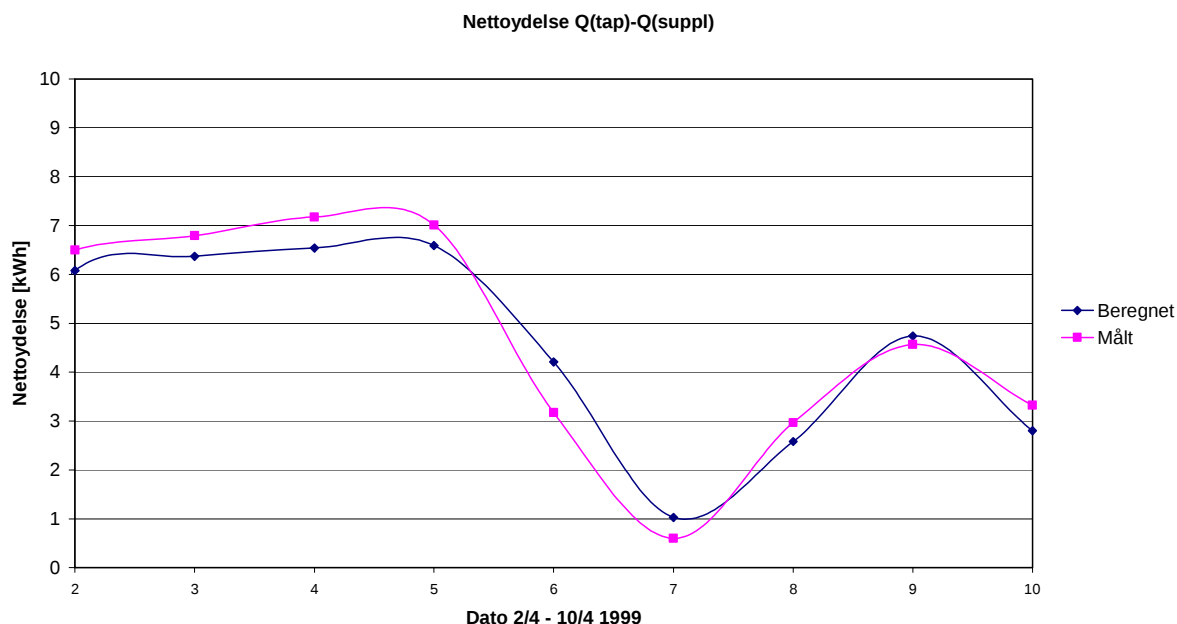
Figur 4-15: Solenergi tilført lageret i periode 1.



Figur 4-16: Supplerende energi tilført lageret i periode 1.



Figur 4-17: Energimængde tappet fra lageret i periode 1.



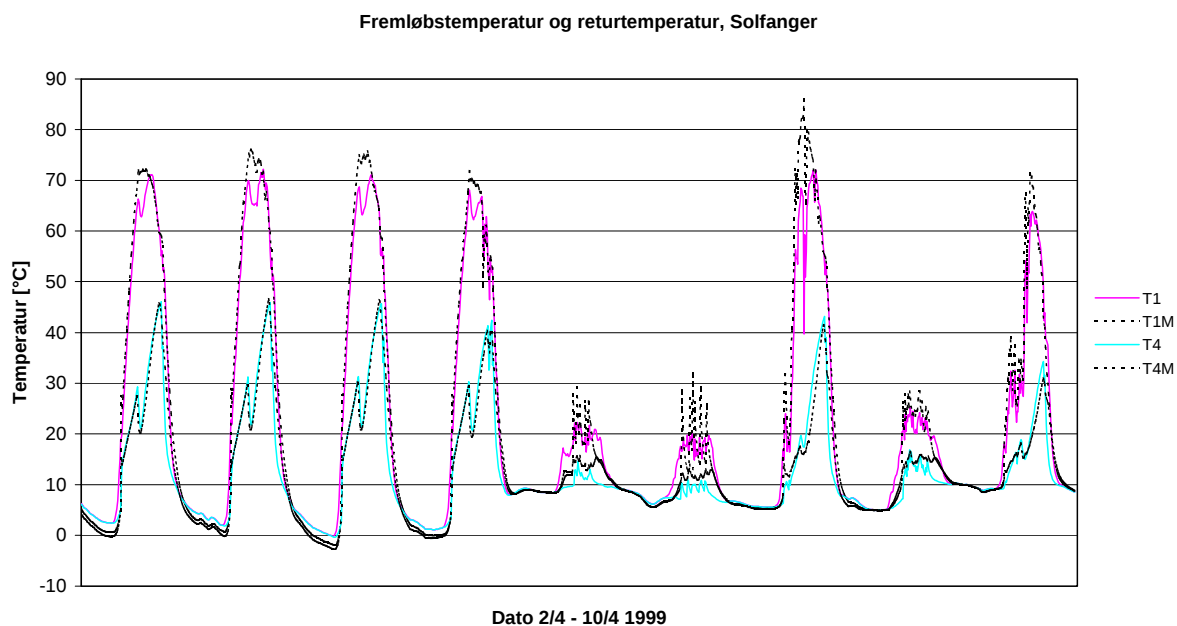
Figur 4-18: Nettoyedelse for anlægget i periode 1.

Det ses, at der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede størrelser. I **Tabel 4-5** er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene ligger indenfor måleusikkerheden på energistørrelserne på $\pm 5\%$.

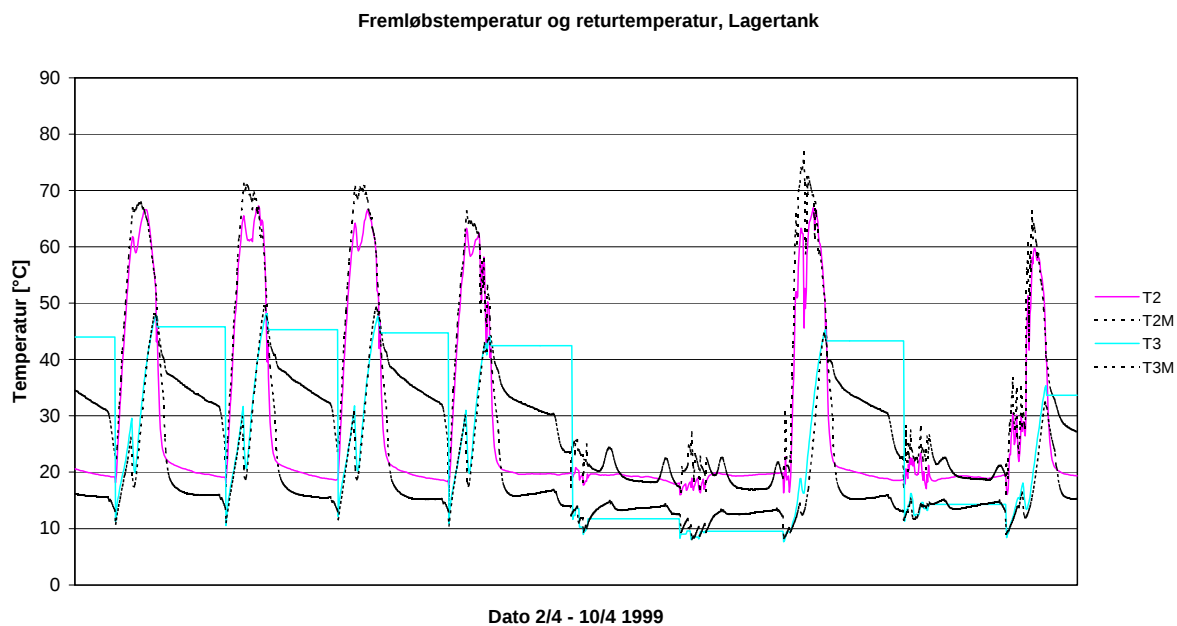
	Solvarme tilført solfangervæsken	Solvarme tilført lageret	Supplerende energi tilført lageret	Energimængde tappet fra lageret	Nettoyedelse
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Målt	51,3	44,1	23,8	65,9	42,1
Beregnet	50,3	44,0	24,7	65,6	40,9
Afvigelse [%]	2,0	0,2	-3,8	0,5	2,9

Tabel 4-5: Summerede energimængder over forsøgsperiode 1, målt og beregnet.

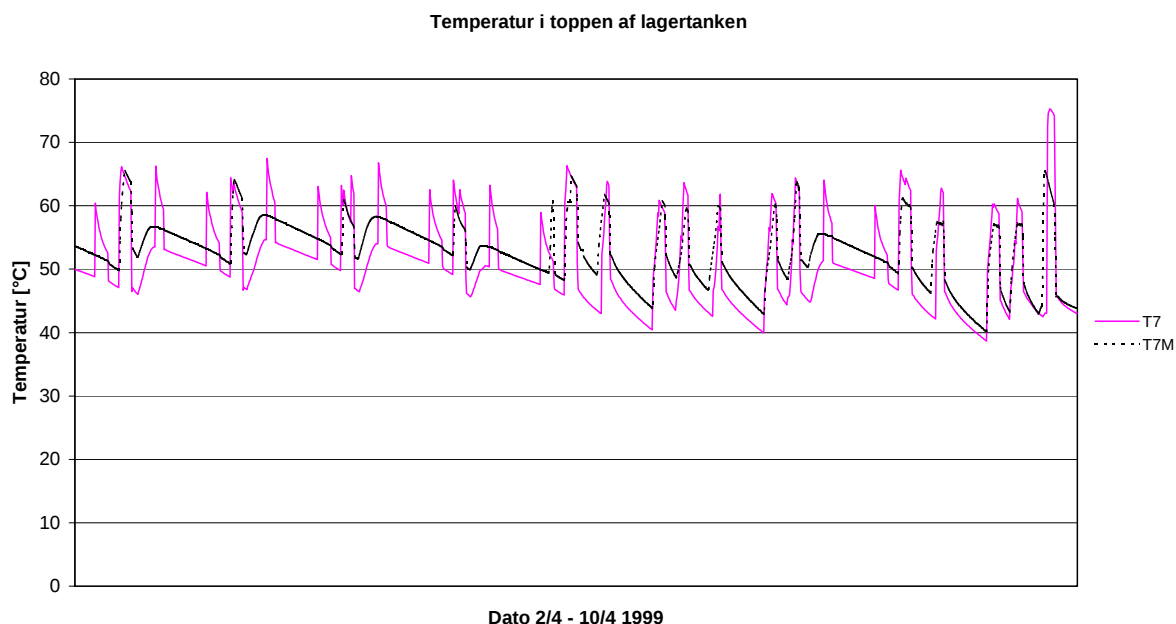
Figur 4-19 og **Figur 4-20** viser de målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer for hhv. solfanger og lager. **Figur 4-21** viser den målte og beregnede temperatur i toppen af lageret. Sammenligning af temperaturerne viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens.



Figur 4-19: Fremløbstemperatur til solfangeren og retur temperatur fra solfangeren i periode 1. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



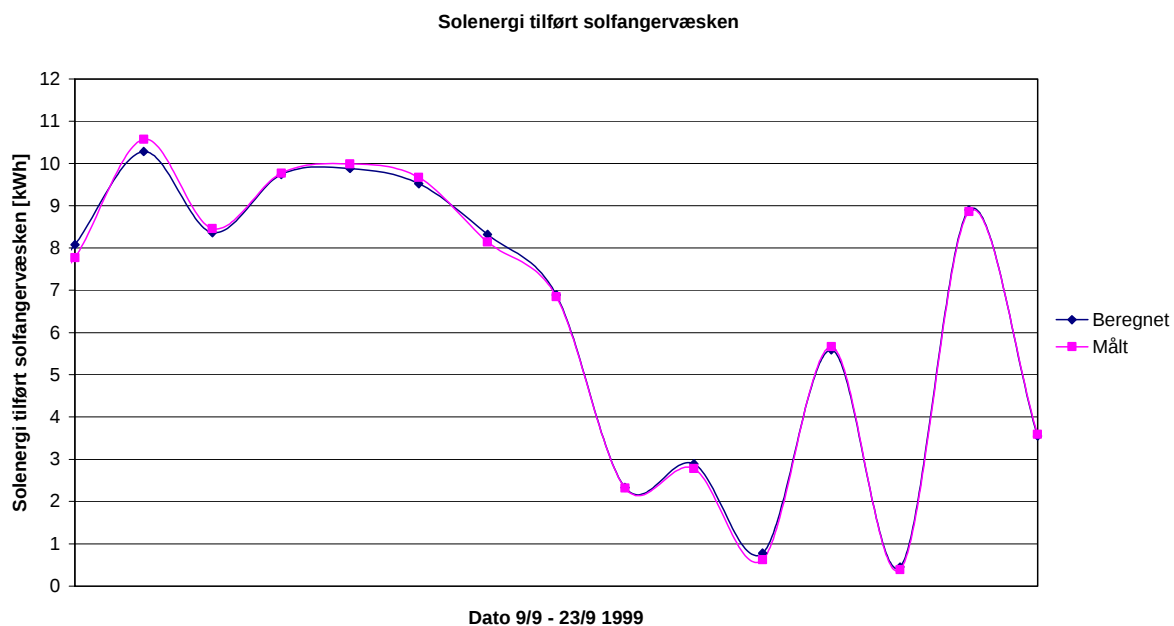
Figur 4-20: Fremløbstemperatur til lageret og returtemperatur fra lageret i periode 1. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



Figur 4-21: Temperaturen i toppen af lageret i periode 1. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.

4.1.3.2 Validering af EDB-model i måleperiode 2 (8. september – 23. september 1999)

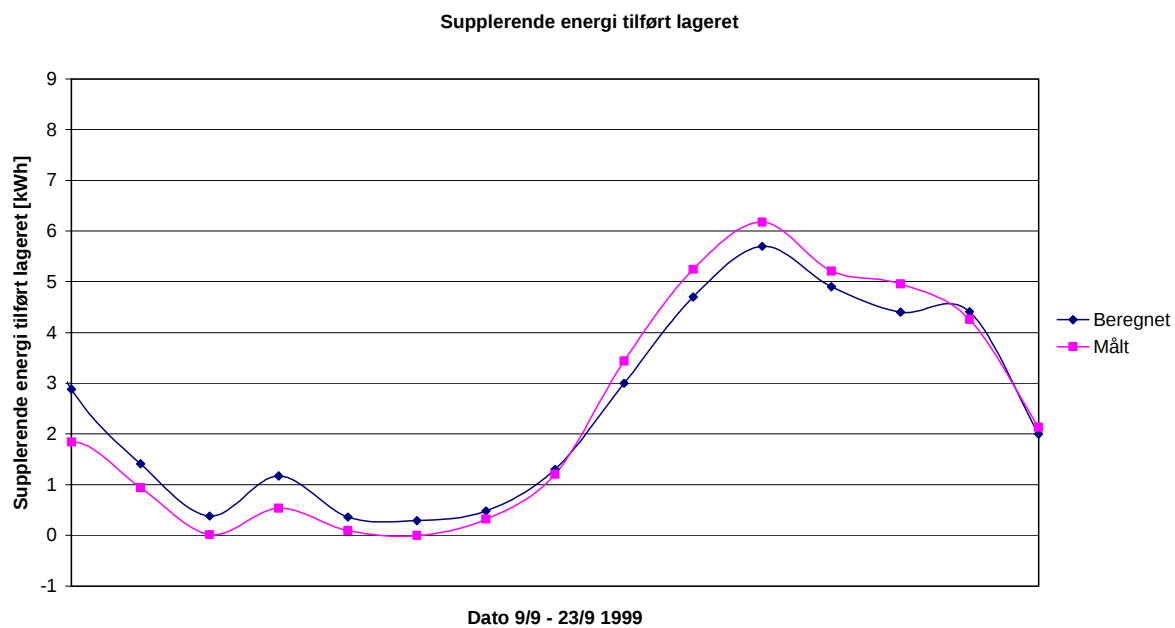
I **Figur 4-22** ses den målte og beregnede daglige energitilførsel til solfangervæsken i solfangeren. **Figur 4-23** viser den målte og beregnede daglige energioverførsel fra solfangervæsken til lageret. I **Figur 4-24** ses den målte og beregnede daglige supplerende energimængde tilført lageret, og **Figur 4-25** viser den målte og beregnede daglige tappede energimængde. Endelig viser **Figur 4-26** den målte og beregnede daglige nettoydelse for anlægget. Det fremgår, at den første dag i forsøgsperioden ikke er medtaget i graferne. Det skyldes, at denne dag benyttes som en beregningsmæssig indsvingningsperiode.



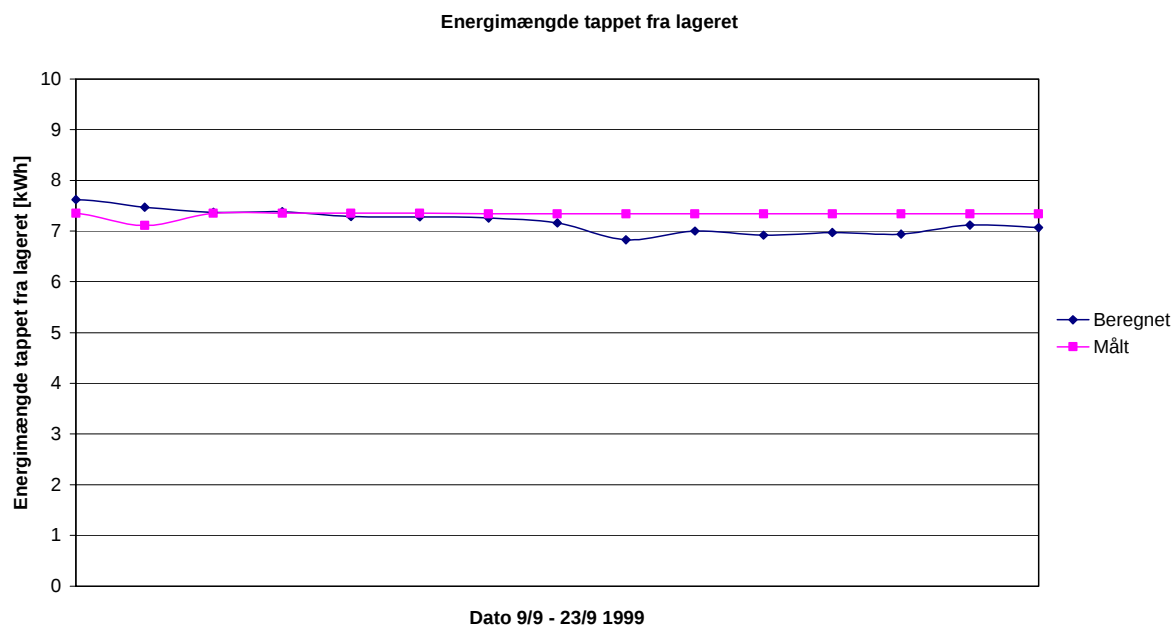
Figur 4-22: Solenergi tilført solfangervæsken i solfangeren i periode 2.



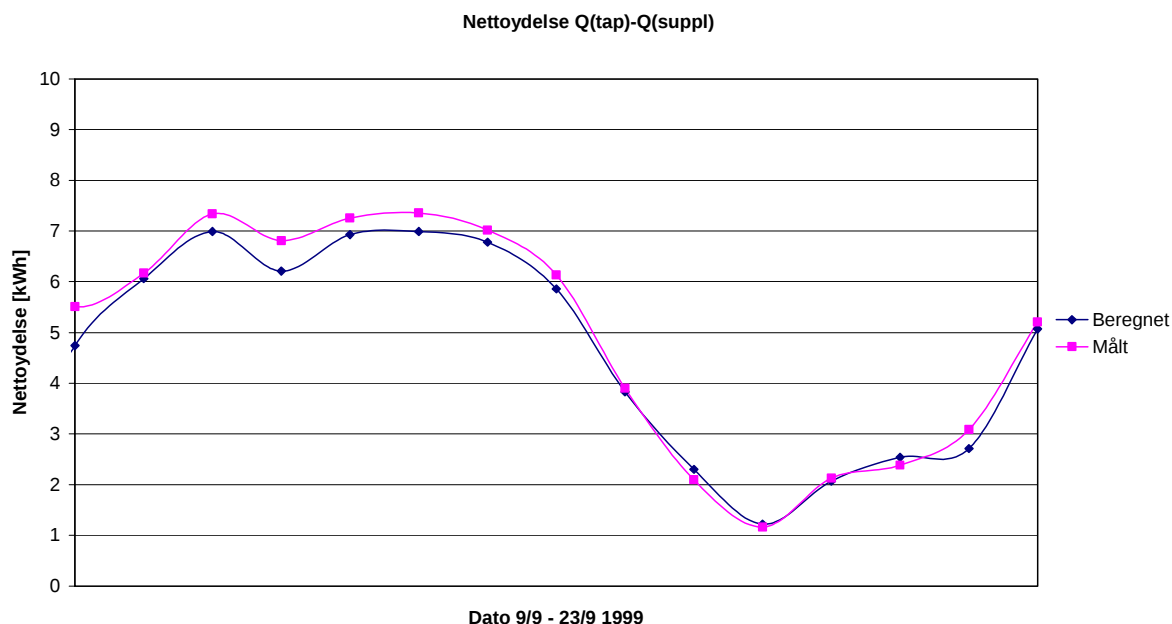
Figur 4-23: Solenergi tilført lageret i periode 2.



Figur 4-24: Supplerende energi tilført lageret i periode 2.



Figur 4-25: Energimængde tappet fra lageret i periode 2.



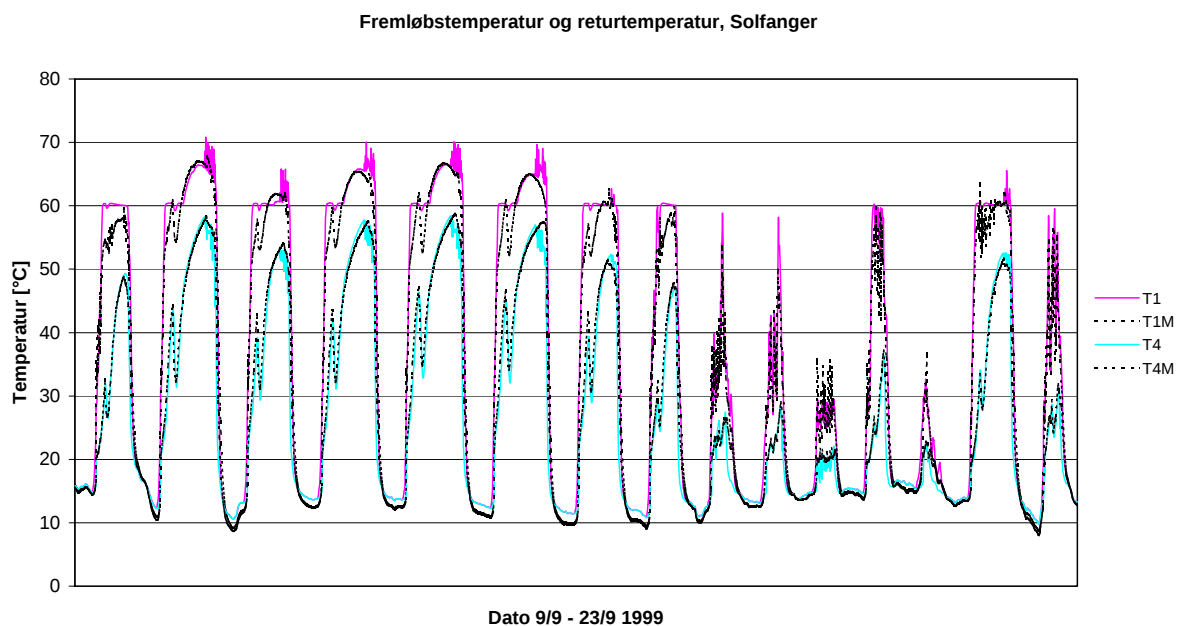
Figur 4-26: Nettoydelse for anlægget i periode 2.

Det ses, at der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede størrelser. I **Tabel 4-6** er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene ligger indenfor måleusikkerhederne på energistørrelserne der er $\pm 5\%$.

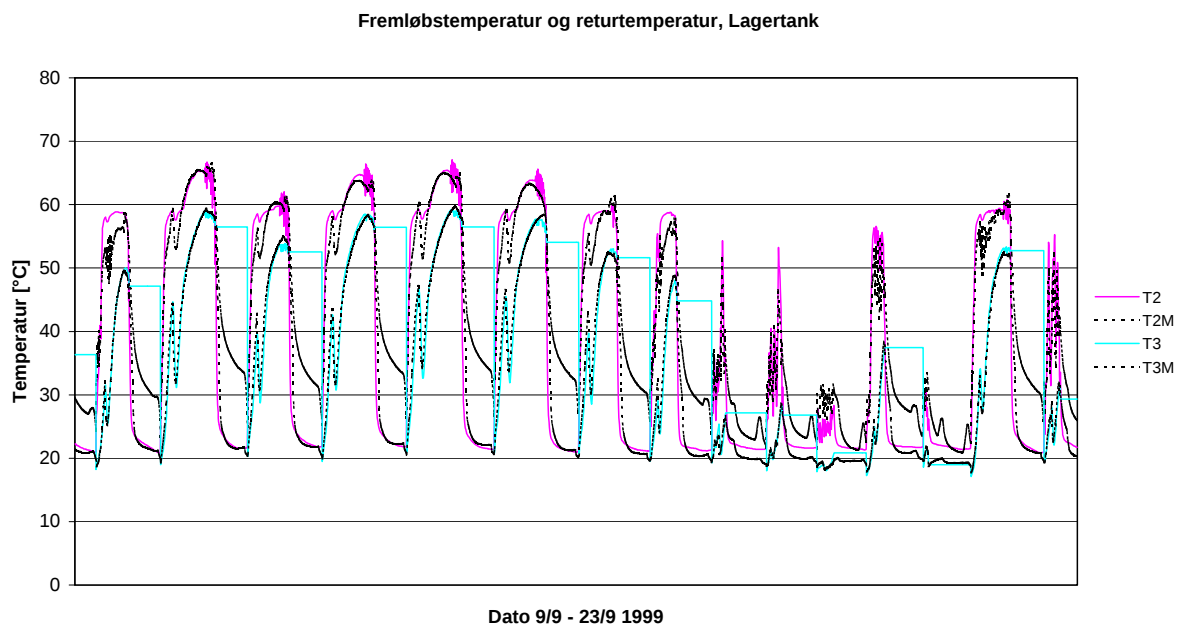
	Solvarme tilført solfangervæsken	Solvarme tilført lageret	Supplerende energi tilført lageret	Energimængde tappet fra lageret	Nettoydelse
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Målt	95,4	84,0	36,4	109,9	73,6
Beregnet	95,6	83,8	37,4	107,7	70,3
Afvigelse [%]	-0,2	0,2	-2,8	2,0	4,5

Tabel 4-6: Summerede energimængder over forsøgsperiode 2, målt og beregnet.

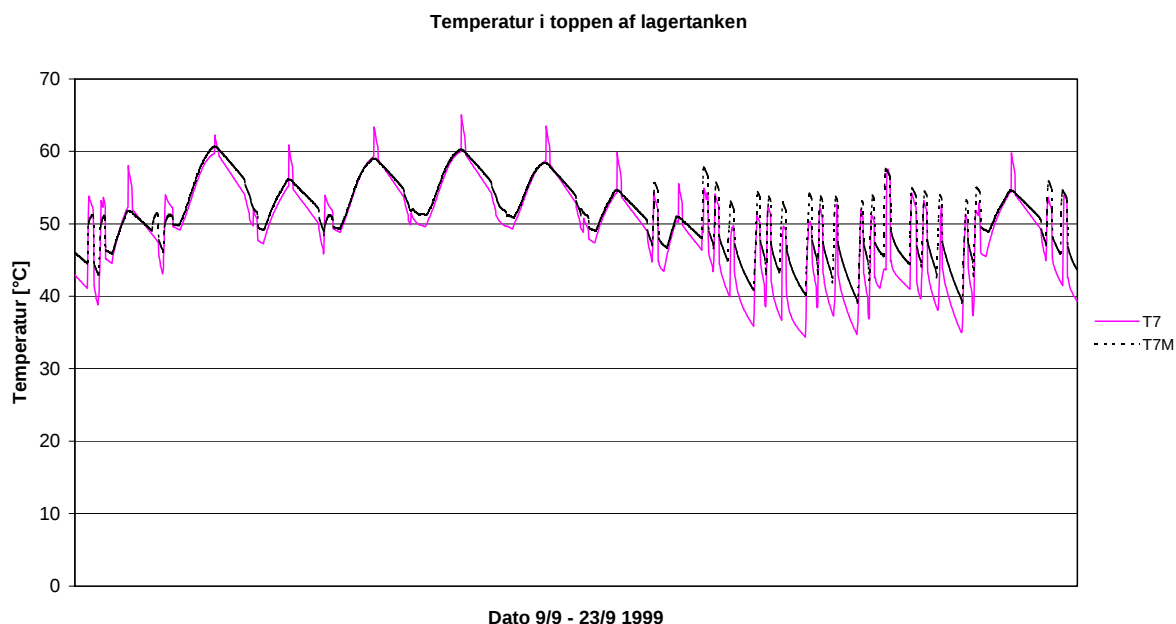
Figur 4-27 og **Figur 4-28** viser de målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer for hhv. solfanger og lager. **Figur 4-29** viser den målte og beregnede temperatur i toppen af lageret. Sammenligning af temperaturerne viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens.



Figur 4-27: Fremløbstemperatur til solfangeren og returtemperatur fra solfangeren i periode 2. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



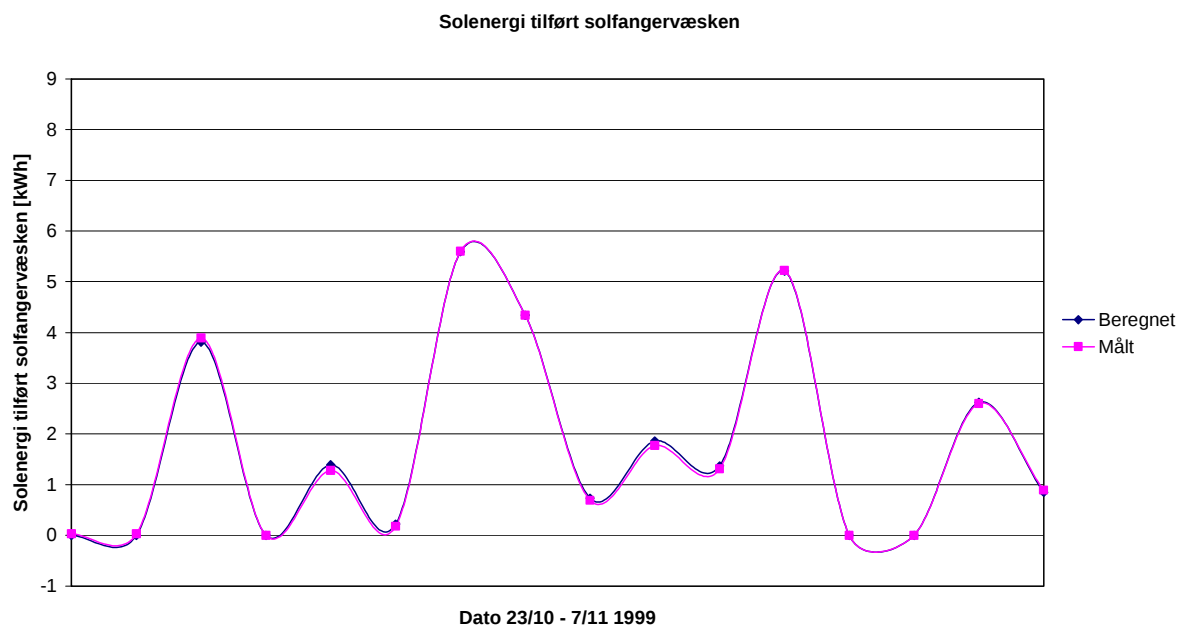
Figur 4-28: Fremløbstemperatur til lageret og returtemperatur fra lageret i periode 2. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



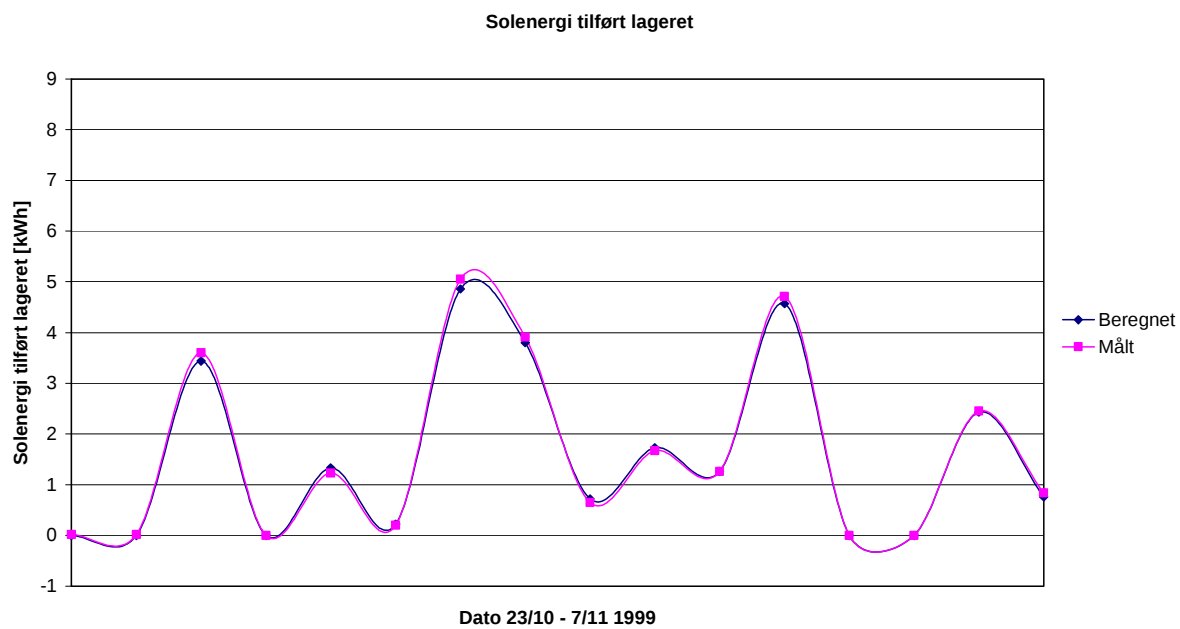
Figur 4-29: Temperaturen i toppen af lageret i periode 2. Signaturerne i figuren jvf. signaturerne i Figur 4-13.

4.1.3.3 Validering af EDB-model i måleperiode 3 (22. oktober – 7. november 1999)

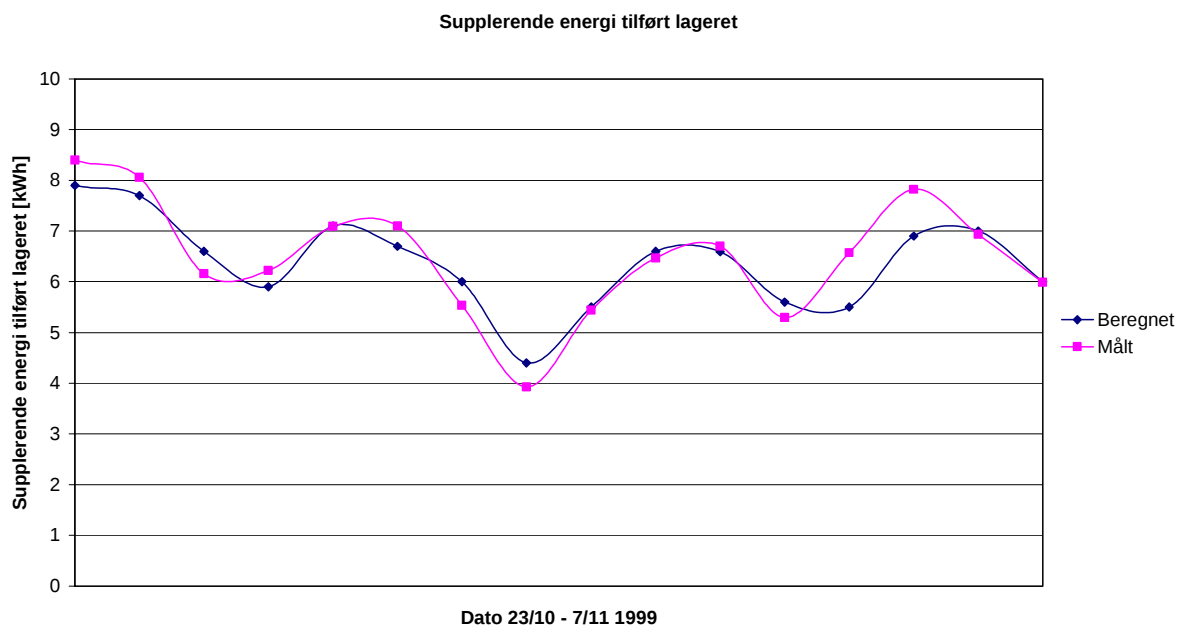
I **Figur 4-30** ses den målte og beregnede daglige energitilførsel til solfangervæsken i solfangeren. **Figur 4-31** viser den målte og beregnede daglige energioverførsel fra solfangervæsken til lageret. I **Figur 4-32** ses den målte og beregnede daglige supplerende energimængde tilført lageret, og **Figur 4-33** viser den målte og beregnede daglige tappede energimængde. Endelig viser **Figur 4-34** den målte og beregnede daglige nettoydelse for anlægget. Det fremgår, at den første dag i forsøgsperioden ikke er medtaget i graferne. Det skyldes, at denne dag benyttes som en beregningsmæssig indsvingningsperiode.



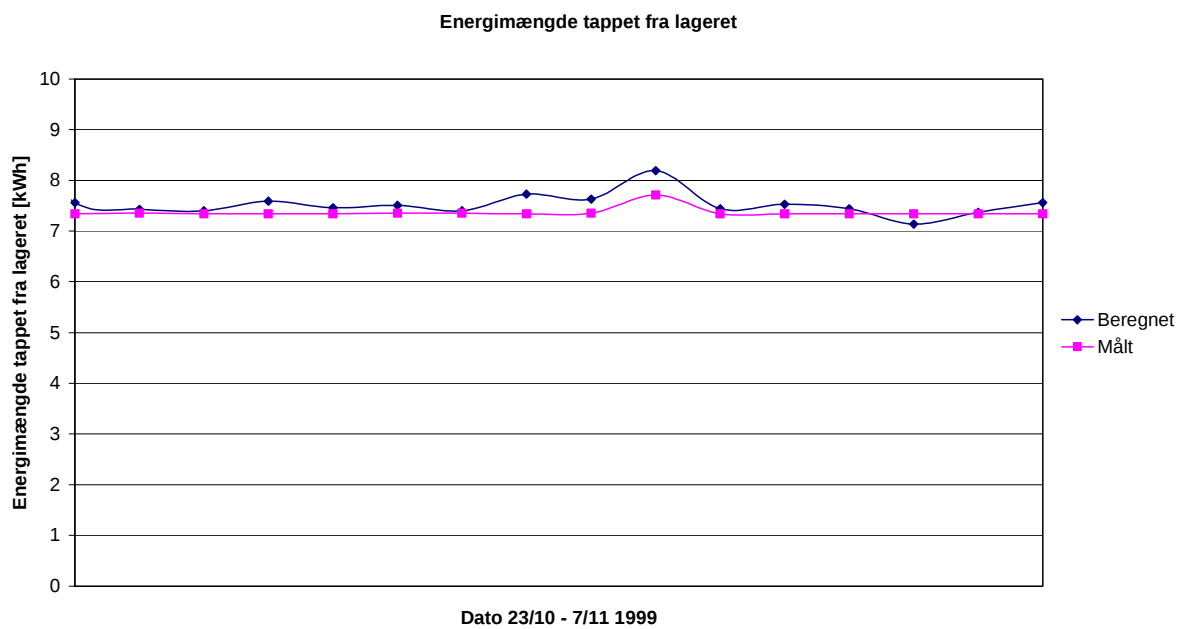
Figur 4-30: Solenergi tilført solfangervæsken i solfangeren i periode 3.



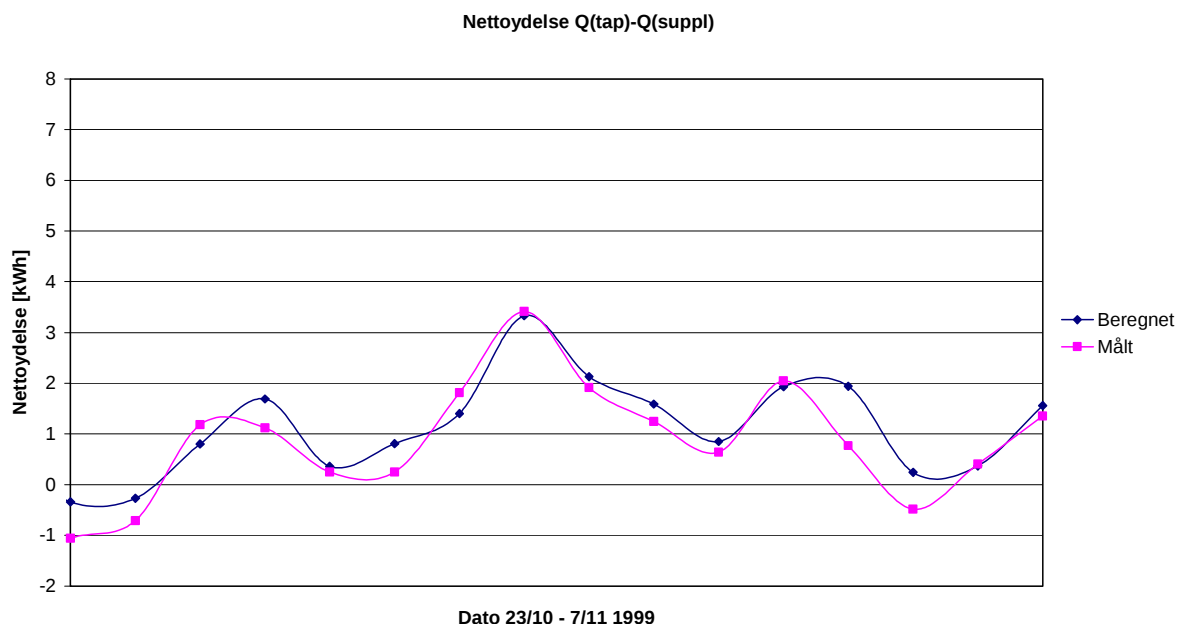
Figur 4-31: Solenergi tilført lageret i periode 3.



Figur 4-32: Supplerende energi tilført lageret i periode 3.



Figur 4-33: Energimængde tappet fra lageret i periode 3.



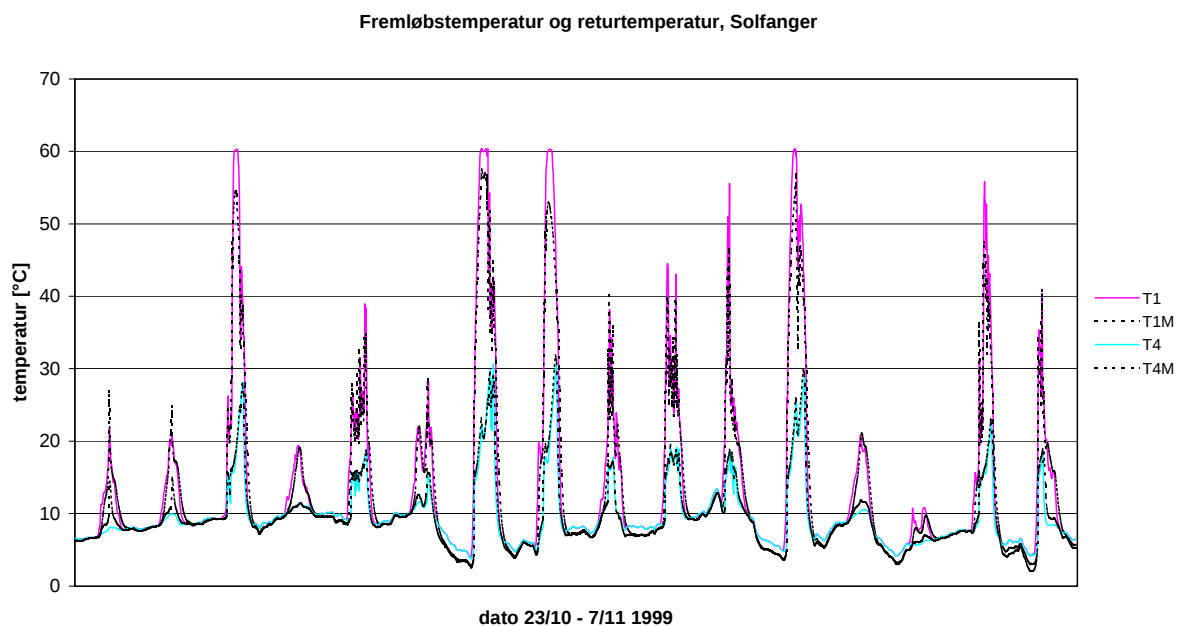
Figur 4-34: Nettoydelse for anlægget i periode 3.

Det ses, at der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede størrelser. I **Tabel 4-7** er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene ligger indenfor måleusikkerhederne på energistørrelserne der er $\pm 5\%$. Dette gælder dog ikke for nettoydelsen hvor afvigelsen på de relativt små tal er større.

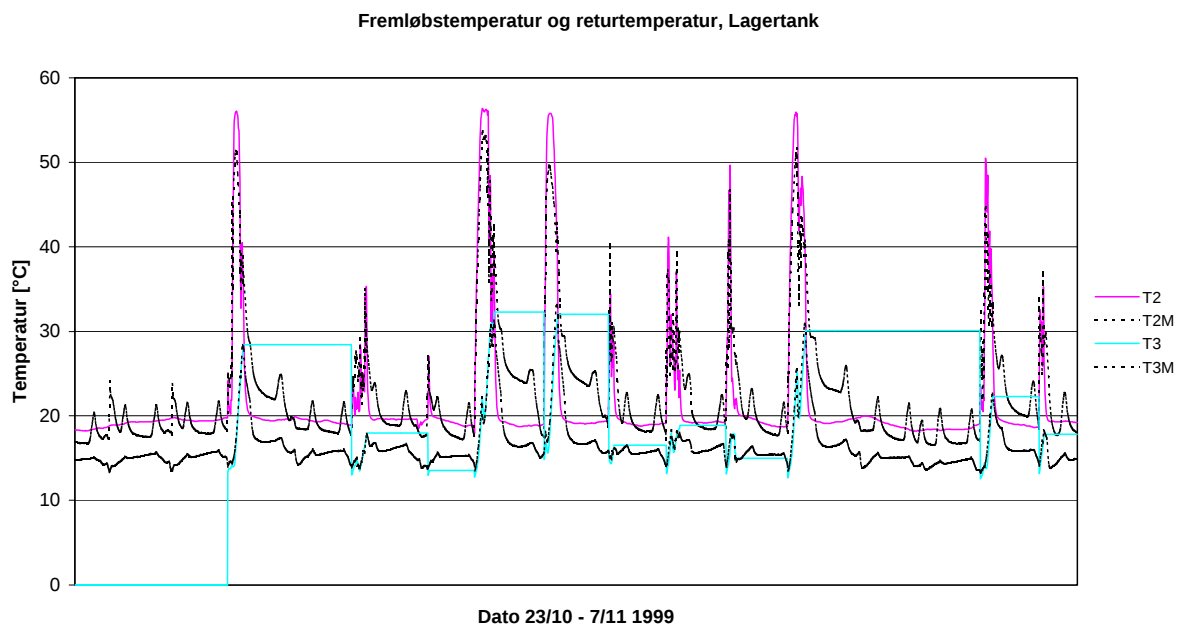
	Solvarme tilført solfangervæsken	Solvarme tilført lageret	Supplerende energi tilført lageret	Energimængde tappet fra lageret	Nettoydelse
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Målt	22,6	20,7	67,8	81,1	13,4
Beregnet	22,8	20,4	66,8	82,9	16,2
Afvigelse [%]	-0,9	1,4	1,5	-2,2	20,9

Tabel 4-7: Summerede energimængder over forsøgsperiode 3, målt og beregnet.

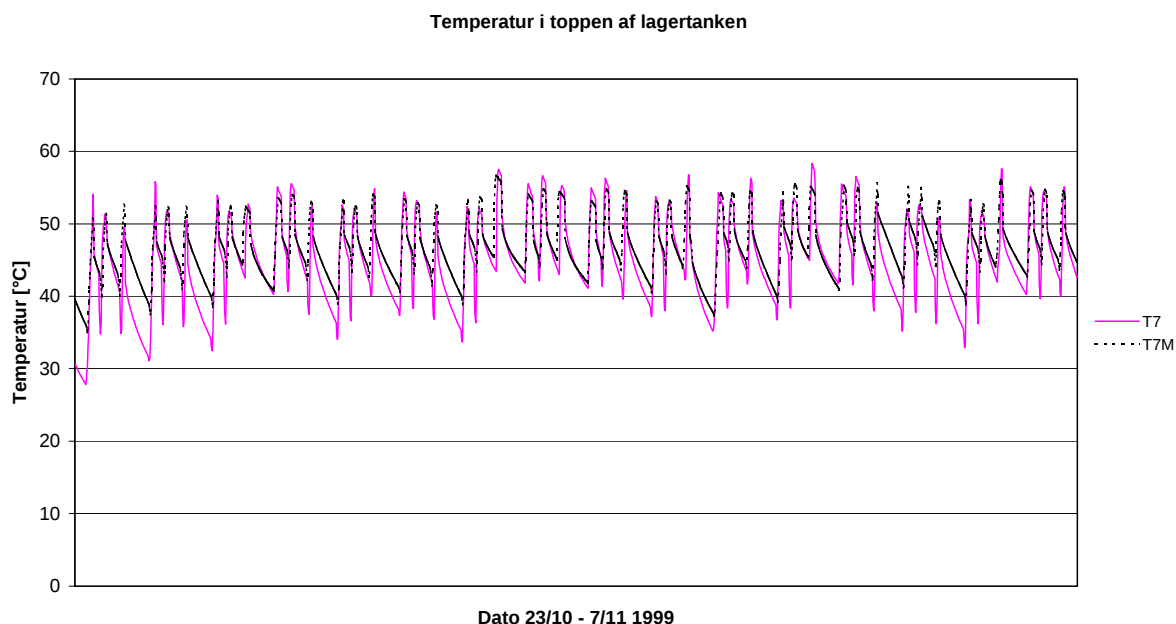
Figur 4-35 og **Figur 4-36** viser de målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer for hhv. solfanger og lager. **Figur 4-37** viser den målte og beregnede temperatur i toppen af lageret. Sammenligning af temperaturerne viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens.



Figur 4-35: Fremløbstemperatur til solfangeren og returtemperatur fra solfangeren i periode 3. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



Figur 4-36: Fremløbstemperatur til lageret og returtemperatur fra lageret i periode 3. Signaturerne i figuren svarer til signaturerne i Figur 4-13.



Figur 4-37: Temperaturen i toppen af lageret i periode 3. Signaturerne i figuren jvf. signaturerne i Figur 4-13.

På grundlag af den gode overensstemmelse mellem målte og beregnede temperaturer samt målte og beregnede energimængder vurderes det, at EDB-modellen af det intelligente solvarmeanlæg med sidearm samt det intelligente solvarmeanlæg med sidearm og med styring af temperaturen ved udløb fra solfangeren kan anvendes til simulering af et helt år med de danske referencevejrdato TRY.

4.2 Intelligent solvarmeanlæg med to interne elpatroner

Der er i det efterfølgende foretaget validering af EDB-modellen for solvarmeanlæg 4 baseret på lagertank 7 med opvarmningsprincippet med to interne elpatroner, som er testet i lagertank 6.

Solvarmeanlægget er opført i IBE's prøvestand for solvarmeanlæg [7] i 1999. Anlægget var til at begynde med et traditionelt forsøgsanlæg, hvor forskellige anlægsudformninger og driftsstrategier blev afprøvet. Senere er anlægget udviklet til en prototype af et intelligent solvarmeanlæg.

Anlægget er et low flow anlæg, som består af et solfangerpanel med et transparent areal på 3 m², samt en lagertank på 175 l + 12,2 l i kappen. Den supplerende energikilde består af to elpatroner – en placeret vandret og en placeret lodret inde i et PVC-plastrør. Lagertanken er detaljeret beskrevet under "Lagertank 6" i Tabel 1-1.

Solfangeren, type BA 30 fra firmaet Batec A/S, består af 4 mm hærdet jernfattigt glas som dæklag, samt en valset rørplade med selektiv belægning som absorber. Rørene i solfangeren er forbundet parallelt og solfangeren er lodretstående. Solfangeren er installeret på 45° hældende sydvendt tagflade uden skygger.

Solfangeren er forbundet til lagertanken via 15,1 m fremløbsrør til lageret, og 17,9 m returrør fra lageret. Heraf er 5,1 m henholdsvis 4,6 m indendørs. Rørene er 10/8 mm kobberør, der er isoleret med 10 mm PUR-skum.

Solfangerkredsen er forsynet med en Grundfos cirkulationspumpe (Type UPS 25-60), som igennem hele måleperioden har kørt på trin 1.

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 11/5 K.

Cirkulationspumpens, elpatronernes og styresystemets effektforbrug fremgår af Tabel 4-8.

Enhed	Effektforbrug [W]
Cirkulationspumpe	36
Elpatron (vandret)	1200
Elpatron (lodret)	1200
Styresystem (on/off)	1,8/1,2

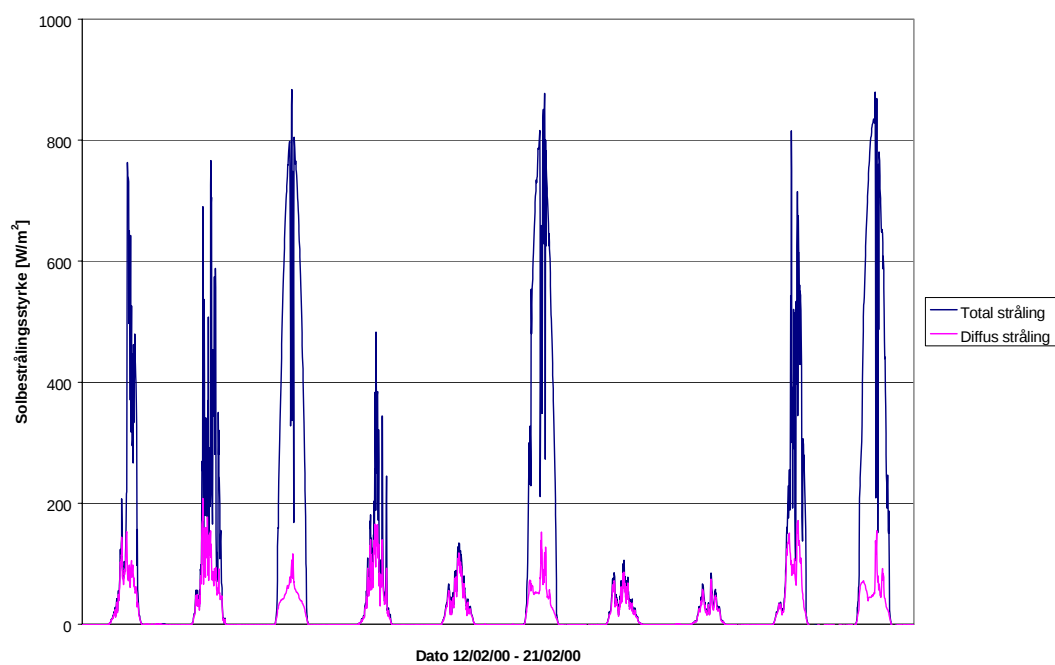
Tabel 4-8: Effektforbrug for cirkulationspumpe, elpatroner og styresystem.

4.2.1 Testeperiode

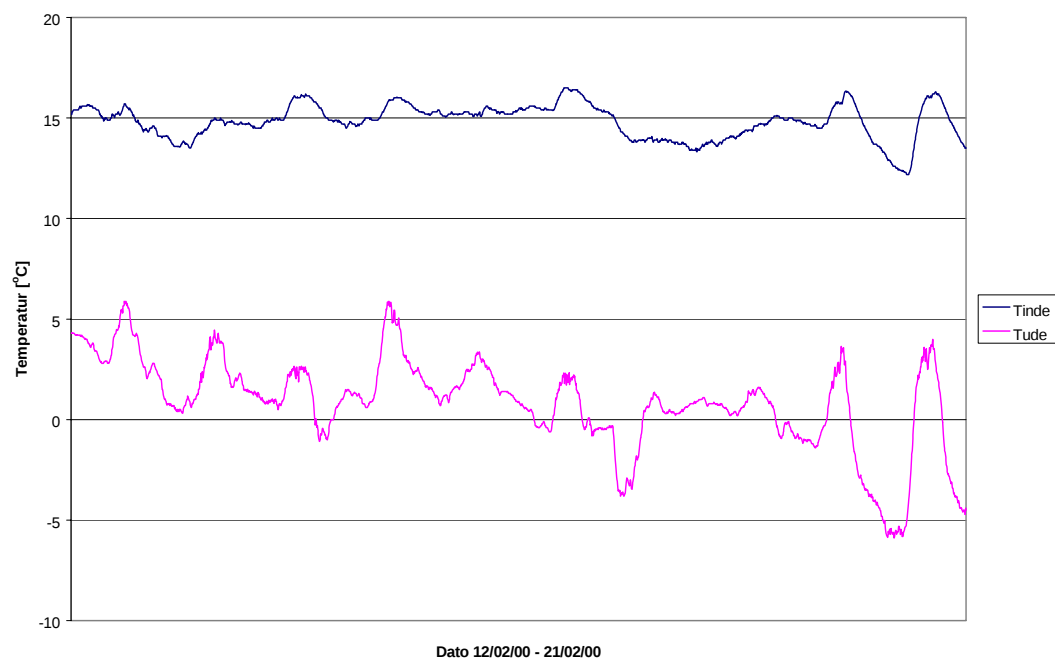
Der er valgt en periode til at validere EDB-modellen for solvarmeanlæg 4. Perioden er: 12. februar – 21. februar 2000. Perioden er valgt ud fra følgende krav:

Der skal være varierende solindfald på solfangeren. Derved undgås systematiske fejl i EDB-modellen. Tapningen af brugsvand fra anlægget skal være uden fejl.

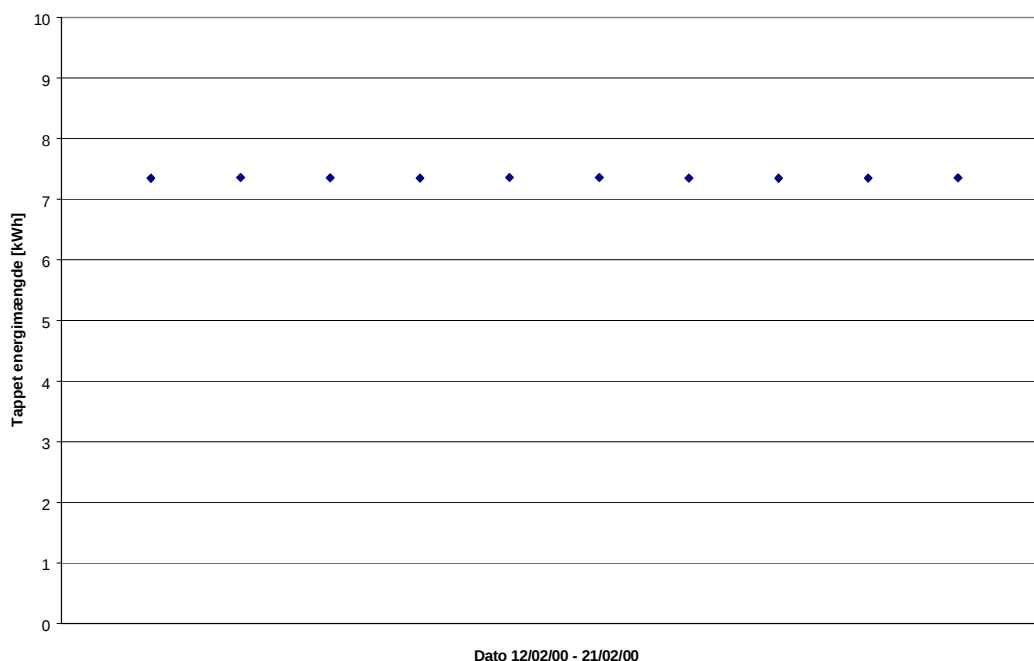
I Figur 4-38, Figur 4-39 og Figur 4-40 ses solbestrålingsstyrke, inde- og udetemperatur og tappede energimængder i valideringsperioden. Det ses af Figur 4-38, at bestrålingsstyrken som ønsket varierer. Det ses af Figur 4-40, at den tappede energimængde, som ønsket, ligger nær de 7,32 kWh/dag.



Figur 4-38: Total og diffus solindfald i perioden 12. februar – 21. februar 2000.



Figur 4-39: Udendørs og indendørs lufttemperatur i perioden 12. februar – 21. februar 2000.



Figur 4-40: Daglig tappet energimængde fra lagertanken i perioden 12. februar – 21. februar 2000.

4.2.2 Prøvning og validering af EDB-model for intelligent anlæg med to interne elpatroner

4.2.2.1 Måledata

I Tabel 4-9 er følgende værdier gengivet: Totalt solindfald på solfangeren, solvarme overført til lageret, suppleringsvarme, energi tappet fra lageret, energiforbrug til cirkulationspumpen i solfangerkredsen, energiforbrug til styresystem, nettoydelse (= tappet energi – supplerende energi), anlægsydelse (= tappet energi – supplerende energi – energiforbrug til pumpe og styresystem), nettodækningsgrad (= nettoydelse/tappet energi) samt anlægsdækningsgrad (= anlægsydelse/tappet energi).

Periode i 2000	Solvarme til solfangervæske [kWh]	Solvarme til lager [kWh]	Supplerende energi til lager [kWh]	Tappet energi fra lager [kWh]	Nettoydelse [kWh]	Nettodækningsgrad [%]
13/2 – 21/2	22	20	58	66	8,4	13

Tabel 4-9: Målte værdier for anlægget i perioden 13. februar – 21. februar 2000.

4.2.2.2 EDB-model af solvarmeanlægget

For at bestemme solvarmeanlæggets årlige ydelse samt hvilken indflydelse ændring i anlægsudformning eller driftsstrategi giver anledning til er en EDB-model af anlægget udformet. Modellen bruges i det detaljerede simuleringsprogram, der kort er beskrevet i afsnit 4. Modellen valideres med målte data fra perioden: 12. februar – 21. februar 2000. I det følgende er input til EDB-modellen beskrevet:

Solfangerkredsen:

Kappeptf benytter ikke det egentlige effektivitetsudtryk men et lineariseret udtryk ved en temperaturdifferent mellem middeltemperaturen i solfangeren og omgivelsestemperaturen på 50 K. En tidligere undersøgelse af solfangeren i anlæg 1 har givet følgende lineariserede effektivitetsudtryk [10]:

$$\eta = 0,78 - 4,45(T_m - T_a)/G$$

hvor:

η	er solfangereffektiviteten	[-]
T_m	er solfangervæskens middeltemperatur	[°C]
T_a	er den omgivende lufts temperatur	[°C]
G	er bestrålingsstyrken på solfangeren	[W/m ²]

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

$$k_g = 1 - (\tan(i/2))^{4,2}$$

hvor:

k_g	er indfaldsvinkelkorrektionen	[-]
i	er indfaldsvinklen	[°]

Siden solvarmeanlæg 4 kom i drift den 25. november 1999, har der været problemer med solfangerens drift. Meget tyder på, at der har været luft i systemet, som har bremset solfangervæskens flow i dele af solfangeren. Efter, at flowet blev reguleret til det maksimale den 4. februar, har solfangerens drift været bedre, men den har stadigvæk ikke været så god, som man kunne forvente med ovenstående effektivitetsudtryk. Derfor er starteffektiviteten, η_0 , reduceret ved valideringen, indtil en passende overensstemmelse mellem beregnede og målte ydelser i solfangeren er opnået. Solfangerens varmetabskoefficient er ikke ændret. Dette gav en starteffektivitet på $\eta_0 = 0,685$, hvorved det lineariserede effektivitetsudtryk bliver:

$$\eta = 0,685 - 4,45(T_m - T_a)/G$$

Væsken i solfangerkredsen er en propylenglykol/vand-blanding med et indhold af propylenglykol på 27 vægt%.

Det gennemsnitlige flow i solfangerkredsen er ud fra målinger bestemt til:

$$0,50 \text{ l/min/m}^2$$

Rørene i solfangerkredsen består af 15,1 m fremløbsrør til lageret, og 17,9 m returrør fra lageret. Heraf er 5,1 m hhv. 4,6 m indendørs. Rørene er 10/8 mm kobberrør og isoleret med PUR-skum med en λ -værdi på 0,037 W/mK.

Pumpen i solfangerkredsen har et effektforbrug på 52 W. Solfangerkredsen styres af en differenstermostat med et start/stop setpunkt på 10/7 K.

Lageret:

Lagertanken har et volumen på 175 liter med en indvendig højde/diameter på $1,440/0,394 = 3,65$. Kappen har et volumen på 12,2 liter med en indvendig bredde/højde på $0,0105/0,569$ m. Godstykkelsen er overalt 3 mm. Beholderen er i toppen isoleret med 200 mm, på siderne med 50 mm og i bunden med 50 mm mineraluld med en λ -værdi på $0,045$ W/mK.

I simuleringerne er anvendt en effekt på 1200 W for hver af elpatronerne.

Startværdien for temperaturen i lagertanken er sat til 20°C . Det medfører at den første dag i perioden ikke kan anvendes til validering, men i stedet benyttes som beregningsmæssig indsvingningsperiode.

4.2.3 Validering af EDB-model

Formålet med validering af EDB-modellen er, at udforme en model der svarer så godt til solvarmeanlægget, at anlæggets årsydelse kan beregnes. Desuden kan modellen benyttes til at undersøge, hvorledes ændringer i anlægsudformningen samt driftsstrategien påvirker ydelsen.

EDB-modellen af anlægget valideres mod målte energistørrelser og temperaturer. Energistørrelserne er som følger:

Solvarme tilført solfangervæskan

Solvarme tilført lageret

Supplerende energi tilført lageret

Energimængde tappet fra lageret

Nettoydelse = energimængde tappet fra lageret – supplerende energi tilført lageret

De målte temperaturer der benyttes til valideringen er:

Temperaturen i toppen af lageret (T7)

Solfangervæskens fremløbstemperatur til solfangeren (T4)

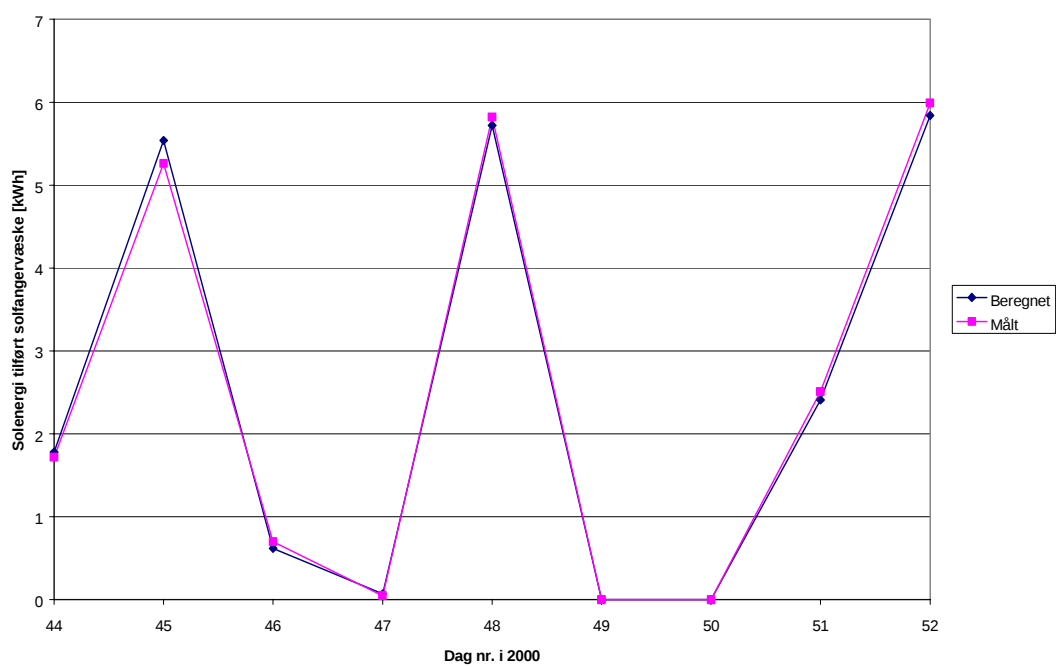
Solfangervæskens returtemperatur fra solfangeren (T1)

Solfangervæskens fremløbstemperatur til lageret (T2)

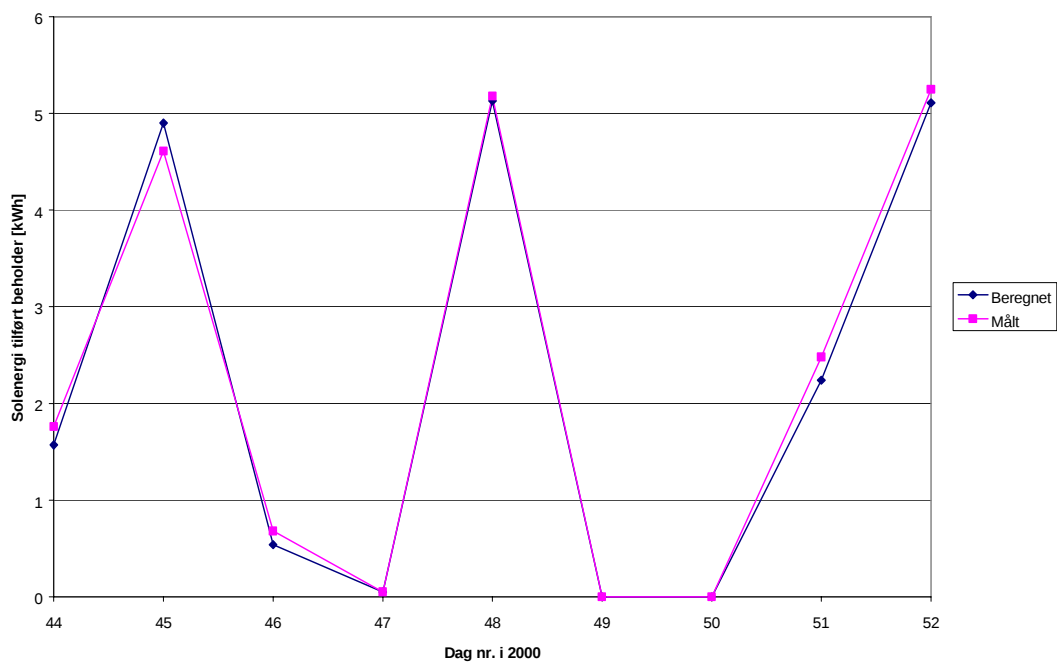
Solfangervæskens returtemperatur fra lageret (T3)

Angivelserne i parenteserne refererer til signaturen i **Figur 4-13**.

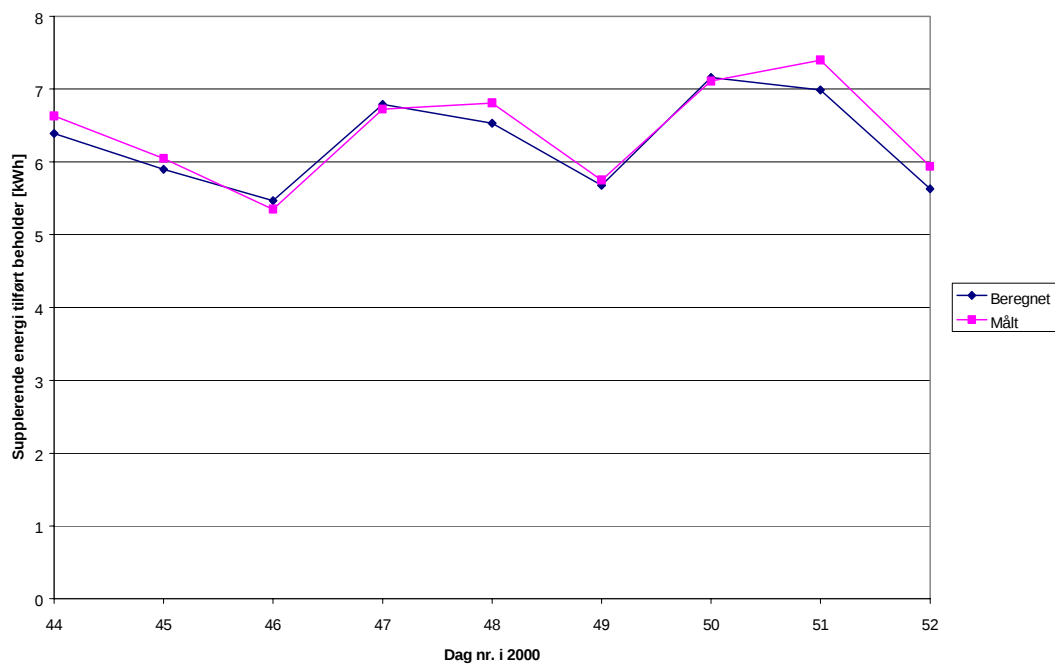
Figur 4-41 viser den målte samt den beregnede daglige solenergitilførsel til solfangervæskan i solfangeren. I Figur 4-42 ses den målte og den beregnede daglige solenergitilførsel til beholderen. Figur 4-43 illustrerer den målte og beregnede daglige tilførte supplerende energimængde til beholderen. I Figur 4-44 ses den målte og beregnede daglige tappede energimængde fra beholderen. Endelig viser Figur 4-45 den målte og beregnede daglige nettoydelse for anlægget.



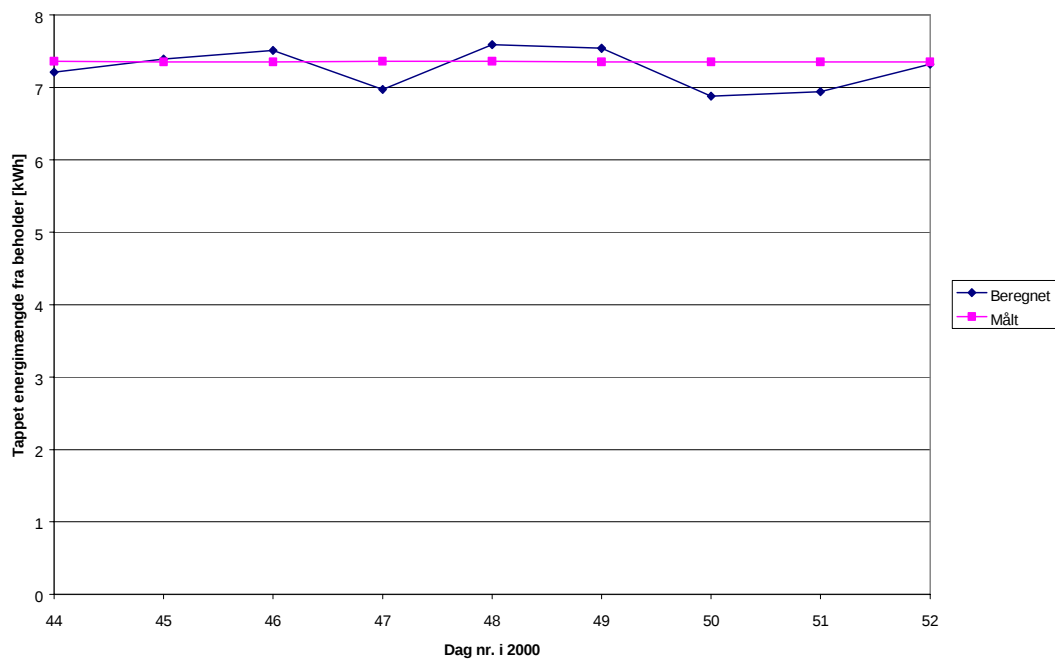
Figur 4-41: Solenergi tilført solfangervæskens i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt.



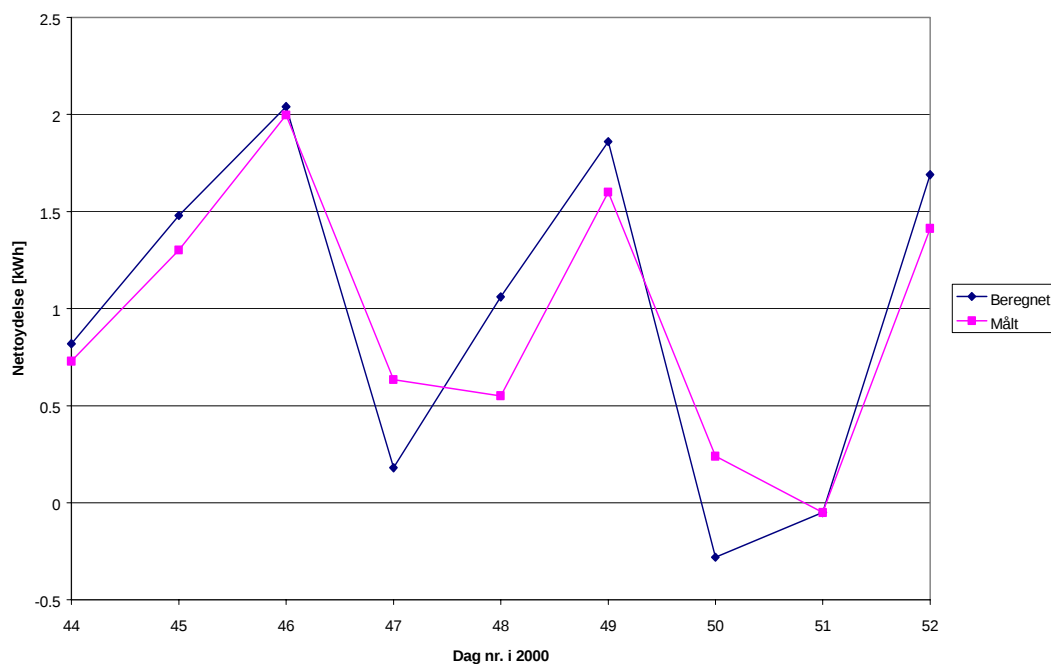
Figur 4-42: Solenergi tilført beholderen i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt.



Figur 4-43: Supplerende energi tilført beholderen i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt.



Figur 4-44: Tappet energimængde fra beholderen i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt.



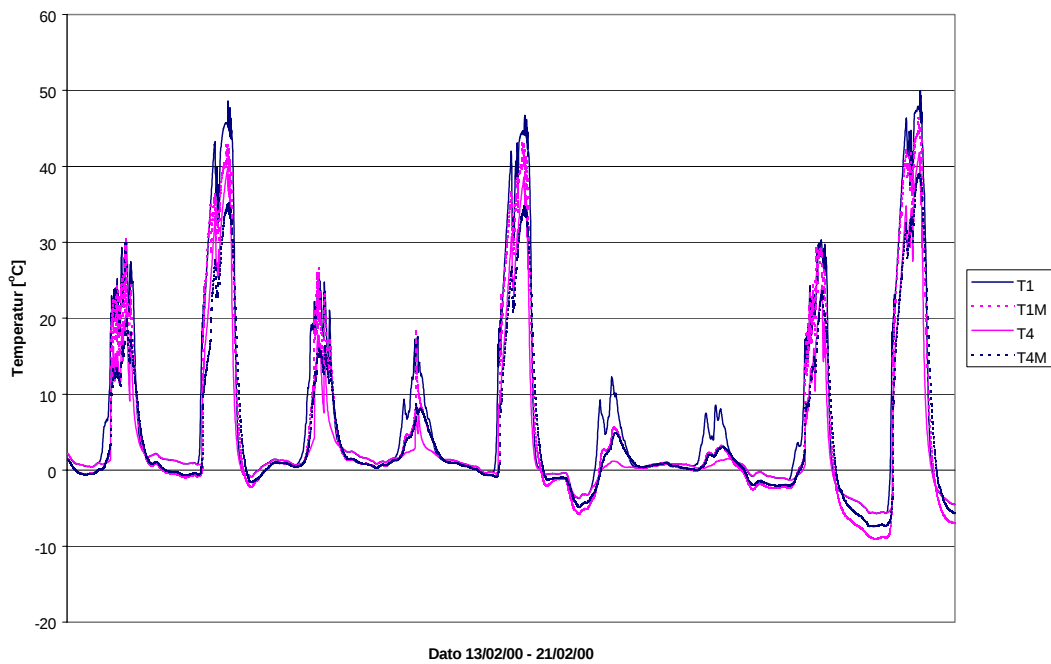
Figur 4-45: Nettoyedelse (Q(tap)-Q(supplerende)) for solvarmeanlæg 4, beregnet og målt.

Det ses af figurene, at der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede energistørrelser. Det ses dog af Figur 4-45, at der nogle af dagene er en form for forsinkelse i beregningerne af nettoyedelsen. Dag nr. 47 er den beregnede nettoyedelse mindre end den målte, men dag nr. 48 er den beregnede nettoyedelse større end den målte. Det samme mønster gør sig gældende for dag nr. 49 og 50. Det har ikke været muligt at finde forklaring på dette. I Tabel 4-10 er energimængderne summeret over hele perioden, og det fremgår heraf, at forskellene på energistørrelserne ligger indenfor måleusikkerheden på $\pm 5\%$.

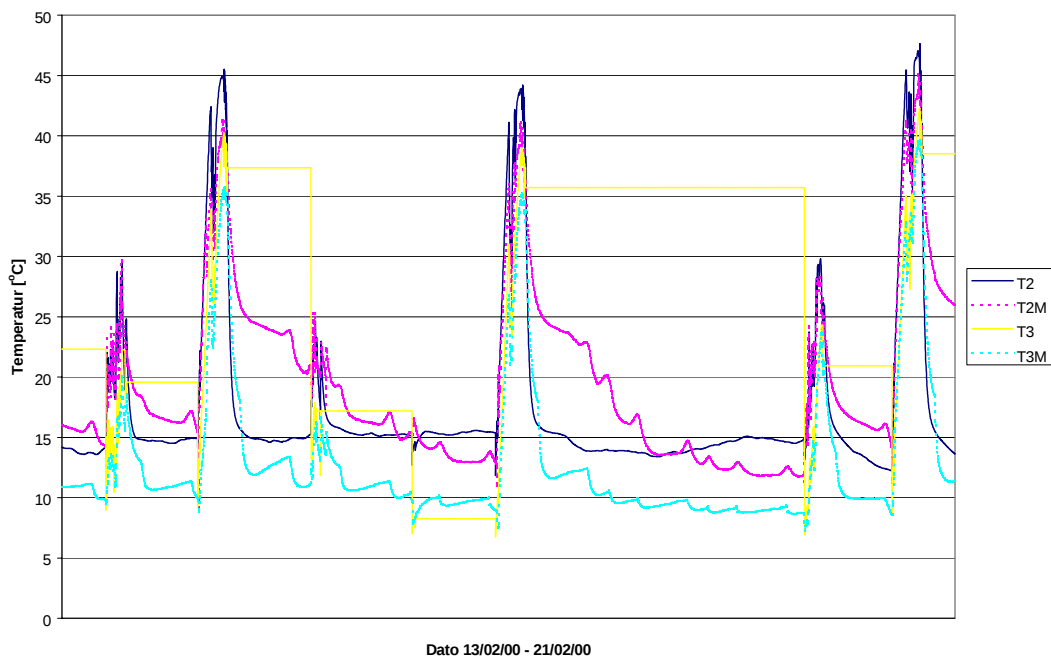
	Solvarme tilført solfangervæsken [kWh]	Solvarme tilført beholderen [kWh]	Supplerende energi tilført beholderen [kWh]	Tappet energimængde fra beholderen [kWh]	Nettoyedelse [kWh]
Målt	22,1	20,0	57,8	66,2	8,4
Beregnet	22,0	19,5	56,5	65,4	8,8
Afvigelse [%]	0,3	2,3	2,1	1,3	-4,6

Tabel 4-10: Summerede energimængder for solvarmeanlæg 4, målt og beregnet.

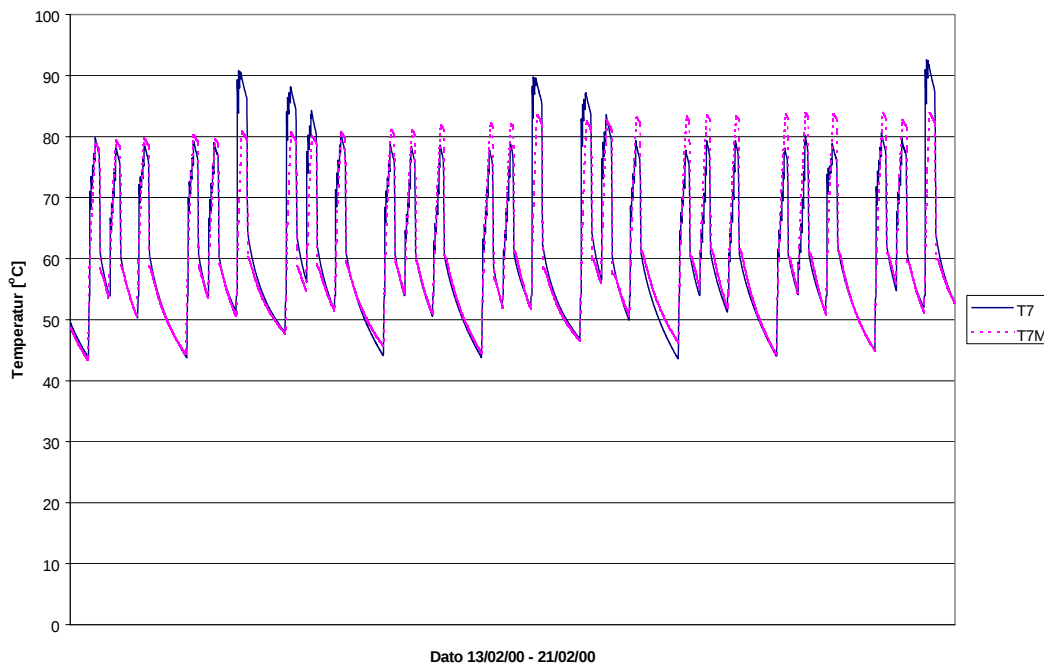
Figur 4-46 og Figur 4-47 viser målte og beregnede fremløbstemperaturer og returtemperaturer for henholdsvis solfanger og kappe. I Figur 4-48 ses den målte og beregnede temperatur i toppen af beholderen.



Figur 4-46: Fremløbstemperaturen (T4) til solfangeren og returtemperaturen (T1) fra solfangeren i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt (M).



Figur 4-47: Fremløbstemperatur (T2) til kappen og returtemperaturen (T3) fra kappen i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt (M).



Figur 4-48: Temperaturen (T7) i toppen af beholderen i solvarmeanlæg 4, beregnet og målt (M).

Sammenligning af de målte og de beregnede temperaturer viser, at temperaturniveauet og dynamikken stemmer godt overens. Det ses dog af Figur 4-48, at den beregnede temperatur i toppen af beholderen ikke altid når op på det samme niveau, som der er målt. Enkelte gange er den beregnede temperatur derimod større end den målte. Det viser, at Kappeptf kan have svært ved at beregne temperaturforholdene i toppen af beholderen. Endvidere ses det også af Figur 4-48, at temperaturen i toppen af beholderen har været meget høj under opvarmningsperioderne. De høje temperaturer i toppen af beholderen skyldes, at flowet i det lodrette rør er lavt. Der er benyttet et flow på 0,35 l/min, hvilket gav den bedste overensstemmelse med målingerne.

På baggrund af sammenligningerne mellem de beregnede og de målte energistørrelser og temperaturer for solvarmeanlæg 4 vurderes det, at EDB-modellen af det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner kan anvendes til simulering af et helt år ved hjælp af Mantlsim, der anvender de danske referencevejrdato, TRY.

5 Beregninger

I dette afsnit foretages sammenligninger og optimeringer med de i afsnit 4 validerede modeller for intelligente solvarmeanlæg med henholdsvis elpatron i sidearm og to interne elpatroner. Beregningerne foretages med Mantlsim, der ved benyttelse af det danske referencevejrdato, TRY, kan beregne årsydelsen for forskellige anlægsudformninger. Årsydelsen for de to typer af intelligente solvarmeanlæg beregnes ved forskellige tappemønstre og forskellige varmtvandsforbrug og disse resultater sammenlignes med beregninger for solvarmeanlæg med markedsførte beholdere (Danlager 1000 og Danlager 2000 fra Nilan A/S). Derudover foretages der nogle optimeringer af udformningen af hvert af de to intelligente solvarmeanlæg.

5.1 Sammenligning med markedsførte traditionelle kappebeholdere

Den beregnede årlige ydelse for de to intelligente solvarmeanlæg ved forskellige tappemønstre og varmtvandsforbrug sammenlignes med den beregnede årlige ydelse for to traditionelle solvarmeanlæg med henholdsvis Danlager 1000 og Danlager 2000 som varmelagre. Beholderne i de to intelligente solvarmeanlæg har i de følgende beregninger samme dimensioner som Danlager 1000 beholderen, således at der kan foretages en reel sammenligning mellem de traditionelle solvarmeanlæg og de intelligente solvarmeanlæg.

Solfanger	
Areal	3 m ²
Effektivitetsudtryk	$\eta = 0,75 - 5,40 \cdot (T_m - T_a) / G$
Indfaldsvinkelkorrektion	$K_g = 1 - \tan^{4,2}(i/2)$
Varmekapacitet	7000 J/Km ²
Hældning	45°
Orientering	Syd
Solfangerkreds	
Rørmateriale	Kobber
Diameter	12/10 mm
Længde af rør fra solfanger til lager, ude	1,5 m
Længde af rør fra lager til solfanger, ude	1,5 m
Længde af rør fra solfanger til lager, inde	3,5 m
Længde af rør fra lager til solfanger, inde	3,5 m
Varmetabskoefficient for rør	0,25 W/mK
Solfangervæske	40 % (vægt) propylenglykol/vand blanding
Volumenstrøm i solfangerkreds	0,45 l/min
Cirkulationspumpens effektforbrug	30 W
Styresystem	
Differenstermostat med en temperaturføler i toppen af solfangeren og en i bunden af kappen.	
Start/stop differens	10 K/2 K

Tabel 5-1: Data for solfanger og solfangerkreds, der er benyttet i beregningerne.

Der er benyttet de samme data for solfangerkredsen til beregning af de fire anlæg. Disse data ses i **Tabel 5-1**. I Tabel 5-2 ses de benyttede data for Danlager 1000 og Danlager 2000. I Tabel 5-3 ses de benyttede data for de to intelligente soltanke.

	Danlager 1000	Danlager 2000
Beholdertype	Kappebeholder	Kappebeholder

Beholdermateriale	Stål St 37-2	Stål St 37-2
Varmtvandstank		
Volumen	0,189 m ³	0,265 m ³
Højde/diameter	1,082/0,500 m	1,450/0,500 m
Godstykkelse	0,003 m	0,003 m
Supplerende energikilde	Øverste 0,080 m ³ af varmtvandstanken er opvarmet til 50,5°C af den supplerende energikilde	Øverste 0,089 m ³ af varmtvandstanken er opvarmet til 50,5°C af den supplerende energikilde
Kappe		
Volumen	0,007 m ³	0,012 m ³
Højde/diameter	0,345/0,525 m	0,715/0,525 m
Godstykkelse	0,003 m	0,003 m
Placering	Kappen omslutter den nederste del af de lodrette sider på varmtvandstanken. De øverste 0,081 m ³ og de nederste 0,014 m ³ af varmtvandstanken er ikke omsluttet af kappen.	Kappen omslutter den nederste del af de lodrette sider på varmtvandstanken. De øverste 0,109 m ³ og de nederste 0,019 m ³ af varmtvandstanken er ikke omsluttet af kappen.
Isolering		
Isoleringsmateriale	PUR-skum	PUR-skum
Varmetabskoefficient	1,7 W/K	2,3 W/K

Tabel 5-2: De benyttede data for Danlager 1000 og Danlager 2000.

Type	Intelligent kappebeholder med to interne elpatroner	Intelligent kappebeholder med sidearm
Beholdermateriale	Stål St 37-2	Stål St 37-2
Varmtvandstank		
Volumen	0,189 m ³	0,189 m ³
Højde/diameter	1,082/0,500 m	1,082/0,500 m
Godstykkelse	0,003 m	0,003 m
Kappe		
Volumen	0,007 m ³	0,007 m ³
Højde/diameter	0,345/0,525 m	0,345/0,525 m
Godstykkelse	0,003 m	0,003 m
Placering	Kappen omslutter de lodrette sider af varmtvandstanken. De øverste 0,081 m ³ og de nederste 0,014 m ³ er ikke omsluttet af kappen.	Kappen omslutter de lodrette sider af varmtvandstanken. De øverste 0,081 m ³ og de nederste 0,014 m ³ er ikke omsluttet af kappen.
Supplerende energikilde		
Placering af lodret rør/sidearm	0,080 m ³ vand er placeret over indløbet til røret 0,019 m ³ vand er placeret over udløbet fra røret	0,080 m ³ vand er placeret over udløbsrør. Indløbet til varmtvandstanken er placeret i toppen af beholderen.
Supplerende energikilde	To indbyggede elpatroner, en placeret vandret og en placeret lodret inde i et rør.	En elpatron indbygget i sidearmen
Volumen af brugsvand over den vandrette elpatron	0,019 m ³	-
Effekt fra elpatroner	Vandret: 1200 W, lodret: 1200 W	1200 W
Volumenstrøm i lodret rør/ sidearm	1,6 l/min	1,7 l/min
Styresystem	De to elpatroner er i drift hvis energiindholdet af brugsvand med temperatur over 50°C er for lille til at dække varmtvandsforbruget med en	Elpatronen er i drift hvis energiindholdet af brugsvand med temperatur over 50°C er for lille til at dække varmtvandsforbruget med en

	minimum tappetemperatur på 50°C, og hvis forskellen mellem den aktuelle tid og tappetidspunktet er mindre end den i tabel 5-4 angivne tid for det ønskede varmtvandsforbrug. I perioden, hvor de to elpatroner kan være i drift, er den vandrette elpatron i drift indtil vandets temperatur i volumenet over elpatronen overstiger 54°C, ellers er den lodrette elpatron i drift.	minimum tappetemperatur på 50°C, og hvis forskellen mellem den aktuelle tid og tappetidspunktet er mindre end den i tabel 5-4 angivne tid for det ønskede varmtvandsforbrug.
Isolering		
Isoleringsmateriale	PUR-skum	PUR-skum
Varmetabskoefficient – sidearm	-	0,2 W/K
Varmetabskoefficient – top	0,1 W/K	0,1 W/K
Varmetabskoefficient – sider	0,6 W/K	0,6 W/K
Varmetabskoefficient – kappe	0,3 W/K	0,3 W/K
Varmetabskoefficient – bund	0,7 W/K	0,7 W/K
Varmetabskoefficient – i alt	1,7 W/K	1,9 W/K (inkl. Sidearm)

Tabel 5-3: De benyttede data for de to intelligente anlæg.

5.1.1 Variation af tappemønster og varmtvandsforbrug

Variationerne i tappemønster og varmtvandsforbrug er foretaget på følgende måde. For hvert tappemønster regnes med fire forskellige daglige varmtvandsforbrug på henholdsvis 50 l, 100 l, 160 l og 200 l. Der tappes dagligt varmt vand i tre lige store portioner. Der er anvendt 5 forskellige tappemønstre og de er; jævnt fordelt forbrug med tapninger kl. 7, kl. 12 og kl. 19, forbrug om morgenen med tapninger kl. 5, kl. 6 og kl. 7, forbrug om aftenen med tapninger kl. 19, kl. 20 og kl. 21, forbrug både morgen og aften med tapninger kl. 6, kl. 7 og kl. 19 samt forbrug morgen og aften med tapninger kl. 7, kl. 19 og kl. 20.

De første 3 tappemønstre er valgt for at vise forskellen imellem forbrug fordelt jævnt over døgnet og så de ekstreme tilfælde med kun tapning henholdsvis morgen og aften. De sidste to tappemønstre er valgt som nogle mere realistiske tappemønstre med tapning både morgen og aften og ingen tapning midt på dagen, hvor brugerne er på arbejde.

Tabel 5-4 viser for de intelligente soltanke hvilken energigrænse, der styres efter, og hvor lang den maksimale opvarmningstid kan være før hver tapning ved de forskellige varmtvandsforbrug og forbrugsmønstre. Opvarmningstiderne og energigrænserne i Tabel 5-4 er tilpasset på en måde, så den ønskede mængde varmt vand kan efterkommes, samtidig med at opvarmningstiden bliver så kort som mulig. Ved tappemønstre hvor der tappes varmt vand med en times mellemrum, bliver opvarmningstiden længere og styresystemets nedre energigrænse større ved den første tapning, således det er muligt at efterkomme den ønskede mængde varmt vand til de efterfølgende tapninger. De længere opvarmningstider og forøgede energigrænser forøger varmetabene i disse perioder.

Varmtvandsforbrug	Tappetidspunkter	1. tapning	2. tapning	3. tapning
50 l	Kl. 5, 6 og 7	1 h	1 h	1 h
		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh
	Kl. 6, 7 og 19	1 h	1 h	1 h
		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh
	Kl. 7, 12 og 19	1 h	1 h	1 h
		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh

		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh
	Kl. 7, 19 og 20	1 h	1 h	1 h
		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh
	Kl. 19, 20 og 21	1 h	1 h	1 h
		0,77 kWh	0,77 kWh	0,77 kWh
100 l	Kl. 5, 6 og 7	3 h	1 h	1 h
		3,6 kWh	2,5 kWh	1,525 kWh
	Kl. 6, 7 og 19	3 h	1 h	2 h
		2,3 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 12 og 19	2 h	2 h	2 h
		1,525 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 19 og 20	2 h	3 h	1 h
		1,525 kWh	2,3 kWh	1,525 kWh
160 l	Kl. 5, 6 og 7	3 h	1 h	1 h
		3,6 kWh	2,5 kWh	1,525 kWh
	Kl. 6, 7 og 19	3 h	1 h	2 h
		2,3 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 12 og 19	2 h	2 h	2 h
		1,525 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 19 og 20	2 h	3 h	1 h
		1,525 kWh	2,3 kWh	1,525 kWh
200 l	Kl. 5, 6 og 7	3 h	1 h	1 h
		3,6 kWh	2,5 kWh	1,525 kWh
	Kl. 6, 7 og 19	3 h	1 h	2 h
		2,3 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 12 og 19	2 h	2 h	2 h
		1,525 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
	Kl. 7, 19 og 20	2 h	3 h	1 h
		1,525 kWh	2,3 kWh	1,525 kWh

Tabel 5-4: Maksimal opvarmningstid og energigrænse ved hver tapning for de forskellige varmtvandsforbrug og forbrugsmønstre.

Resultaterne af beregningerne er vist i Figur 5-1 til Figur 5-10. Det intelligente anlæg med to interne elpatroner er i Figur 5-1 til Figur 5-10 betegnet som ”intelligent anlæg 1”, og det intelligente anlæg med den supplerende energikilde i sidearm er i Figur 5-1 til Figur 5-10 betegnet som ”intelligent anlæg 2”. Figur 5-1 viser nettoydelsen (defineret som energimængde tappet fra beholder minus supplerende energi tilført beholder) som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 7, kl. 12 og kl. 19. I Figur 5-2 ses den relative nettoydelse for anlæggene som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 7, kl. 12 og kl. 19. Den relative nettoydelse er defineret som nettoydelsen for det pågældende anlæg divideret med nettoydelsen for anlægget med Danlager 1000 som varmelager.

Figur 5-3 viser nettoydelsen som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 5, kl. 6 og kl. 7. I Figur 5-4 ses den relative nettoydelse for anlæggene som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 5, kl. 6 og kl. 7. Figur 5-5 viser nettoydelsen som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 19, kl. 20 og kl. 21. I Figur 5-6 ses den

relative nettoydelse for anlæggene som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 19, kl. 20 og kl. 21. Figur 5-7 viser nettoydelsen som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 6, kl. 7 og kl. 19. I Figur 5-8 ses den relative nettoydelse for anlæggene som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 6, kl. 7 og kl. 19. Figur 5-9 viser nettoydelsen som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 7, kl. 19 og kl. 20. I Figur 5-10 ses den relative nettoydelse for anlæggene som funktion af det daglige varmtvandsforbrug med vand tappet kl. 7, kl. 19 og kl. 20.

Figur 5-1 og Figur 5-2 viser, at med tappetidspunkter kl. 7, kl. 12 og kl. 19 har de intelligente anlæg en årlig nettoydelse, der er 7-12 % større end den årlige nettoydelse for Danlager 1000-anlægget. Det intelligente solvarmeanlæg med sidearm har en lidt større årlig nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

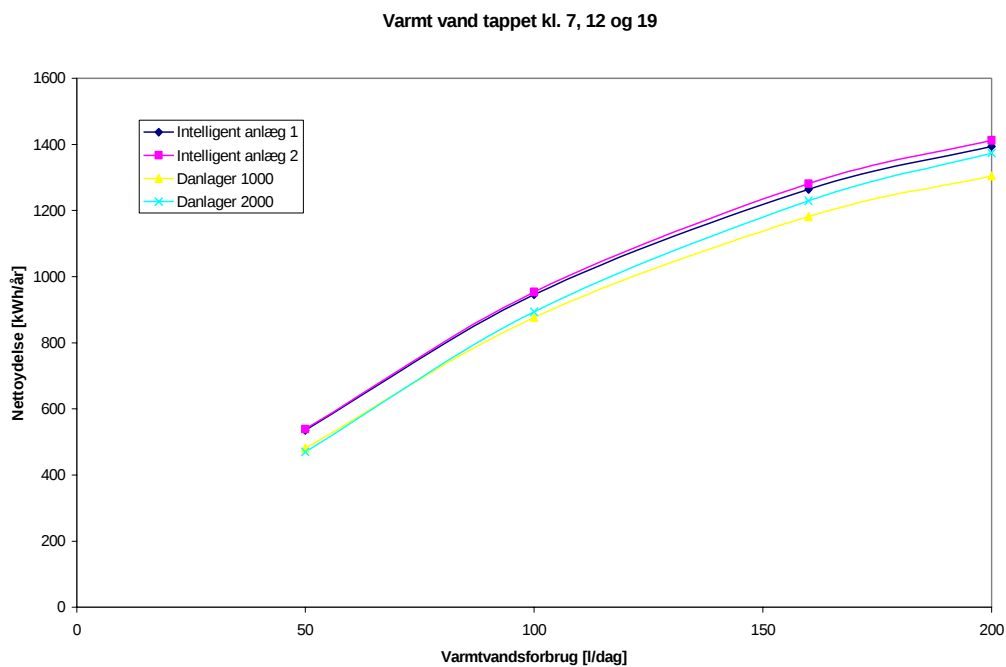
I Figur 5-3 og Figur 5-4 ses det, at med tappetidspunkter kl. 5, kl. 6 og kl. 7 har de intelligente anlæg en årlig nettoydelse, der er 10-20 % større end den årlige nettoydelse for Danlager 1000-anlægget. Ved dette forbrugsmønster har det intelligente solvarmeanlæg med sidearm en lidt større årlig nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

Figur 5-5 og Figur 5-6 viser, at med tappetidspunkter kl. 19, kl. 20 og kl. 21 har de intelligente anlæg en årlig nettoydelse, der er 18-34 % større end den årlige nettoydelse for Danlager 1000-anlægget. Det intelligente solvarmeanlæg med sidearm har en lidt større årlig nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

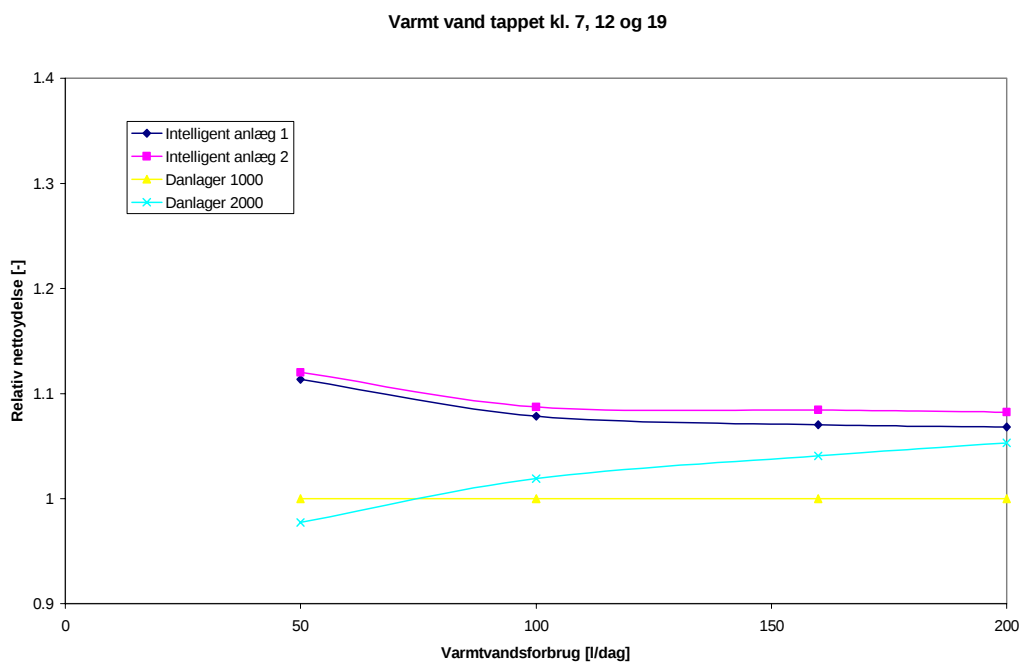
I Figur 5-7 og Figur 5-8 ses det, at med tappetidspunkter kl. 6, kl. 7 og kl. 19 har de intelligente anlæg en årlig nettoydelse, der er 11-18 % større end den årlige nettoydelse for Danlager 1000-anlægget. Ved dette forbrugsmønster har det intelligente solvarmeanlæg med sidearm en lidt større årlig nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

Figur 5-9 og Figur 5-10 viser, at med tappetidspunkter kl. 7, kl. 19 og kl. 20 har de intelligente anlæg en årlig nettoydelse, der er 13-21 % større end den årlige nettoydelse for Danlager 1000-anlægget. Det intelligente solvarmeanlæg med sidearm har en lidt større årlig nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

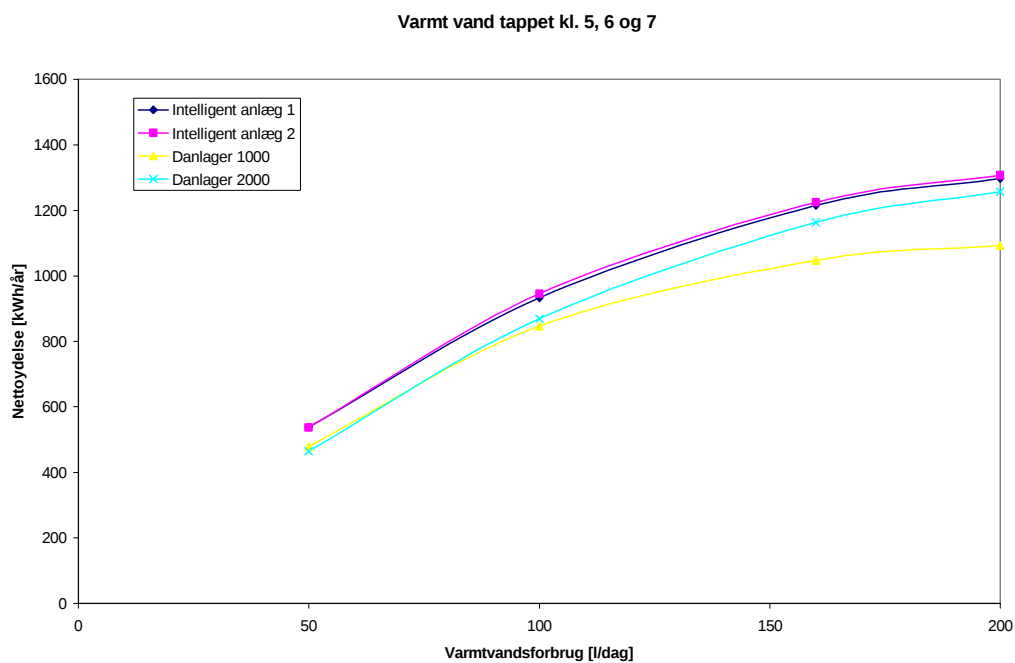
Generelt viser Figur 5-1 til Figur 5-10, at de intelligente solvarmeanlæg har en større årlig nettoydelse end de traditionelle solvarmeanlæg, samt at det intelligente solvarmeanlæg med sidearm har den største årlige nettoydelse. De intelligente solvarmeanlæg er specielt attraktive når størstedelen af varmtvandsforbruget ligger om aftenen, mens de er lidt mindre attraktive når, der er et jævnt dagligt forbrug. Derudover ses det, at den årlige nettoydelse for både de intelligente og de traditionelle solvarmeanlæg stiger når varmtvandsforbruget stiger.



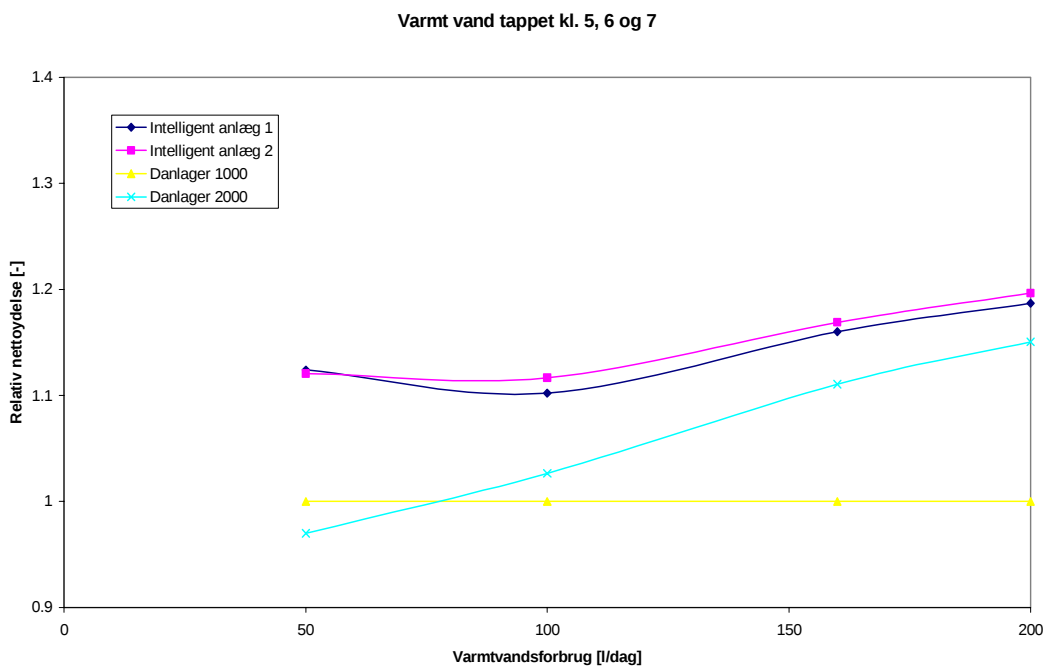
Figur 5-1: Årlig nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og to traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 7, kl. 12 og kl. 19.



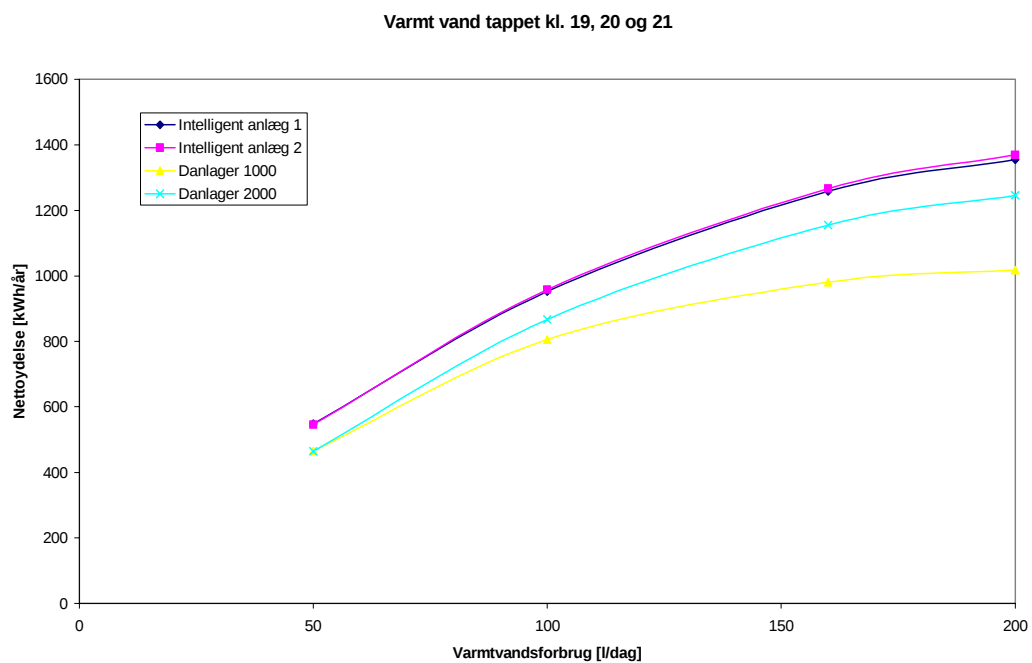
Figur 5-2: De relative nettoydelser som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 7, kl. 12 og kl. 19.



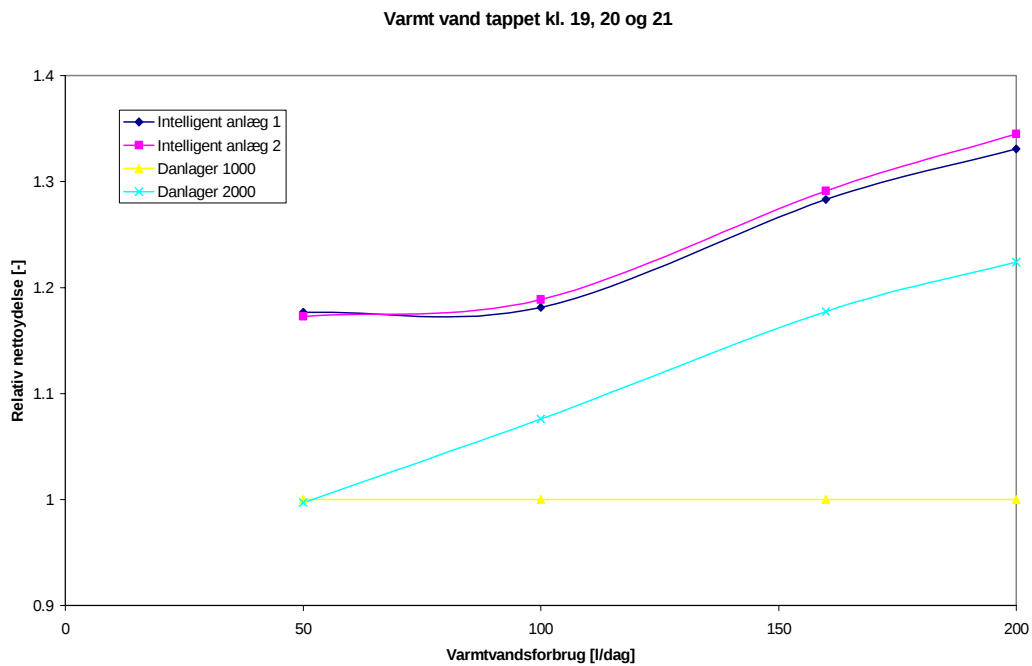
Figur 5-3: Årlig nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og to traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 5, kl. 6 og kl. 7.



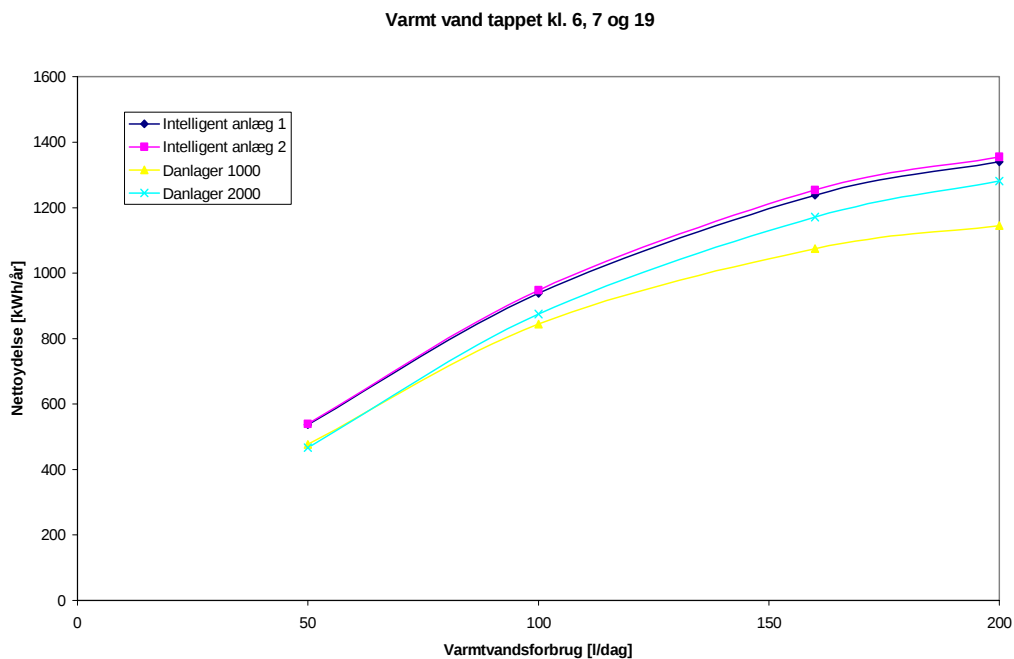
Figur 5-4: De relative nettoydelser som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 5, kl. 6 og kl. 7.



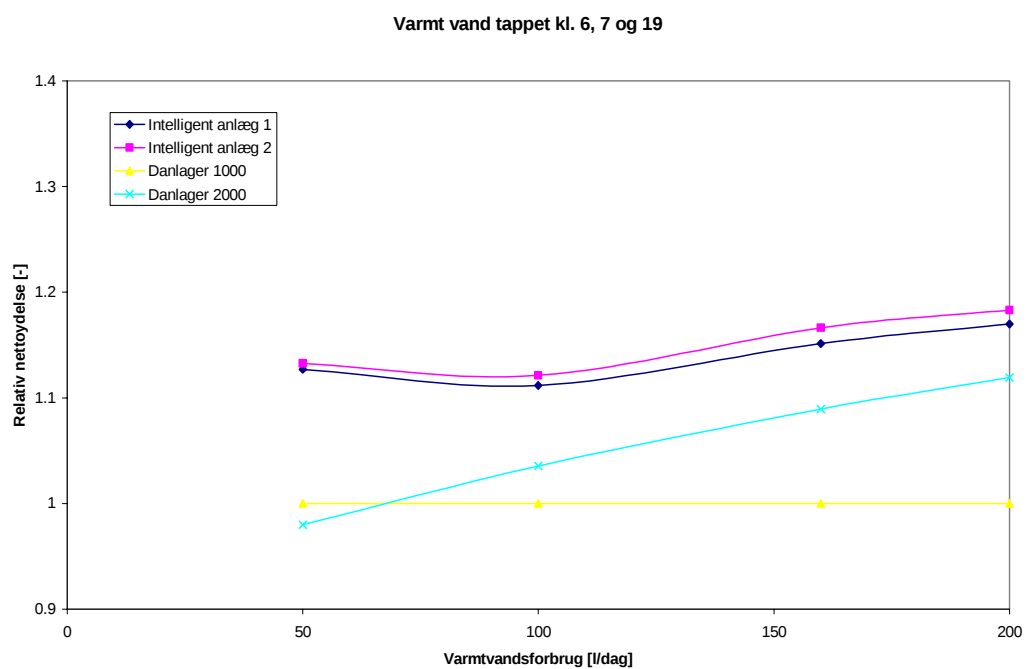
Figur 5-5: Årlig nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og to traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 19, kl. 20 og kl. 21.



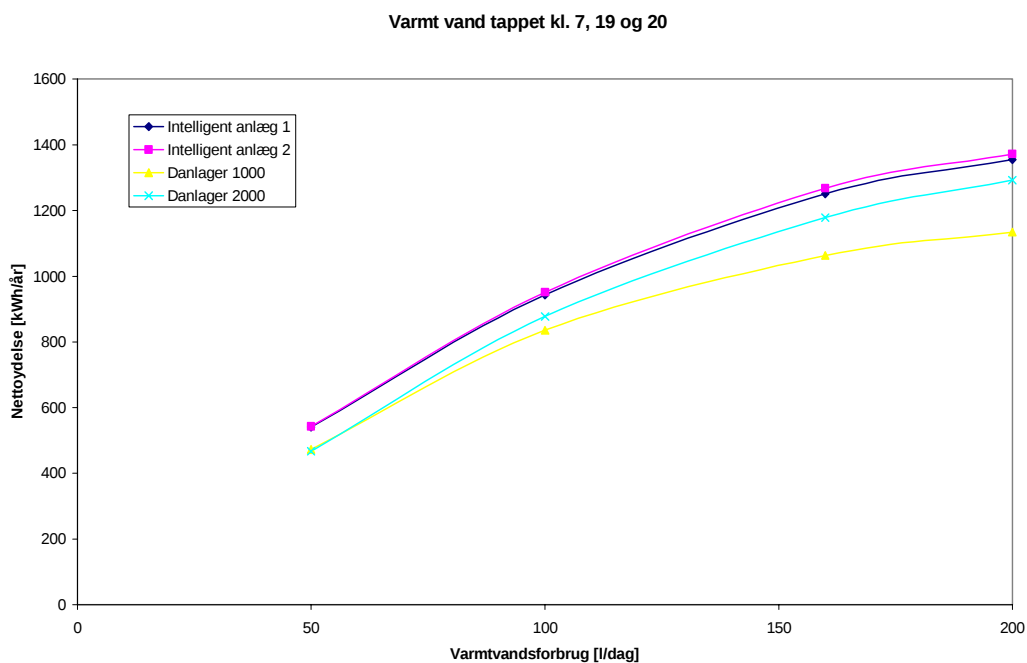
Figur 5-6: De relative nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 19, kl. 20 og kl. 21.



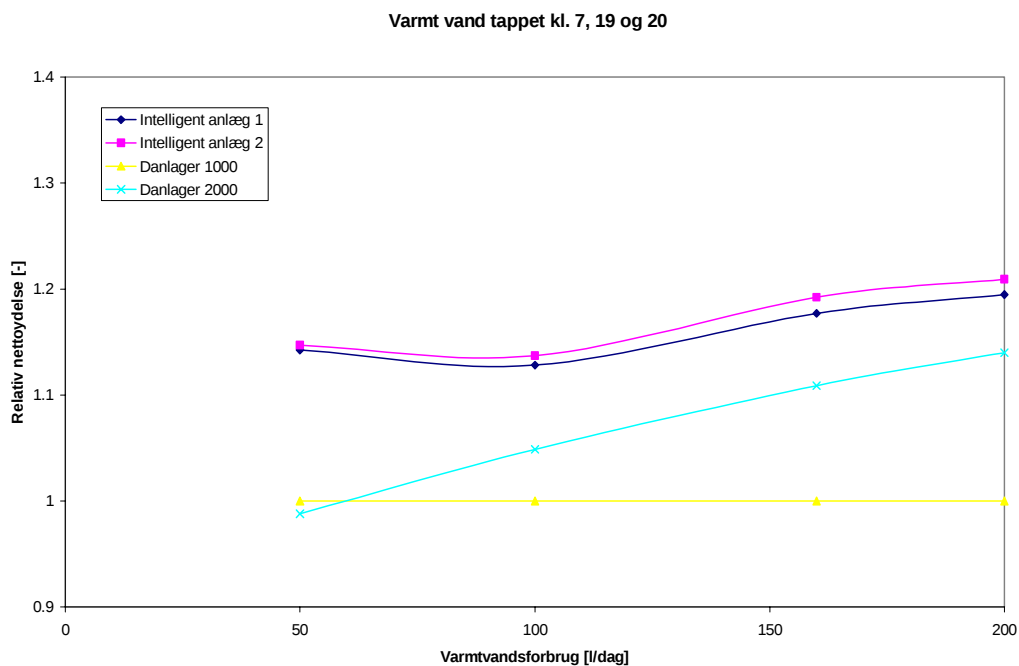
Figur 5-7: Årlig nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og to traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 6, kl. 7 og kl. 19.



Figur 5-8: De relative nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 6, kl. 7 og kl. 19.



Figur 5-9: Årlig nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og to traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 7, kl. 19 og kl. 20.



Figur 5-10: De relative nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug for to intelligente solvarmeanlæg og traditionelle solvarmeanlæg. Varmt vand er tappet i tre lige store portioner kl. 7, kl. 19 og kl. 20.

5.2 Optimering af intelligent solvarmeanlæg med elpatron i sidearm

Med den validerede model af solvarmeanlægget baseret på lagertank 2 er der foretaget en række beregninger med det formål at bestemme den optimale beholderudformning samt den bedste driftsstrategi. Modellen for lagertanken er den samme som blev benyttet i afsnit 5.1 dvs. at lagertankens dimensioner er de samme som for Danlager 1000, men udformningen af sidearm og elpatron er den samme som for lagertank 2.

Der er foretaget variationer med følgende parametre:

Kappehøjde (afsnit 5.2.1)

Placering af udløb til sidearm (afsnit 5.2.2)

Effekt fra elpatron (afsnit 5.2.3)

Indløbstemperatur fra sidearm (afsnit 5.2.4)

Styresystemets nedre grænse for energiindhold i lagertank for fastholdt tappet energimængde (afsnit 5.2.5)

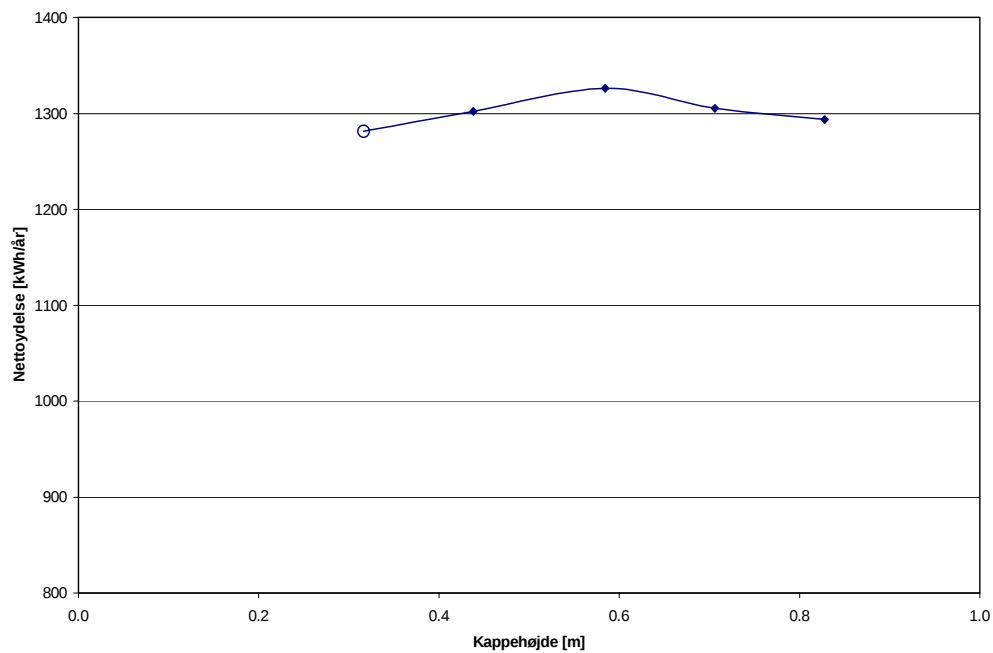
Volumenstrøm i sidearm (afsnit 5.2.6)

Beholdervolumen (afsnit 5.2.7)

I beregningerne er det intelligente solvarmeanlæg med elpatron i sidearm udformet som i Tabel 5-1 og Tabel 5-3, og der er kun ændret en parameter ad gangen. Det daglige varmtvandsforbrug er 160 l, og der er tappet varmt vand i tre lige store portioner kl. 7, kl. 12 og kl. 19. I figurene (Figur 5-11 til Figur 5-17) vises den årlige nettoydelse som funktion af den undersøgte parameter.

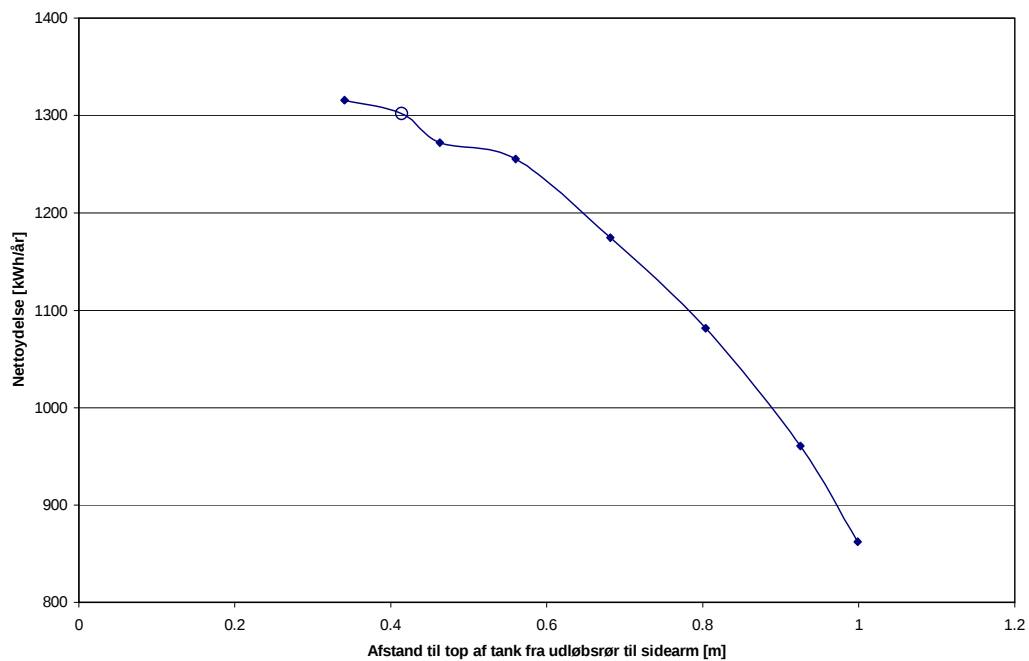
5.2.1 Kappehøjde

Figur 5-11 viser den årlige nettoydelse som funktion af kappehøjden. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Kappehøjden i referenceanlægget er 0,34 m. Det ses af Figur 5-11, at den optimale kappehøjde i dette tilfælde er ca. 0,6 m. For traditionelle kappebeholdere er det mest optimalt, hvis toppen af kappen er placeret ud for den nederste del af det vandvolumen, som opvarmes af den supplerende energikilde. For forvarmebeholdere er det mest optimalt, hvis kappen strækker sig fra den øverste del af beholderen til bunden af beholderen, og udenfor opvarmningsperioderne kan temperaturforholdene i den intelligente soltank godt sammenlignes med forvarmebeholdere. Derfor kan den årlige nettoydelse i dette tilfælde forøges ved at gøre kappen højere. Den optimale kappehøjde svarer til, at der er et volumen på 55-60 l over kappen, hvilket igen svarer til varmtvandsforbruget på 53 l/tapning. En tilsvarende undersøgelse i [13] viste at med et varmtvandsforbrug på 33 l/tapning var det mest optimalt med et vandvolumen på ca. 35 l over kappen. Det viser, at den optimale kappehøjde er bestemt af varmtvandsforbruget, men det kan under alle omstændigheder godt betale sig at gøre kapperne højere end i traditionelle kappebeholdere.



Figur 5-11: Den årlige nettoydelse som funktion af kappehøjden.

5.2.2 Placering af udløb til sidearm



Figur 5-12: Den årlige nettoydelse som funktion af afstanden fra toppen af beholderen til udløbsrøret til sidearmen.

Figur 5-12 viser den årlige nettoydelse som funktion af afstanden fra toppen af beholderen til udløbsrøret til sidearmen. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Afstanden fra indløbet til sidearmen til toppen af beholderen er i referenceanlægget 0,41 m. Det ses af Figur 5-12, at den årlige nettoydelse kan forøges ved at gøre afstanden mellem udløb og beholdertop mindre (dvs. at udløbet til sidearmen flyttes længere op i beholderen). Man skal dog være opmærksom på at det maksimale suppleringsvolumen bliver mindre ved dette.

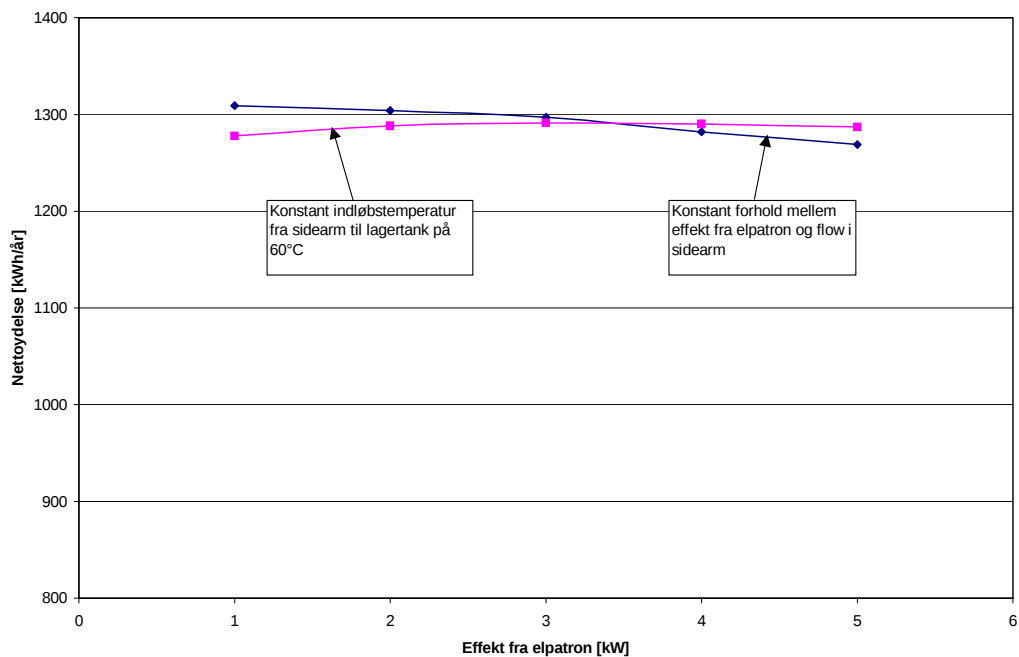
5.2.3 Effekt fra elpatron

Figur 5-13 viser den årlige nettoydelse som funktion af den afgivne effekt fra elpatronen. Effekten fra elpatronen er varieret, og samtidig er opvarmningstiden varieret, da det ønskede energiindhold kan opnås på kortere tid med en større effekt fra elpatronen. Tabel 5-5 viser hvilken opvarmningstid, der hører sammen med hvilken effekt. For hver af de i Tabel 5-5 samhørende effekter og opvarmningstider er der foretaget to årssimuleringer med hver sin driftsstrategi: Konstant indløbstemperatur på 60°C fra sidearmen (variabelt flow i sidearm)
Konstant forhold mellem effekt fra elpatron og flowet i sidearm. Forholdet er 1,33 l/min/kW.

Effekt fra elpatron [kW]	Opvarmningstid [h]
1	2,5
1,2	2,5
2	1,5
3	1,0
4	0,8
5	0,6

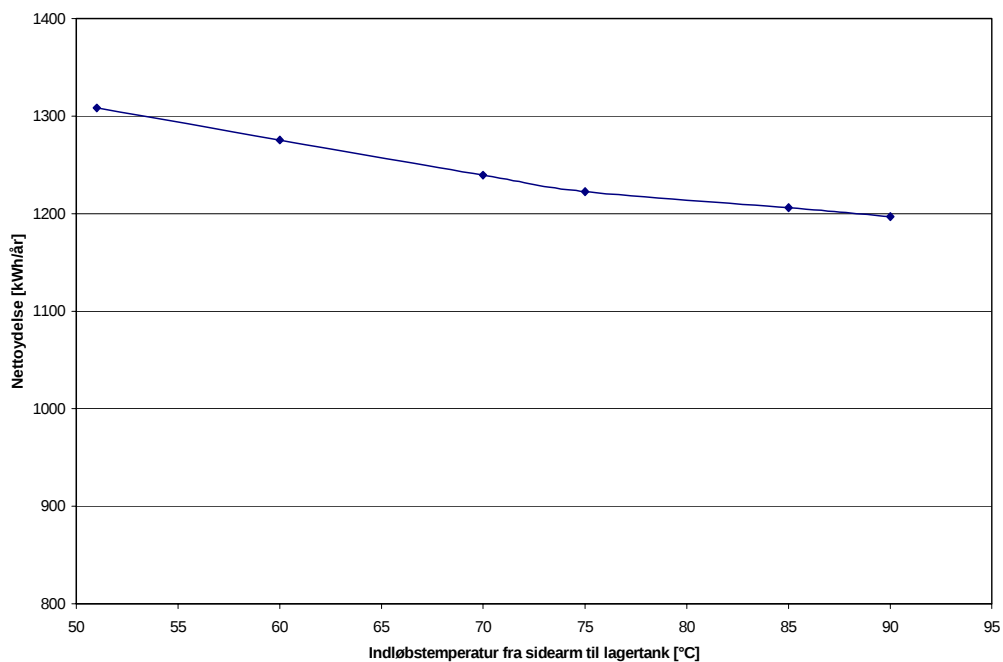
Tabel 5-5: Samhørende effekter og opvarmningstider ved beregningerne vist i Figur 5-13.

Det ses af Figur 5-13, at den årlige nettoydelse ikke ændres ret meget ved at ændre effekten fra elpatronen.



Figur 5-13: Den årlige nettoydelse som funktion af den afgivne effekt fra elpatronen.

5.2.4 Indløbstemperatur fra sidearm

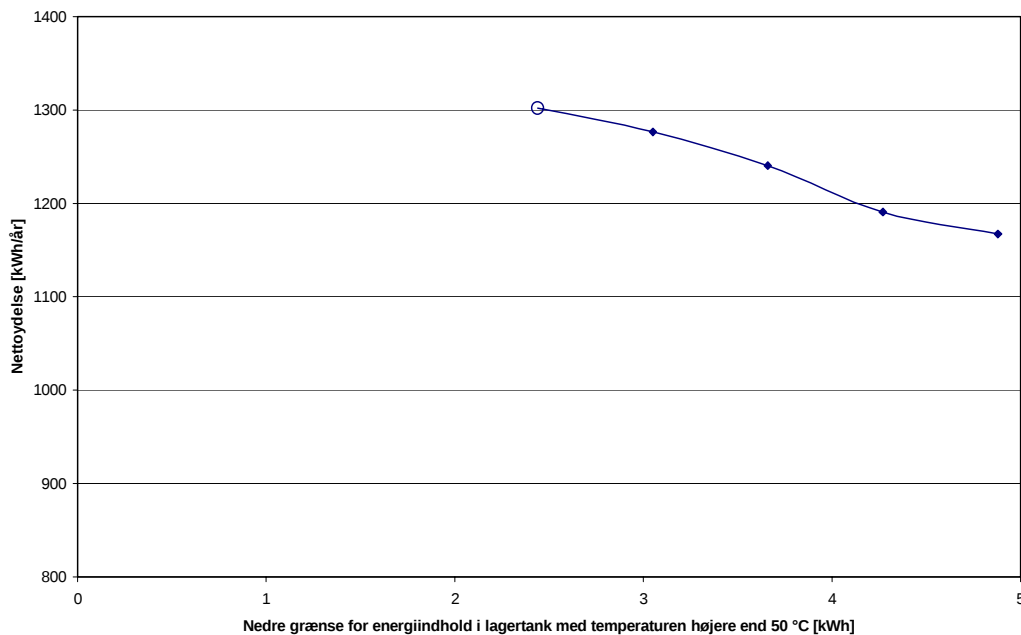


Figur 5-14: Den årlige nettoydelse som funktion af indløbstemperaturen fra sidearmen til beholderen.

Figur 5-14 viser den årlige nettoydelse som funktion af indløbstemperaturen fra sidearm til lagertank. Indløbstemperaturen fra sidearmen holdes konstant mens flowet i sidearmen varierer alt efter udløbstemperaturen fra lagertank til sidearm. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Det ses af Figur 5-14, at den årlige nettoydelse falder for stigende indløbstemperatur fra sidearmen, hvilket skyldes et forøget varmetab for de højere temperaturer i toppen af beholderen. Derfor er det bedst hvis indløbstemperaturen fra sidearmen kan tilpasses, så den ligger så tæt på den ønskede tappetemperatur som muligt. Denne tilpasning skal ske ved dimensioneringen af elpatron og sidearm.

5.2.5 Styresystemets nedre grænse for energiindhold i lagertank

I Figur 5-15 er den årlige nettoydelse vist som funktion af styresystemets nedre grænse for energiindhold af brugsvand i beholder med temperaturen større end 50°C. Ved alle beregningerne er den ønskede tappemængde 2,44 kWh/tapning, og der tappes tre gange dagligt (kl. 7, kl. 12 og kl. 19). Elpatronens driftstid er ved alle beregningerne sat så de forskellige energiindhold kan nås. Det ses af Figur 5-15, at der ved energistyring er en vis følsomhed overfor, om der bliver varmet op til et højere energiindhold end nødvendigt.

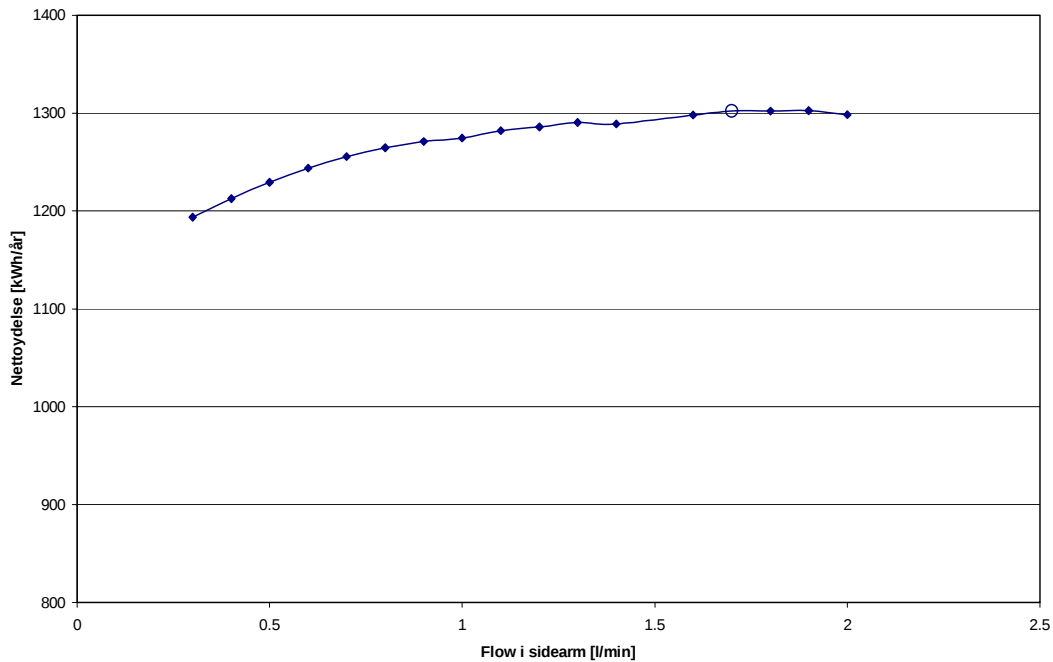


Figur 5-15: Den årlige nettoydelse som funktion af styresystemets nedre grænse for energiindhold af brugsvand med temperaturen højere end 50°C. Den daglige tappede energimængde er konstant 7,32 kWh, og der tappes vand kl. 7, kl. 12 og kl. 19.

5.2.6 Volumenstrøm i sidearm

Figur 5-16 viser den årlige nettoydelse som funktion af flowet i sidearmen. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Det ses af Figur 5-16, at det er mest optimalt med et flow på omkring 1,7 l/min. Ved et lavt flow i sidearmen bliver indløbstemperaturen fra sidearmen høj, og det giver høje temperaturer i toppen af beholderen, hvorved varmetabet forøges. Flowet i sidearmen gives som et input til beregningsprogrammet, i virkeligheden er det dog ikke konstant, men det

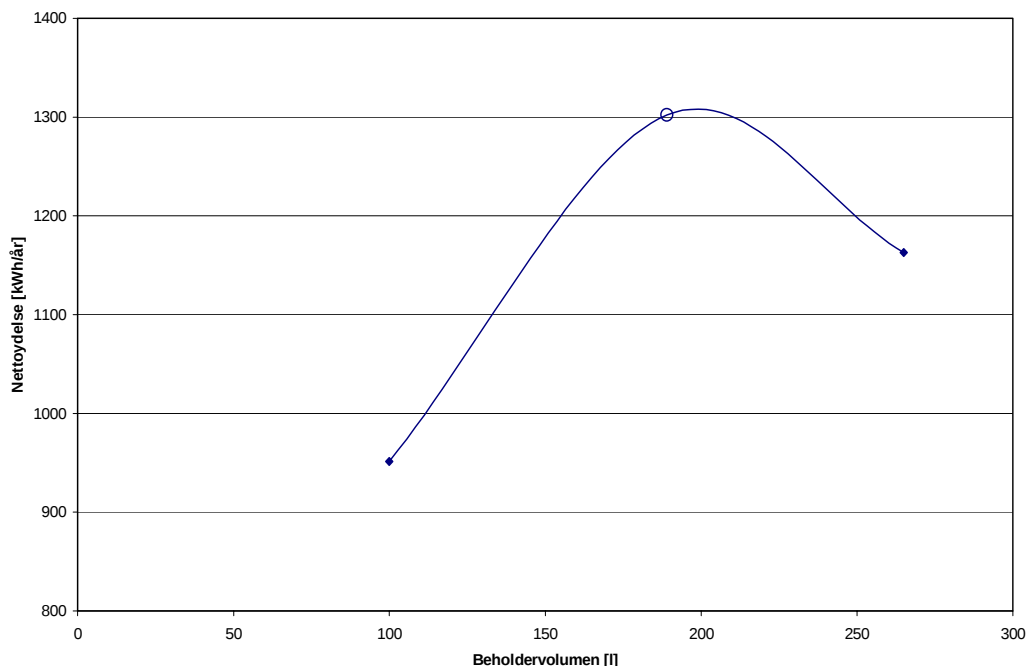
afhænger af udløbstemperaturen fra lagertank til sidearm og af temperaturlagdelingen over dette udløb. Endvidere er flowet afhængig af designet af henholdsvis elpatron (effektafgivelse pr. areal og placering) og rør i sidearm (længde og diameter) samt af rørføringen (tryktab fra enkeltmodstande).



Figur 5-16: Den årlige nettoydelse som funktion af flowet i sidearmen.

5.2.7 Beholdervolumen

Figur 5-17 viser den årlige nettoydelse som funktion af beholdervolumenet. Beholdervolumenet er varieret ved at holde diameteren konstant (0,5 m) for de tre beholdervolumener. Det ses af Figur 5-17, at den årlige nettoydelse bliver kraftigt forøget ved at øge beholdervolumenet fra 100 l til 189 l, mens nettoydelsen falder noget ved at øge beholdervolumenet fra 189 l til 260 l.



Figur 5-17: Den årlige nettoydelse som funktion af beholdervolumenet.

5.3 Optimering af intelligent solvarmeanlæg med to interne elpatroner

Med den validerede model af solvarmeanlægget baseret på lagertank 6 er der foretaget en række beregninger med det formål at bestemme den optimale beholderudformning samt den bedste driftsstrategi. Modellen for lagertanken er den samme som blev benyttet i afsnit 5.1 dvs. at lagertankens dimensioner er de samme som for Danlager 1000, men udformningen af de to interne elpatroner er den samme som for lagertank 6.

Der er foretaget variationer med følgende parametre:

Kappehøjde (afsnit 5.3.1)

Placering af indløb til det lodrette rør (afsnit 5.3.2)

Effekt fra elpatron (afsnit 5.3.3)

Udløbstemperatur fra lodret rør (afsnit 5.3.4)

Styreform: Energistyring eller temperaturstyring (afsnit 5.3.5)

Styresystemets nedre grænse for energiindhold ved energistyring og styresystemets nedre grænse for opvarmet volumen i lagertank ved temperaturstyring. Beregningerne foretages for fastholdt tappet energimængde (afsnit 5.3.6)

Volumenstrøm i lodret rør (afsnit 5.3.7)

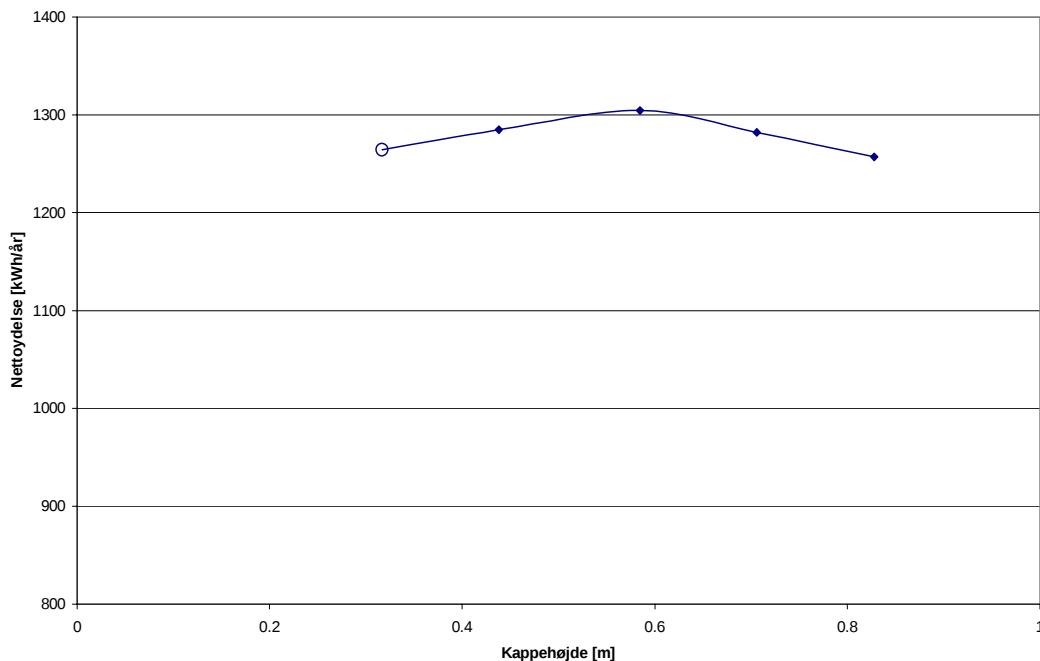
Beholdervolumen (afsnit 5.3.8)

I beregningerne er det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner udformet som i Tabel 5-1 og Tabel 5-3, og der er kun ændret en parameter ad gangen. Det daglige varmtvandsforbrug er

160 l, og der er tappet varmt vand i tre lige store portioner kl. 7, kl. 12 og kl. 19. I figurene (Figur 5-18 til Figur 5-25) vises den årlige nettoydelse som funktion af den undersøgte parameter.

5.3.1 Kappedøjde

Figur 5-18 viser den årlige nettoydelse som funktion af kappedøjden. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Kappedøjden i referenceanlægget er 0,34 m. Det ses af Figur 5-18, at den optimale kappedøjde i dette tilfælde er ca. 0,6 m. For traditionelle kappedeholdere er det mest optimalt, hvis toppen af kappen er placeret ud for den nederste del af det vandvolumen, som opvarmes af den supplerende energikilde. For forvarmebeholdere er det mest optimalt, hvis kappen strækker sig fra den øverste del af beholderen til bunden af beholderen, og udenfor opvarmningsperioderne kan temperaturforholdene i den intelligente soltank godt sammenlignes med forvarmebeholdere. Derfor kan den årlige nettoydelse i dette tilfælde forøges ved at gøre kappen højere. Den optimale kappedøjde svarer til, at der er et volumen på 55-60 l over kappen, hvilket igen svarer til varmtvandsforbruget på 53 l/tapning. En tilsvarende undersøgelse i [13] viste at med et varmtvandsforbrug på 33 l/tapning var det mest optimalt med et vandvolumen på ca. 35 l over kappen. Det viser, at den optimale kappedøjde er bestemt af varmtvandsforbruget, men det kan under alle omstændigheder godt betale sig at gøre kapperne højere end i traditionelle kappedeholdere.

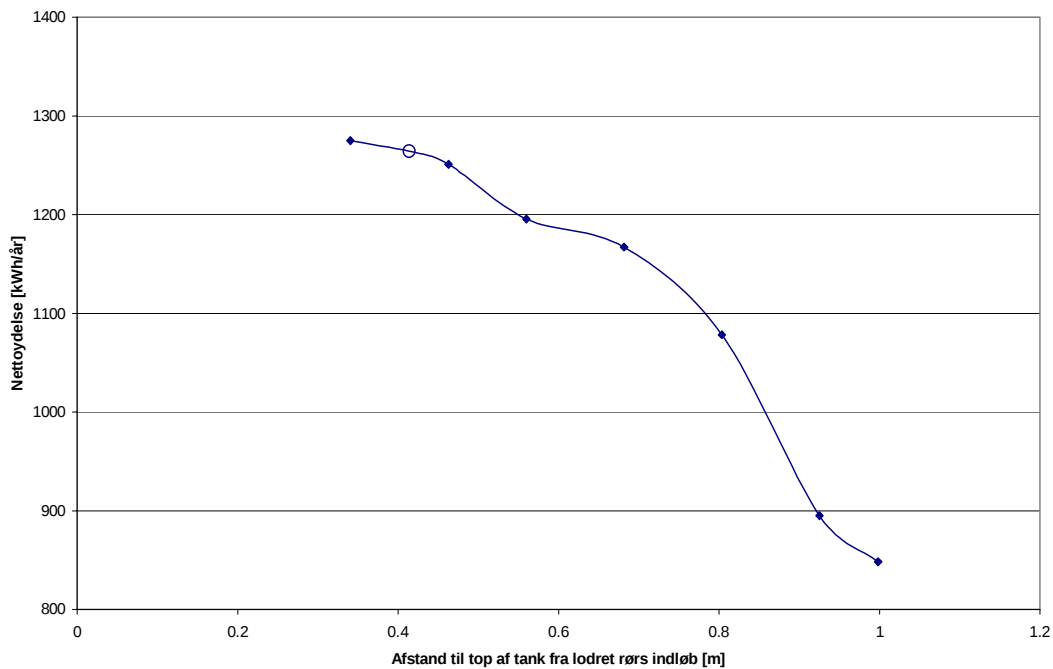


Figur 5-18: Den årlige nettoydelse som funktion af kappedøjden.

5.3.2 Placering af indløb til det lodrette rør

Figur 5-19 viser den årlige nettoydelse som funktion af afstanden fra indløbet til det lodrette rør til toppen af beholderen. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Afstanden fra indløbet til det lodrette rør til toppen af beholderen er i referenceanlægget 0,41 m. Det ses af Figur 5-19, at den årlige nettoydelse kan forøges ved at gøre afstanden mellem indløb og

beholdertop mindre (dvs. at indløbet til det lodrette rør flyttes længere op i beholderen). Man skal dog være opmærksom på at det maksimale suppleringsvolumen bliver mindre ved dette.



Figur 5-19: Den årlige nettoydelse som funktion af afstanden fra indløbet til det lodrette rør til toppen af beholderen.

5.3.3 Effekt fra elpatroner

Figur 5-20 viser den årlige nettoydelse som funktion af den afgivne effekt fra elpatronerne. Effekten fra elpatronerne er varieret, og samtidig er opvarmningstiden varieret, da det ønskede energiindhold kan opnås på kortere tid med en større effekt fra elpatronerne. Tabel 5-6. viser hvilken opvarmningstid, der hører sammen med hvilken effekt. For hver af de i Tabel 5-6 samhørende effekter og opvarmningstider er der foretaget to årssimuleringer med hver sin driftsstrategi:

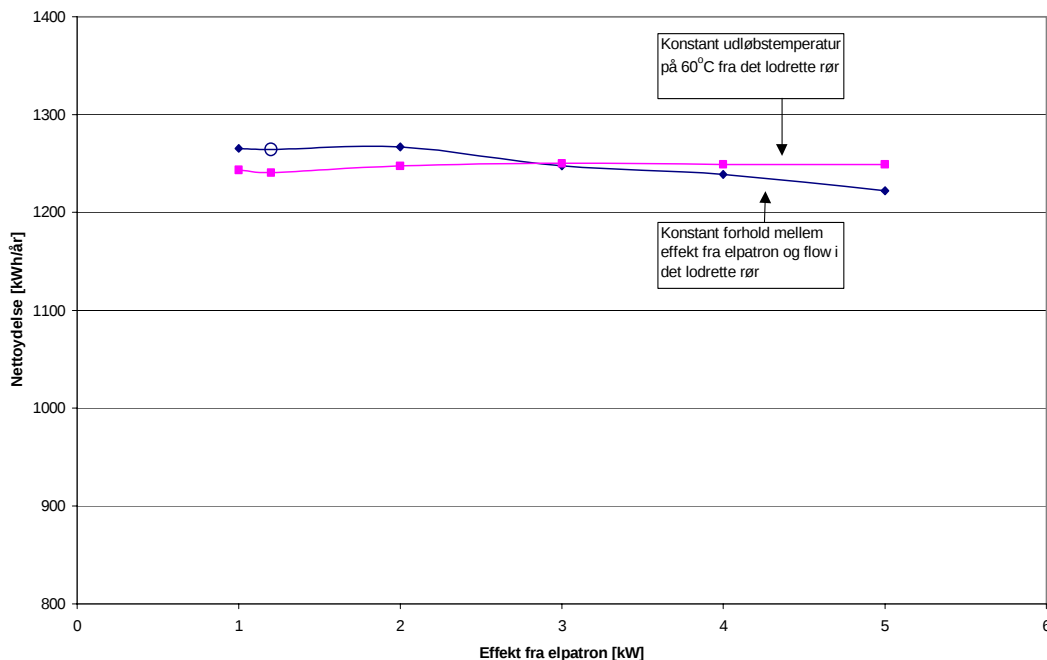
Konstant udløbstemperatur på 60°C fra det lodrette rør (variabelt flow i røret)

Konstant forhold mellem effekten fra den lodrette elpatron og flowet i det lodrette rør. Forholdet er 1,33 l/min/kW.

Effekt fra hver elpatron [kW]	Opvarmningstid [h]
1	2,5
1,2	2,5
2	1,5
3	1,0
4	0,8
5	0,6

Tabel 5-6: Samhørende effekter og opvarmningstider ved beregningerne vist i Figur 5-20.

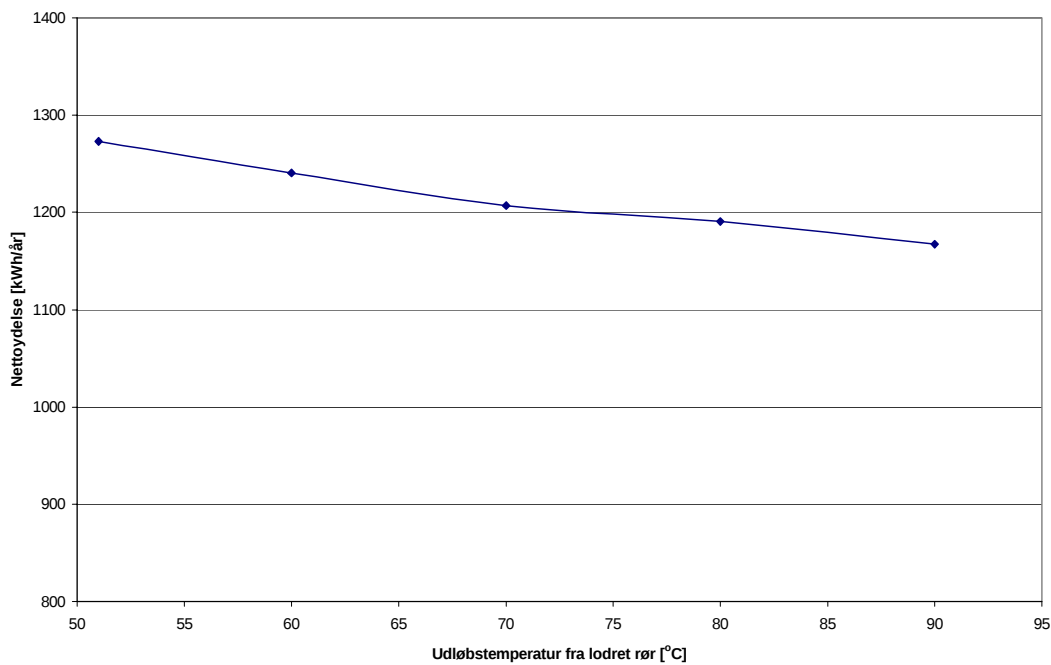
Det ses af Figur 5-20, at den årlige nettoydelse ikke ændres ret meget ved at ændre effekten fra elpatronerne.



Figur 5-20: Den årlige nettoydelse som funktion af den afgivne effekt fra hver af elpatronerne.

5.3.4 Udløbstemperatur fra lodret rør

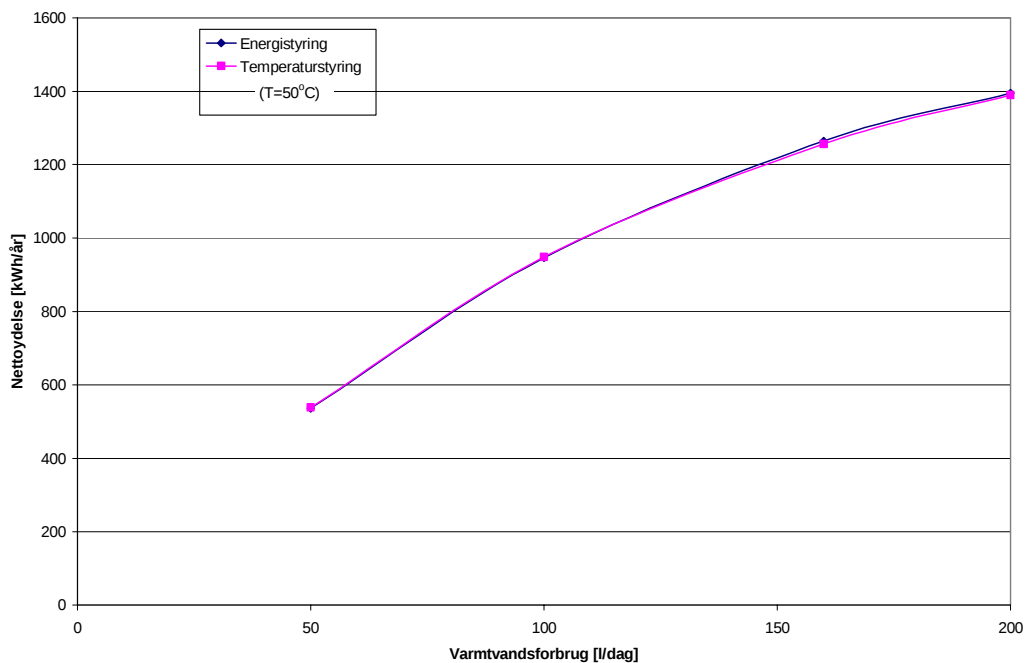
Figur 5-21 viser den årlige nettoydelse som funktion af udløbstemperaturen fra det lodrette rør. Udløbstemperaturen fra det lodrette rør holdes konstant mens flowet i det lodrette rør varierer alt efter indløbstemperaturen. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Det ses af Figur 5-21, at den årlige nettoydelse falder for stigende udløbstemperaturer fra det lodrette rør, hvilket skyldes et forøget varmetab for de højere temperaturer i toppen af beholderen. Derfor er det bedst hvis udløbstemperaturen fra det lodrette rør kan tilpasses, så den ligger så tæt på den ønskede tappetemperatur som muligt. Da der ikke sidder nogen ventil på det lodrette rør, så skal denne tilpasning ske ved dimensioneringen af elpatron og rør.



Figur 5-21: Den årlige nettoydelse som funktion af udløbstemperaturen fra det lodrette rør.

5.3.5 Styreform: Energistyring eller temperaturstyring

Figur 5-22 viser den årlige nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug ved henholdsvis energistyring og temperaturstyring. Ved energistyring forstås, at der styres efter energiindholdet af den mængde brugsvand, der har en temperatur over 50°C. Ved temperaturstyring forstås, at der styres efter at en ønsket volumenmængde vand har opnået en ønsket minimumstemperatur (her 50°C). Ved de forskellige varmtvandsforbrug tappes der tre gange dagligt i lige store mængder. Det ses af Figur 5-22, at når der opvarmes lige præcis nok til at dække det ønskede varmtvandsforbrug, så er den årlige nettoydelse uafhængig af om der benyttes energistyring eller temperaturstyring.



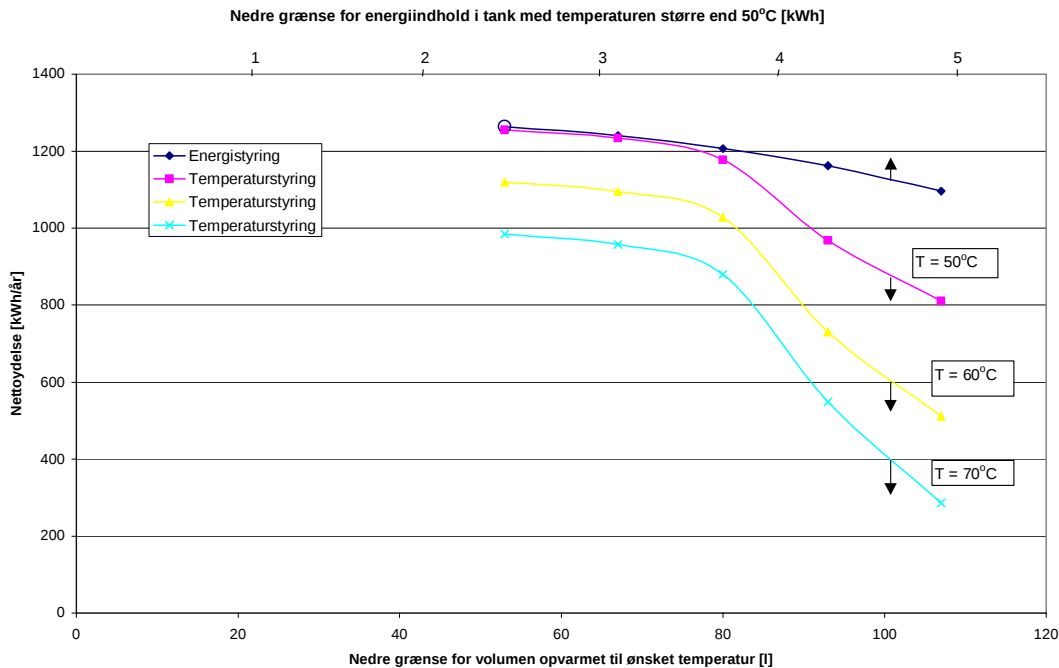
Figur 5-22: Den årlige nettoydelse som funktion af det daglige varmtvandsforbrug ved henholdsvis energistyring og temperaturstyring.

5.3.6 Nedre grænse for styresystem ved hhv. energi- og temperaturstyring

I Figur 5-23 er der vist forskellige variationer med henholdsvis energistyring og temperaturstyring. Ved energistyring forstås, at der styres efter energiindholdet af den mængde brugsvand, der har en temperatur over 50°C. Ved temperaturstyring forstås, at der styres efter at en ønsket volumenmængde vand har opnået en ønsket minimumstemperatur (f.eks. 50°C). For energistyringen i Figur 5-23 er den årlige nettoydelse vist som funktion af den nedre grænse for energiindhold af brugsvand i beholder med temperaturen større end 50°C. For temperaturstyringen i Figur 5-23 er den årlige nettoydelse vist som funktion af den nedre grænse for volumen opvarmet til ønsket temperatur, og dette er vist for tre forskellige minimumstemperaturer. Ved alle beregningerne er den ønskede tappemængde 2,44 kWh/tapning (53 l/tapning), og der tappes tre gange dagligt (kl. 7, kl. 12 og kl. 19). Energimængderne og volumenmængderne passer sammen således at 2,44 kWh svarer til 53 l vand opvarmet fra 10°C til 50°C, 3,05 kWh svarer til 67 l vand opvarmet fra 10°C til 50°C osv.

Det ses af Figur 5-23, at der ved energistyring ikke er så stor følsomhed overfor, om der bliver varmet op til et lidt højere energiindhold end nødvendigt. Samtidig ses det, at der ved temperaturstyring er meget større følsomhed, hvis der bliver opvarmet et for stort volumen. Det skyldes, at der opbygges store temperaturforskelle mellem top og bund af det ønskede volumen, og det kan der ikke tages højde for ved temperaturstyringen på samme måde som ved energistyringen. Det ses endvidere af Figur 5-23, at det er vigtigt at sætte minimumstemperaturen tæt på den ønskede varme brugsvandstemperatur. Den årlige nettoydelse falder drastisk når minimumstemperaturen sættes op til henholdsvis 60°C og 70°C. Ved grænser tæt på den ønskede

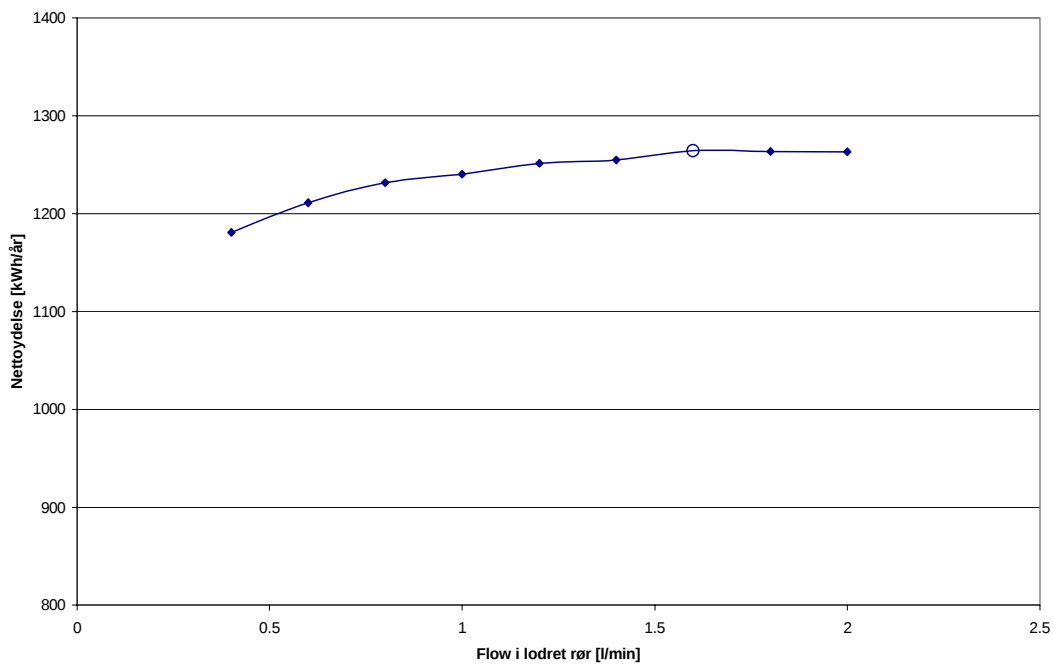
tappemængde er der ikke den store forskel på nettoydelsen for energistyring og temperaturstyring, hvis minimumstemperaturen er 50°C.



Figur 5-23: Forskellige variationer med henholdsvis energistyring og temperaturstyring. Den årlige nettoydelse er ved energistyring vist som funktion af den nedre grænse for energiindhold af brugsvand med temperaturen højere end 50°C. Den årlige nettoydelse er ved temperaturstyring vist som funktion af den nedre grænse for volumen opvarmet til ønsket temperatur. Den daglig tappede energimængde er konstant 7,32 kWh. Der tappes vand kl. 7, kl. 12 og kl. 19.

5.3.7 Volumenstrøm i lodret rør

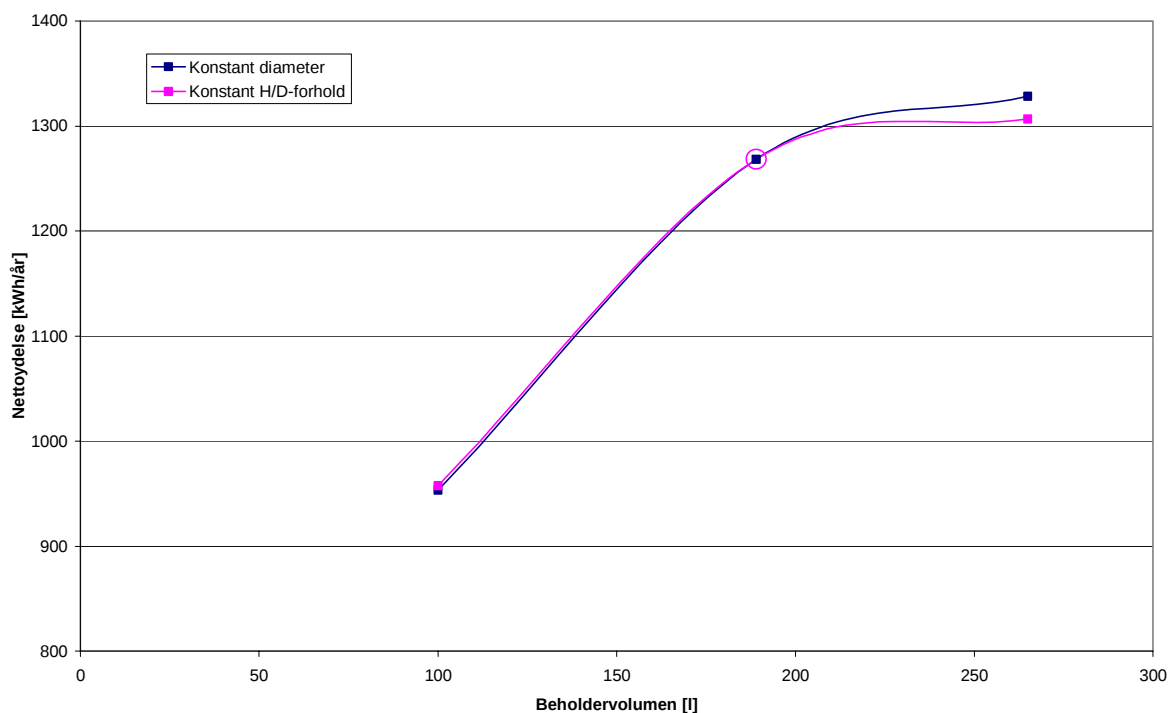
Figur 5-24 viser den årlige nettoydelse som funktion af flowet i det lodrette rør. Alle andre parametre er lig med parametrene i referenceanlægget. Det ses af Figur 5-24, at det er mest optimalt med et flow på omkring 1,6 l/min. Ved et lavt flow i det lodrette rør bliver udløbstemperaturen høj, og det giver høje temperaturer i toppen af beholderen, hvorved varmetabet forøges. Flowet i det lodrette rør gives som et input til beregningsprogrammet, i virkeligheden er det dog ikke konstant, men det afhænger af indløbstemperaturen og af temperaturlagdelingen ud for røret. Endvidere er flowet afhængig af designet af henholdsvis elpatron (effektafgivelse pr. areal og placering) og rør (længde og diameter).



Figur 5-24: Den årlige nettoydelse som funktion af flowet i det lodrette rør.

5.3.8 Beholdervolumen

Figur 5-25 viser den årlige nettoydelse som funktion af beholdervolumenet. Beholdervolumenet er varieret på to forskellige måder. Ved den ene måde er diameteren konstant (0,5 m) for de tre beholdervolumener, mens højde/diameter forholdet er konstant (ca. 2) for de tre beholdervolumener ved den anden måde. Det ses af Figur 5-25, at den årlige nettoydelse bliver kraftigt forøget ved at øge beholdervolumenet fra 100 l til 189 l, mens nettoydelsen ikke stiger så meget ved at øge beholdervolumenet fra 189 l til 260 l.



Figur 5-25: Den årlige nettoydelse som funktion af beholdervolumenet.

5.4 Sammenfatning af beregninger

I afsnit 5.1 blev de beregnede årsydelser for to intelligente solvarmeanlæg (et med elpatron i sidearm og et med to interne elpatroner) sammenlignet med den beregnede årlige ydelser for to solvarmeanlæg med markedsførte kappebeholdere. De beregnede årsydelser blev foretaget med forskellige tappemønstre og forskellige varmtvandsforbrug. Beregningerne viste at de intelligente solvarmeanlæg havde en ydelse, der ved de forskellige tappemønstre og varmtvandsforbrug er 7-34 % større end den årlige nettoydelse for et solvarmeanlæg med den markedsførte Danlager 1000 kappebeholder. Beregningerne viste også, at de intelligente solvarmeanlæg er specielt attraktive når størstedelen af varmtvandsforbruget ligger om aftenen, mens de er lidt mindre attraktive når, der er et jævnt dagligt forbrug. Det intelligente solvarmeanlæg med elpatron i sidearm havde i beregningerne en lidt større nettoydelse end det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner.

I afsnit 5.2 blev der foretaget en række beregninger for at optimere beholderudformning og driftsstrategi for det intelligente solvarmeanlæg med elpatron i sidearm. Resultatet af beregningerne blev:

Kappehøjde:

- Den årlige nettoydelse kan forøges ved at gøre kappen højere end for de markedsførte tanke.

Placering af udløb til sidearm:

- Udløbet til sidearmen bør placeres i tanken, således at det ønskede maksimale suppleringsvolumen svarer til det volumen, der befinder sig over udløbet.

Effekt fra elpatron:

- Effekten fra elpatronen kan være på mellem 1 til 5 kW, uden at der er nogle nævneværdige forskelle i den årlige nettoydelse.

Indløbstemperatur fra sidearm:

- Indløbstemperaturen fra sidearm til lagertank skal helst ligge så tæt på den ønskede varmtvandstemperatur som muligt. Den årlige nettoydelse falder, hvis indløbstemperaturen er meget højere end den ønskede varmtvandstemperatur.

Styresystemets nedre grænse for energiindhold i lagertank:

- Den nedre grænse for energiindholdet i lagertanken skal ligge så tæt på energiindholdet af den mængde varmt vand, der ønskes tappet. Hvis der med den supplerende energikilde bliver varmet op til et for højt energiindhold falder den årlige nettoydelse.

Volumenstrøm i sidearm:

- Den mest optimale volumenstrøm i sidearmen er 1,7 l/min med en effekt fra elpatronen på 1,2 kW.

Beholdervolumen:

- Med et dagligt forbrug på 160 l/dag er det mest optimalt med et beholdervolumen på 150-200 l.

I afsnit 5.3 blev der foretaget en række beregninger for at optimere beholderudformning og driftsstrategi for det intelligente solvarmeanlæg med to interne elpatroner. Resultatet af beregningerne blev:

Kappehøjde:

- Den årlige nettoydelse kan forøges ved at gøre kappen højere end for de markedsførte tanke.

Placering af indløb til det lodrette rør:

- Indløbet til det lodrette rør bør placeres i tanken, således at det ønskede maksimale suppleringsvolumen svarer til det volumen, der befinder sig over indløbet.

Effekt fra elpatron:

- Effekten fra elpatronen kan være på mellem 1 til 5 kW, uden at der er nogle nævneværdige forskelle i den årlige nettoydelse.

Udløbstemperatur fra lodret rør:

- Udløbstemperaturen fra det lodrette rør til lagertanken skal helst ligge så tæt på den ønskede varmtvandstemperatur som muligt. Den årlige nettoydelse falder, hvis udløbstemperaturen er meget højere end den ønskede varmtvandstemperatur.

Styreform: Energistyring eller temperaturstyring:

- Hvis der opvarmes lige præcis nok til at dække det ønskede varmtvandsforbrug, så er den årlige nettoydelse uafhængig af om der benyttes energistyring eller temperaturstyring.

Nedre grænse for styresystem ved hhv. energi- og temperaturstyring:

- Den nedre grænse for energiindholdet i lagertanken skal ligge så tæt på energiindholdet af den mængde varmt vand, der ønskes tappet. Hvis der med den supplerende energikilde bliver varmet op til et for højt energiindhold falder den årlige nettoydelse lidt. Ved temperaturstyring er meget vigtigt at sætte minimumstemperaturen tæt på den ønskede varmtvandstemperatur. Den årlige nettoydelse falder drastisk, hvis minimumstemperaturen sættes for højt i forhold til den ønskede varmtvandstemperatur. Samtidig er det vigtigt ved temperaturstyring, at det volumen, der bliver opvarmet, ikke er meget større end det volumen, der ønskes tappet.

Volumenstrøm i lodret rør:

- Den mest optimale volumenstrøm i det lodrette rør er 1,6 l/min med en effekt fra den lodrette elpatron på 1,2 kW.

Beholdervolumen:

- Med et dagligt forbrug på 160 l/dag er det mest optimalt med et beholdervolumen på ca. 200 l.

Det ses, at den optimale beholderudformning og driftsstrategi stemmer meget godt overens mellem de to typer intelligente solvarmeanlæg.

6 Intelligente solvarmeanlæg i praksis

Der er gennemført målinger på to små intelligente solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning opført i enfamiliehuse. Anlæggenes varmtvandsbeholdere er specialfremstillede idet to markedsførte beholdere er bygget om, således at de ligner de testede lagertanke 2 og 6 i Figur 1-1. En lagertank af typen Danlager 1000 fra Nilan A/S er ombygget således at dens opvarmningsprincip ligner princippet i lagertank 6. En lagertank af typen BWS-165 E fra AquaHeat A/S er ombygget således at opvarmningsprincippet ligner princippet i lagertank 2. Solvarmeanlæggene er installeret hos familier i Næstved og Køge, der i forvejen har el som primær opvarmningsform. Solvarmeanlæggene er installeret i april 2000 af lokale solvarmeautoriserede VVS-installatører. Ingen af anlæggene er forsynet med cirkulationsledning.

Tabel 6-1 viser familiernes sammensætning og størrelse samt en række fysiske parametre for solvarmeanlæggene.

Figur 6-1 til Figur 6-4 viser billeder af solfangeren på tagfladen samt lagertanken i Næstved og i Køge. Billederne viser tydeligt bevoksningen omkring husene.

Figur 6-5 viser en principskitse af solvarmebeholderne mens Figur 6-6 viser hvor solvarmeanlæggene er lokaliseret samt lokaliteten af den klimastation hvor vejrdata er målt.

Lokalitet	Næstved	Køge
Opførelsestidspunkt	April 2000	April 2000
Måleperiode	April 2000 – marts 2001	April 2000 – oktober 2000
Familietype	Ældre ægtepar uden hjemmeboende børn.	Yngre ægtepar med hjemmeboende børn.
Antal voksne	2	2
Antal børn	0	3
Solfangertype	AE-32 Thermo-Sol ApS.	BA 30 xx Batec A/S
Solfangerareal	2,78 m ²	3,00 m ²
Tagfladens orientering	Syd	Syd
Tagfladens hældning	25°	45°
Skygge	Stik syd er der ingen skyggegivere. Mod øst og vest er der høje træer der afhængig af tid på året samt tidspunkt på dagen vil reducere solindfaldet på solfangeren.	Der er ingen skyggegivere af betydning for solindfaldet på solfangeren.
Varmtvandsbeholder	Danlager 1000 med vandret og lodret elpatron Nilan A/S	BWS 165 E med sidearm AquaHeat A/S
Beholdertype	Kappebeholder	Kappebeholder
Beholdervolumen/kappevolumen	189 l / 7 l	165 l / 5 l
Supplerende energikilde	En vandret og en lodret elpatron	En elpatron indbygget i en dyklomme i bunden af sidearmen
Effekt fra supplerende energikilde	Vandret: 1200 W Lodret: 1200 W	1500 W
Placering af sidearm/volumen over vandret og lodret elpatron	0,032 m ³ vand er placeret over den vandrette elpatron. 0,017 m ³ vand er placeret over toppen af den lodrette elpatron mens 0,082 m ³ vand er placeret over bunden af den lodrette	0,067 m ³ vand er placeret over indløb til plastrør. Indløbet fra sidearmen til varmtvandsbeholderen er placeret i toppen af beholderen

	elpatron	
Dimension af sidearm		Sidearmen er udført i 3/4" rustfrie stålør fra bunden af tanken til toppen af tanken mens den del af sidearmen der befinder sig i tanken er udført i plastmaterialet POM med lysningsdimensionen 1". Godstykkelsen af POM-røret er 20 mm
Varmtvandsbeholderens placering	Varmtvandsbeholderen er placeret på loftet lige under en uisoleret tagflade. I oktober 2000 er der anbragt en ekstra isoleringskasse omkring lagertanken.	Varmtvandsbeholderen er placeret i fyrrummet på husets nordside.
Styresystem	• DTF 2200 solfangerstyring • DTF 2201 kontrolboks for stavtermometer • DTT 2202 stavtermometer, aktiv længde 450 mm med 10 følere • PTC temperaturfølere til solfangerstyringen	• DTF 2200 solfangerstyring • DTF 2201 kontrolboks for stavtermometer • DTT 2202 stavtermometer, aktiv længde 450 mm med 10 følere • PTC temperaturfølere til solfangerstyringen
Producent af styresystem	Danotek	Danotek

Tabel 6-1: Data for de installerede solvarmeanlæg.



Figur 6-1: Solvarmeanlægget i Næstved: På taget ses solfangeren fra Thermo-Sol ApS med et transparent areal på 2,78 m².



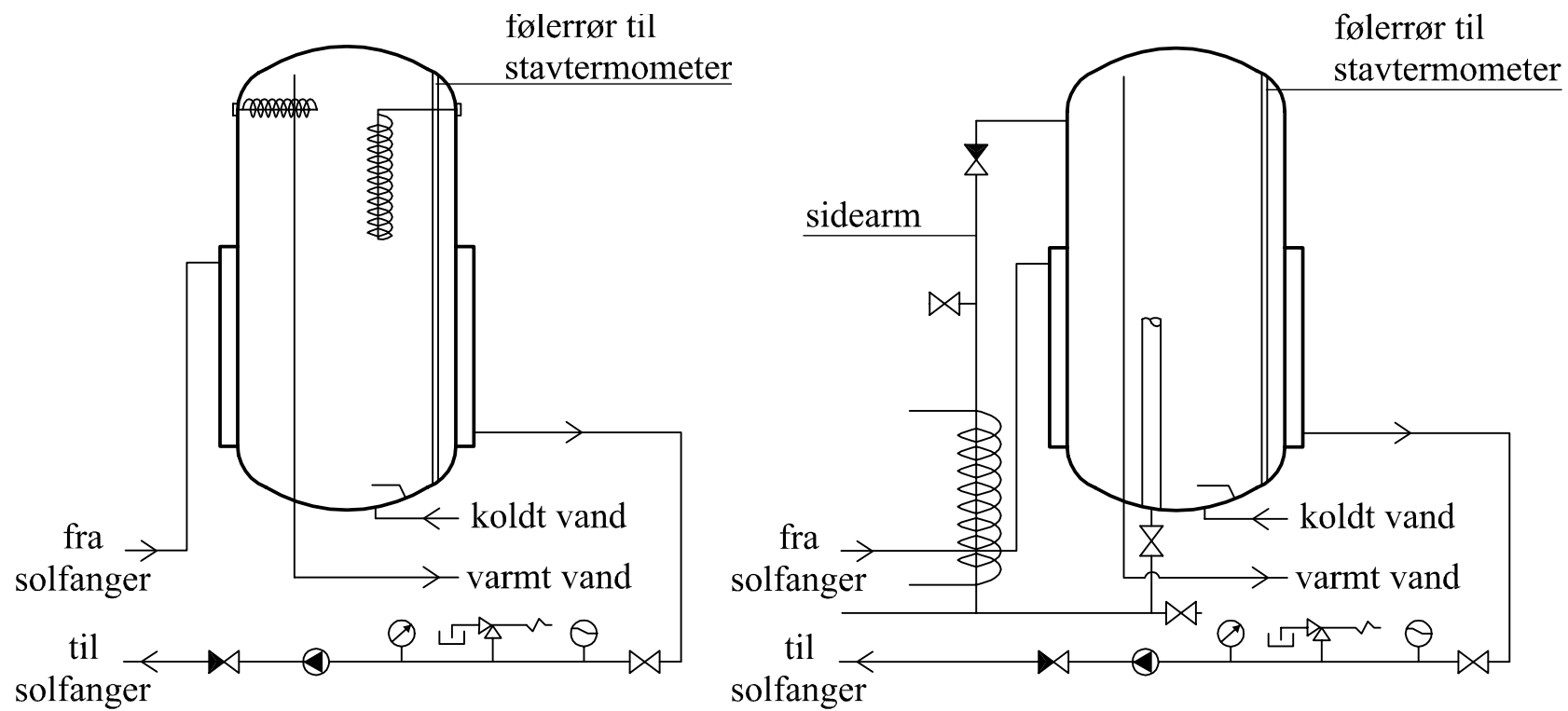
Figur 6-2: Solvarmeanlægget i Næstved: På loftet under den uisolerede tagflade ses varmtvandsbeholderen fra Nilan A/S. Der er anbragt en ekstra isoleringskasse omkring beholderen i oktober 2000.



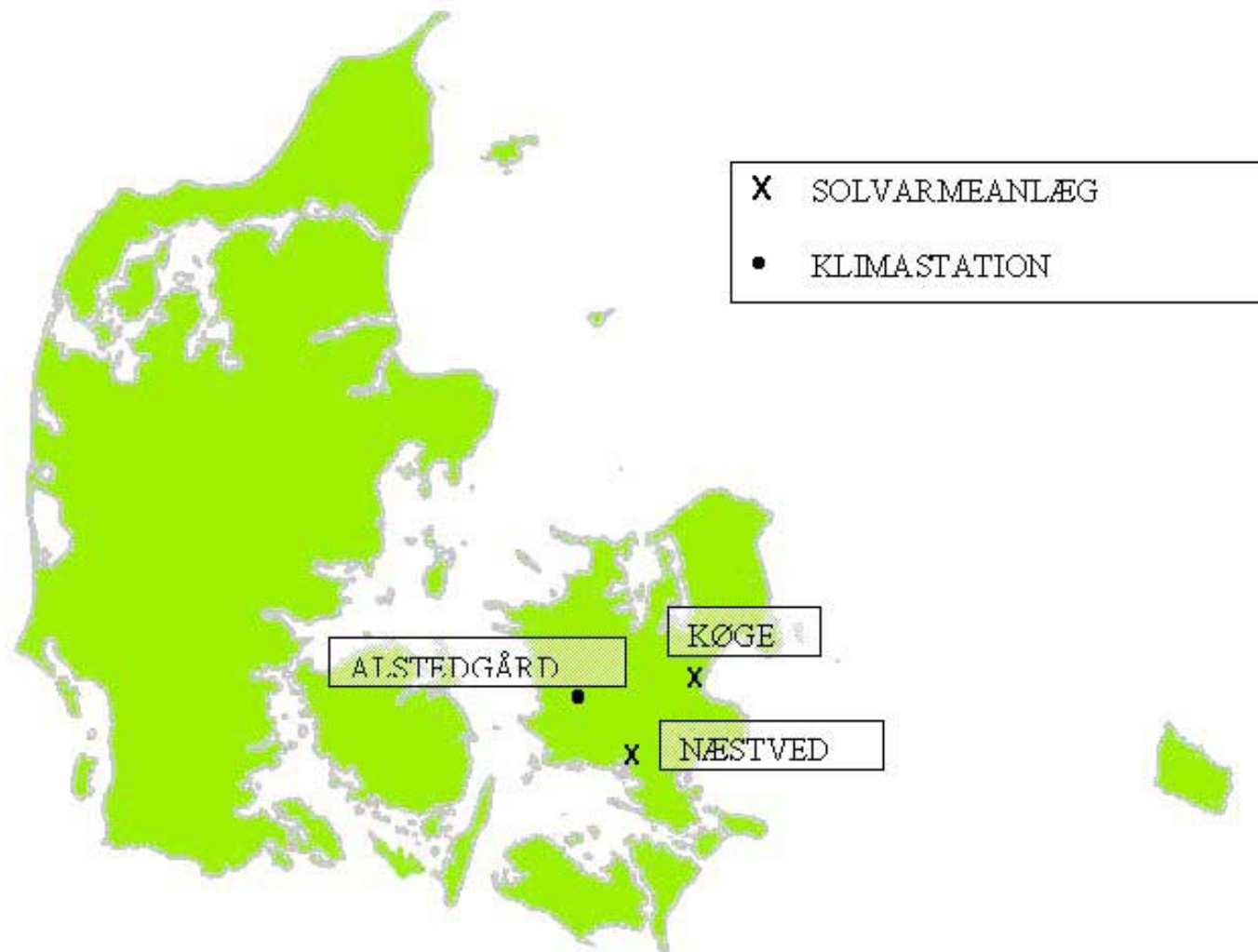
Figur 6-3: Solvarmeanlægget i Køge: På taget ses solfangeren fra Batec A/S med et transparent areal på 3,00 m².



Figur 6-4: Solvarmeanlægget i Køge: I fyrrummet på husets nordside ses varmtvandsbeholderen fra AquaHeat A/S.



Figur 6-5: Principskitse af de to solvarmebeholdere. Til venstre ses beholderen til anlægget i Næstved. Til højre ses beholderen til anlægget i Køge.



Figur 6-6: Lokalisering af de undersøgte solvarmeanlæg og klimastationen.

6.1 Intelligent styresystem

Solvarmeanlæggene er udstyret med et nyudviklet styresystem. Firmaet Danotek har udviklet det nye styresystem som er afprøvet på DTU [17]. Styresystemet består af en traditionel solfangerstyring samt en intelligent styring af en eller to supplerende energikilder.

Styresystemet består af følgende komponenter:

- DTF2200 solfangerstyring
- PTC temperaturfølere til solfangerstyringen
- DTF2201 kontrolboks for stavtermometer
- DTT2202 stavtermometer med temperaturfølere pr. 45 mm, aktiv længde afhænger af højden af det supplerende volumen. Stavtermometeret dækker hele det supplerende volumen.

Solfangerstyringen er en temperaturdifferensstyring med en temperaturføler anbragt i toppen af solfangeren med god termisk kontakt til absorberen samt en temperaturføler anbragt i bunden af kappen i et dykrør, ligeledes med god termisk kontakt til dykrøret. Styresystemet bruger endvidere føleren i bunden af kappen til overstyring af pumpen i solkredsen hvis temperaturen i bunden af kappen bliver for høj. Sidstnævnte foranstaltning er for at forhindre en overophedning af vandet i lagertanken.

Den intelligente del af styresystemet består af et stavtermometer der føres ind igennem toppen af beholderen således at temperaturerne i den supplerende del af varmtvandsbeholderen detaljeret kan måles samt en timerstyring af den supplerende energitilførsel. Ud fra de målte temperaturer udregnes energiindholdet i lagertanken. Energiindholdet er defineret som energiindholdet af brugsvand med temperatur større end 50°C. Hvis energiindholdet af brugsvand med temperatur over 50°C er for lille til at dække varmtvandsforbruget med en minimum tappetemperatur på 50°C og hvis forskellen mellem den aktuelle tid og det forventede, af brugeren indtastede, tappetidspunkt svarer til tidsforbruget ved opvarmning af den ønskede energimængde fra 10°C – 50°C aktiveres den supplerende energitilførsel. I dette tidsrum sørger den eller de supplerende energikilder for at opbygge og opretholde det ønskede energiniveau.

Det er forbrugernes varmtvandsforbrug der lægges til grund for styringen. Via en kontrolboks kan forbrugeren angive hvornår der skal tappes varmt vand samt hvor meget varmt vand der skal tappes. Det er muligt at angive 4 tapninger à maksimalt det maksimale supplerende volumens størrelse. Herudover er det muligt at angive en grundmængde, dvs. en vandmængde der altid skal være tilstede i et angivet tidsrum, f.eks. fra klokken 10:00 til klokken 21:00. Hvis forbruget og forbrugsmønstret af den ene eller anden årsag ikke passer med det angivne bør der naturligvis foretages en tilpasning. Hvis det blot en sjælden gang falder udenfor det angivne forbrug, er systemet endvidere udstyret med en straksvandfunktion der, når den aktiveres, straks indleder opvarmning af en angivet %-del af det supplerende volumen. Når opvarmningen er slut nulstilles straksvandfunktionen automatisk. Alle vandmængder angives i styresystemet som %-del af det maksimale supplerende volumen.

6.2 Målesystem

Til verificering af driften af anlæggene er der i solkredsen installeret energimålere fra Clorius type Q1 – 5EC mens der i brugsvandskredsen er installeret energimålere fra Clorius type Sensonic 1,5 . Målerne består af flowmåler til måling af den gennemstrømmede væskemængde samt af to temperaturfølere anbragt i dykrør i henholdsvis den varme og den kolde del af kredsen. Målerne er forsynet med elektroniske enheder der ved hjælp af de målte størrelser beregner energimængderne der passerer kredsen. Energi- og væskemængderne udlæses på energimålerens display. På displayet er det endvidere muligt at aflæse volumenstrømmen i kredsen.

Ved hjælp af målerne måles varmtvandsforbruget og energimængden, som tappes fra anlæggets varmtvandsbeholder samt energimængden som overføres fra solkredsen til varmtvandsbeholderen. Væsken i solfangerkredsen består af en glykol-vand blanding. Den af energimålerne beregnede energimængde er baseret på specifikke værdier for vand. Derfor er den målte energimængde som overføres fra solkredsen til varmtvandsbeholderen korrigeret for solfangervæskens større densitet og mindre varmekapacitet.

Solkredsens cirkulationspumpe er forsynet med en timetæller der registrerer pumpens driftstid. Det supplerende energiforbrug måles med en kilowatt-time måler.

Ved små varmtvandstapninger bevirker temperaturfølernes inertie, at den målte tappede energimængde er noget mindre end den faktisk tappede energimængde. Da mønsteret for varmtvandsforbruget ikke kendes detaljeret er det ikke muligt at angive den nøjagtige størrelse af denne systematiske målefejl. Målefejlen er lille ca. 1% – 3% ved store varmtvandstapninger mens den er betragteligt større ca. 15% – 20% ved små varmtvandstapninger på 6 – 10 liter. Det vurderes at den systematiske målefejl resulterer i, at den reelle tappede energimængde er ca. 10% højere end den målte tappede energimængde. De benyttede temperaturfølere er af typen PT 500.

Solvarmeanlæggets nettoydelse bestemmes ud fra målingerne som den fra varmtvandsbeholderen tappede energimængde minus den til varmtvandsbeholderen tilførte supplerende energimængde. Energiforbrug til brugsvandsopvarmning er lig med den fra varmtvandsbeholderen tappede energimængde. Solvarmeanlæggets dækningsgrad defineres som forholdet mellem nettoydelsen og den tappede energimængde fra varmtvandsbeholderen.

Alle målerne aflæses en gang om ugen af beboerne og et skema med de aflæste værdier sendes ved udgangen af hver måned til Institut for Bygninger og Energi (BYG.DTU fra 2001).

Ved bedømmelse af anlægsydelse benyttes de af Energi- og Miljødata, EMD målte vejrdata for klimastationen Alstedgård, som ligger midt imellem Køge og Næstved, se Figur 6-6.

6.3 Målinger

6.3.1 Måleresultater

Solvarmeanlægs ydelser afhænger først og fremmest af varmtvandsforbrugets størrelse. For intelligente solvarmeanlæg spiller varmtvandsforbrugets størrelse en langt mindre rolle for ydelsen end for traditionelle solvarmeanlæg når styringen af anlægget er afpasset det faktiske forbrug.

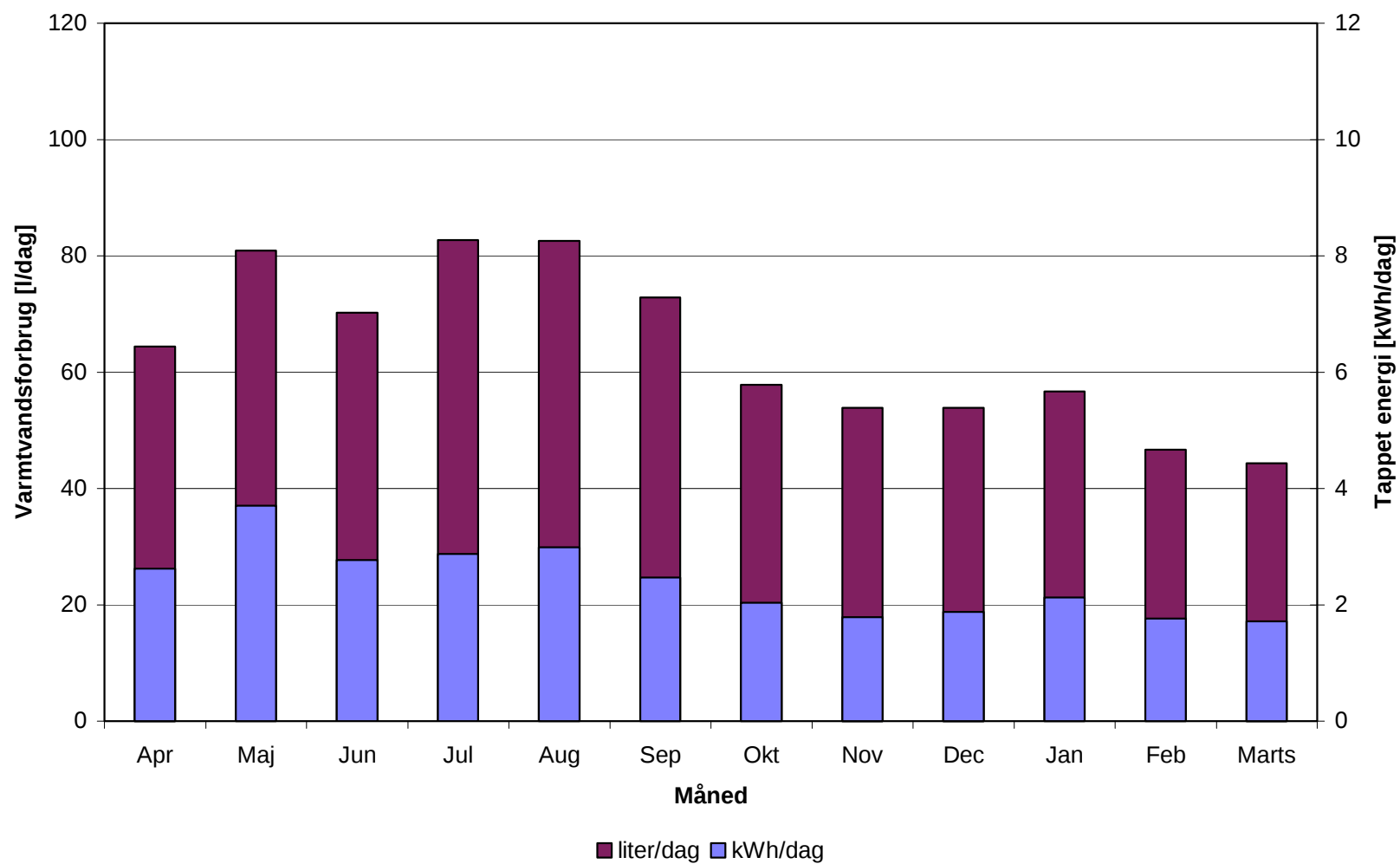
I Tabel 6-2 er angivet målte gennemsnitlige varmtvandsforbrug og tappede energimængder samt gennemsnitlige forskelle mellem koldt vandstemperaturen og temperaturen af det tappede varme vand igennem hele måleperioden.

Solvarmeanlæg	Næstved 2,78 m ² 2 beboere	Køge 3,00 m ² 5 beboere
Varmtvandsforbrug	64 liter/dag 32 liter/dag person 23 liter/dag m ²	94 liter/dag 19 liter/dag person 31 liter/dag m ²
Tappet energi	2 kWh/dag	4,95 kWh/dag
Opvarmning af brugsvand	27 K	45 K

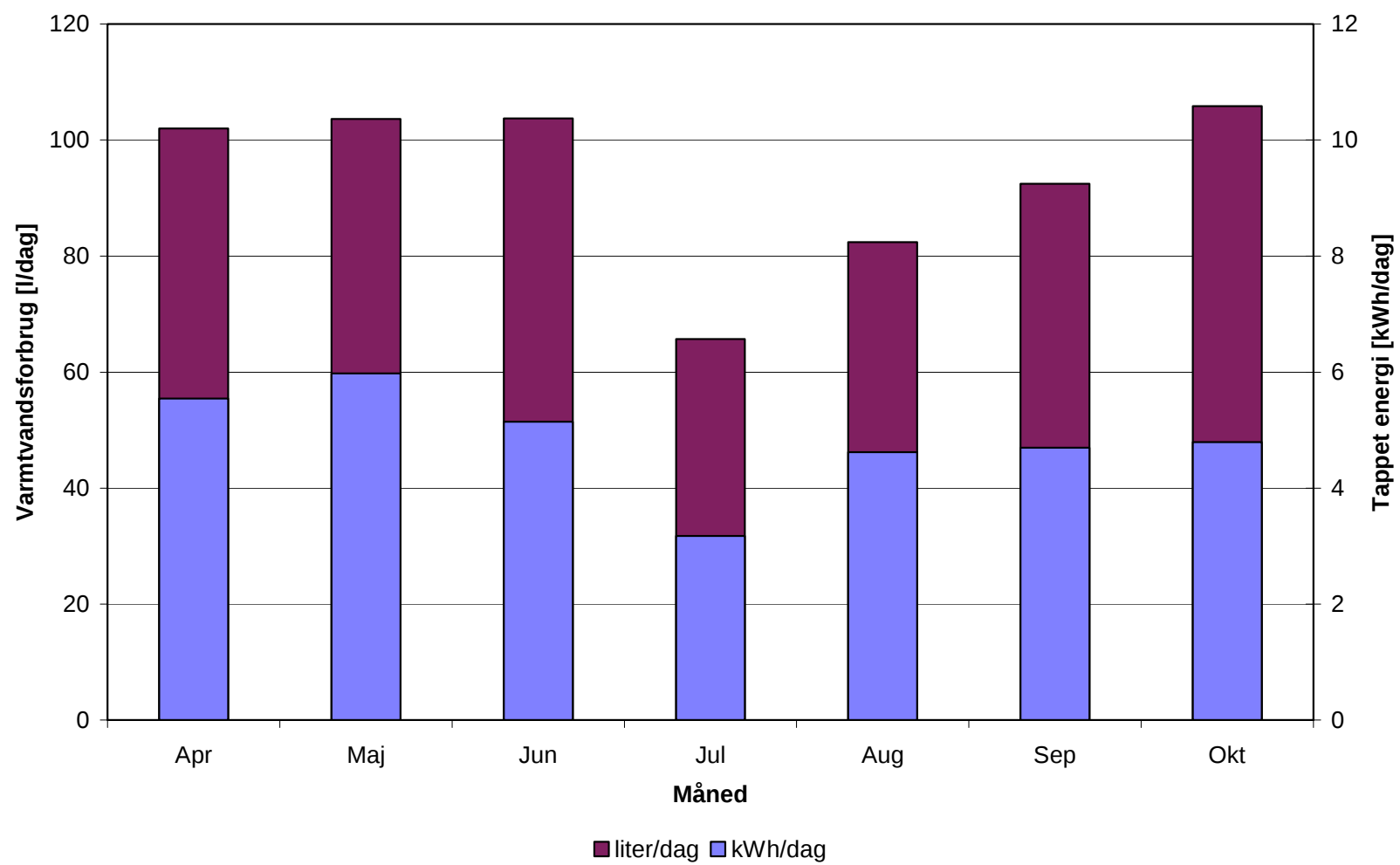
Tabel 6-2: Målte gennemsnitlige varmtvandsforbrug og tappet energimængder og opvarmning af brugsvandet.

Varmtvandsforbruget er meget lavt for begge solvarmeanlæggene. Et veldimensioneret solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning har et varmtvandsforbrug på 50 l/dag pr. m² solfanger. Ud fra denne betragtning er begge solvarmeanlæg altså overdimensionerede, hvorfor forholdsvis små anlægsydelse pr. m² solfanger må forventes.

Variationen af varmtvandsforbruget gennem året har naturligvis stor indflydelse på anlægsydelsen. Figur 6-7 og Figur 6-8 viser det gennemsnitlige daglige varmtvandsforbrug og den gennemsnitlige daglige tappede energimængde måned for måned igennem måleperioden. Det ses at både det daglige varmtvandsforbrug og den daglige tappede energimængde varierer gennem året.



Figur 6-7: Målte gennemsnitlige varmtvandsforbrug og tappede energimængder pr. dag for 2,78 m² anlægget i Næstved.



Figur 6-8: Målte gennemsnitlige varmtvandsforbrug og tappede energimængder pr. dag for 3,0 m² anlægget i Køge.

Solvarmeanlæggenes ydelser afhænger naturligvis også stærkt af solindfaldet. Den målte globalstråling ved klimastationen Alstedgård igennem måleperioden samt globalstrålingen i referenceårene TRY og DRY fremgår af Tabel 6-3.

Periode	Målestation Alstedgård	Globalstråling kWh/m ²	
		Referenceår	
		Test Reference Year, TRY	Design Reference Year, DRY
April 00	119	119	114
Maj 00	186	155	163
Juni 00	161	186	165
Juli 00	140	161	160
August 00	128	135	134
September 00	82	83	82
Oktober 00	39	44	43
November 00	16	19	19
December 00	11	12	10
Januar 01	13	13	16
Februar 01	36	33	32
Marts 01	77	59	65
April 00 – marts 01	1008	1018	1002

Tabel 6-3: Målt globalstråling på klimastationen Alstedgård samt globalstrålingen i referenceårene TRY og DRY.

Det ses at det samlede solindfald ved målestationen Alstedgård i perioden april 00 – marts 01 svarer til solindfaldet i det danske DRY. Fordelingen af solindfaldet måned for måned er dog ikke den samme som i referenceåret DRY.

Ved vurdering af anlægsydelse er der i det følgende regnet med at solindfaldet ved anlæggene har været lig med solindfaldet ved klimastationen.

På basis af de målte vejrdata, af solfangernes orientering og hældning er størrelsen af det totale solindfald på solfangerne bestemt for hver enkelt måned i måleperioden. De herved ”målte” solindfald på solfangerne er angivet i Tabel 6-4. Det skønnes at nøjagtigheden på de ”målte” solindfald er $\pm 5\%$. Desuden er solindfaldet på solfangerne i referenceårene DRY og TRY angivet.

Periode	Totalt solindfald på solfangeren, kWh/m ²					
	Næstved 2,78 m ² , 25°, syd			Køge 3,00 m ² , 45°, syd		
	”Målt”	TRY	DRY	”Målt”	TRY	DRY
April 00	132	132	126	131	131	126
Maj 00	193	161	170	183	152	160
Juni 00	163	188	167	151	174	154
Juli 00	144	165	164	134	154	153
August 00	137	144	143	132	139	138
September 00	94	95	94	96	97	96
Oktober 00	49	56	55	54	61	59
November 00	22	27	27	-	-	-
December 00	17	19	16	-	-	-
Januar 01	20	20	24	-	-	-
Februar 01	47	44	42	-	-	-
Marts 01	90	69	76	-	-	-
April 00 – oktober 00	912	941	919	881	908	886
April 00 – marts 01	1108	1120	1104	-	-	-

Tabel 6-4: Totalt solindfald på solfangerne – målte størrelser fremhævet og størrelser fra referenceårene.

Det ses at solindfaldet, i perioden hvor der måles på begge anlæg, er størst for anlægget i Næstved med en solfangerhældning på 25°. Forskellen i solindfald er dog forholdsvis lille for de to anlæg.

De målte størrelser for de to anlæg fremgår af Tabel 6-5 og Tabel 6-6. Målte gennemsnitlige varmtvandsforbrug og driftstider for cirkulationspumpen samt energimængder, som er tappet fra anlægget og tilført til anlægget er angivet. Desuden er solvarmeanlæggets nettoydelse og dækningsgrad angivet. Nettoydelsen er defineret som: energi tappet fra lageret – supplerende energi tilført lageret. Dækningsgraden er defineret som: forholdet mellem nettoydelsen og energien tappet fra lageret.

Måleresultaterne er endvidere sammenfattet i Tabel 6-7, som viser varmtvandsforbrug og ydelser samt udnyttelsen af solindfaldet defineret som forholdet mellem nettoydelsen og det totale solindfald på solfangeren i måleperioderne.

Tabel 6-8 og Tabel 6-9 viser styresystemets indstillinger igennem måleperioden for anlæggene.

Periode	Varmtvandsforbrug		Gennemsnitlig tid for solpumpe	Energi tappet fra soltank	Supplerende energi	Nettoydelse		Dæknings grad
	l/dag	l/dag/m ²				kWh	kWh/m ²	
April 00	64	23	18	72	25	47	17	65
Maj 00	81	29	12	115	18	97	35	85
Juni 00	70	25	20	83	14	69	25	84
Juli 00	83	30	23	89	16	73	26	82
Aug. 00	83	30	8	93	11	82	29	88
Sep. 00	73	26	4	74	19	55	20	74
Okt. 00	58	21	2	63	42	21	7	33
Nov. 00	54	19	0,4	54	65	-12	-4	-22
Dec. 00	54	19	0,3	58	75	-17	-6	-29
Jan. 01	57	20	0,5	64	72	-9	-3	-14
Feb. 01	47	17	2	49	48	1,5	0,5	3
Mar. 01	44	16	2	53	36	17	6	33
Apr. 00 – Marts 01	64	23	8	867	441	425	153	49

Tabel 6-5: Målte varmtvandsforbrug, ydelser og energiforbrug for 2,78 m² anlægget i Næstved.

Periode	Varmtvandsforbrug		Gennemsnitlig tid for solpumpe	Energi tappet fra soltank	Supplerende energi	Nettoydelse		Dæknings grad
	l/dag	l/dag/m ²				kWh	kWh/m ²	
April 00	102	34	11	147	66	81	27	55
Maj 00	104	35	12	185	42	143	48	77
Juni 00	104	35	12	154	62	92	31	60
Juli 00	66	22	10	98	57	41	14	42
Aug. 00	82	27	10	143	83	60	20	42
Sep. 00	92	31	6	141	83	58	19	41
Okt. 00	106	35	4	149	134	15	5	10
April 00 – Okt. 00	94	31	9	1017	527	490	163	48

Tabel 6-6: Målte varmtvandsforbrug, ydelser og energiforbrug for 3,00 m² anlægget i Køge.

Anlæg lokalitet solfangerareal	Periode	Varmtvands forbrug		Gennemsnit -lig tid for solpumpe	Energi tappet fra lageret	Energi tilført fra elpatron	Solindfald på solfanger		Solvarmeanlæggets nettoydelse		Dæknings- grad	Udnyttelse af solindfaldet
		l/dag	l/m ² dag				kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²		
Næstved 2,78 m ²	April 00 – Marts 01	64	23	7	867	442	3080	1108	425	153	49	14
Køge 3,00 m ²	April 00 – Oktober 00	94	31	9	1017	527	2643	881	490	163	48	19

Tabel 6-7: Målte varmtvandsforbrug og ydelser samt udnyttelser af solindfald for de to anlæg i måleperioderne.

Dato	Grundopvarmning			1. opvarmning		2. opvarmning		3. opvarmning		4. opvarmning	
	Start- tidspunkt for grund- opvarmning	Slut- tidspunkt for grund- opvarmning	%-del af det supplerende volumen på 82 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 82 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 82 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 82 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 82 liter der opvarmes
	kl.	kl.	%	kl.	%	kl.	%	kl.	%	kl.	%
03.04.00	7:00	22:00	10	8:00	40	12:30	13	17:30	13	-	-
07.04.00	7:00	22:00	10	8:00	20	12:30	13	17:30	40	-	-
23.10.00	7:00	22:00	10	8:00	20	12:30	0	17:30	20	-	-

Tabel 6-8: Forbrugsmønster for 2,78 m² solvarmeanlægget i Næstved.

Dato	Grundopvarmning			1. opvarmning		2. opvarmning		3. opvarmning		4. opvarmning	
	Start- tidspunkt for grund- opvarmning	Slut- tidspunkt for grund- opvarmning	%-del af det supplerende volumen på 67 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 67 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 67 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 67 liter der opvarmes	Forventet tappe- tidspunkt	%-del af det supplerende volumen på 67 liter der opvarmes
	kl.	kl.	%	kl.	%	kl.	%	kl.	%	kl.	%
18.04.00	6:00	24:00	20	6:00	100	15:00	40	18:30	90	20:00	50

Tabel 6-9: Forbrugsmønster for 3,00 m² solvarmeanlægget i Køge.

6.4 Vurdering af solvarmeydelser

For at vurdere om anlægsydelse er så høje som det kan forventes, er der foretaget ydelsesberegninger for anlæggene med vejrdata fra referenceåret TRY. Ydelsesberegningerne er foretaget med programmet [8]. Programmet er tilpasset intelligent styring. Beregningsprogrammet kræver nøje kendskab til udformningen og driften af solvarmeanlæggene. Desværre kendes en del af de vigtigste data for solvarmeanlæggene kun med en vis usikkerhed. Eksempler på sådanne data er:

- Varmetabskoefficienten for den øverste del af varmtvandsbeholderen.
- Tappemønstret. I beregningerne forudsættes det samme daglige varmtvandsforbrug igennem hele året. Det forudsættes at koldt vandtemperaturen altid er 10°C og at det tappede varme vand altid er 50°C. Endvidere forudsættes det at der hver dag kl. 7, 12 og 19 tages 1/3 af det daglige varmtvandsforbrug.

Tabel 6-10 viser data for de to solvarmeanlæg der er taget i beregning. Data er baseret på datablade for enkeltkomponenter samt de faktiske forhold hvor solvarmeanlæggene er installeret. Der er ikke taget hensyn til skygger i beregningerne selv om bevoksning og lignende har en reducerende virkning på solindfaldet på solfangeren i løbet af dagen på forskellige tider af året for anlægget i Næstved. I stedet er der efterfølgende ved hjælp af [16] foretaget en vurdering af hvor meget bevoksningen omkring solvarmeanlægget i Næstved reducerer solindfaldet på solfangeren og på baggrund af denne vurdering er der foretaget en skyggekorrektur. Resultatet af skyggekorrektur er vist i Figur 6-9 og Figur 6-10.

Tabel 6-11 viser de varmtvandsforbrug og forbrugsmønstre som er lagt til grund for beregningerne.

Lokalitet	Næstved	Køge
Anlægstype	Intelligent solvarmeanlæg med to interne elpatroner – en vandret og en lodret.	Intelligent solvarmeanlæg med en elpatron i en sidearm.
Solfanger		
Type	Thermo-Sol AE-32	Batec BA 30 xx
Areal	2,78 m ²	3 m ²
Effektivitetsudtryk	$\eta = 0,792 - 5,13 \cdot (T_m - T_a)/G$	$\eta = 0,756 - 4,87 \cdot (T_m - T_a)/G$
Indfaldsvinkelkorrektur	$K_g = 1 - \tan^4(i/2)$	$K_g = 1 - 0,15 \cdot (1/\cos(i/2))$
Varmekapacitet	7000 J/K m ²	7000 J/K m ²
Hældning	25°	45°
Orientering	Syd	Syd
Solfangerkreds		
Væske i solfangerkreds	40 vægt% propylenglykol/vand blanding	40 vægt% propylenglykol/vand blanding
Volumenstrøm i solkreds	0,5 l/min	0,5 l/min
Rørlængde	10 m	12,5 m
Varmekapacitet for rør	300 J/K m	300 J/K m
Varmetabskoefficient for rør	0,25 W/K m	0,25 W/K m
Cirkulationspumpens effektforbrug	30 W	30 W
Styresystem – solfangerkreds		
Differenstermostat med en temperaturføler i toppen af solfangeren og en i bunden af kappen.		
Start/stop differens	6 K/2 K	6 K/2 K

Varmtvandstank		
Beholdermateriale	Stål St 37-2	Rustfrit stål
Varmedledningsevne	60 W/m · K	15 W/m · K
Volumen	0,189 m ³	0,165 m ³
Højde/diameter	1,082/0,500 m	1,100/0,450 m
Godstykkelse	0,003 m	0,003 m
Kappe		
Volumen	0,007 m ³	0,005 m ³
Højde/diameter	0,345/0,525 m	0,500/0,470 m
Godstykkelse	0,003 m	0,00125 m
Placering	Kappen omslutter den nederste del af de lodrette sider på varmtvandstanken. De øverste 0,094 m ³ og de nederste 0,019 m ³ af varmtvandstanken er ikke omsluttet af kappen.	Kappen omslutter den nederste del af de lodrette sider på varmtvandstanken. De øverste 0,072 m ³ og de nederste 0,016 m ³ af varmtvandstanken er ikke omsluttet af kappen.
Supplerende energikilde		
Supplerende energikilde	To interne elpatroner, en placeret vandret i tanksvøbet og en placeret lodret jf. billedet til venstre i Figur 6-5.	En elpatron indbygget i bunden af sidearmen jf. billedet til højre i Figur 6-5.
Placering af sidearm		0,067 m ³ vand er placeret over udløbsrøret. Indløbet til varmtvandstanken er placeret i toppen af tanken.
Volumen af vand over den vandrette og den lodrette elpatron	0,032 m ³ vand er placeret over den vandrette elpatron. 0,082 m ³ vand er placeret over bunden af den lodrette elpatron mens 0,017 m ³ vand er placeret over toppen af den lodrette elpatron.	
Effekt fra elpatron	Vandret: 1200 W Lodret: 1200 W	1500 W
Volumenstrøm i sidearm		1,3 l/min
Styresystem – supplerende energikilde		
Styresystem	Den vandrette elpatron opvarmer de øverste 0,032 m ³ vand til 54°C hvorefter den lodrette elpatron overtager opvarmningen. De to elpatroner er i drift hvis energiindholdet af brugsvand med temperatur over 50°C er for lille til at dække varmtvandsforbruget med en minimum tappetemperatur på 50°C og hvis forskellen mellem den aktuelle tid og det forventede tappetidspunkt er mindre end den på styresystemet indstillede opvarmningstid, se Tabel 6-11.	Elpatronen er i drift hvis energiindholdet af brugsvand med temperatur over 50°C er for lille til at dække varmtvandsforbruget med en minimum tappetemperatur på 50°C og hvis forskellen mellem den aktuelle tid og det forventede tappetidspunkt er mindre end den på styresystemet indstillede opvarmningstid, se Tabel 6-11.
Isolering		
Isoleringsmateriale	PUR-skum	PUR-skum
Varmetabskoefficient – sidearm		0,1 W/K
Varmetabskoefficient – top	0,08 W/K	0,05 W/K
Varmetabskoefficient – side over kappe	0,79 W/K	0,57 W/K
Varmetabskoefficient – kappe	0,59 W/K	0,63 W/K
Varmetabskoefficient – bund	0,24 W/K	0,15 W/K

Varmetabskoefficient for beholder	1,7 W/K	1,5 W/K inkl. sidearm
Omgivelsestemperatur	20°C	20°C

Tabel 6-10: De benyttede data til beregning af ydelser for de to intelligente solvarmeanlæg installeret i praksis.

Varmtvandsforbrug pr. dag	Tappetidspunkt	Grundmængde	1. tapning	2. tapning	3. tapning
20 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	6,67 liter	6,66 liter	6,67 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 6:03 – 7:00	Kl. 11:03 – 12:00	Kl. 18:03 – 19:00
		0,686 kWh	0,305 kWh	0,305 kWh	0,305 kWh
40 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	13,33 liter	13,34 liter	13,33 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:51 – 7:00	Kl. 10:51 – 12:00	Kl. 17:51 – 19:00
		0,686 kWh	0,61 kWh	0,61 kWh	0,61 kWh
60 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	20 liter	20 liter	20 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:48 – 7:00	Kl. 10:48 – 12:00	Kl. 17:48 – 19:00
		0,686 kWh	0,915 kWh	0,915 kWh	0,915 kWh
80 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	26,67 liter	26,66 liter	26,67 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:42 – 7:00	Kl. 10:42 – 12:00	Kl. 17:42 – 19:00
		0,686 kWh	1,22 kWh	1,22 kWh	1,22 kWh
100 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	33,33 liter	33,34 liter	33,33 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:39 – 7:00	Kl. 10:39 – 12:00	Kl. 17:39 – 19:00
		0,686 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh	1,525 kWh
120 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	40 liter	40 liter	40 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:27 – 7:00	Kl. 10:27 – 12:00	Kl. 17:27 – 19:00
		0,686 kWh	1,83 kWh	1,83 kWh	1,83 kWh
140 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	46,67 liter	46,66 liter	46,67 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:14 – 7:00	Kl. 10:14 – 12:00	Kl. 17:14 – 19:00
		0,686 kWh	2,135 kWh	2,135 kWh	2,135 kWh
160 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	53,33 liter	53,34 liter	53,33 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 5:02 – 7:00	Kl. 19:02 – 12:00	Kl. 17:02 – 19:00
		0,686 kWh	2,44 kWh	2,44 kWh	2,44 kWh
180 liter	Kl. 7,12 og 19	15 liter	60 liter	60 liter	60 liter
		Kl. 7:00 – 22:00	Kl. 4:50 – 7:00	Kl. 9:50 – 12:00	Kl. 16:50 – 19:00
		0,686 kWh	2,745 kWh	2,745 kWh	2,745 kWh

Tabel 6-11: Beregningsmæssigt forbrugsmønster med varmtvandsforbrug, opvarmningstid og etableret energimængde før tapning. Under 1. til 3. tapning angiver 1. linje det tappede volumen, 2. linje angiver perioden hvor timeren tillader den supplerende energikilde at være aktiv mens 3. linje angiver energiindholdet der ønskes opbygget i lagertanken i opvarmningsperioden. Det opbyggede energiindhold svarer til energien af det tappede volumen opvarmet fra 10°C til 50°C.

De beregnede nettoydelser (= tappet energi – supplerende energi) er angivet måned for måned som funktion af det daglige varmtvandsforbrug pr. m² solfanger på Figur 6-9 til Figur 6-11.

På figurerne er de målte nettoydelser samt de målte nettoydelser korregeret for temperaturfølernes træghed i forbindelse med varmtvandstapningerne, angivet for hver måned. På baggrund af beregninger udført i [14] og [15] er der opstillet en sammenhæng mellem forholdet mellem faktisk solindfald og solindfaldet i referenceåret, anlæggets dækningsgrad og forholdet mellem nettoydelsen med det faktiske solindfald og nettoydelsen i referenceåret. På basis af de faktiske solindfald og referenceårets solindfald fra Tabel 6-4, har det herved været muligt at korrigere de målte nettoydelser samt de målte nettoydelser korregeret for temperaturfølernes træghed i forbindelse med varmtvandstapningerne, således at der på figurerne også er angivet ”målte” nettoydelser med referenceårets vejrdata. Disse ”målepunkter” kan sammenlignes direkte med de beregnede nettoydelser.

På Figur 6-12 er målte og beregnede nettoydelse for måleperioderne vist som funktion af det gennemsnitlige daglige varmtvandsforbrug. Desuden er vist referenceåret TRY's **"målte"** nettoydelse, som både er korrigeret for at det faktiske solindfald har været anderledes end referenceårets solindfald og temperaturfølernes træghed i forbindelse med varmtvandstapningerne. Disse "målepunkter" kan altså sammenlignes direkte med de beregnede nettoydelse.

På baggrund af Figur 6-9 til Figur 6-12 samt Tabel 6-5 til Tabel 6-7 vurderes det at solvarmeanlæggene yder lidt dårligere end forventet.

Anlægget i Køge yder dårligere end forventet, bl.a. fordi:

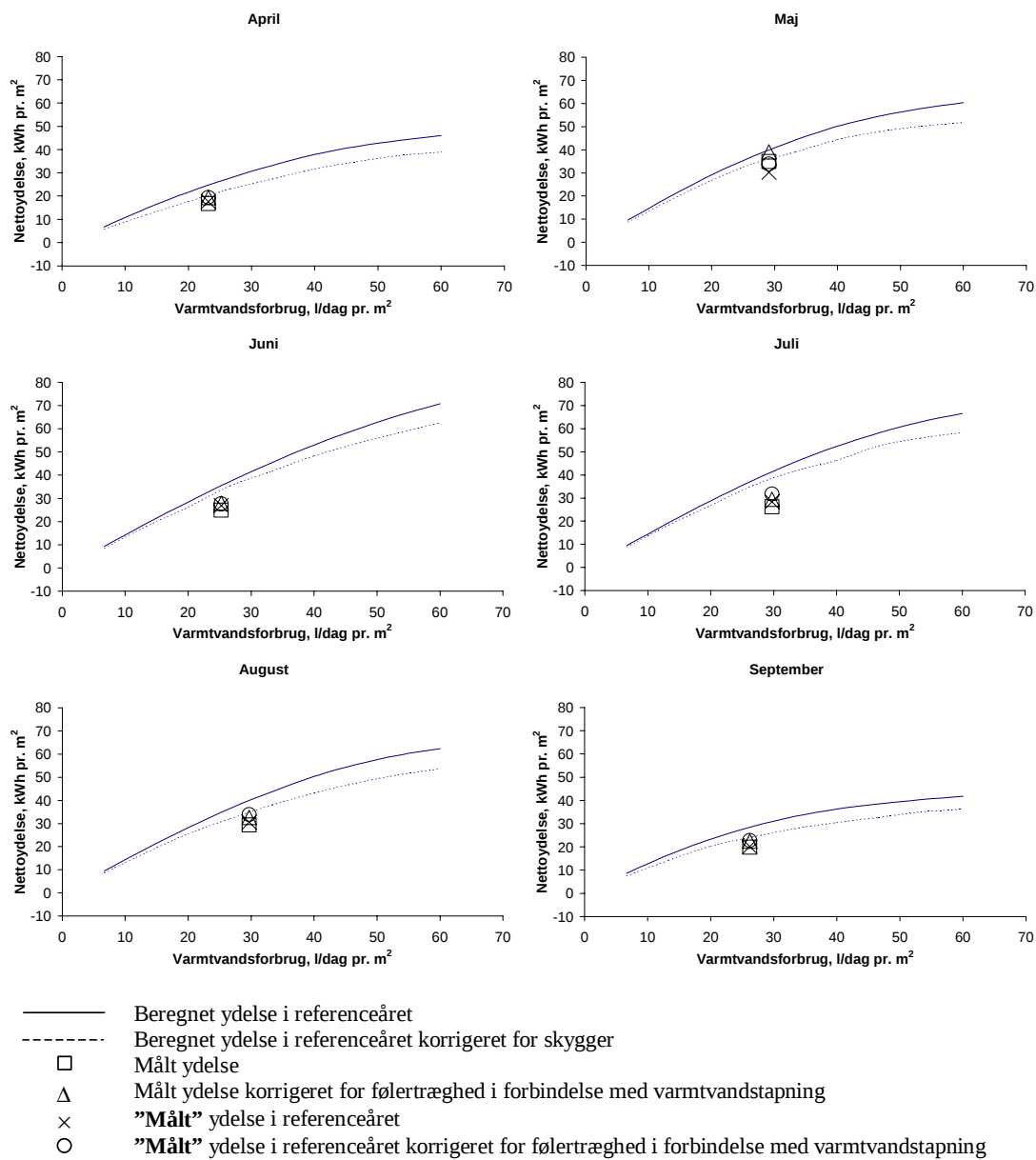
- da lagertanken til solvarmeanlægget ankom fra fabrikken var sidearmen ikke isoleret. Isoleringen af sidearmen blev foretaget på stedet af VVS-installatøren. Da anlægget blev inspiceret, blev det konstateret at sidearmen var mangelfulgt isoleret. VVS-installatøren foretog derfor yderligere en isolering af sidearmen. Sidearmen var imidlertid stadig ikke isoleret godt nok. Endvidere blev temperaturen undertiden så høj i sidearmen at noget af isoleringen smeltede. Det har vist sig at det er problematisk at isolere sidearmen tilstrækkelig på stedet. Sidearmen må nødvendigvis isoleres sammen med resten af beholderen på fabrikken og det må sikres at der inderst omkring sidearmen anbringes en isoleringstype der kan tåle høje temperaturer på over 70°C, f.eks. rockwool.
- stavtermometeret til registrering af temperaturerne i den supplerende del af varmtvandsbeholderen er ført ind i et dykrør der er anbragt i toppen af beholderen. Det giver anledning til en kuldebro i toppen af beholderen, som er det mest kritiske sted.
- der i starten af oktober måned blev konstateret en utæthed på beholderen. Det medførte at beholderisoleringen blev våd og dermed, at isoleringsevnen reduceredes.

Anlægget i Næstved yder dårligere end forventet, bl.a. fordi:

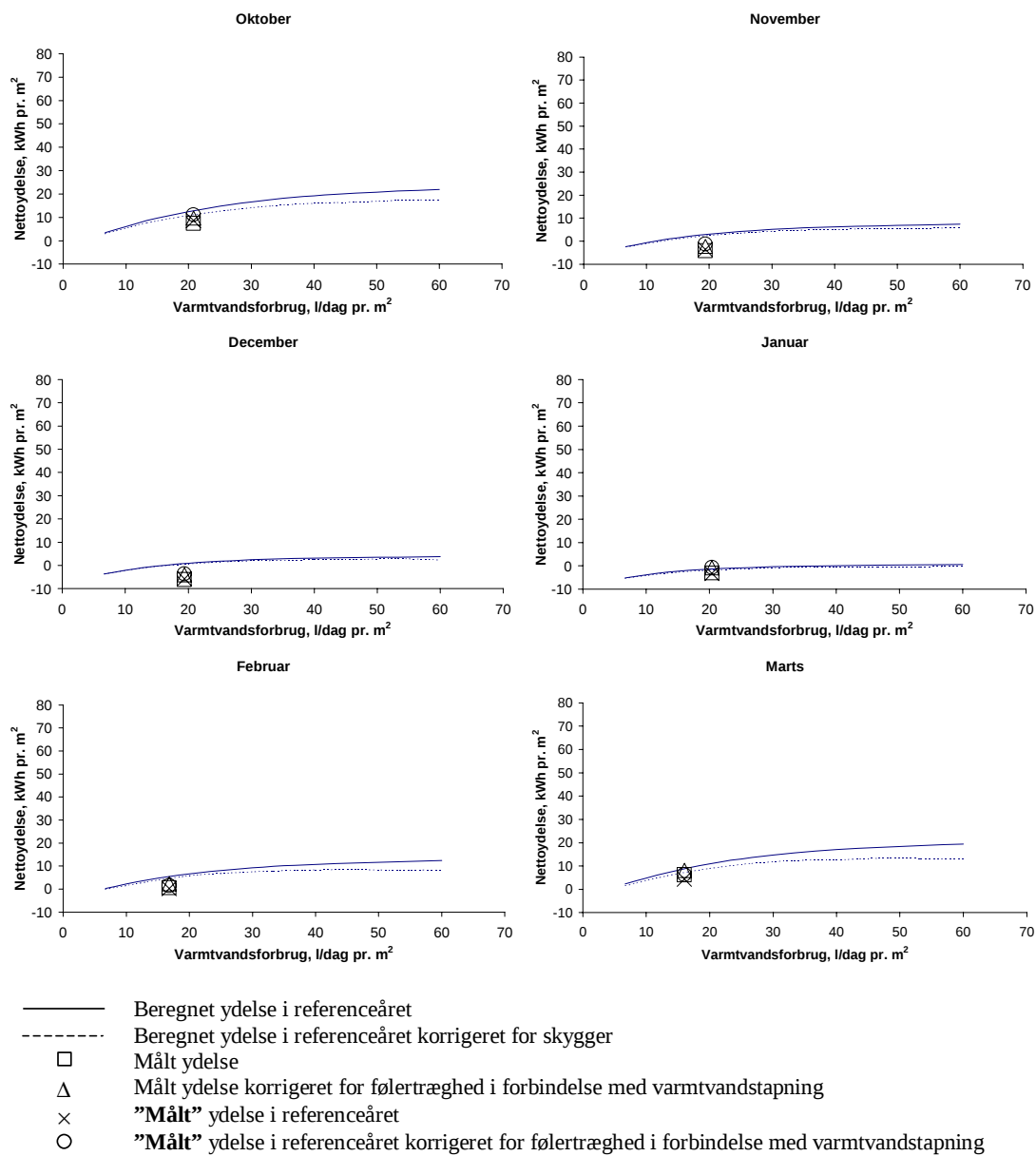
- der i juni og juli måned var problemer med styresystemet til solkredsen. Pumpen i solkredsen kørte konstant med stort energitab til følge. Problemet var en defekt temperaturføler i toppen af solfangeren.
- stavtermometeret til registrering af temperaturerne i den supplerende del af varmtvandsbeholderen er ført ind i et dykrør der er anbragt i toppen af beholderen. Det giver anledning til en kuldebro i toppen af beholderen, som er det mest kritiske sted.
- lagertanken er placeret lige under en uisolere tagflade. I slutningen af oktober måned blev der derfor anbragt en ekstra isoleringskasse omkring lagertanken for at reducere varmetabet fra lagertanken.

De lave anlægsydelse forklares desuden af følgende forhold:

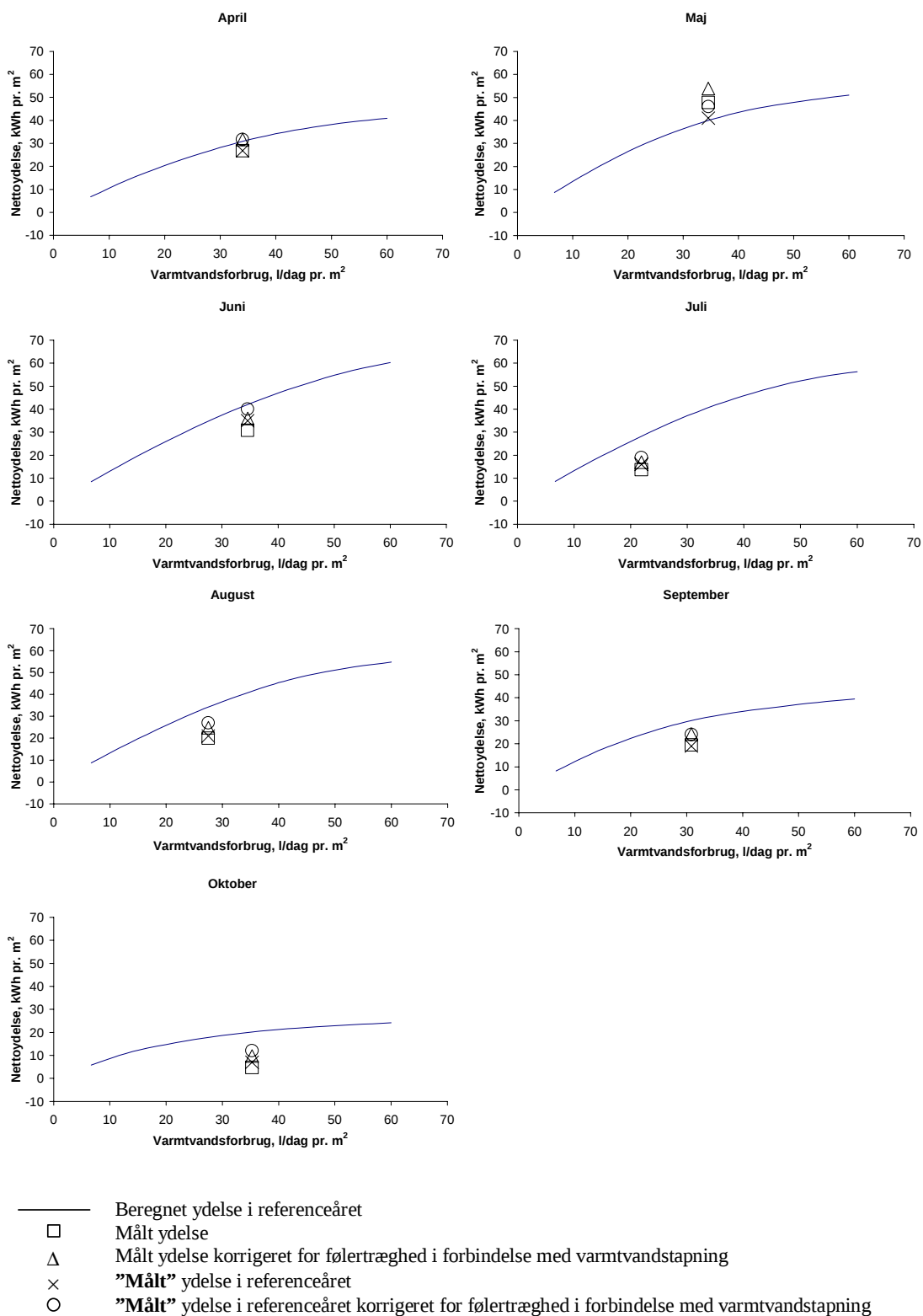
- I beregningerne forudsættes det at der hver dag tappes lige store mængder varmt vand, og at det varme vand tappes i 3 lige store portioner kl. 7, 12 og 19. Dette tappemønster resulterer i en høj ydelse for solvarmeanlægget. Andre tappemønstre kan resultere i mindre anlægsydelse.



Figur 6-9: Beregnede og målte nettoyielder i perioden april 00 til september 00 for 2,78 m² anlægget i Næstved.

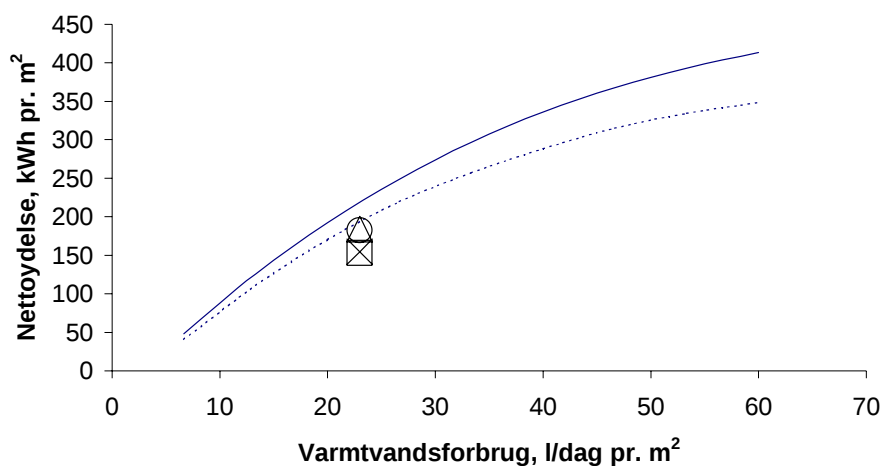


Figur 6-10: Beregnede og målte nettoydelser i perioden oktober 00 til marts 01 for 2,78 m² anlægget i Næstved.

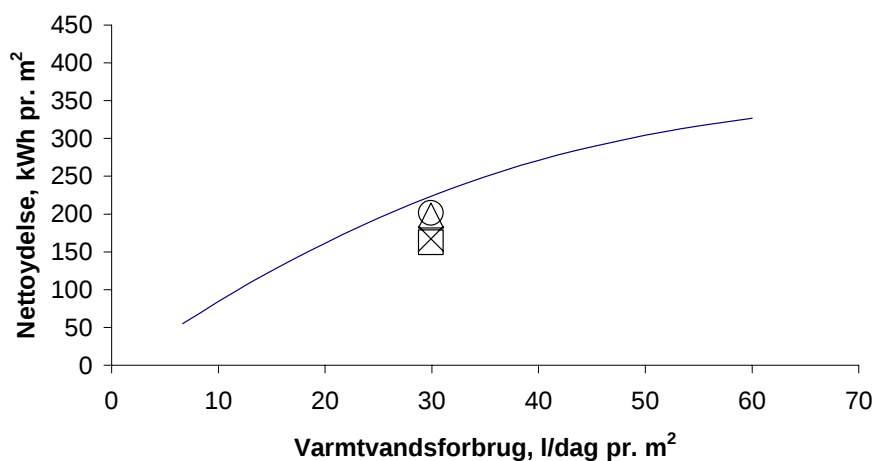


Figur 6-11: Beregnede og målte nettoydelse i måleperioden for 3,00 m² anlægget i Køge.

2,78 m² anlægget i Næstved. April 00 - Marts 01.



3,00 m² anlægget i Køge. April 00 - Oktober 00.



- Beregnet ydelse i referenceåret
- Beregnet ydelse i referenceåret korrigeret for skygger
- Målt ydelse
- △ Målt ydelse korrigeret for følertræghed i forbindelse med varmtvandstapning
- × ”Målt” ydelse i referenceåret
- ”Målt” ydelse i referenceåret korrigeret for følertræghed i forbindelse med varmtvandstapning

Figur 6-12: Beregnede og målte nettoydelser i måleperioderne for begge anlæggene.

Den målte årsydelse for anlægget i Næstved er indtegnet i Figur 6-13, målepunkt ①, sammen med målte årsydelser for tidligere undersøgte solvarmeanlæg i praksis [4]. Den målte ydelse for anlægget i Køge er ikke indtegnet i figuren idet der kun er målt på anlægget i månederne april 00 – oktober 00. I stedet er vist en estimeret årsydelse, målepunkt ②, for solvarmeanlægget. Estimatet er foretaget med udgangspunkt i det gennemsnitlige daglige vandforbrug for anlægget i Køge samt et forventet supplerende energiforbrug. Det forventede supplerende energiforbrug er estimeret ud fra målte supplerende energiforbrug for anlægget i Køge samt variationen i det supplerende energiforbrug hen over året for anlægget i Næstved. Den årlige nettoydelse pr. m² solfanger er vist som funktion af anlæggets årlige dækningsgrad. Målingerne fra de tidligere undersøgte solvarmeanlæg, som alle er traditionelt udformede små solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning, stammer fra [1], [2] og [3].

Foruden de målte årsydelser er beregnede årsydelser for fire forskellige 4 m² standard solvarmeanlæg vist på figuren. Ydelser er vist for low flow anlæg og traditionelle anlæg – både med en højeffektiv og en laveffektiv solfanger. Kurverne er fundet ved beregning af årsydelser for forskellige daglige varmtvandsforbrug i intervallet 25 l til 300 l. Koldt vandstemperaturen forudsættes at være 10°C og temperaturen af det varme vand forudsættes at være 45°C. Beregningerne er foretaget med vejrdata TRY og med sydvendte solfanger med en hældning på 45° fra vandret.

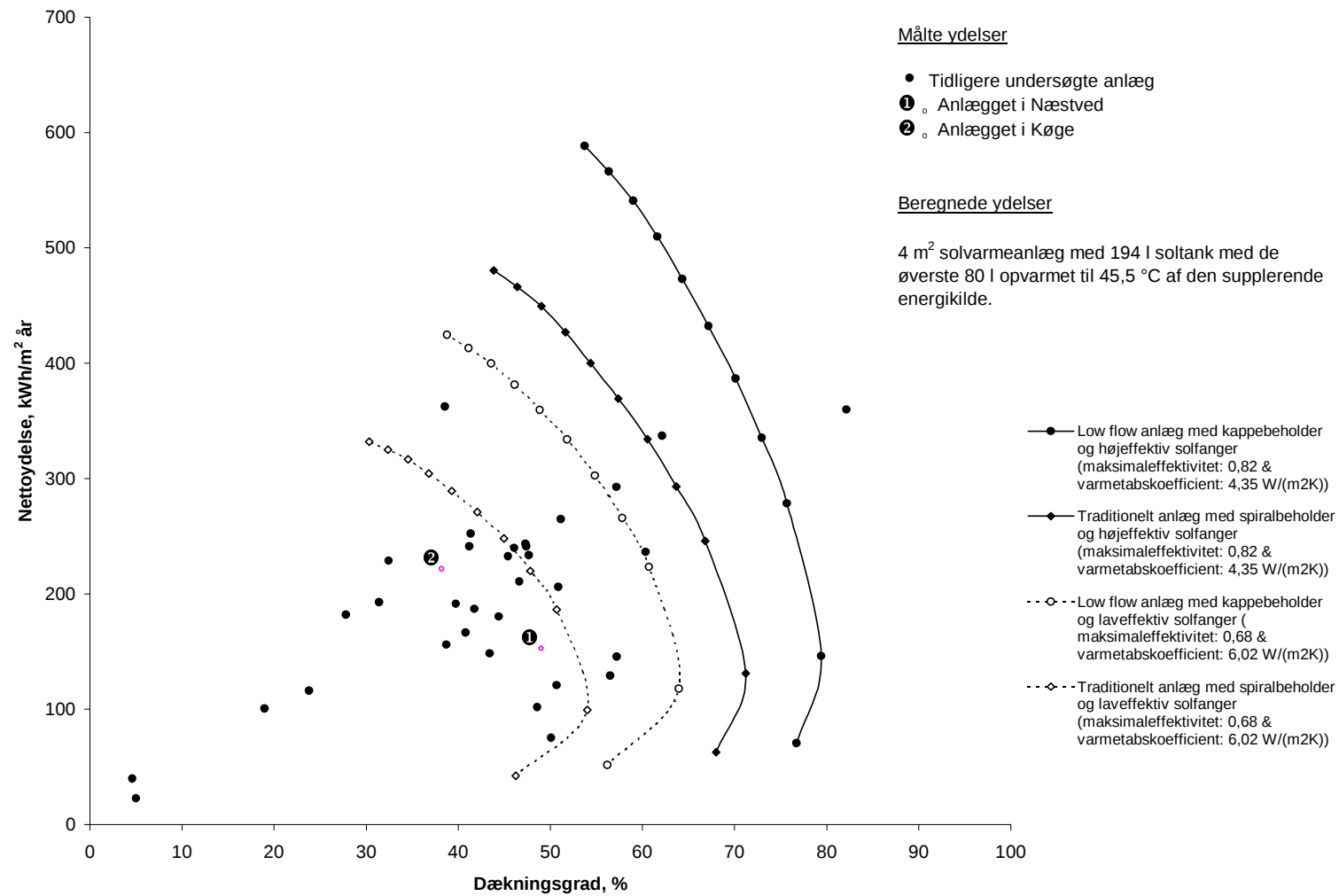
Ved hjælp af Figur 6-13 er det muligt at sammenligne solvarmeanlæg, som har forskellige solfangerarealer og som er belastet med forskellige varmtvandsforbrug. Veldesignede anlægs ydelsespunkter er beliggende til højre for kurverne for anlæggene med højeffektive solfanger, mens dårligt udformede anlægs ydelsespunkter er beliggende til venstre for kurverne for anlæggene med den laveffektive solfanger. For **stærkt** overdimensionerede anlæg, dvs. for anlæg med meget små varmtvandsforbrug pr. m² solfanger, kan både nettoydelsen pr m² solfanger og dækningsgraden blive lav uden at der er noget galt med designet af solvarmeanlægget. Figur 6-13 er derfor ikke velegnet til at vurdere stærkt overdimensionerede anlæg. Ingen af de undersøgte anlæg er stærkt overdimensioneret. Derfor benyttes figuren til at vurdere de målte ydelser.

Af figuren ses det at de målte ydelser er lavere end de beregnede ydelser. De afprøvede solvarmeanlæg har en gennemsnitlig årlig ydelse på 195 kWh med en gennemsnitlig dækningsgrad på 43,1 %.

Af figuren ses det at:

- de intelligente anlæg ikke ydelsesmæssigt skiller sig væsentlig ud fra de tidligere undersøgte traditionelle anlæg.
- ydelserne i praksis generelt er væsentligt lavere end de beregnede ydelser. De fleste anlæg er således ydelsesmæssigt dårligere end den teoretiske ydelse for et traditionelt spiralbeholderanlæg med en laveffektiv solfanger.

På baggrund af målingerne må det konkluderes at der er et stort behov for at videreudvikle de nye intelligente solvarmeanlæg. På baggrund af figuren kan det i øvrigt også konkluderes at der er et stort behov for at videreudvikle traditionelt udformede solvarmeanlæg.



Figur 6-13: Målte årsydelser for anlæg i praksis samt beregnede årsydelser for fire 4 m² solvarmeanlæg.

7 Potentialet for intelligente solvarmeanlæg

Anvendelsen af intelligente solvarmeanlæg medfører fordele som ikke haves ved anvendelse af traditionelle solvarmeanlæg. Fordelene er:

- reduceret varmetab fra varmtvandsbeholderen
- bedre udnyttelse af solindfaldet
- reduceret beholdervolumen og solfangerareal
- reduceret risiko for overdimensionering
- velegnet til alle forbrug og forbrugsmønstre

Der gælder de samme vejledende regler for forholdet mellem lagertankens volumen og solfangerarealet som der gælder for traditionelle solvarmeanlæg. Volumen af lagertanken bør være ca. 50 liter pr. m² solfanger. I perioder med meget lille eller intet forbrug sikrer dette forhold at den energimængde der opfanges i solfangeren kan overføres til lagertanken. Dermed er risiko for kogning i solfangeren minimal.

Intelligente solvarmeanlæg er lidt dyrere end tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg. Det skyldes at både lagertanken og styresystemet er mere avanceret i intelligente solvarmeanlæg. Til gengæld yder intelligente solvarmeanlæg 7 – 34 % bedre end tilsvarende traditionelle solvarmeanlæg, afhængig af forbrug og forbrugsmønstre, jvf. kapitel 3. For at vurdere hvilken type solvarmeanlæg der er mest attraktivt økonomisk set, er det nødvendigt at vurdere forholdet mellem pris og ydelse for de forskellige anlægstyper.

Prisen på to typer intelligente solvarmeanlæg er vurderet og sammenlignet med prisen på et tilsvarende traditionelt solvarmeanlæg. De to typer intelligente solvarmeanlæg som er vurderet svarer til de to intelligente solvarmeanlæg der er afprøvet i praksis, jf. kapitel 6. Alle anlæggene er baseret på lagertanke af typen Danlager 1000 fra Nilan A/S samt solfangere af typen BA 30 fra Batec A/S. Prisvurderingen er baseret på aktuelle markedspriser og prisvurderingen for ombygning af enkeltkomponenter er foretaget i samråd med de involverede producenter: Danotek, AquaHeat A/S og Nilan A/S.

Traditionelt solvarmeanlæg:

Den nuværende markedspris for komponenter til et traditionelt solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning er ca. 17.400 kroner. Prisen inkluderer følgende komponenter:

- | | |
|---------------|-------------|
| - Lagertank | 9000 kroner |
| - Styresystem | 1800 kroner |
| - Pumpemodul | 2000 kroner |
| - Solfanger | 4600 kroner |

Styresystemet til intelligente anlæg:

Firmaet Danotek der har udviklet styresystemet oplyser, at prisen for det nyudviklede styresystem vil ligge på omkring 2.200 – 2.500 kroner. Prisen for det tilsvarende traditionelle styresystem er 1.800 kroner. Merprisen på det intelligente styresystem ligger således i intervallet 400 – 700 kroner og der regnes med en gennemsnitlig merpris på 550 kroner. Beskrivelse af styresystemet findes i kapitel 6 samt [17].

Lagertanken med to interne elpatroner, jf. lagertank 6:

For lagertanken med to interne elpatroner ligger merprisen på lagertanken i en ekstra elpatron, en ekstra gennembrydning i lagertanken til indføring af elpatronen samt en ekstra flange med pakning og bolte hvorpå elpatronen monteres.

Prisen for en ekstra elpatron er ca. 200 kroner. Omkostningerne ved at lave en ekstra gennembrydning i lagertanken samt et ekstra manddæksel er ca. 150 kroner.

Lagertanken med sidearm, jf. lagertank 2:

For lagertanken med sidearm ligger fordyrelsen i materialeudgifter til sidearm, kontraventil, påfyldningsventil, aftapningsventil, afspærringsventil samt et plastrør med stor godstykkelse. Foruden de ekstra materialeudgifter skal sidearmen tilsluttes lagertanken og plastrøret skal føres ind i lagertanken. Den oprindelige indføring af elpatronen igennem siden af lagertanken bortfalder fordi elpatronen nu føres ind i sidearmen. Sidearmen kan etableres for omkring 1.000 – 1.500 kroner og der regnes med en gennemsnitlig merpris på 1.250 kroner. Endvidere spares der ca. 150 kroner når elpatronen ikke som oprindeligt føres ind i lagertanken.

De nævnte priser er alle excl. moms.

Tabel 7-1 viser priser og ydelser samt pris-ydelsesforholdet for solvarmeanlæggene. Priserne er excl. moms og uden statstilskud.

Anlægstype		Samlet pris [kr.]	Ydelse [kWh/år]	Pris/ydelse [kr./kWh/år]
Traditionelt solvarmeanlæg:				
traditionelt solvarmeanlæg	17.400	25.400	1000	25,4
installation af solvarmeanlæg	8.000			
Intelligent solvarmeanlæg med to interne elpatroner:				
traditionelt solvarmeanlæg	17.400	26.300	1070/1340	24,6/19,6
styresystem	550			
elpatron	200			
gennembrydning, flange mv.	150			
installation af solvarmeanlæg	8.000			
Intelligent solvarmeanlæg med sidearm:				
traditionelt anlæg	17.400	27.050	1070/1340	25,3/20,2
styresystem	550			
sidearm	1.250			
gennembrydning , flange mv.	- 150			
installation af solvarmeanlæg	8.000			

Tabel 7-1: Pris-ydelsesforhold for solvarmeanlæggene.

Det ses at pris-ydelsesforholdet kan reduceres med op til 23 % når et intelligent solvarmeanlæg vælges frem for et traditionelt solvarmeanlæg.

Den virkelige merpris på enkeltkomponenter til intelligente solvarmeanlæg kendes først når intelligente solvarmeanlæg fabrikantproduceres. De her nævnte merpriser er baseret på realistiske prisvurderinger foretaget i samråd med de involverede producenter.

Udviklingen og afprøvningen, beskrevet i denne rapport, beskæftiger sig kun med intelligente solvarmeanlæg hvor den supplerende energi er baseret på elektricitet. For at få et billede af det fulde potentiale for intelligente solvarmeanlæg er det nødvendigt at supplere de i dette projekt udførte undersøgelser med lignende undersøgelser for intelligente solvarmeanlæg hvor den supplerende energi er baseret på andet end elektricitet, f.eks. olie eller gas.

8 Konklusion

Formålet med undersøgelserne beskrevet i rapporten var at udvikle og afprøve intelligente solvarmeanlæg. Betegnelsen intelligente solvarmeanlæg dækker solvarmeanlæg hvor tilførslen af supplerende energi styres på en fleksibel måde således at der kun opvarmes en vandmængde der svarer til det forventede forbrug samt at opvarmningen finder sted umiddelbart før forventet forbrug.

Der er udviklet og afprøvet i alt seks forskellige lagertanke med intelligent styring af den supplerende energitilførsel. Den supplerende energikilde i alle lagertankene er baseret på elektricitet. Tre af de afprøvede lagertanke er endvidere laboratorietestet i komplette solvarmeanlæg side om side med et traditionelt solvarmeanlæg. Alle lagertankene som blev afprøvet er kappebeholdere, hvor solfangervæskens føres gennem kappen. Der er udviklet beregningsprogrammer der kan beregne ydelsen for intelligente solvarmeanlæg. Beregningsprogrammerne er valideret med målinger fra de testede anlæg. Til sidst er to solvarmeanlæg baseret på de to bedste lagertanke testet i praksis.

To af de afprøvede lagertanke udmærkede sig i forhold til de øvrige afprøvede lagertanke. Det var lagertanken med sidearm og lagertanken med to interne elpatroner - en vandret og en lodret. Med disse lagertanke var det muligt at opvarme et vilkårligt supplerende volumen ved et kontrolleret temperaturniveau. Desuden blev det bedste forhold mellem mængden af tilført energi og energiindhold opbygget i lagertanken opnået med disse to tanke.

De to bedste lagertanke, samt en tredje lagertank der viste sig ikke at leve op til betegnelsen intelligent lagertank, blev efterfølgende laboratorieafprøvet i komplette solvarmeanlæg side om side med et traditionelt solvarmeanlæg. Laboratorieafprøvningen viste at de intelligente solvarmeanlæg baseret på de to bedste lagertanke ydede 4 – 37% bedre end det traditionelle solvarmeanlæg. Den tredje lagertank blev kasseret på baggrund af målingerne.

Med de validerede beregningsprogrammer blev der beregnet årsydelser for de intelligente solvarmeanlæg. Beregningerne viste at:

- intelligente solvarmeanlæg yder 7 – 34% bedre end traditionelle solvarmeanlæg afhængig af tappemønster og varmtvandsforbrug.
- intelligente solvarmeanlæg er specielt attraktive når varmtvandsforbruget hovedsageligt ligger om morgenen eller om aftenen.

Beregningerne viste yderligere at:

- ydelsen for de intelligente solvarmeanlæg er stærkt afhængig af styresystemets indstillinger, dvs. opvarmningstidspunkter i forhold til tappetidspunkter samt etableret energimængde i forhold til tappet energimængde.
- lagervolumenet af de intelligente soltanke kan gøres mindre end lagervolumenet af traditionelle soltanke.
- kappen med fordel kan gøres højere end kappehøjden på de markedsførte lagertanke.

Solvarmeanlæggene installeret i praksis, er baseret på de to bedste lagertankprincipper – en lagertank med sidearm og en lagertank med to interne elpatroner, en vandret og en lodret. Der blev

målt på solvarmeanlægget med sidearm i perioden april 2000 – oktober 2000 og på solvarmeanlægget med to interne elpatroner i perioden april 2000 – marts 2001.

Anlæggene har desværre ikke kørt problemfrit i måleperioderne.

I solvarmeanlægget med sidearm var der problemer med isoleringen af sidearmen. Sidearmen blev aldrig tilstrækkeligt isoleret hvilket er katastrofalt for ydelsen. Desuden har beholderen været utæt i en periode hvilket har reduceret beholderisoleringens isoleringsevne idet beholderisoleringen har været våd.

I solvarmeanlægget med to interne elpatroner var der problemer med styresystemet til solfangerkredsen i hele juni og juli måned idet temperaturføleren i solfangeren var defekt. I den periode kørte pumpen i solkredsen i døgndrift hvilket medførte et øget supplerende energiforbrug i juni og juli måned.

I måleperioden april 2000 til oktober 2000 viste målingerne på solvarmeanlægget med sidearm at anlægget ydede ca. 10% dårligere end forventet ud fra beregnede ydelser.

I måleperioden april 2000 til marts 2001 viste målingerne på solvarmeanlægget med to interne elpatroner at anlægget ydede ca. 6% dårligere end forventet ud fra beregnede ydelser.

Foreløbige beregninger viser at det er muligt af forbedre pris-ydelses forholdet for solvarmeanlæg med op til 23%, afhængig af varmtvandsforbrug og forbrugsmønster, når et intelligent solvarmeanlæg vælges frem for et traditionelt solvarmeanlæg.

Der er derfor behov for at udvikle markedsførte intelligente soltanke, så intelligente solvarmeanlæg i praksis bliver lige så attraktive som intelligente solvarmeanlæg under laboratoriemæssige forhold.

9 Referencer

- [1] *Ydelsesstatistik for mindre brugsvandsanlæg – erfaringer fra det første til det femte års målinger.* William Otto, Jan Erik Nielsen og Inge-Lise Clausen. Prøvestationen for Solenergi, februar 1993 – marts 1997.
- [2] *Ydelser og erfaringer fra 9 små low flow solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning.* Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 224, januar 1992.
- [3] *Solskin kan man altid finde...* En rapport om solvarmeanlæg til elvarmekunder. De 13 Elforsyninger, marts 1994.
- [4] *Thermal performance og small solar domestic hot water systems in theory, in the laboratory and in practice.* Elsa Andersen. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Paper fra Eurosun 98, september 1998.
- [5] *Varmelagring til solvarmeanlæg.* Simon Furbo. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Meddelelse nr. 162, september 1984.
- [6] *Undersøgelse af solvarmeanlæg fra Thermo Dynamics LTD.* Simon Furbo og Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet. Meddelelse nr. 260, maj 1994.
- [7] *Små markedsførte solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmninhg-funktionsafprøvning og ydelsesmålinger. Opbygning af prøvestand.* Klaus Ellehauge. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet. Rapport nr. 93-37. 1993.
- [8] *Kort brugervejledning til simuleringsprogrammet Mantlsim.* Louise Jivan Shah. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Notat U-058. 1999.
- [9] *Kort brugervejledning til simuleringsprogrammet Kappeptf.* Louise Jivan Shah. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Notat. 1997.
- [10] *Små low flow solvarmeanlæg med kappebeholdere.* Louise Jivan Shah. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Rapport R-009. 1997.
- [11] *Smart solar tanks – heat storage of the future?* Simon Furbo og Louise Jivan Shah. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Paper fra ISES Solar World Congress, 1997.
- [12] *Development of smart a solar tank.* Simon Furbo og Elsa Andersen. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Paper fra ISES Solar World Congress, juli 1999.
- [13] *Solvarmeanlæg med intelligente soltanke.* Søren Knudsen. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Eksamensprojekt, april 2000.

- [14] *To solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En beskrivelse og vurdering efter 4 måneders drift af anlæggene.* Klaus Ellehauge, Leif Sønderkov Jørgensen, Mads Lange, Svend Erik Mikkelsen, Carsten Nielsen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 104, december 1980.
- [15] *Solvarmeanlæg til varmt brugsvand. En vurdering baseret på målinger på to anlæg.* Klaus Ellehauge, Leif Sønderkov Jørgensen, Mads Lange, Svend Erik Mikkelsen, Carsten Nielsen, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU. Meddelelse nr. 114, september 1981.
- [16] *PC-SOLAR version 2.0*, Carlos Portela, Po Box 1390, Veneta OR 97487 USA.
- [17] *Intelligent styresystem fra Danotek.* Søren Knudsen, Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Sagsrapport SR-0105, december 2000.