

Solfangerkreds med stor ekspansions- beholder og fordampning i solfanger ved faretruende høje temperaturer til sikring af solfangervæske og anlæg



Janne Dragsted

Simon Furbo

Bengt Perers

Ziqian Chen

Sagsrapport

Institut for Byggeri og Anlæg
2009

DTU Byg-Sagsrapport SR-10-04 (DK)
Maj 2010

1 Forord

Som en del af Energiforskningsprojektet "Kvalitetssikring af solvarmeanlæg - fase III", EUDP-09, 64036-0003, som finansieres af Energistyrelsen og gennemføres i et samarbejde mellem PlanEnergi, DTU Byg, DS, SBI, Ellehauge & Kildemoes og Dansk Solvarme Forening, yder DTU Byg assistance til fabrikanter med det formål at udvikle nye og bedre produkter.

Fabrikanter stillede ved projektets start forslag om 5 projekter, som de ønskede at gennemføre i et samarbejde med DTU Byg. På grund af projektets begrænsede resurser var der kun mulighed for at gennemføre et projekt. Det gennemførte projekt, som blev udvalgt af projektledelsens prioriteringsgruppe, er: "Solfangerkreds med stor ekspansionsbeholder og fordampning i solfanger ved faretruende høje temperaturer til sikring af solfangervæske og anlæg", som gennemføres i et samarbejde med Batec Solvarme A/S. Denne rapport beskriver projektet.

Indholdsfortegnelse

2	Resumé	5
3	Summary	5
4	Forsøgsopstilling	6
4.1	Solfanger/solfangere	6
4.2	Solfangerkreds og solfangervæske	7
4.3	Ekspansionsbeholder og ophæng	9
4.4	Måleudstyr.....	9
5	Forsøg (driftsstrategi)	11
6	Præsentation af målinger	12
6.1	En solfanger og direkte indløb.....	14
6.2	En solfanger og U-indløb	21
6.3	Tre solfangere og direkte indløb	27
6.4	Tre solfangere og U-indløb	33
6.5	Konklusion målinger	37
7	Teoretisk analyse af solfangerkreds under stagnation	38
7.1	Analysemodel	39
7.1.1	Kogning	39
7.1.2	Damp.....	39
7.1.3	Solfangerkreds	39
7.2	Teoretisk analyse	40
7.2.1	Kogning i solfangeren.....	40
7.2.2	Damp i solfangeren	41
7.2.3	Ekspansionsbeholder	41
7.2.4	Andre områder i solfangerkredsen	41
7.3	Teoretiske beregninger.....	42
7.4	Validering – Sammenligning mellem målinger og beregnede værdier	46
7.4.1	Sammenligning mellem beregnede og målte værdier for vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen og af trykket nederst og øverst i solfangerkredsen den 1. september 2009	48
7.4.2	Sammenligning mellem beregnede og målte værdier for kogepunktstemperaturen og stagnationstemperaturen den 1. september 2009.....	51
7.4.3	Yderligere sammenligning mellem målte og beregnede værdier for 5. og 27. August 2009	56
7.5	Volumenet af ekspansionsbeholderen	58
7.5.1	Fast installationstryk og fortryk.....	58
7.5.2	Fast fortryk og varieret installationstryk	60
7.5.3	Fast installationstryk og varieret fortryk	63
7.6	Undersøgelse af afhængighed af den øverste rørstrækning i solfangerkredsen under stagnation	66
7.6.1	Analyse af rørdiameteren på rørstrækningen over den nederste del af solfangeren.....	66
7.6.2	Analyse af isoleringstykkelsen for rørstrækningen over den nederste del af solfangeren	67
7.7	Konklusion teori.....	68
8	Regneark	69
8.1	Information.....	69
8.2	Dimensionering	71
8.3	Tabeller og diagrammer	73
9	Konklusion	84
10	Referencer	85

2 Resumé

Der er gennemført eksperimentelle og teoretiske undersøgelser af en solfangerkreds med Batec Solvarmes BA30 solfangere, med en stor ekspansionsbeholder, med propylenglykol/vand blanding uden additiver som solfangervæske og med en cirkulationspumpe, som stoppes ved høje temperaturer. Temperatur- og trykforhold under solrige stagnationsperioder er klarlagt for solfangerkredsen.

Den undersøgte solfangerkreds sikrer solvarmeanlæg og solfangervæske mod faretruende høje temperaturer.

Der er udarbejdet et regneark, som kan benyttes til at bestemme ekspansionsbeholderens volumen på basis af solfangerkredsens udformning og den maksimale tilladte solfangervæsketemperatur.

3 Summary

Experimental and theoretical investigations of a solar collector loop have been carried out with Batec Solvarme's BA30 solar collector with a large expansion vessel, propylene glycol/water mixture without additives as solar collector fluid and with a circulation pump which stops at high temperatures. Pressure and temperature conditions are determined during sunny periods and stagnation in the solar collector.

The investigated solar collector loop secures the solar heating system and solar collector fluid from dangerously high temperatures.

In connection with the investigations an excel sheet has been constructed for determining the volume of the expansion vessel based on information of the design of the solar collector loop and the maximum allowable temperature of the solar collector fluid.

4 Forsøgsopstilling

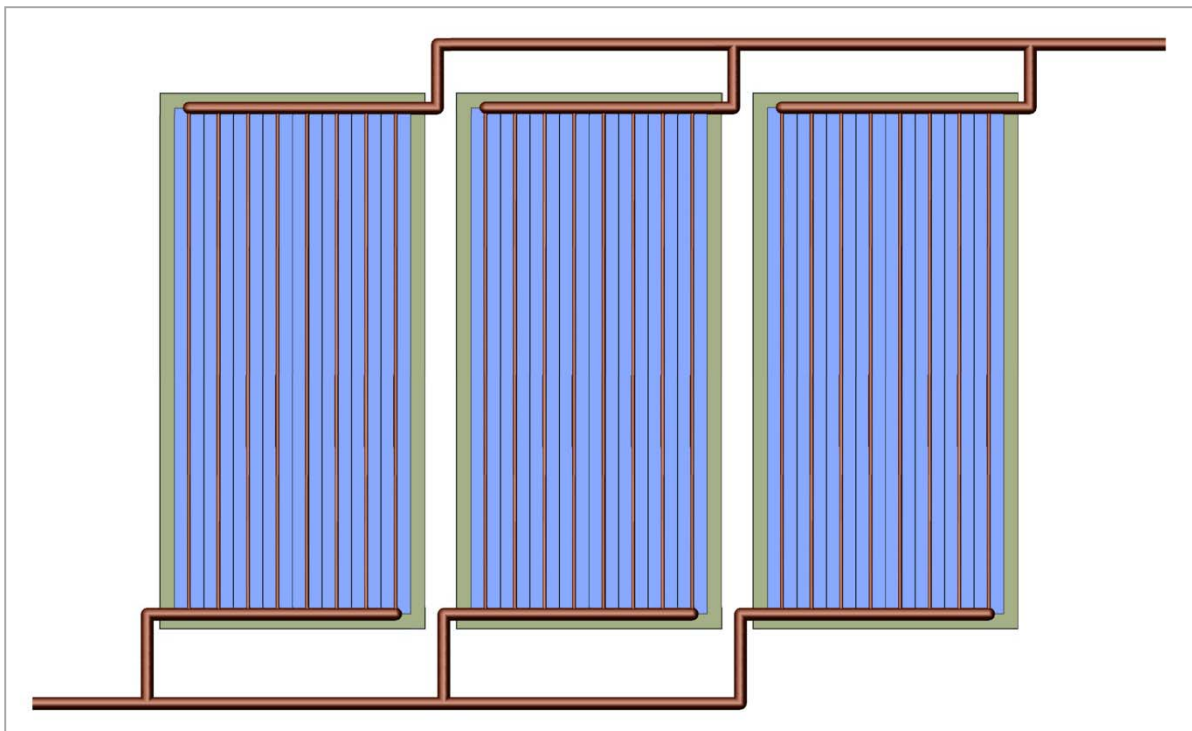
Forsøgsopstillingen, der er opstillet på DTU's prøvestand i Lyngby, blev taget i brug den 15. juli 2009. Opstillingen omfatter solfangere, solfangerkreds, pumpe, ekspansionsbeholder, skue-glas samt diverse måleinstrumenter.

4.1 Solfanger/solfangere

Solfangerne er fra Batec A/S og er af typen BA30. Solfangeren har et bruttoareal på 3,16 m² og et transparent areal på 3,00 m². Væskeindholdet i solfangeren er 2,26 liter. Effektivitetsudtrykket ved en indfaldsvinkel på 0° er:

$$\eta = 0,772 - 2,907 \frac{W}{m^2K} \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - 0,015 \frac{W}{m^2K^2} \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2$$

Der er i forsøgsopstillingen installeret tre BA30 solfangere. Solfangerne er tilsluttet parallelt som vist på Figur 1. Solfangernes hældning er 45° og solfangerne vender 10° mod vest fra syd.



Figur 1. BA30 opbygning af manifold og absorber.

En solfanger designet på denne måde, med indløb i bunden og udløb i toppen, har gode egenskaber med hensyn til tømning under stagnation.

På Figur 2 ses et billede af Batec solfangerne installeret i solfangerkredsen på forsøgsstanden på DTU.

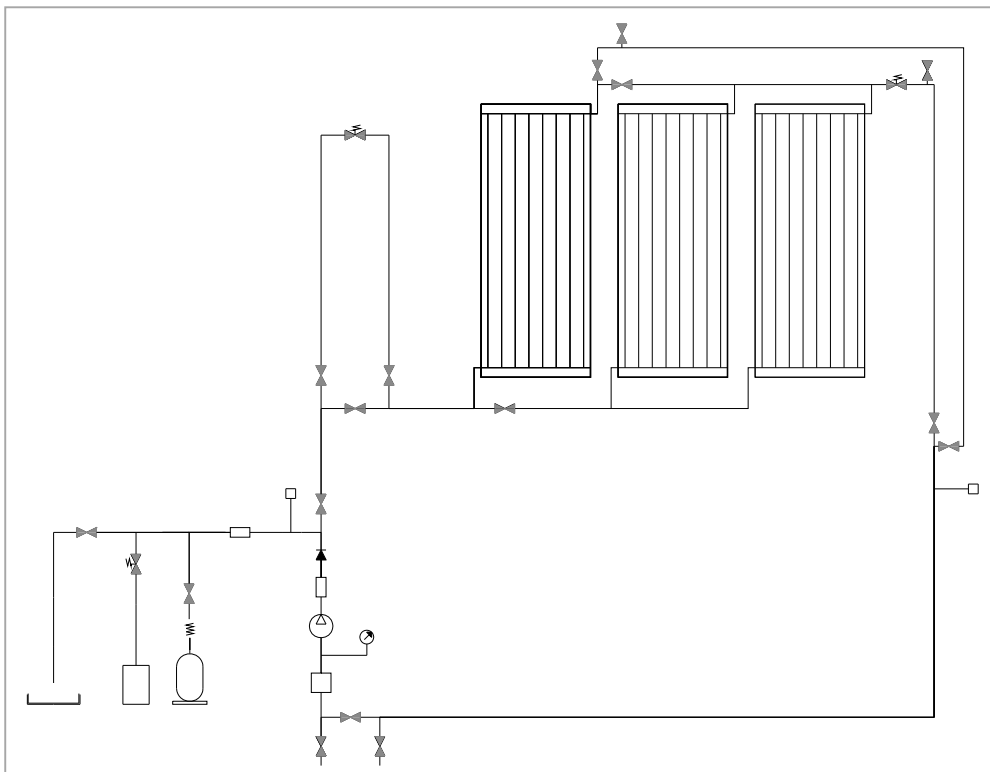


Figur 2 Billede af Batec solfangerne.

4.2 Solfangerkreds og solfangervæske

Solfangerkredsen er opbygget som en standard solfangerkreds, men med ekstra udstyr til at kunne følge udviklingen under stagnation. På Figur 3 ses en opbygning af forsøgsopstillingen.

Solfangerkredsen er opbygget med kobberør med en indre diameter på 13 mm. Rørene er isoleret med 10 mm PUR-skum. Solfangerkredsen er opbygget så det er muligt både at afprøve en solfangerkreds med én solfanger og en solfangerkreds med tre solfangere.



Figur 3. Principskitse af anlægsopbygning.

Trykket måles to steder i solfangerkredsen: Oppe ved solfangerne i niveau med bunden af solfangerne, samt ved indgangen til ekspansionsbeholderen i niveau med pumpen.

Derudover er der i solfangerkredsen indbygget to skue-glas, for at kunne se solfangervæsken og ændringer i denne visuelt, se Figur 4.

Den lodrette højdeforskel mellem solfangerne og ekspansionsbeholder er 3 meter.



Figur 4. Skue-glas indbygget i solfangerkredsen.

Solfangervæsken der anvendes er en propylenglykol/vand blanding leveret af Batec A/S.

Propylenglykolen er uden inhibitorer af nogen form, der er kun tilsat grøn farve, som det ses på Figur 4. Der er her valgt at benytte en blanding på 32 % (vægt %) propylenglykol.

4.3 Ekspansionsbeholder og ophæng

Ekspansionsbeholderen der er tilsluttet anlægget er på 24 liter og fra firmaet Elbi. Den er fra fabrikens side indstillet med et fortryk på 3,0 bar, men det kan justeres da der i bunden er monteret en ventil. Det maksimale tryk for ekspansionsbeholderen er på 8,0 bar. Ekspansionsbeholderen er ophængt i en transducer fra Celesco, se Figur 5. Med transducere er det muligt løbende at måle vægtforøgelsen af ekspansionsbeholderen i forbindelse med at solfangervæsken presses ud af solfangerne og ned i ekspansionsbeholderen.



Figur 5. Ophæng af ekspansionsbeholder i en transducer.

Ekspansionsbeholderen er her installeret korrekt med indløb vendt opad. I det følgende hvor beregningerne gennemgås er det en forudsætning af ekspansionsbeholderen installeret på samme måde. En ændring vil ændre forudsætningerne for beregningerne.

4.4 Måleudstyr

Målingerne opsamles med programmet IMP-View, med tilhørende målekort fra Schlumberger. Der indhentes 67 data fra forsøgsopstillingen med et tidsskridt på enten 10 s eller 1 min.

De 67 målinger fordeler sig på:

- 2 solstrålingsmålinger
- 2 trykmålinger

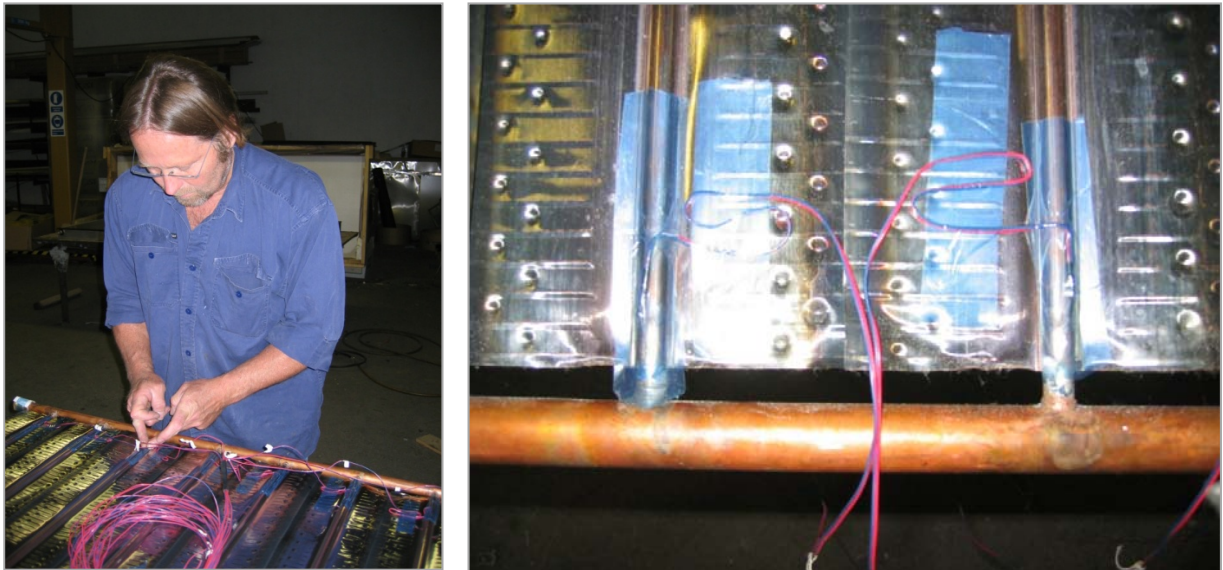
- 1 vægtmåling.
- 62 temperaturmålinger
- PH måling af solfangervæske
- Måling af propylenglykol % i dampen i toppen af solfangeren under stagnation

Målingerne af solstrålingen består af den totale solbestrålingsstyrke og den diffuse solbestrålingsstyrke, begge målt med samme hældning og orientering som solfangerne. Målingerne foretages med pyranometre fra Kipp og Zonen af typen CM 11 til totalstrålingen og CM5 til den diffuse stråling.

Trykket i anlægget måles ved ekspansionsbeholderen, samt på taget oppe ved solfangerne ud for den nederste del af solfangerne på rørstrækningen fra toppen af solfangerne til ekspansionsbeholderen. Målingerne bliver foretaget med CTE8010GQ0 målere fra Sensor Technics.

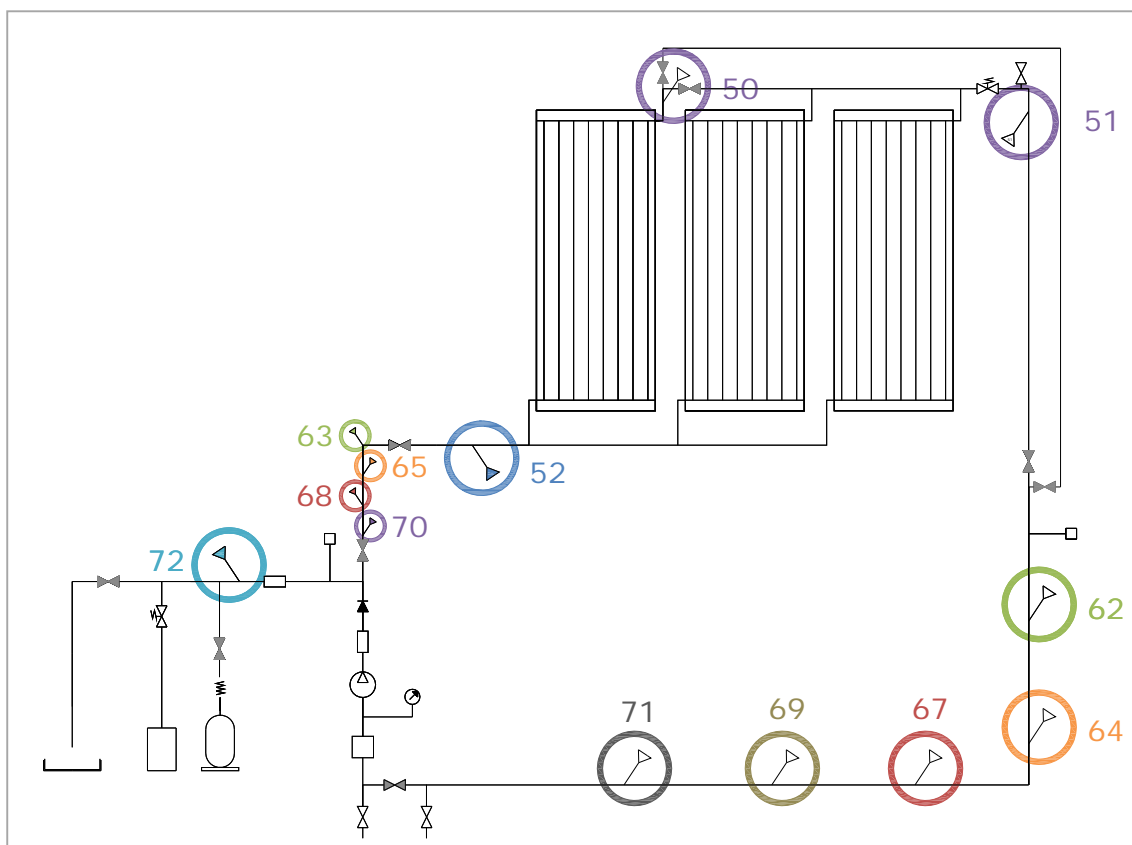
Vægten af ekspansionsbeholderen måles, som nævnt tidligere, med en transducer fra Celesco.

Temperaturmålingerne fordeler sig på 48 temperaturmålinger fra bagsiden af hver Cu-strip i både toppen og bunden af solfangerne, se Figur 6.



Figur 6. Påsætning af temperaturfølere på bagsiden af absorberstrips.

Derudover måles temperaturen i solfangerkredsen fra pumpen til solfangeren 5 steder, se Figur 7. Fra solfangerne til pumpen måles temperaturen 6 steder. På strækningen til ekspansionsbeholderen måles temperaturen et sted. Herudover måles udelufttemperaturen og rumtemperaturen hvor ekspansionsbeholderen er ophængt.



Figur 7. Placering af termoelementtråd til temperaturmålinger.

Målingerne af temperaturen er foretaget med kobber-konstantan termoelementtråd af typen TT. Solfangervæskens PH værdi måles indledningsvis dagligt og senere på ugebasis.

5 Forsøg (driftsstrategi)

Da formålet med projektet er at udsætte anlægget for stagnation så ofte som muligt, er pumpen styret således at den slår fra når temperaturen ved udløb fra solfangerne når 80 °C. Dette vil fremme stagnation og høje temperaturer i solfangerne.

Der vil i forsøget blive målt på 4 forskellige opbygninger af anlægget. De er:

1. En solfanger med direkte indløb
2. En solfanger med U-indløb
3. Tre solfangere med direkte indløb
4. Tre solfangere med U-indløb

Målingerne er gennemført med forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen og forskellige tryk i solfangerkredsen.

6 Præsentation af målinger

Der måles fra den 15. juli 2009 og frem til 31. marts 2010. I perioden fra den 15. juli til den 31. august testes de førnævnte 4 forskellige opbygninger. Målingerne registreres hvert 10. sekund.

Fra den 1. september 2009 og frem til 31. marts 2010 måles der på tre solfangere med direkte indløb. Målingerne registreres hvert minut.

I Tabel 1 ses en oversigt over væsentlige driftsbetingelser og måledata for hele perioden fra den 15. juli 2009 frem til 31. marts 2010.

Det ses at PH værdien for solfangervæsken på trods af i alt 97 kogninger, ikke er faldet under 7 i prøveperioden.

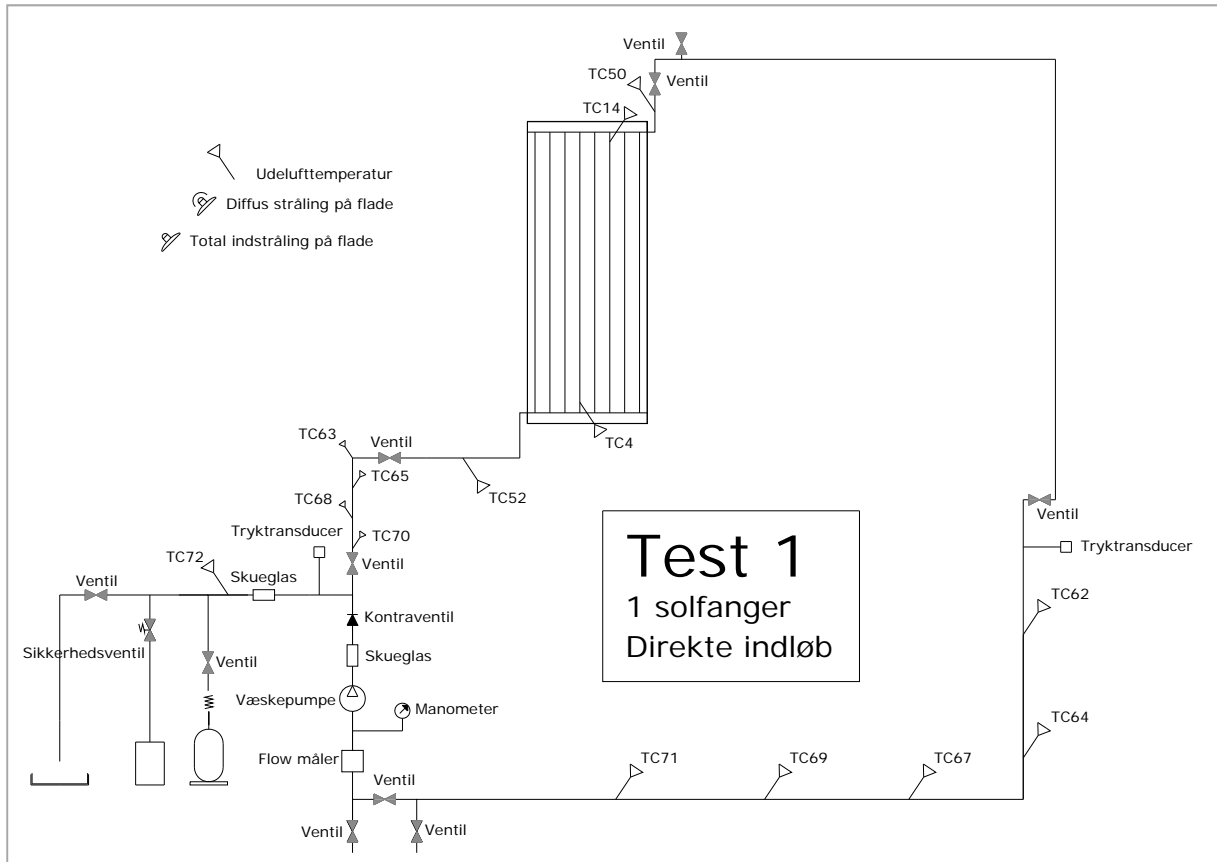
Det viser at det benyttede princip er velegnet til sikring af anlæg og solfangervæske mod faretruende høje temperaturer.

Tabel 1. Oversigt over driftsbetingelser og målinger for hele måleperioden.

Periode	Rørføring [-]	Antal solfangere [-]	Fortryk for ekspansions- beholderen [bar]	Tryk ved ekspansions- beholder under påfyldning [bar]	Kogepunktstemperatur for solfangervæske [°C]	Tryk ved solfangerne under stagnation [bar]	PH [-]	Antal kogninger [-]
15/7 – 19/7	Direkte indløb	1	3,0	3,3	155	3,4	7	4
20 /7	Direkte indløb	1	2,5	3,1	149	3,2	7	1
21/7 – 23/7	Direkte indløb	1	1,0	1,0	123	0,9	7	3
24/ - 28/7	Direkte indløb	1	1,0	0,4	123	0,9	7	6
29/7 – 30/7	U-indløb	1	1,0	0,5	125	1,0	7	4
31/7 – 3/8	U-indløb	1	1,0	0,9	123	0,9	7	8
4/8 – 8/8	U-indløb	1	1,0	0,8	123	0,9	7	5
9/8 – 10/8	U-indløb	1	1,0	0,7	120	0,8	7	2
11/8 – 19/8	Direkte indløb	3	1,0	1,0	133	1,5	7	13
20/8 – 31/8	U-indløb	3	1,0	1,1	135	1,6	7	18
1/9 – 6/9	Direkte indløb	3	1,0	1,0	135	1,6	7	1
7/9 – 22/11	Direkte indløb	3	1,0	1,0	136	1,8	7	26
23/11 – 28/2	Direkte indløb	3	2,2-1,5	1,8	132	1,5	7	2
1/3 – 31/3	Direkte indløb	3	2,2	1,8	159	3,5	7	4

6.1 En solfanger og direkte indløb

I perioden fra den 15. juli 2009 til den 28. juli 2009 blev der målt på anlægsopbygningen med en solfanger og direkte indløb, se principskitse på Figur 8.



Figur 8. Principskitse af anlægsopbygning til test 1.

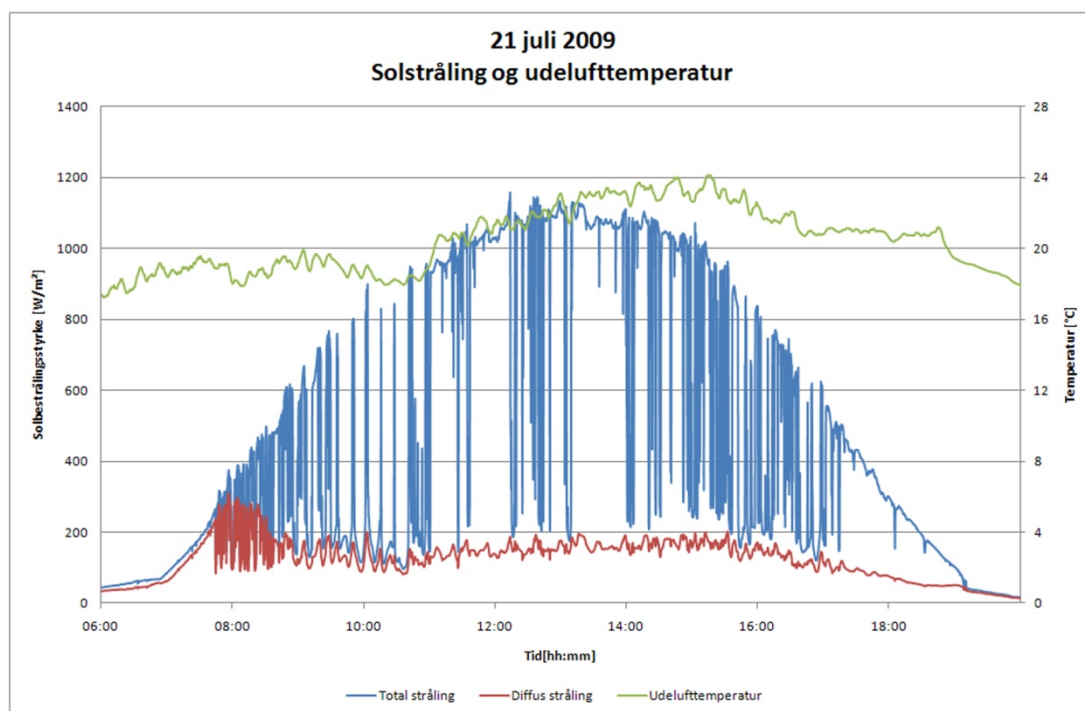
Til at begynde med var trykket ved ekspansionsbeholder 3,3 bar og fortrykket i ekspansionsbeholderen 3,0 bar, se Tabel 2. Trykket blev efter et par dage sænket for at fremme stagnation, så trykket ved ekspansionsbeholderen var 1,0 bar og fortrykket i ekspansionsbeholderen 1,0 bar. I hele perioden var der i alt 14 perioder med stagnation.

Tabel 2. Oversigt over måleperioderne og målinger med en solfanger og direkte indløb.

Periode	Fortryk for ekspansionsbeholderen [bar]	Tryk ved ekspansionsbeholder under påfyldning [bar]	Kogepunkts-temperatur for solfangervæske [°C]	Tryk ved solfangerne under stagnation [bar]	Antal kogninger [-]
15/7 – 19/7	3,0	3,3	155	3,4	4
20/7	2,5	3,1	149	3,2	1
21/7 – 23/7	1,0	1,0	123	0,9	3
24/7 – 28/7	1,0	0,4	123	0,9	6

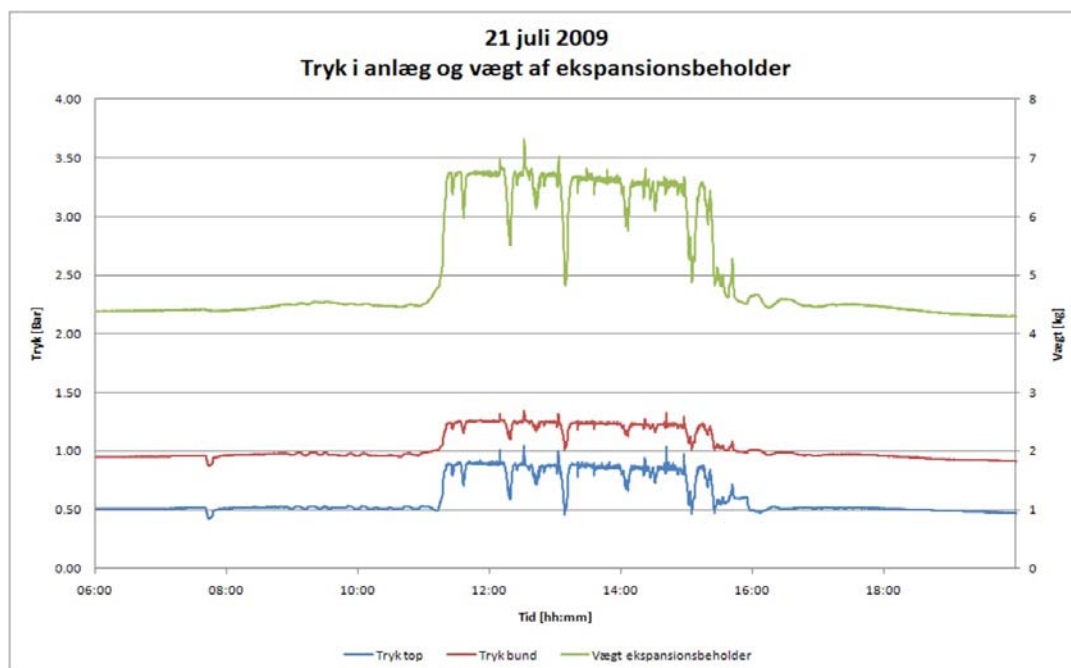
På de følgende figurer (Figur 9 - Figur 16) er vist målinger fra den 21. juli 2009, som var den mest solrige dag i måleperioden med en solfanger og direkte indløb.

Som det ses af Figur 9 var den 21. juli 2009 en dag med solskin og drivende lette skyer. Fluktuering der ses i udelufttemperaturen skyldes måden hvorpå temperaturen måles. Der er mulighed for at varm luft ophobes omkring termotråden, hvorefter luften frigives og ny luft opvarmes hvorefter processen gentages.



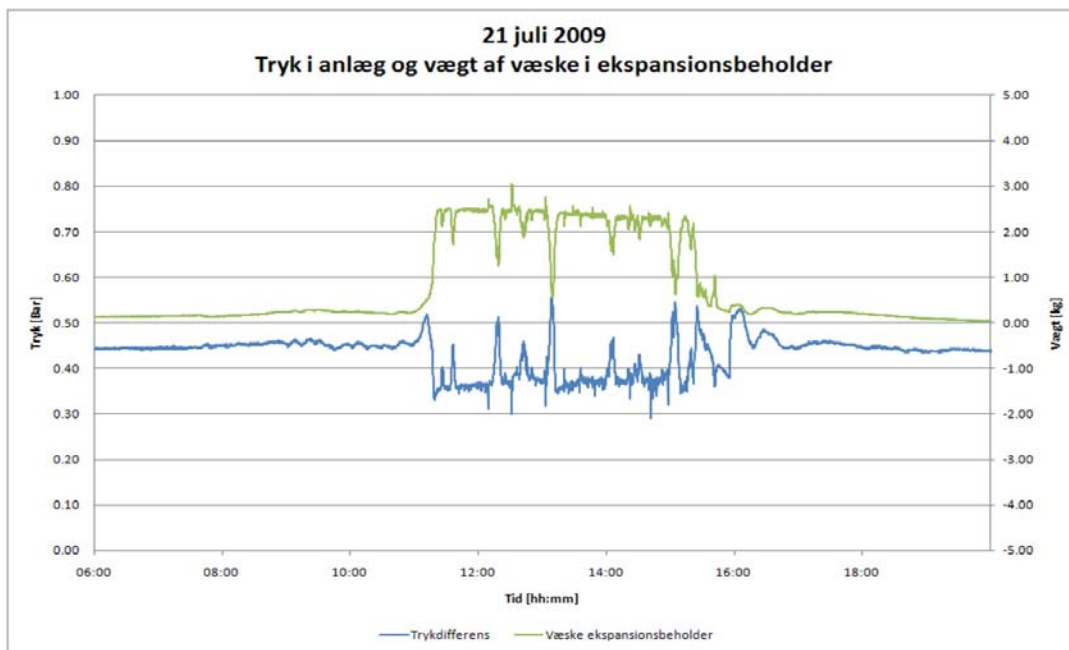
Figur 9. Målinger af solstråling og udelufttemperatur den 21. juli 2009.

På Figur 10 er vist målingerne af trykket to steder i anlægget: Ved udgangen fra solfanger og ved ekspansionsbeholderen, samt målingen af vægten af ekspansionsbeholderen. Det ses at stagnationen indtræffer kl. 11:30. Der sker som forventet en forøgelse af både tryk og vægt under stagnationen.



Figur 10. Målinger af tryk i anlægget og vægten af ekspansionsbeholderen den 21. juli 2009.

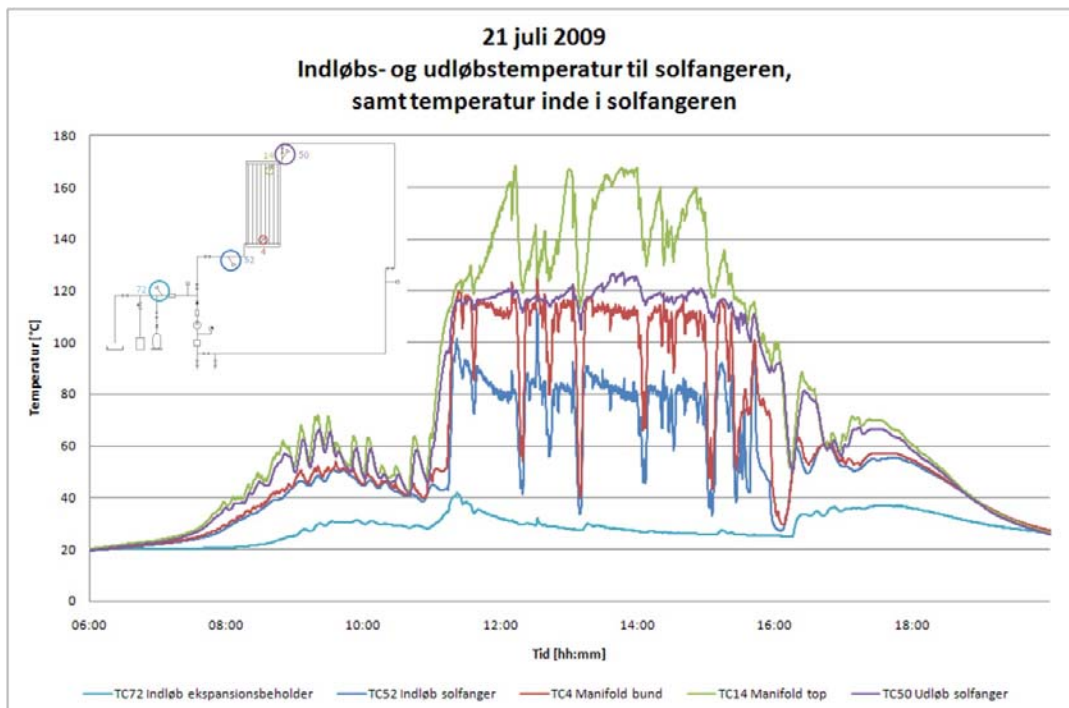
Under stagnation vil trykdifferensen mellem top og bund mindskes, se Figur 11, hvilket skyldes at fordampning der sker i solfangeren får trykket til at stige kraftigere i toppen ved solfangerne end nede ved ekspansionsbeholderen, idet væskesøjlen i størstedelen af solfangeren er erstattet af damp under stagnation. Væskesøjlen bidrager derfor ikke længere til at forøge trykket ved ekspansionsbeholderen.



Figur 11. Trykdifferensen og vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen den 21. juli 2009.

Mængden af væske der presses ned i ekspansionsbeholderen er omkring 2,3 kg, hvilket svarer til 2,2 liter, se Figur 11. Det svarer til at ca. 98 % af solfangervæskeindholdet i solfangeren.

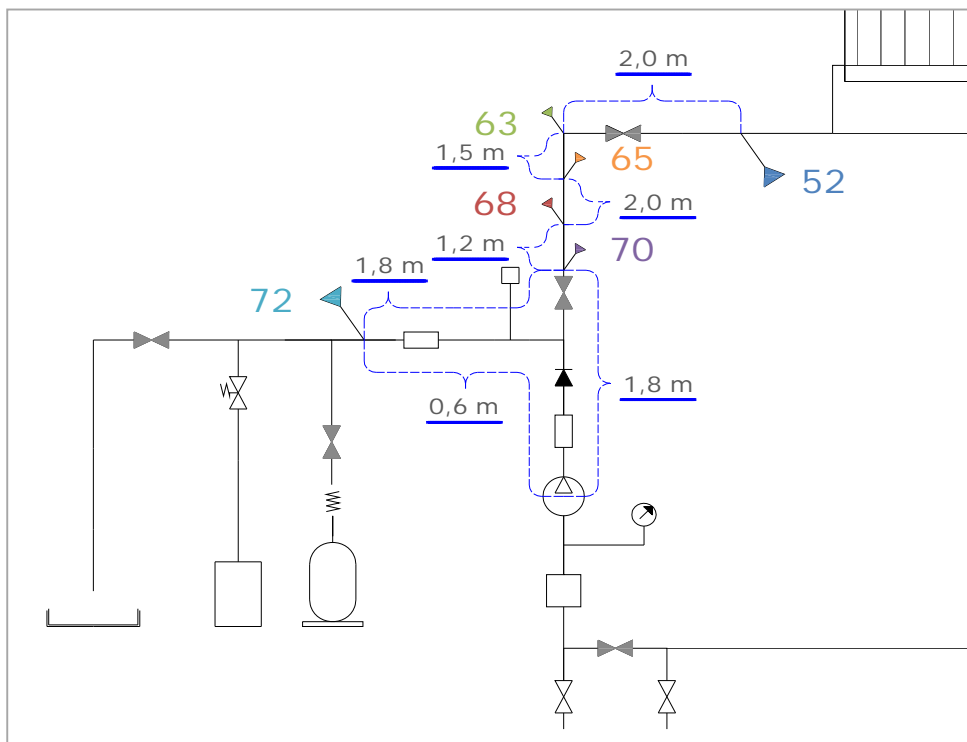
På Figur 12 er der vist temperaturmålingerne for ind- og udløb for solfangeren, samt temperaturen ved indløbet til ekspansionsbeholderen. Derudover er der vist temperaturmålinger fra bagsiden af absorberne i top og bund af solfangeren.



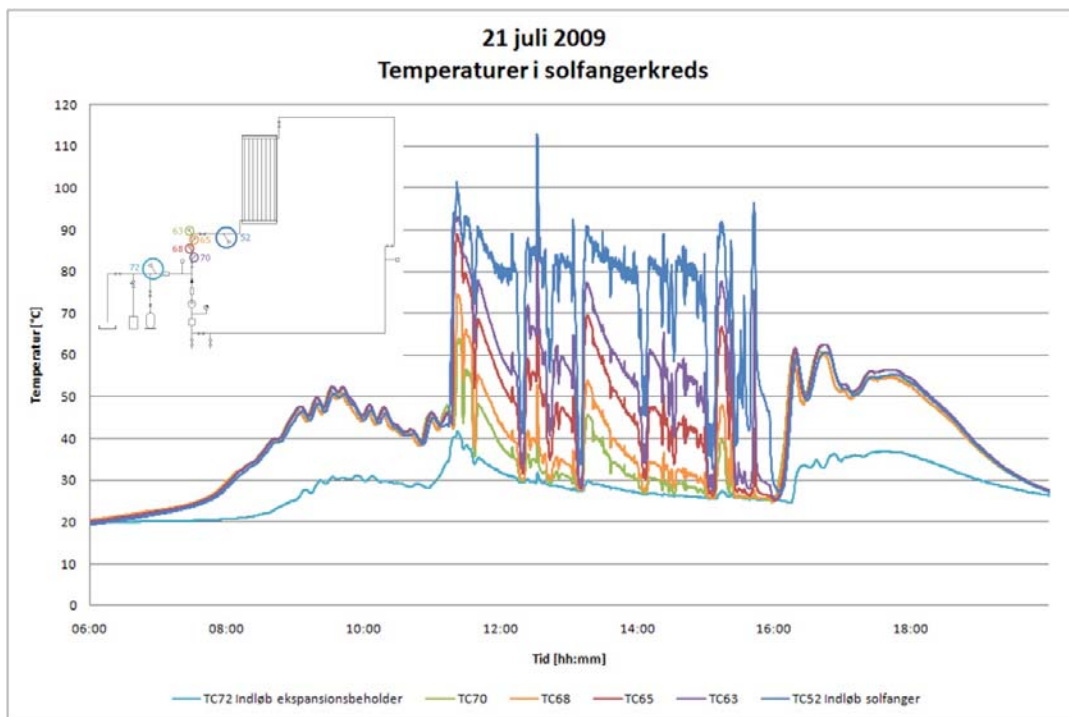
Figur 12. Målinger af temperaturer i anlægget den 21. juli 2009.

Det ses her at de højeste temperaturer forekommer på bagsiden af absorbereren i toppen af solfangeren. Derudover ses det at temperaturen ved indløbet til ekspansionsbeholderen ikke bliver påvirket af de høje temperaturer i solfangeren. Den højeste temperatur ved indløbet til ekspansionsbeholderen er 42 °C.

På Figur 14 er vist temperaturmålingerne fra solfangerkredsen på strækningen ned til ekspansionsbeholderen mod flowretningen. Målepunkternes placering er vist på Figur 13 sammen med afstanden mellem punkterne. Målingerne viser at der ikke under stagnation er faretruende høje temperaturer i solfangerkredsen.

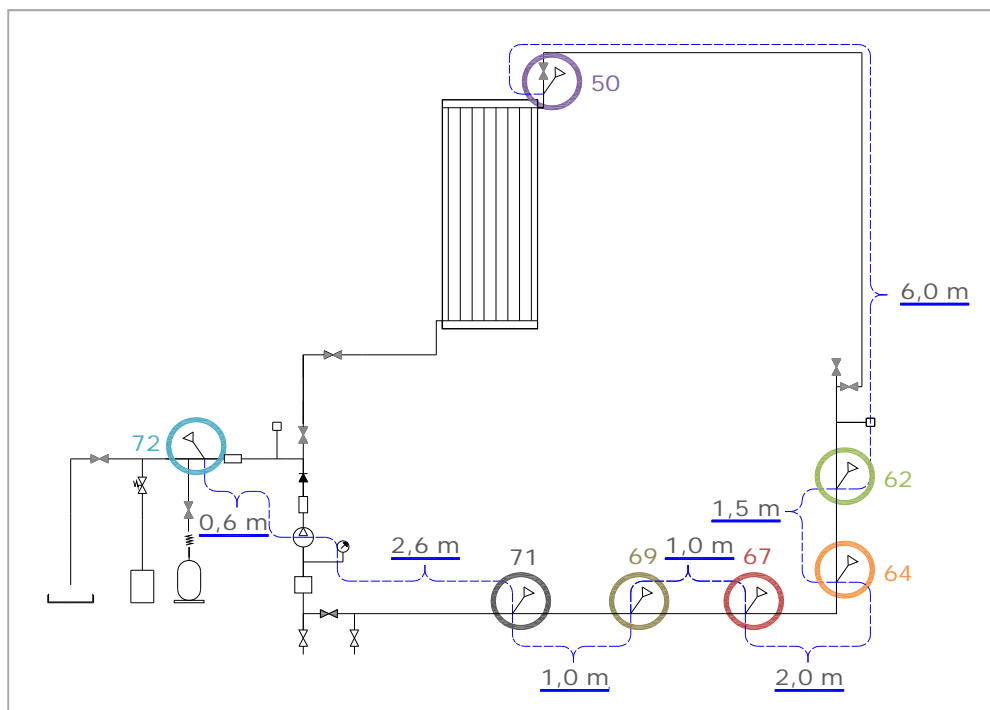


Figur 13. Afstand mellem målepunkterne i solfangerkredsen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren.

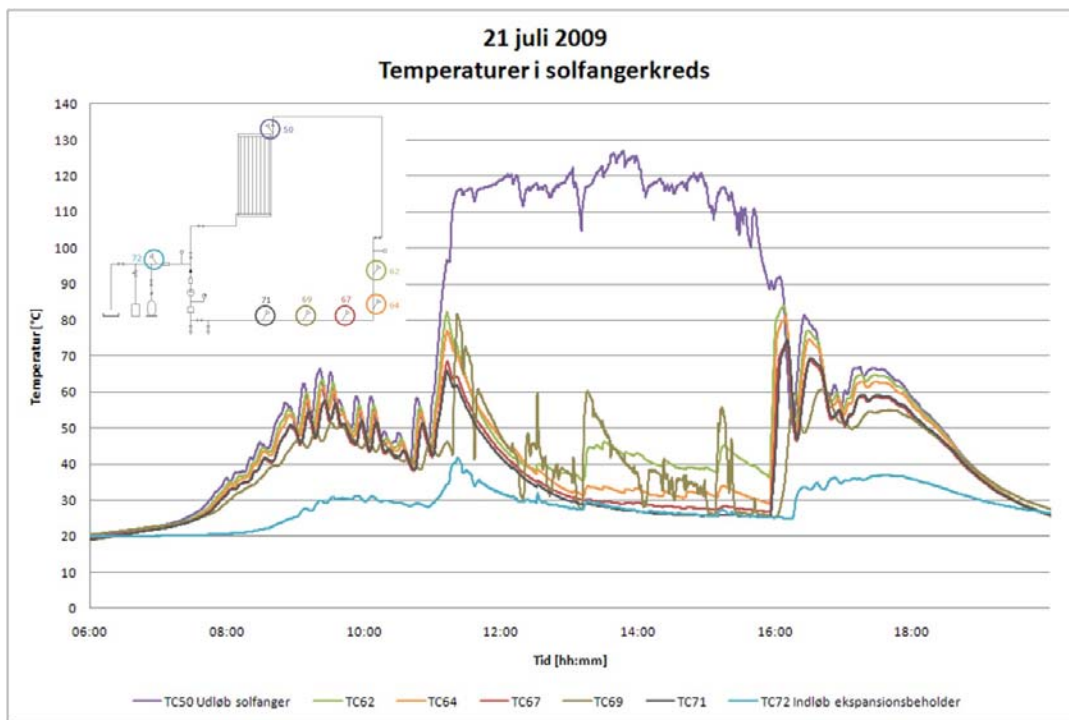


Figur 14. Målinger af temperaturer i anlægget den 21. juli 2009.

På Figur 16 er igen vist temperaturmålingerne fra solfangerkredsen på strækningen ned til ekspansionsbeholderen, denne gang i flowretningen. Målepunkternes placering er vist på Figur 15 sammen med afstanden mellem punkterne.



Figur 15. Afstand mellem målepunkterne i solfangerkredsen fra solfangeren til ekspansionsbeholderen.

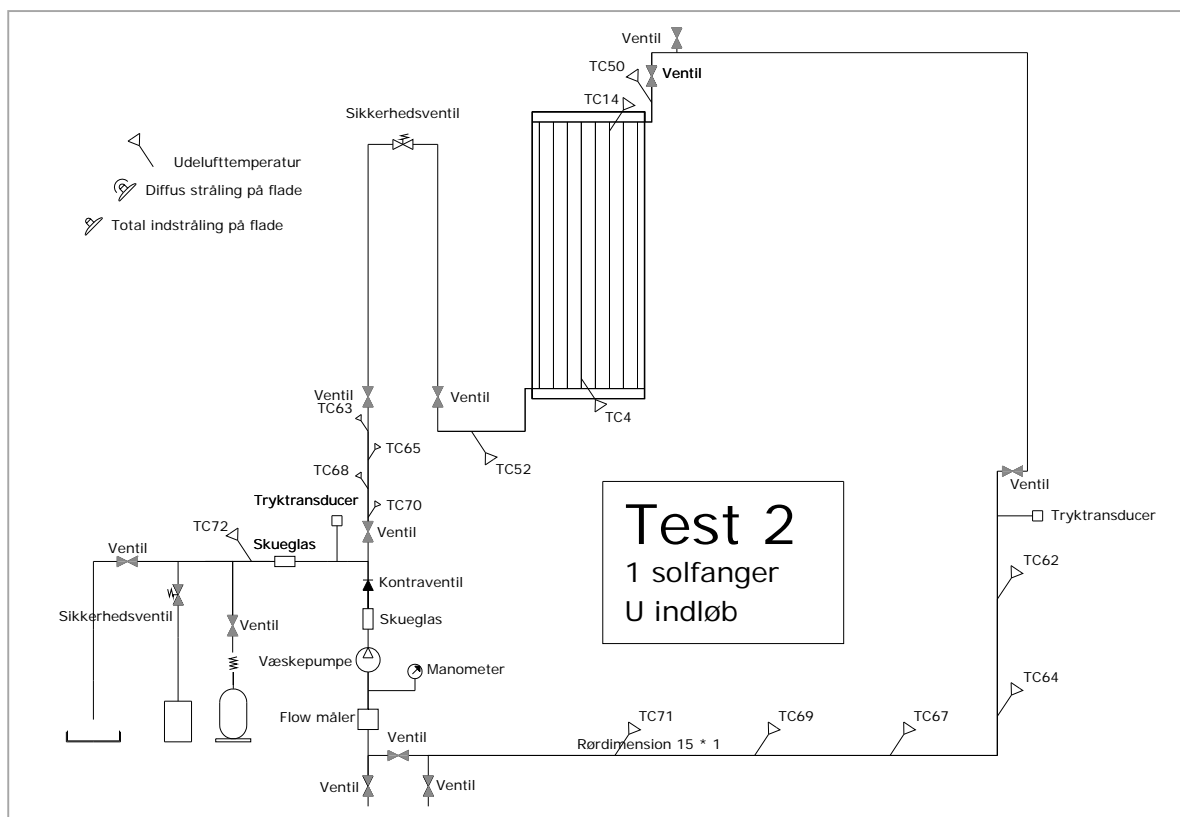


Figur 16. Målinger af temperaturer i anlægget den 21. juli 2009.

Temperaturen på returstrengen varierer ikke væsentligt og er ikke påvirket af de høje temperaturer i solfangeren.

6.2 En solfanger og U-indløb

Testperioden for opbygningen med en solfanger og U-indløb løber fra den 29. juli 2009 til den 10. august 2009. På Figur 17 ses en principskitse af opbygningen. Fortrykket var i hele perioden 1,0 bar. Trykket ved ekspansionsbeholderen varierede fra 0,5 bar til 0,9 bar, se Tabel 3. I måleperioden forekom der 19 perioder med stagnation. Der var ingen ændring af PH værdien for solfangervæsken.

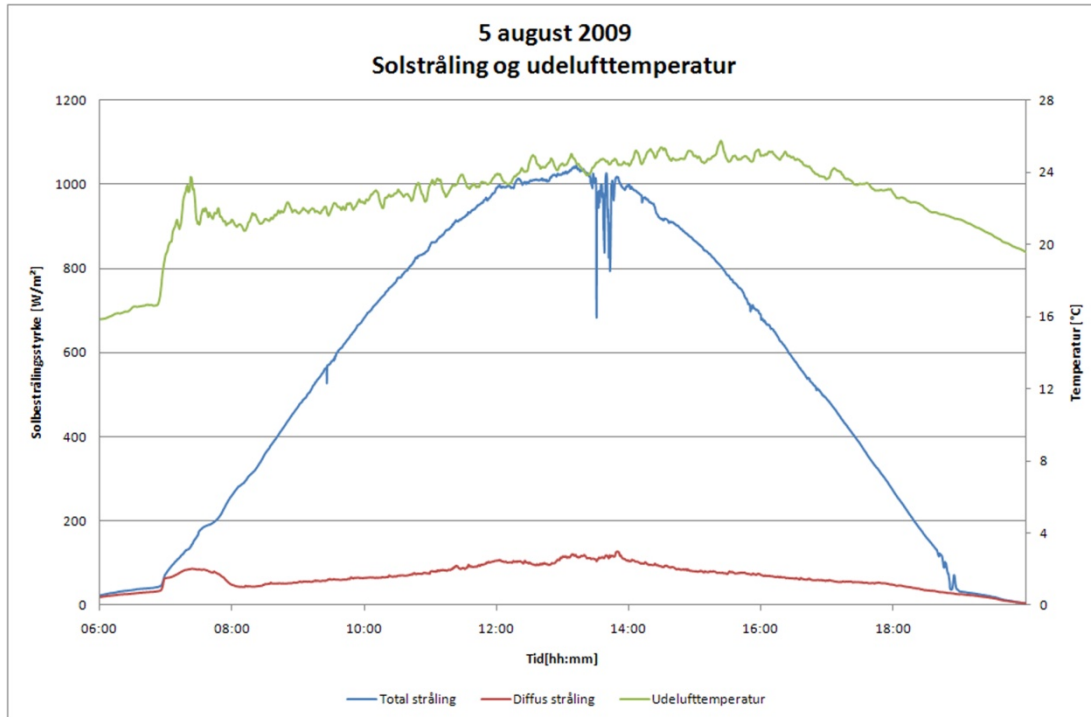


Figur 17. Principskitse af anlægsopbygning til test 2.

Tabel 3. Oversigt over måleperioderne og målingerne med en solfanger og U-indløb.

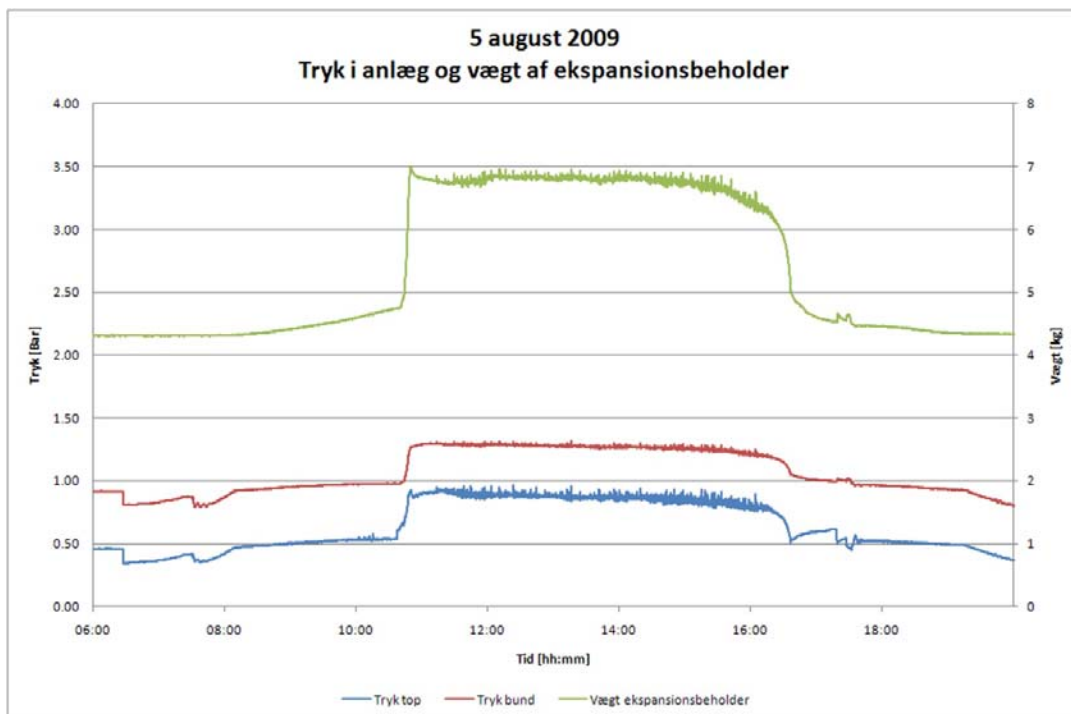
Periode	Fortryk for ekspansionsbeholderen [bar]	Tryk ved ekspansionsbeholder under påfyldning [bar]	Kogepunkts-temperatur for solfangervæske [°C]	Tryk ved solfangerne under stagnation [bar]	Antal kogninger [-]
29/7 – 30/7	1,0	0,5	125	1,0	4
31/7 – 3/8	1,0	0,9	123	0,9	8
4/8 – 8/8	1,0	0,8	123	0,9	5
9/8 – 10/8	1,0	0,7	120	0,8	2

På de følgende figurer vises målinger for den 5. august 2009, som var en solrig dag. Som det ses på Figur 18 var den 5. august 2009 en næsten skyfri dag.



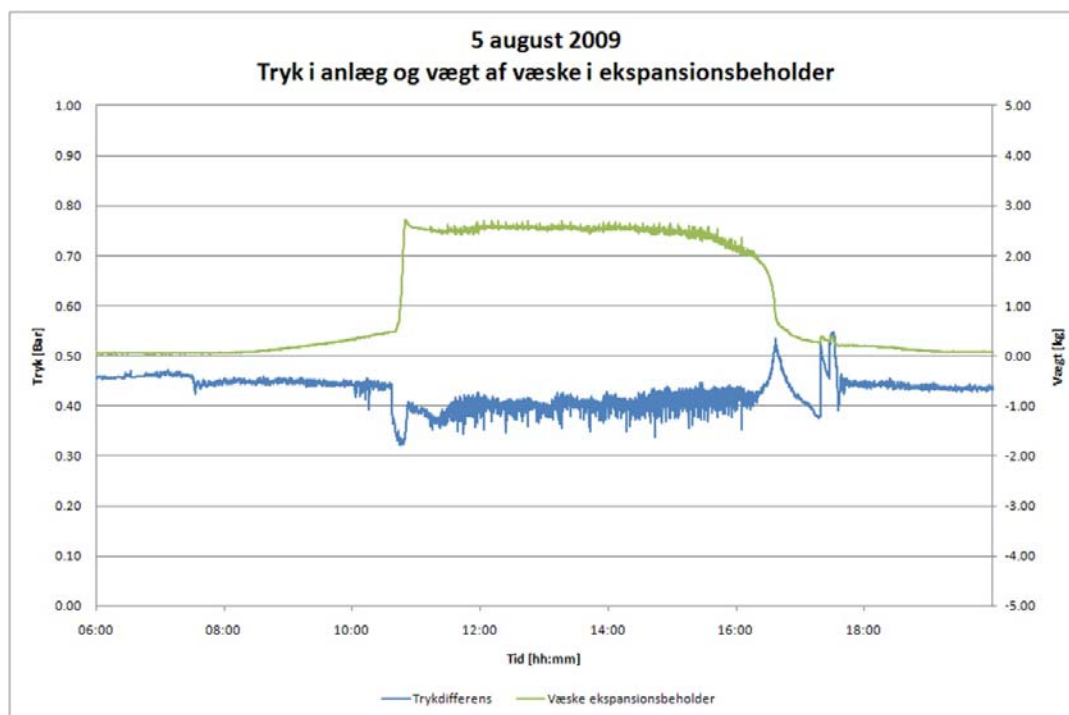
Figur 18. Målinger af solstråling og udelufttemperatur den 5. august 2009.

På Figur 19 ses trykkene i solfangerkredsen og vægten af ekspansionsbeholderen gennem dagen. Stagnation indtræffer lige før kl. 11.00.



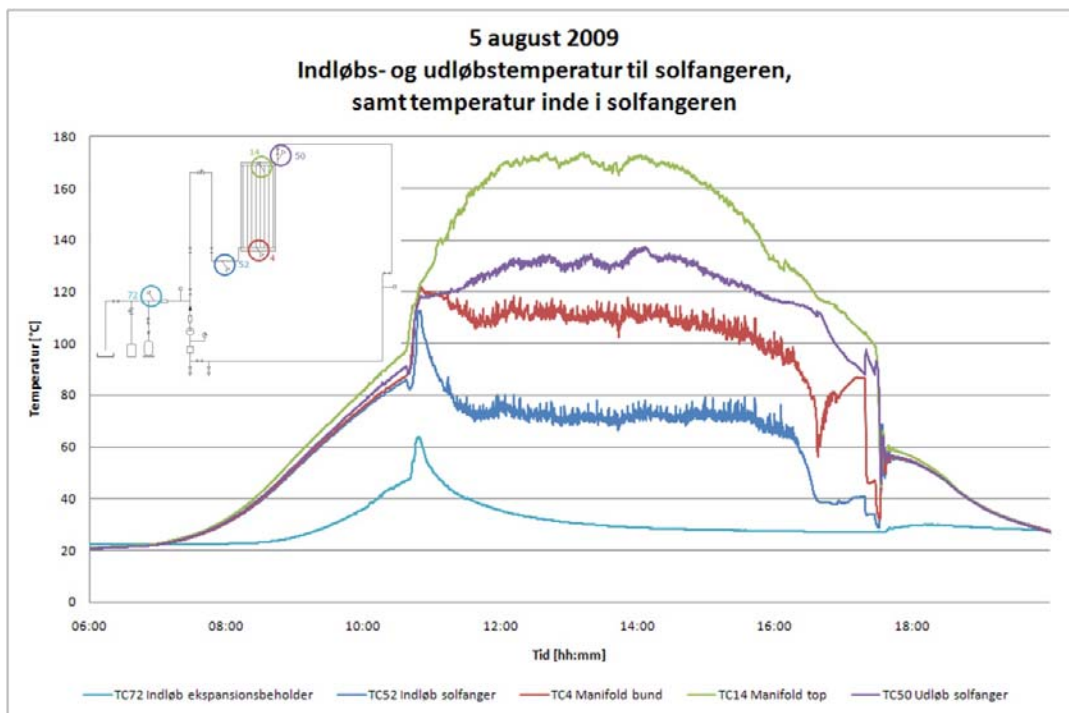
Figur 19. Målinger af tryk i anlægget og vægten af ekspansionsbeholderen den 5. August 2009.

Mængden af væske der presses ned i ekspansionsbeholderen er på 2,5 kg, se Figur 20, hvilket svarer til 2,5 liter. Det svarer til ca. 109 % af solfangerens væskeindhold, også her er differensen mellem trykket ved udløbet fra solfangeren og trykket ved ekspansionsbeholderen mindre under stagnation end ved drift.



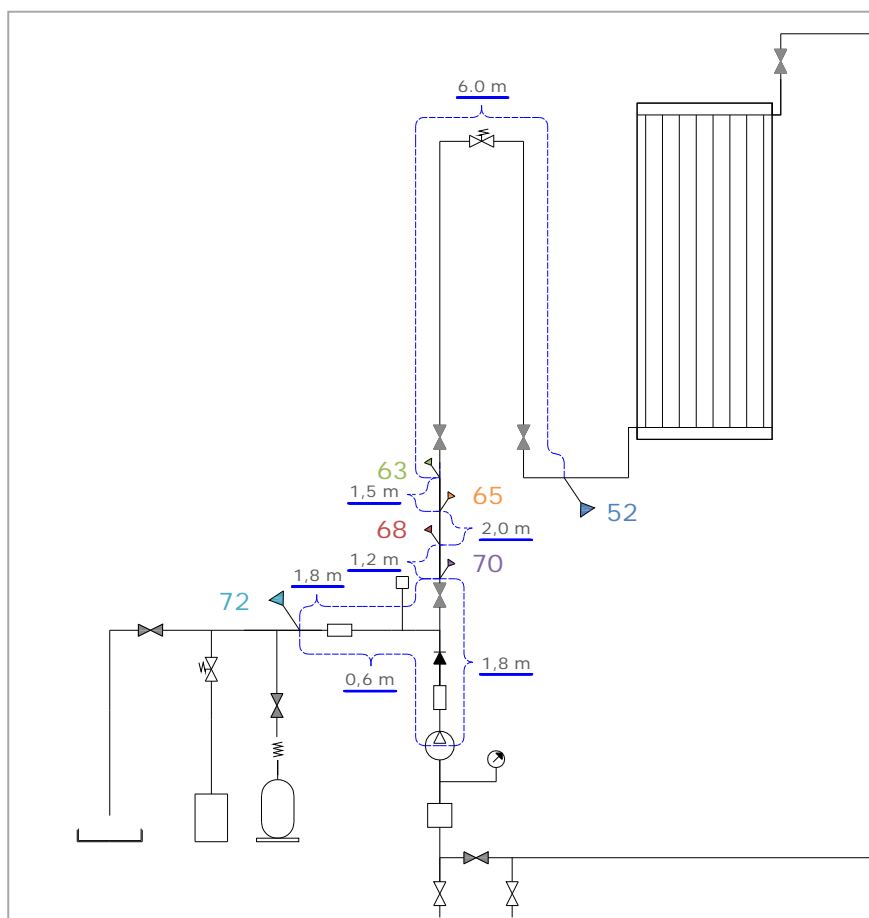
Figur 20. Trykdifferensen og vægten af ekspansionsbeholderen den 5. august 2009.

På Figur 21 er vist temperaturerne ved ind- og udløb til solfangeren samt temperaturerne i solfangeren og ved ekspansionsbeholderen. Igen ses det at de højeste temperaturer som forventet forekommer på bagsiden af absorberne i solfangeren. Igen kan det konstateres at de høje temperaturer ikke når ekspansionsbeholderen. Temperaturen ved ekspansionsbeholderne falder så snart pumpen stopper med at køre.



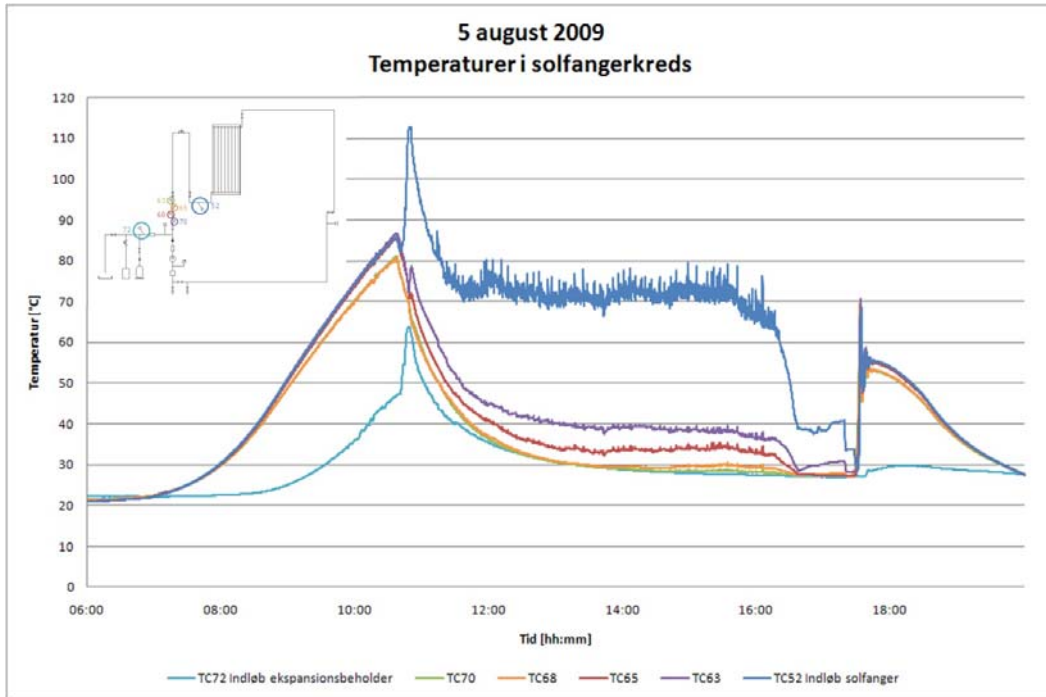
Figur 21. Målinger af temperaturer i anlægget den 5. august 2009.

Temperaturerne i solfangerkredsen på strengen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren er vist på Figur 23. Afstanden mellem målepunkterne er vist tidligere på Figur 22.



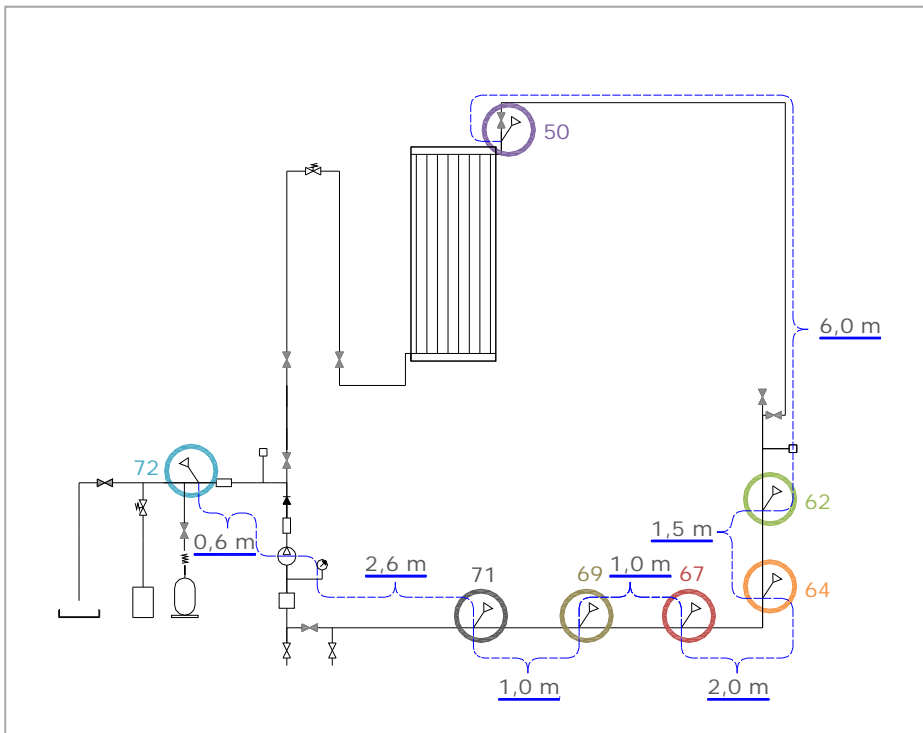
Figur 22. Afstand mellem målepunkterne i solfangerkredsen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren.

Her ses det at temperaturen falder så snart pumpen stopper, samt at de høje temperaturer ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



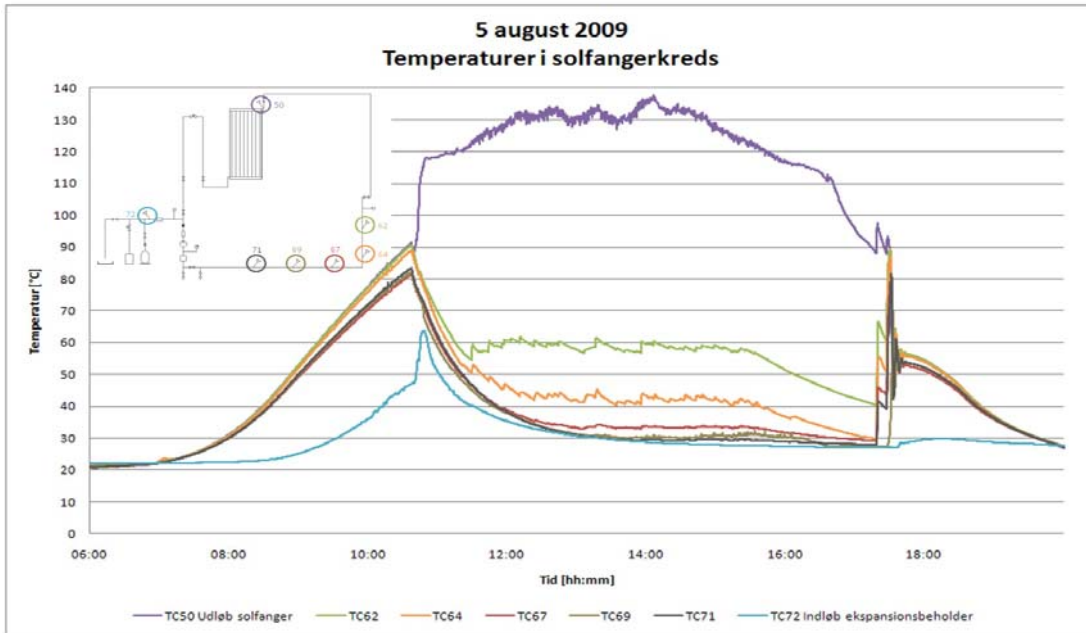
Figur 23. Målinger af temperaturer i anlægget den 5. august 2009.

På Figur 25 er vist temperaturerne i solfangerkredsen fra solfangeren ned til ekspansionsbeholderen. Afstanden mellem punkterne er vist tidligere på Figur 24.



Figur 24. Afstand mellem målepunkterne i solfangerkredsen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren.

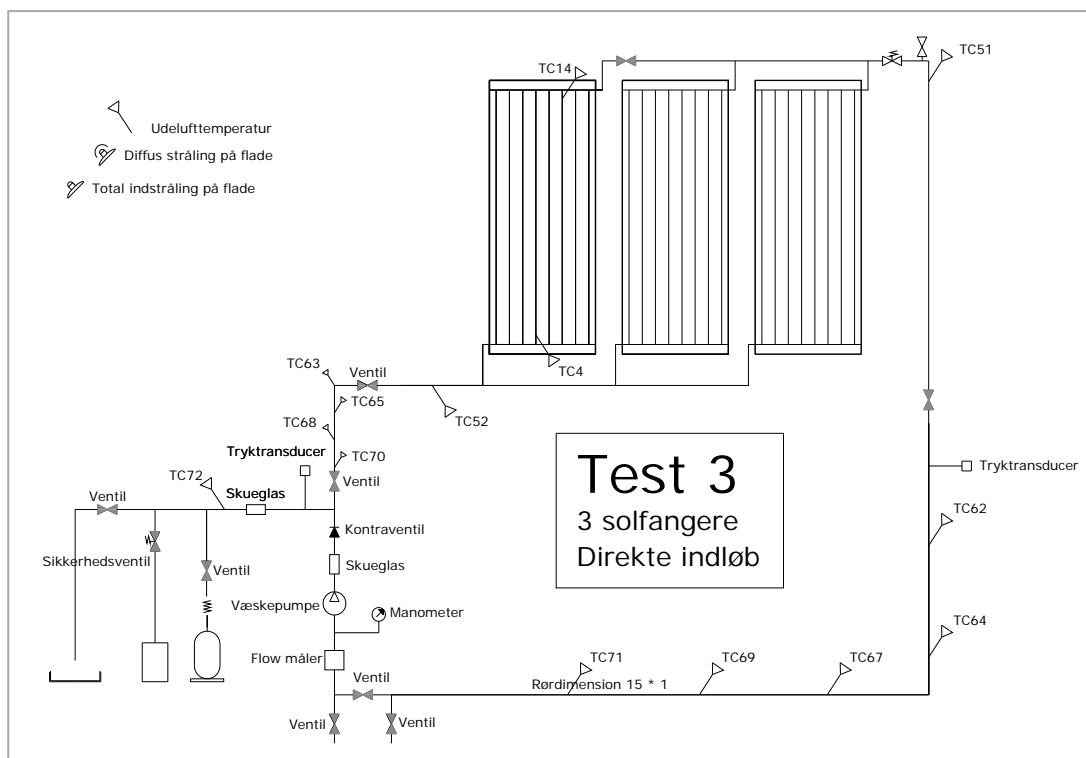
Igen ses det at de høje temperaturer oppe ved udløbet fra solfangeren ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



Figur 25. Målinger af temperaturer i anlægget den 5. august 2009.

6.3 Tre solfangere og direkte indløb

Opbygningen med tre solfangere og direkte indløb, se principskitse på Figur 26, er blevet testet på to forskellige tidspunkter. Første periode løb fra den 11. august 2009 til den 19. august 2009. Anden periode løb fra den 1. september 2009 frem til den 31. marts 2010. Fortrykket for ekspansionsbeholderen og trykket ved ekspansionsbeholderen blev varieret igennem afprøvningen, se Tabel 4.

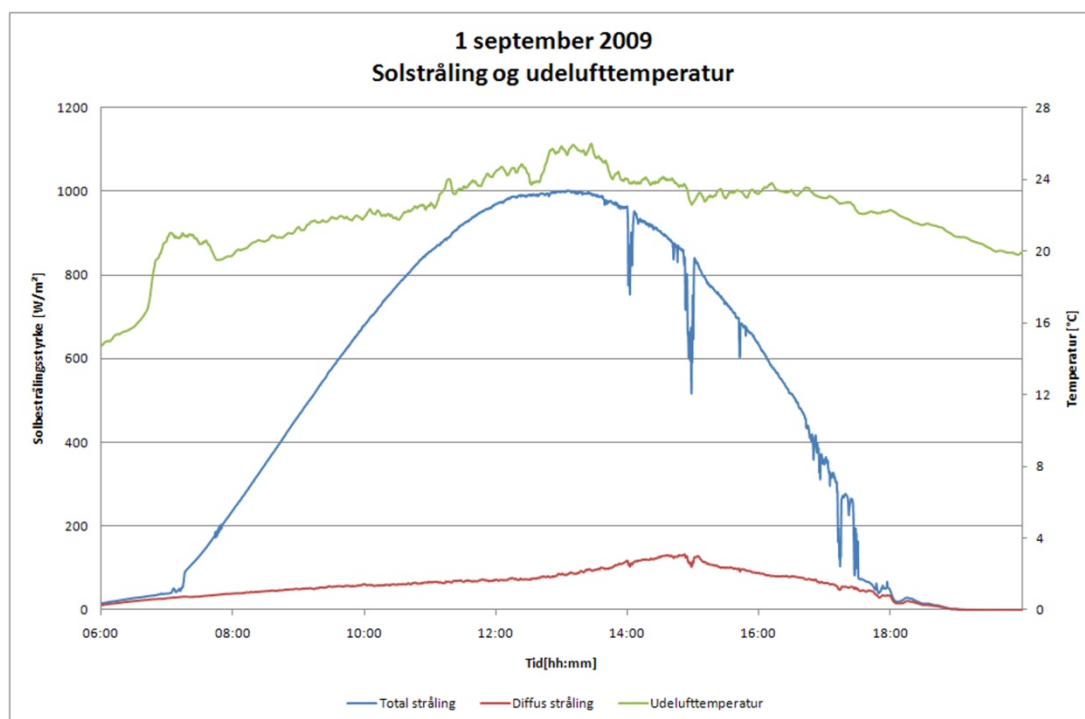


Figur 26. Principskitse af anlægsopbygning til test 3.

Tabel 4. Oversigt over måleperioderne og målinger med tre solfangere og direkte indløb.

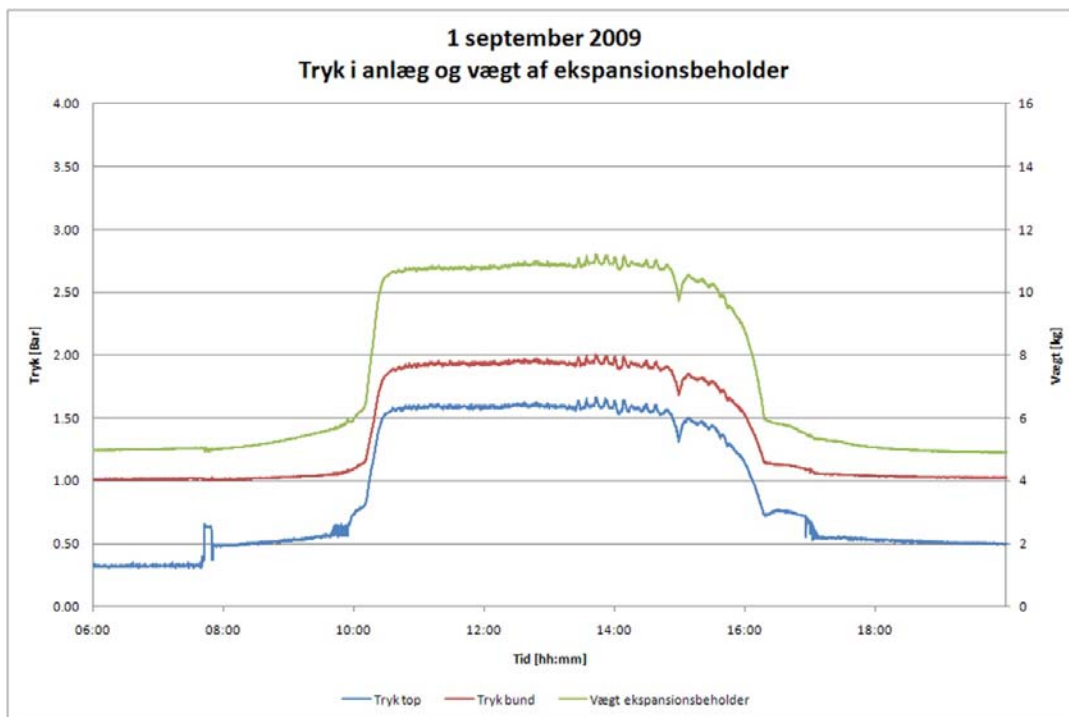
Periode	Fortryk for ekspansionsbeholderen [bar]	Tryk ved ekspansionsbeholder under påfyldning [bar]	Kogepunkts-temperatur for solfangervæske [°C]	Tryk ved solfangerne under stagnation [bar]	Antal kogninger [-]
11/8 – 19/8	1,0	1,0	133	1,5	13
1/9 – 6/9	1,0	1,0	135	1,6	1
7/9 – 22/11	1,0	1,1	136	1,8	26
23/11 – 28/2	2,2 – 1,5	1,8	132	1,5	2
1/3 – 31/3	2,2	1,8	159	3,5	4

På de følgende figurer vises målinger for den 1. september 2009, som var en solrig dag, se Figur 27.



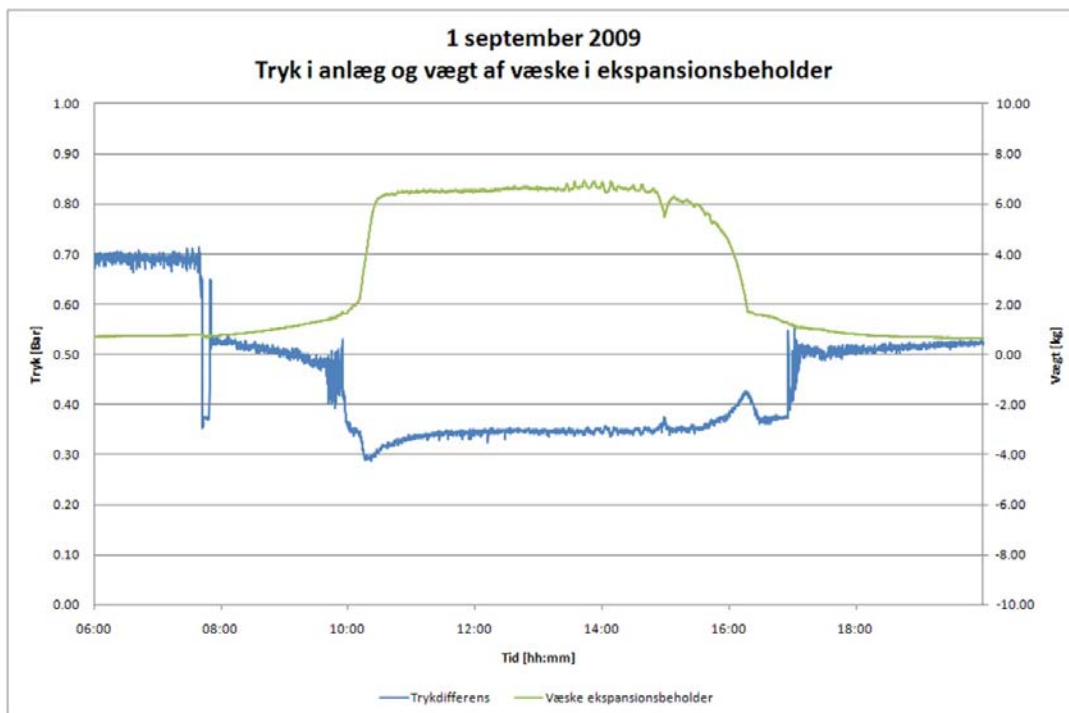
Figur 27. Målinger af solstråling og udelufttemperatur den 1. september 2009.

På Figur 28 ses trykket i solfangerkredsen og vægten af ekspansionsbeholderen gennem dagen. Stagnation indtræffer kl. 10:30.



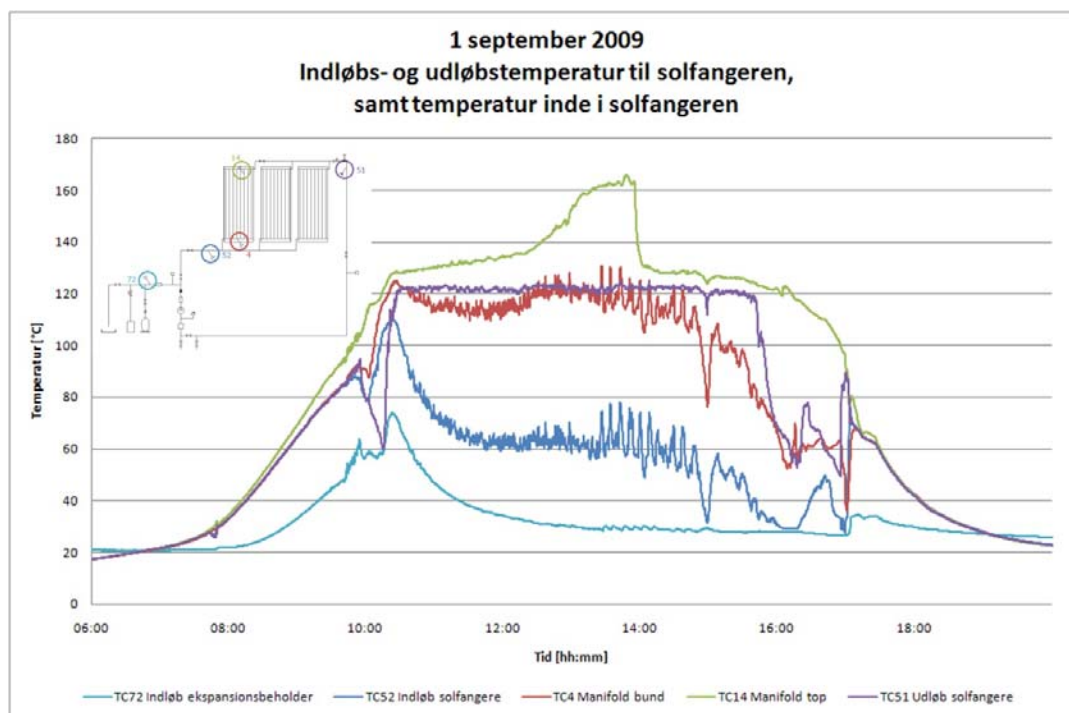
Figur 28. Målinger af tryk i anlægget og vægten af ekspansionsbeholderen den 1. september 2009.

Vægten af den væske der presses ned i ekspansionsbeholderen under stagnation er på 6,6 kg, se Figur 29, hvilket svarer til 6,5 liter, eller 95 % af solfangernes væskeindhold. Også her er differensen mellem trykket ved solfangerne og trykket ved ekspansionsbeholderen lavere under stagnation end under drift.



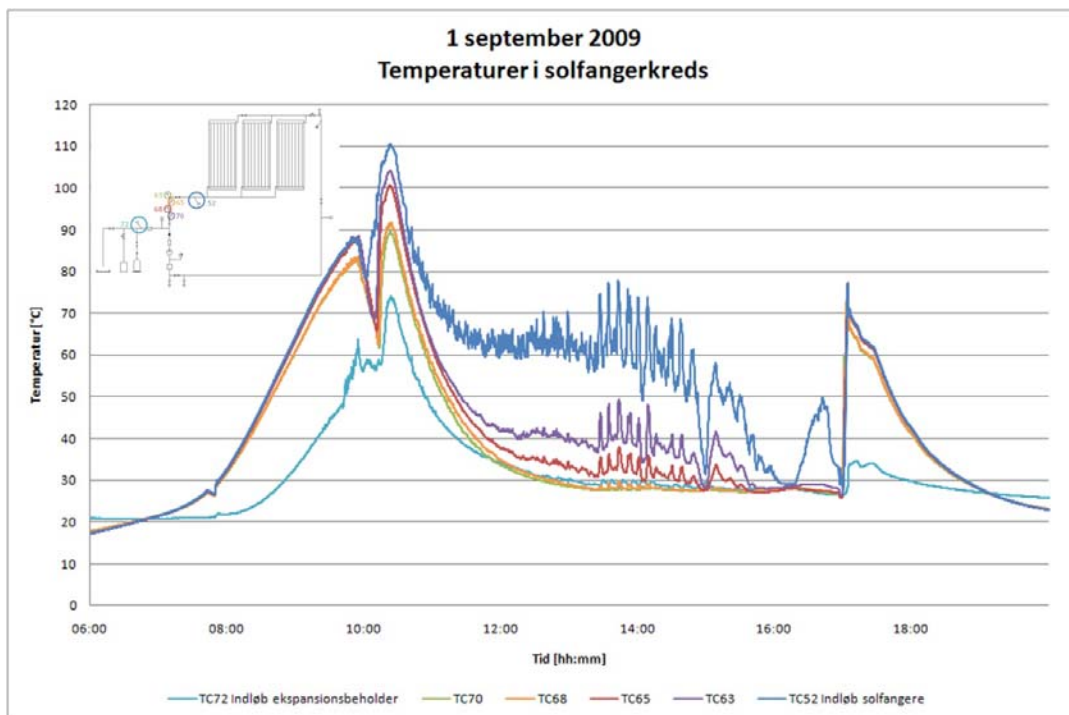
Figur 29. Trykdifferensen og vægten af ekspansionsbeholderen den 1. september 2009.

På Figur 30 er vist temperaturerne ved ind- og udløb til solfangeren samt temperaturerne i solfangeren og ved ekspansionsbeholderen. Igen ses det at de højeste temperaturer forekommer på bagsiden af absorbereren i solfangeren. Igen kan det konstateres at de høje temperaturer ikke når ekspansionsbeholderen.



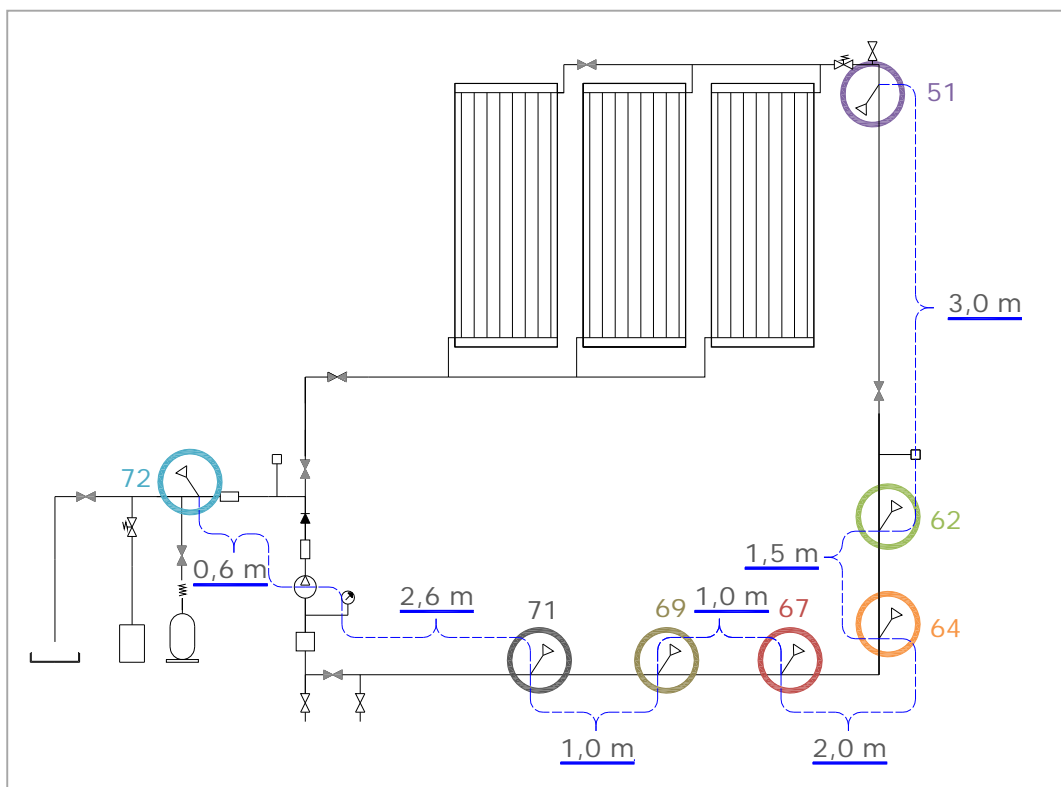
Figur 30. Målinger af temperaturer i anlægget den 1. september 2009.

Temperaturerne i solfangerkredsen på strengen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren er vist på Figur 31. Afstanden mellem målepunkterne er vist på Figur 13. Her ses det igen at temperaturen falder så snart pumpen stopper, samt at de høje temperaturer ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



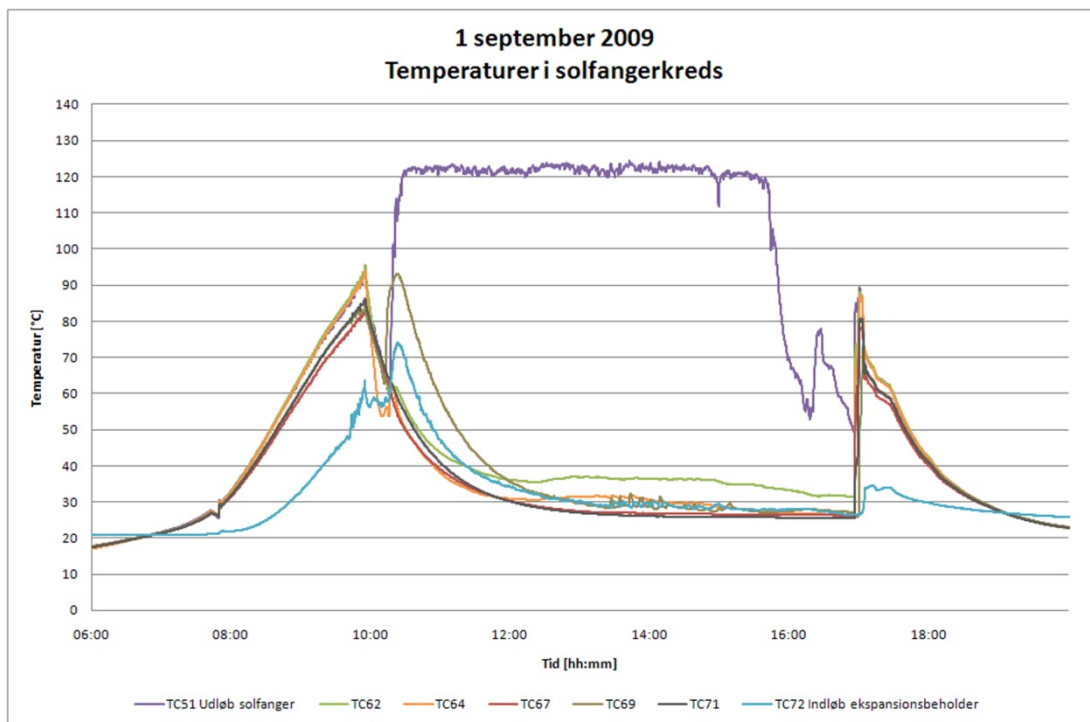
Figur 31. Målinger af temperaturer i anlægget den 1. september 2009.

På Figur 33 er vist temperaturerne i solfangerkredsen fra solfangeren ned til ekspansionsbeholderen. Afstanden mellem punkterne er vist på Figur 32.



Figur 32. Afstand mellem målepunkterne i solfangerkredsen fra solfangeren til ekspansionsbeholderen.

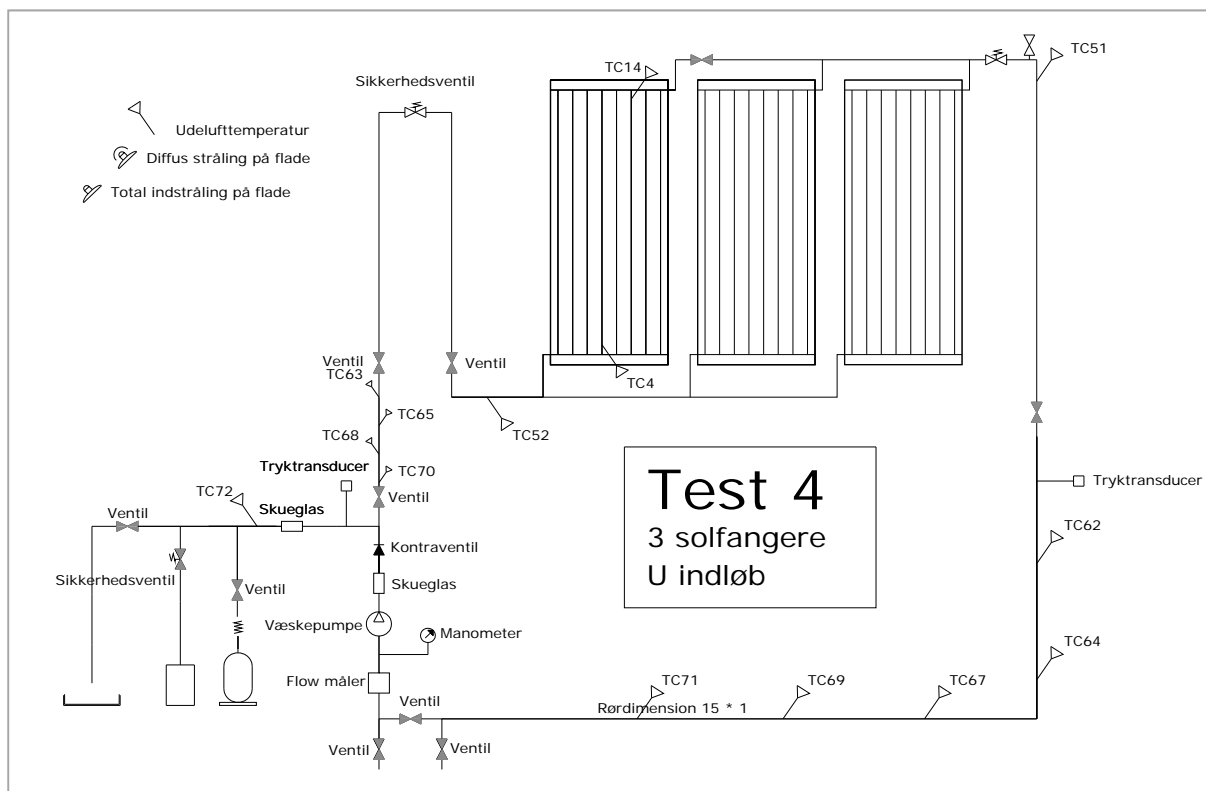
Igen ses det at de høje temperaturer oppe ved udløbet fra solfangeren ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



Figur 33. Målinger af temperaturer i anlægget den 1. september 2009.

6.4 Tre solfangere og U-indløb

Måleperioden for tre solfangere med U-indløb startede den 20. august 2009 og løb frem til den 31. august 2009. Se principskitse af opbygningen på Figur 34. Fortrykket var 1,0 bar og trykket i anlægget ved ekspansionsbeholderen var 1,1 bar. Under hele måleperioden var der 18 perioder med stagnation. I Tabel 5 ses værdier for tryk og temperatur for anlægsopbygningen.

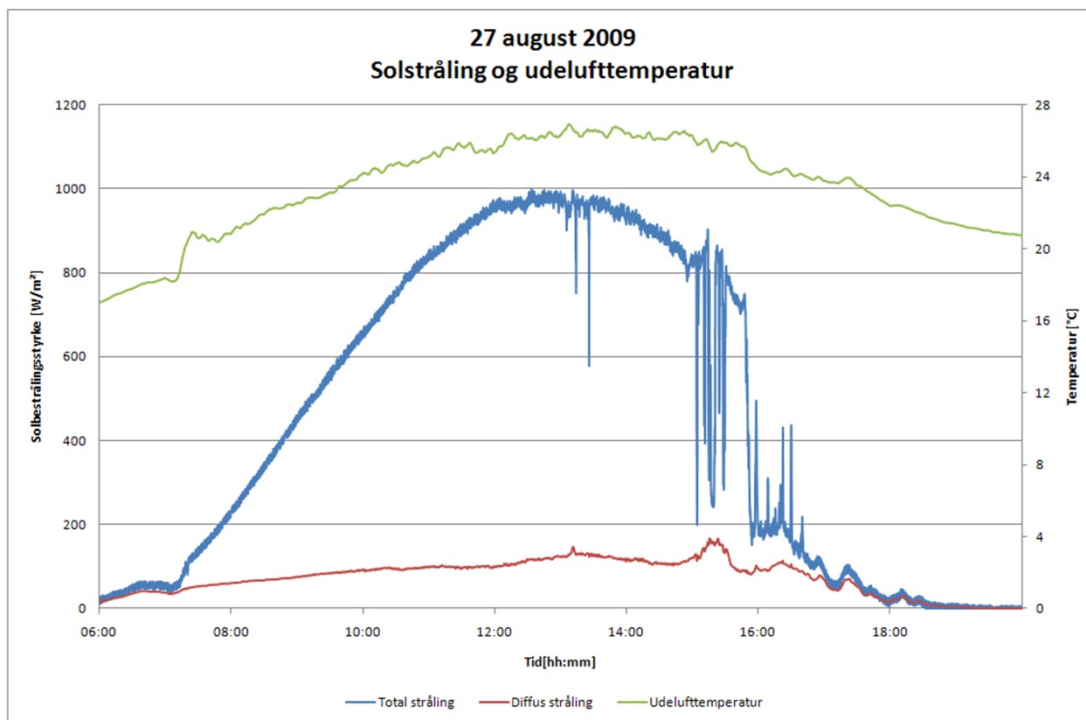


Figur 34. Principskitse af anlægsopbygning til test 4.

Tabel 5. Oversigt over måleperioden og målinger med tre solfangere og U-indløb.

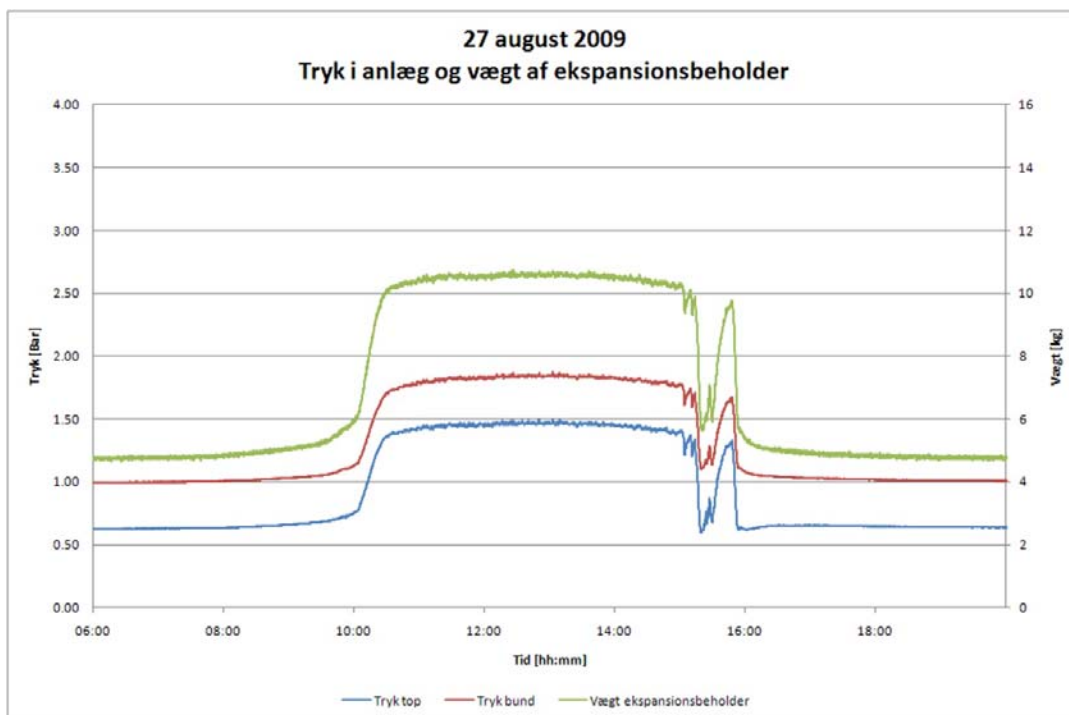
Periode	Fortryk for ekspansionsbeholderen [bar]	Tryk ved ekspansionsbeholder under påfyldning [bar]	Kogepunkts-temperatur for solfangervæske [°C]	Tryk ved solfangerne under stagnation [bar]	Antal kogninger [-]
20/8 – 31/8	1,0	1,1	135	1,6	18

På de følgende figurer vises målinger for den 27. august 2009, hvilket var en dag med sol om formiddagen frem til eftermiddagen hvor der kommer skyer, se Figur 35.



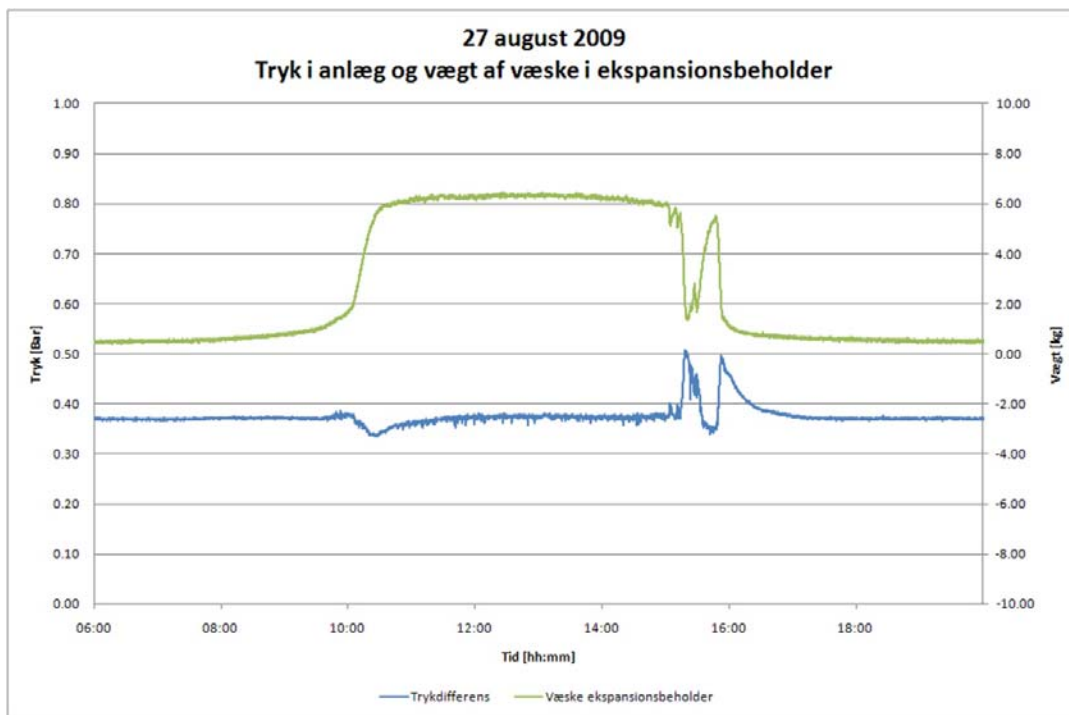
Figur 35. Målinger af solstråling og udelufttemperatur den 27. august 2009.

På Figur 36 ses trykket i solfangerkredsen og vægten af ekspansionsbeholderen gennem dagen. Stagnation indtræffer kl. 10:30.



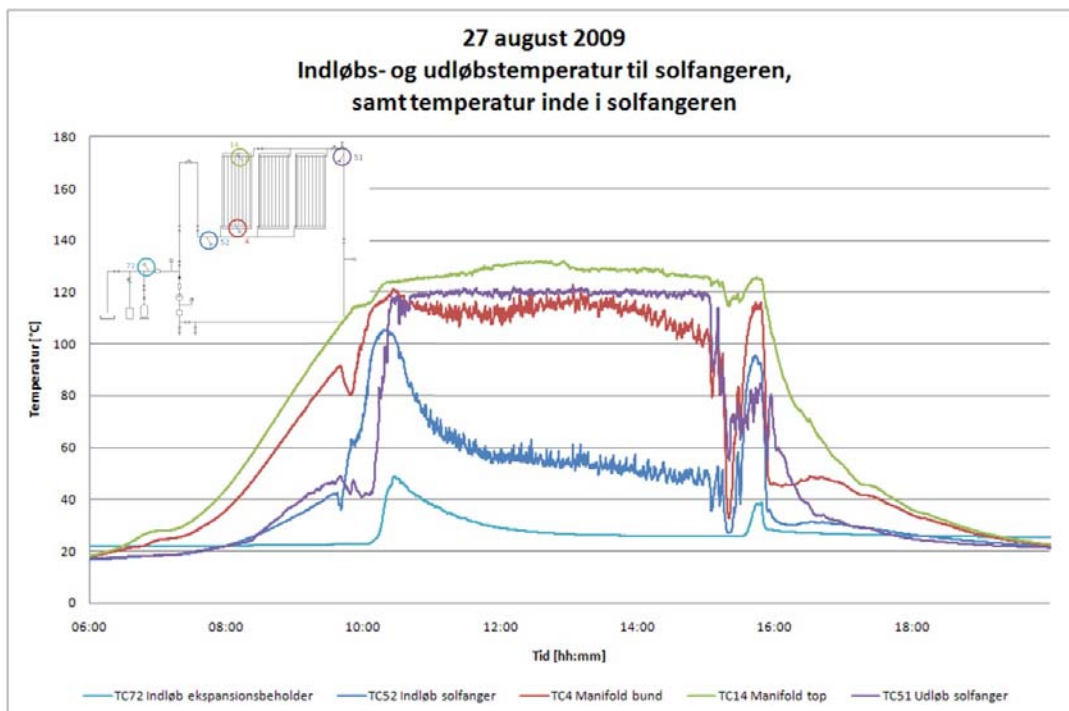
Figur 36. Målinger af tryk i anlægget og vægten af ekspansionsbeholderen den 27. august 2009.

Vægten af den væske der presses ned i ekspansionsbeholderen under stagnation er på 6,25 kg, se Figur 20, hvilket svarer til 6,11 liter. Dette svarer til 90 % af volumenet i solfangerne.



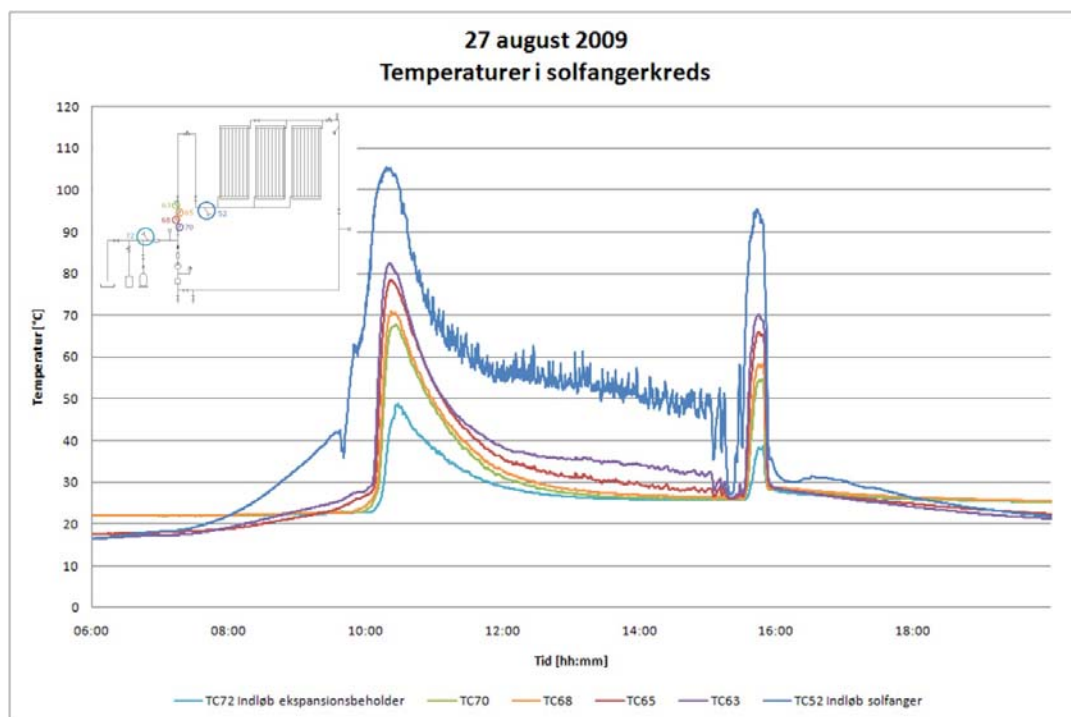
Figur 37. Trykdifferensen og vægten af ekspansionsbeholderen den 27. august 2009.

På Figur 38 er vist temperaturerne ved ind- og udløb til solfangeren samt temperaturerne i solfangeren og ved ekspansionsbeholderen. Igen ses det at de højeste temperaturer forekommer på bagsiden af absorbereren i toppen af solfangeren. Igen kan det konstateres at de høje temperaturer ikke når ekspansionsbeholderen.



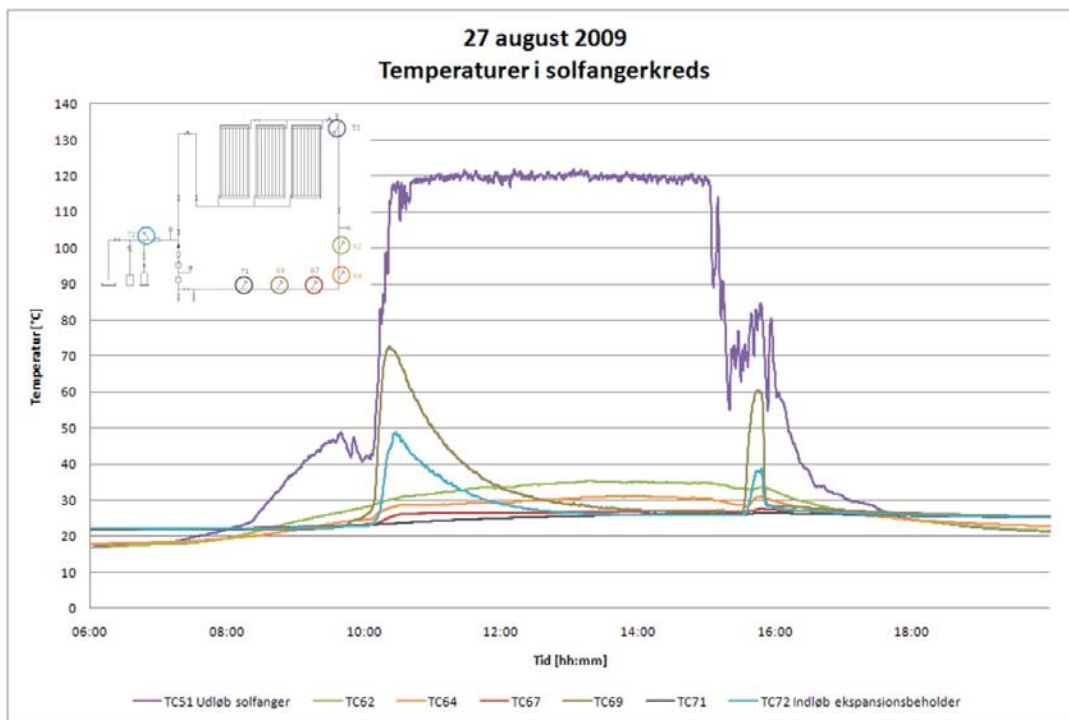
Figur 38. Målinger af temperaturer i anlægget den 27. august 2009.

Temperaturerne i solfangerkredsen på strengen fra ekspansionsbeholderen til solfangeren er vist på Figur 39. Afstanden mellem målepunkterne er vist på Figur 22. Her ses det igen at temperaturen falder så snart pumpen stopper, samt at de høje temperaturer ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



Figur 39. Målinger af temperaturer i anlægget den 27. august 2009.

På Figur 40 er vist temperaturerne i solfangerkredsen fra solfangeren ned til ekspansionsbeholderen. Afstanden mellem punkterne er vist tidligere på Figur 32. Igen ses det at de høje temperaturer oppe ved udløbet fra solfangeren ikke når ned til ekspansionsbeholderen.



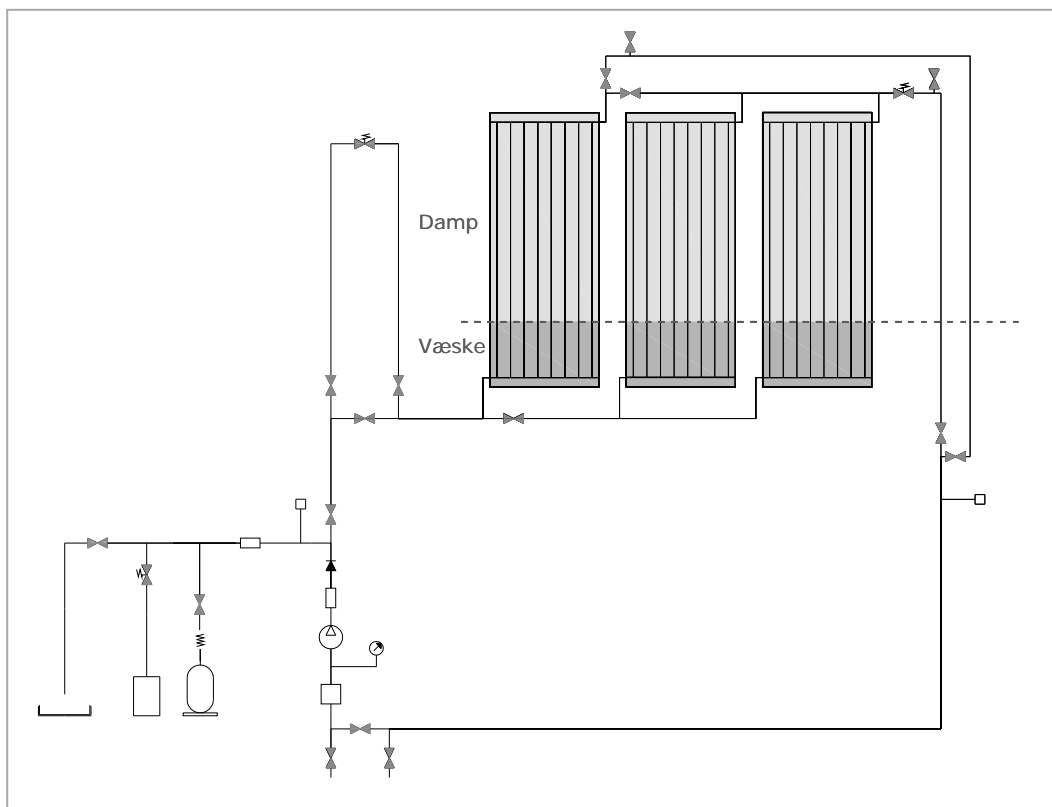
Figur 40. Målinger af temperaturer i anlægget den 27. august 2009.

6.5 Konklusion målinger

Under stagnation fordampes solfangervæsken i toppen af solfangerne under stor udvidelse. Udvidelsen presser solfangervæske ud af solfangerens nederste tilslutningsrør. Solfangervæske presses herved ind i ekspansionsbeholderen. Under stagnation opretholdes meget høje temperaturer i solfangeren, mens kritisk høje temperaturer i øvrigt ikke forekommer i solfangerkredsen. Dette er uafhængigt af om der er en eller flere solfangere i anlægget og af om det er direkte indløb eller U-indløbet der benyttes. Volumenet, som optages i ekspansionsbeholderen under stagnation varierer mellem 90 % og 109 % af solfangerens væskevolumen i afhængighed af fortrykket for ekspansionsbeholderen og trykket i solfangerkredsen. Altså er der i stagnationsperioder ofte en smule solfangervæske i nederste del af solfangeren, i andre perioder er solfangerne helt tømt for væske. Dette afhænger af trykforholdene. Den højeste temperatur, som solfangervæsken er fordampet ved er 159 °C. PH værdien for solfangervæsken er ikke reduceret igennem hele forsøget og hverken solfanger eller solfangerkreds har taget skade af de 97 kogninger. Det konkluderes derfor at princippet med en stor ekspansionsbeholder og et styresystem der stopper cirkulationspumpen ved høje temperaturer er velegnet til at sikre Batec anlæg med Batec's solfangervæske mod faretruende høje temperaturer.

7 Teoretisk analyse af solfangerkreds under stagnation

Solfangerkredsen som undersøges her er den samme som er undersøgt eksperimentelt. Som solfangervæske anvendes en propylenglykol/vand blanding. Solfangerkredsen antages at opnå en ligevægtstilstand under stagnation. Solfangerne inddeles i to dele: En hvor væske koger og en med overophedet damp, se Figur 41. Under stagnation koger væsken i den nederste del af solfangerne, og der vil i den damp der dannes fra væsken ske en øgning af temperaturen til samme niveau som den overophedede damp i den øverste del af solfangerne. En del af den overophedede damp vil kondenseres på det koldeste sted i den øverste del af solfangeren eller i den øverste del af solfangerkredsen. Den kondenserede væske i toppen af solfangeren vil flyde tilbage til den overophedede damp og fordampe påny. En del af dampen presses ud af udløbet fra solfangerne og kondenserer i den øverste del af solfangerkredsen. Herfra vil noget af den kondenserede væske flyde tilbage til solfangerne, mens resten af den kondenserede væske vil skubbe væske frem i solfangerkredsen, hvilket vil resultere i at væske bliver skubbet ind i solfangerne ved indløbet til solfangerne, det vil sige nederst i solfangerne.



Figur 41. Skitsering af kogningsdel og fordampningsdel.

7.1 Analysemodel

Den teoretiske analyse er baseret på følgende antagelser:

- Systemet opnår under stagnation en tilstand hvor det forbliver uændret.
- Solfangerne er inddelt i to dele. En del hvor der sker kogning, hvor temperaturen af solfangervæsken der løber ind i solfangerne vil opnå kogningstemperatur, og en del med mættet og overopvarmet damp. Den øverste del af solfangerkredsen er også fyldt med damp, se Figur 41.
- Luften inde i ekspansionsbeholder og dampen i den overopvarmede del af solfangeren behandles ved hjælp af idealgasloven.
- Trykket i solfangerkredsen er altid højere end fortrykket i ekspansionsbeholderen.

7.1.1 Kogning

For den del af solfangerne hvor propylenglykol/vand blandingen er på væskeform kan følgende ligevægtsligning opstilles:

$$q_{ce,sol} = q_{ce} + q_{ceh} \quad [1]$$

hvor $q_{ce,sol}$ er effekten væsken modtager fra solen [W]

q_{ce} er effekten der benyttes til at opvarme solfangervæske, der tilføres den nederste del af solfangeren, til kogepunktet [W]

q_{ceh} er effekten der tilføres solfangervæsken for at få den til at koge [W]

7.1.2 Damp

For den del af solfangerne hvor propylenglykol/vand blandingen er på dampform kan følgende ligevægtsligning opstilles:

$$q_{cs,sol} = q_{csh} + q_{cs,re} \quad [2]$$

Hvor $q_{cs,sol}$ er effekten modtaget fra solen [W]

q_{csh} er effekten der tilføres dampen for at få den opvarmet til en overophedet tilstand [W]

$q_{cs,re}$ er effekten der benyttes til at få den kondenserede damp i toppen af solfangeren og solfangerkredsen til at fordampe igen [W]

7.1.3 Solfangerkreds

I henhold til loven om massebevarelse i ligevægt gælder:

$$M_o = M_v + M_{in} \quad [3]$$

hvor M_o er massen af væske der oprindeligt var i solfangeren og solfangerkredsen hvor der under stagnation er damp [kg]

M_v er massen af damp i den del af solfangerne og solfangerkredsen hvor der er damp når systemet er under stagnation [kg]

M_{in} er massen af propylenglykol/vand blandingen som løber ind i ekspansionsbeholderen under stagnation [kg]

Hvis der kun ses på fordampningen og kondenseringen i solfangerkredsen fås følgende:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{econ} \quad [4]$$

Hvor \dot{m}_e er masseflowet af damp der fordamper fra væsken i den nederste del af solfangeren [kg/s]
 \dot{m}_{econ} er masseflowet af den del af væsken der kondenserer ved udløbet fra solfangeren og i solfangerkredsen og som skubber ny væske ind i solfangerne ved indløbet [kg/s]

7.2 Teoretisk analyse

7.2.1 Kogning i solfangeren

I den del af solfangeren hvor der er kogning kan følgende ligninger opstilles:

$$q_{ce,sol} = GA_{ce}\eta_{ce} \quad [5-1]$$

$$q_{ce} = \dot{m}_e\lambda \quad [5-2]$$

$$q_{ceh} = \dot{m}_e c_{p,l}(T_e - T_{in}) \quad [5-3]$$

hvor G er solbestrålingsstyrken på solfangeren [W/m²]
 A_{ce} er solfangerarealet med kogning [m²]
 η_{ce} er solfangereffektiviteten ved kogningstemperatur efter at der er korrigeret for indfaldskorrektionsfaktoren [-]
 λ er fordampningsvarmen for solfangervæsken i solfangerne [kJ/kg]
 $c_{p,l}$ er varmekapaciteten for væsken i solfangerne [kJ/kgK]
 T_e er kogningstemperaturen [°C]
 T_{in} er temperaturen for væsken som løber ind i solfangerne ved indløbet [°C]

η_{ce} kan beregnes via følgende formel:

$$\eta_{ce} = k_{\theta}a_0 - a_1T_e^* - a_2GT_e^{*2} \quad [5-4]$$

hvor a_0 er starteffektivitet for solfangerne ($T_e^* = 0$) [-]
 k_{θ} er indfaldsvinkelkorrektionsfaktoren [-]
 a_1 er varmetabskoefficienten for solfangerne når $T_e^* = 0$ [W/m²K]
 a_2 er den temperaturafhængige varmetabskoefficient for solfangerne [W/m² K²]

T_e^* [Km²/W] kan beregnes via følgende formel:

$$T_e^* = (T_f - T_a)/G \quad [5-5]$$

hvor T_a er udelufttemperaturen [°C]

T_f er temperaturen af væsken i solfangerne [°C]

7.2.2 Damp i solfangeren

I den del af solfangeren hvor der er overophedet damp kan følgende formler opstilles:

$$q_{cs,sol} = GA_{cs}\eta_{cs} \quad [6-1]$$

$$q_{csh} = \dot{m}_e c_{p,g}(T_s - T_e) \quad [6-2]$$

$$q_{cs,re} = \dot{m}_{re} c_{p,g}(T_s - T_e) + \dot{m}_{re} \lambda \quad [6-3]$$

hvor A_{cs} er arealet med overophedet damp i solfangerne [m²]

η_{cs} er solfangereffektiviteten ved temperaturen af den overophedede damp [-]

$c_{p,g}$ er varmekapaciteten af dampen i solfangerne [kJ/kgK]

T_s temperaturen af den overophedede damp [°C]

\dot{m}_{re} er masseflowet af dampen der genfordamper efter at have været kondenseret ved udløbet fra solfangerne [kg/s]

Solfangereffektiviteten ved temperaturen af den overophedede damp (η_{cs}) kan beregnes via formel (5-4), hvor der anvendes T_s^* i stedet for T_e^* .

T_s^* findes via:

$$T_s^* = (T_s - T_a)/G \quad [6-4]$$

7.2.3 Ekspansionsbeholder

Inden i ekspansionsbeholderen er en ballon hvor der er luft. Luften i ballonen følger idealgasloven

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad [7]$$

hvor P_1 , V_1 og T_1 er trykket, volumenet og temperaturen af luften indeni ballonen ved installation ved 20 °C

P_2 , V_2 og T_2 er trykket, volumenet og temperaturen af luften indeni ballonen når systemet er i stagnation.

7.2.4 Andre områder i solfangerkredsen

Dampen der forlader solfangerne via udløbet fra solfangerne kondenserer. Noget af den kondenserede væske løber tilbage til solfangeren og fordamper igen. Resten af den kondenserede væske skubber væske videre rundt i solfangerkredsen og skubber til sidst væske ind i solfangeren igen ved solfangernes indløb. Hvis \dot{m}_{ucon} er masseflowet af væsken der kondenserer ved udløbet fra solfangerne kan følgende ligning opstilles for masseflowet af dampen der genfordamper efter at have været kondenseret ved udløbet fra solfangerne (\dot{m}_{re}):

$$\dot{m}_{re} = \dot{m}_{ucon} - \dot{m}_{econ} \quad [8]$$

hvor \dot{m}_{ucon} er masseflowet af væske der kondenserer ved udløbet fra solfangerne [kg/s]
 \dot{m}_{econ} er masseflowet af den del af væsken der kondenserer ved udløbet fra solfangeren og skubber ny væske ind i solfangerne ved indløbet [kg/s]

7.3 Teoretiske beregninger

Hvis følgende er kendt:

- Dimensioner og effektivitet af solfangerne
- Solfangerkredsens udformning
- Længde og isoleringen af rørene i den øverste del af solfangerkredsen
- Fortrykket for ekspansionsbeholderen samt trykket i solfangerkredsen under installation
- Procent propylenglykol i propylenglykol/vand blandingen
- Udelufttemperatur
- Solbestrålingsstyrken på solfangeren

så kan mængden af propylenglykol/vand blandingen der presses ned i ekspansionsbeholderen beregnes ved hjælp af de opstillede ligninger. Desuden kan højden af væskeniiveauet i solfangeren og kogepunktstemperaturen beregnes. Derudover kan trykket i solfangerne under kogning og trykket ved ekspansionsbeholderen beregnes.

I det følgende vil beregningerne blive gennemført for den 1. september 2009, og de beregnede størrelser vil blive sammenlignet med målte størrelser. De anvendte parametre der beskriver solvarmeanlægget er angivet i Tabel 6.

Tabel 6. Oversigt over faste parametre benyttet til den teoretiske analyse.

Starteffektivitet	a_0	[-]	0,772
Varmetabskoefficient	a_1	[W/m ² K]	2,907
Temperaturafhængig varmetabskoefficient	a_2	[W/m ² K ²]	0,015
Vertikal højde på solfanger	L_c	[m]	2,68
Bredde på solfanger	W_c	[m]	1,13
Indre diameter af solfangerens Custrip	d_c	[m]	0,0095
Indre diameter af manifoldrøret i solfanger	D_c	[m]	0,020
Bredde af metalstrip på manifoldrør	W_{co}	[m]	0,071
Solfangerareal	A_c	[m ²]	3
Væskeindhold i en solfanger	V_c	[liter]	2,26
Antallet af solfangere	N_c	[-]	3
Antallet af Custrips i en solfanger	N_{cs}	[-]	8
Varmeledningsevne af isoleringsmaterialet for rørene i den øverste del af solfangerkredsen	K	[W/mK]	0,04
Ydre diameter af røret i den øverste del af solfangerkredsen	D_i	[m]	0,015
Ydre diameter af røret i den øverste del af solfangerkredsen med isoleringen	D_o	[m]	0,029
Indre diameter af røret i den øverste del af solfangerkredsen	d_p	[m]	0,013
Rørstrækning i solfangerkreds placeret over solfangerne	L_{pcon}	[m]	5,73
Fortrykket for ekspansionsbeholderen	P_{pre}	[bar]	1,034
Installationstrykket i solfangerkredsen	P_{sys}	[bar]	1,068
Volumenet af ekspansionsbeholderen	V_{ba}	[liter]	20,38

I Tabel 7 ses beregningsresultaterne med den opstillede teori.

Tabel 7. Beregninger pga. af den angivne teori beskrevet i afsnit 8.

Tid	Solbestrålingsstyrke	Udelufttemperatur	Fordampningstemperatur	Stagnationstemperatur	Højde af væskegrænsen	Trykket ved ekspansionsbeholder	Trykket i toppen af solfangerkredsen	Vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen
	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _e (°C)	T _s (°C)	H _{ce} (m)	P _b (bar)	P _t (bar)	M _{in} (kg)
10:25	770	21,9	130,0	142,8	0,35	1,82	1,47	5,70
10:30	785	21,7	129,6	145,0	0,41	1,80	1,44	5,59
10:35	799	22,1	129,8	147,4	0,37	1,82	1,45	5,66
10:40	813	22,2	130,5	148,6	0,30	1,84	1,48	5,80
10:45	828	22,5	130,4	150,8	0,31	1,85	1,48	5,78
10:50	841	22,5	131,0	152,8	0,22	1,88	1,51	5,94
10:55	853	22,3	130,9	154,0	0,23	1,87	1,50	5,92
11:00	863	22,6	130,7	155,3	0,25	1,87	1,50	5,88
11:05	873	22,6	131,2	156,1	0,20	1,89	1,52	5,99
11:10	883	23,3	130,3	158,2	0,22	1,84	1,47	5,69
11:15	893	23,9	131,2	159,9	0,18	1,91	1,54	6,02
11:20	907	23,2	131,4	160,8	0,21	1,92	1,55	6,09
11:25	918	23,4	131,2	162,0	0,19	1,90	1,53	6,00
11:30	927	23,6	131,4	163,4	0,15	1,92	1,55	6,08
11:35	936	23,7	131,1	164,6	0,19	1,90	1,53	6,00
11:40	945	23,9	131,2	165,8	0,18	1,91	1,54	6,03
11:45	953	23,6	131,3	166,4	0,16	1,91	1,55	6,07
11:50	958	24,2	131,4	167,8	0,15	1,92	1,55	6,08
11:55	966	24,1	131,5	168,6	0,14	1,93	1,56	6,10
12:00	973	24,5	131,3	169,8	0,15	1,93	1,56	6,08
12:05	977	24,7	131,5	170,3	0,13	1,93	1,56	6,11
12:10	984	24,2	131,4	170,7	0,14	1,92	1,56	6,09
12:15	987	24,6	131,3	171,6	0,16	1,92	1,55	6,06
12:20	989	24,6	131,3	171,6	0,16	1,92	1,56	6,07

12:25	989	24,6	131,2	171,6	0,17	1,92	1,55	6,03
12:30	991	23,9	131,2	171,2	0,16	1,91	1,54	6,05
12:35	991	23,9	131,1	171,1	0,17	1,91	1,54	6,03
12:40	993	24,0	131,4	171,6	0,15	1,92	1,55	6,08
12:45	993	24,9	131,1	172,5	0,17	1,92	1,55	6,04
12:50	997	25,6	131,3	173,9	0,15	1,94	1,57	6,08
12:55	998	25,5	131,4	173,7	0,12	1,95	1,58	6,14
13:00	999	25,7	131,4	174,2	0,12	1,95	1,58	6,14
13:05	1000	25,4	131,4	173,9	0,12	1,95	1,58	6,13
13:10	996	25,9	131,3	173,9	0,12	1,95	1,58	6,12
13:15	996	25,6	131,1	173,5	0,15	1,94	1,57	6,08
13:20	995	25,5	131,1	173,5	0,14	1,94	1,57	6,09
13:25	992	25,8	131,3	173,4	0,14	1,94	1,57	6,09
13:30	988	25,2	131,2	172,3	0,15	1,93	1,56	6,07
13:35	980	25,1	130,9	171,3	0,17	1,93	1,56	6,05
13:40	975	24,9	131,1	170,5	0,16	1,93	1,56	6,06
13:45	971	24,1	131,1	168,9	0,14	1,92	1,55	6,09
13:50	963	24,3	131,0	168,4	0,17	1,92	1,55	6,04
13:55	959	23,9	131,0	167,6	0,16	1,92	1,55	6,06
14:25	907	23,9	130,9	161,3	0,15	1,92	1,55	6,07
14:28	901	23,9	130,7	160,6	0,19	1,90	1,53	6,01
14:33	891	24,0	130,6	159,5	0,21	1,90	1,53	5,97
14:38	872	23,9	130,6	157,3	0,18	1,91	1,54	6,02
14:43	844	23,2	130,2	154,1	0,25	1,87	1,50	5,88
15:13	773	23,0	129,4	145,1	0,36	1,83	1,46	5,68
15:16	765	23,0	129,5	143,9	0,35	1,83	1,46	5,71
15:21	752	23,3	128,9	141,7	0,44	1,80	1,43	5,53

7.4 Validering – Sammenligning mellem målinger og beregnede værdier

De målte data fra den 1. september 2009 er anvendt til at validere den opstillede teori. Da de teoretiske resultater bliver beregnet på grundlag af en stationær tilstand, er det ligeledes nødvendigt at anvende de målte data under stationær tilstand til sammenligning. Der er derfor valgt at anvende gennemsnitsværdier over perioder på 5 min. I Tabel 8 er angivet de målte værdier der er anvendt til valideringen.

Tabel 8 Målinger fra den 1. september 2009.

Tid	Solbestrålingsstyrke	Udelufttemperatur	Temperatur i bunden af solfangere	Temperatur i toppen af solfangere	Udløbstemperatur fra solfangere	Trykket ved ekspansionsbeholder	Trykket i toppen af solfangerkredsen	Vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen
	G (W/m ²)	T _a (°C)	T _b (°C)	T _t (°C)	T _{out} (°C)	P _b (bar)	P _t (bar)	M _{in} (kg)
10:25	770	21,9	123,8	133,1	119,1	1,82	1,51	5,54
10:30	785	21,7	121,3	135,4	121,8	1,86	1,55	5,71
10:35	799	22,1	119,3	137,1	122,1	1,88	1,57	5,79
10:40	813	22,2	117,7	138,5	121,8	1,90	1,57	5,81
10:45	828	22,5	116,9	139,7	121,9	1,91	1,58	5,85
10:50	841	22,5	115,8	141,1	122,1	1,92	1,59	5,87
10:55	853	22,3	115,1	142,1	122,1	1,92	1,59	5,88
11:00	863	22,6	114,1	143,3	122,1	1,92	1,59	5,88
11:05	873	22,6	114,4	144,1	122,8	1,93	1,59	5,89
11:10	883	23,3	114,2	145,7	122,4	1,93	1,59	5,91
11:15	893	23,9	114,3	146,2	122,2	1,93	1,60	5,93
11:20	907	23,2	113,2	147,0	121,6	1,93	1,59	5,90
11:25	918	23,4	113,2	147,2	121,8	1,93	1,59	5,90
11:30	927	23,6	112,4	147,9	121,2	1,93	1,59	5,90
11:35	936	23,7	113,0	148,8	121,8	1,93	1,59	5,91
11:40	945	23,9	113,7	149,6	121,8	1,93	1,59	5,93
11:45	953	23,6	111,7	150,5	121,0	1,92	1,58	5,89
11:50	958	24,2	114,0	150,4	122,1	1,94	1,59	5,94
11:55	966	24,1	112,3	152,2	121,3	1,93	1,58	5,91
12:00	973	24,5	114,1	153,1	121,6	1,93	1,59	5,93

12:05	977	24,7	115,0	153,6	121,5	1,94	1,59	5,95
12:10	984	24,2	113,3	153,9	120,8	1,93	1,59	5,92
12:15	987	24,6	115,6	154,1	122,1	1,94	1,59	5,96
12:20	989	24,6	115,5	155,9	122,0	1,94	1,59	5,97
12:25	989	24,6	118,4	156,9	122,9	1,95	1,60	6,02
12:30	991	23,9	119,0	158,6	123,2	1,95	1,60	6,03
12:35	991	23,9	119,2	159,5	123,0	1,95	1,60	6,04
12:40	993	24,0	119,1	160,4	123,0	1,95	1,60	6,02
12:45	993	24,9	120,7	161,0	123,1	1,95	1,61	6,06
12:50	997	25,6	119,8	162,1	122,7	1,95	1,60	6,04
12:55	998	25,5	119,8	161,5	121,5	1,94	1,60	6,02
13:00	999	25,7	119,3	161,2	122,4	1,94	1,60	6,03
13:05	1000	25,4	118,9	160,6	121,6	1,94	1,59	6,00
13:10	996	25,9	120,3	160,2	122,6	1,94	1,60	6,03
13:15	996	25,6	118,2	159,9	121,4	1,93	1,58	5,99
13:20	995	25,5	116,6	158,4	120,8	1,92	1,58	5,97
13:25	992	25,8	119,9	156,1	121,9	1,95	1,60	6,07
13:30	988	25,2	120,3	156,0	121,9	1,95	1,60	6,08
13:35	980	25,1	116,3	154,9	122,3	1,94	1,60	6,08
13:40	975	24,9	122,3	155,4	123,5	1,97	1,63	6,20
13:45	971	24,1	115,5	156,6	122,4	1,94	1,59	6,08
13:50	963	24,3	120,0	154,4	122,7	1,97	1,62	6,21
13:55	959	23,9	115,9	155,2	122,4	1,94	1,59	6,08
14:25	907	23,9	116,1	147,2	122,5	1,93	1,58	6,06
14:28	901	23,9	113,0	146,9	122,4	1,92	1,57	6,03
14:33	891	24,0	114,1	146,8	122,4	1,92	1,57	6,00
14:38	872	23,9	109,3	145,5	122,1	1,90	1,55	5,96
14:43	844	23,2	101,0	139,1	120,7	1,82	1,46	5,51
15:13	773	23,0	99,5	137,2	120,7	1,81	1,46	5,51
15:16	765	23,0	101,4	136,7	120,9	1,81	1,46	5,52
15:21	752	23,3	98,4	136,0	120,7	1,80	1,44	5,45

7.4.1 Sammenligning mellem beregnede og målte værdier for vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen og af trykket nederst og øverst i solfangerkredsen den 1. september 2009

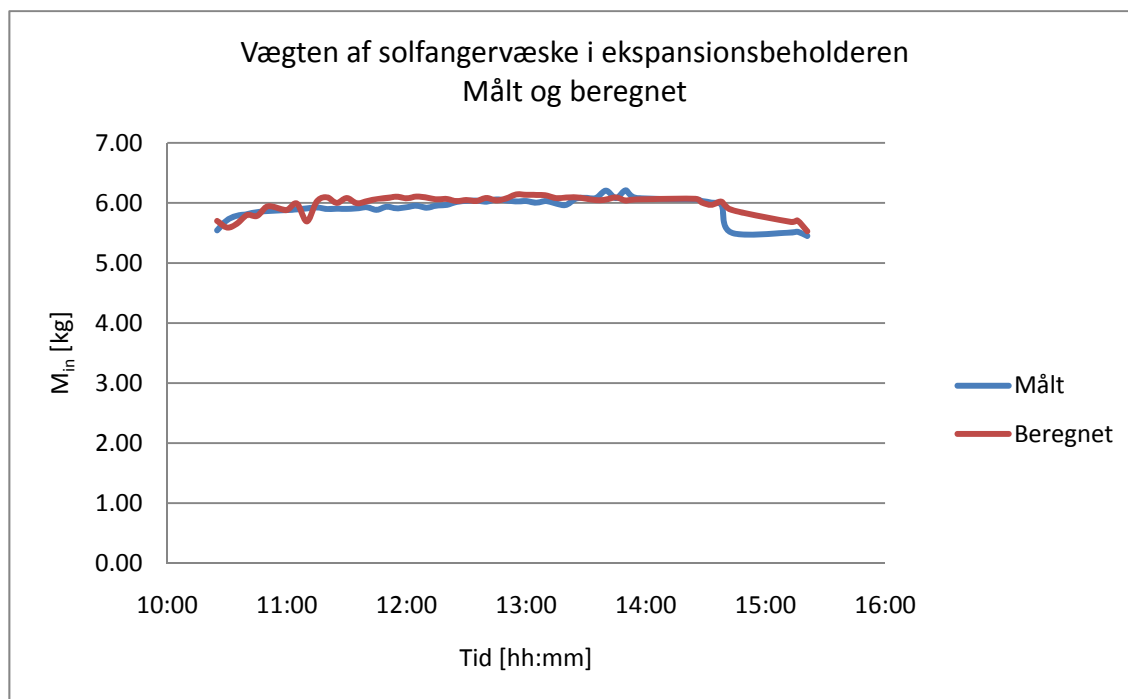
I Tabel 9 ses både de målte værdier og de beregnede værdier for trykket i toppen af solfangerkredsen ved solfangeren (P_t) og i bunden af solfangerkredsen ved ekspansionsbeholderen (P_b), samt vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen (M_{in}). Værdierne er som nævnt tidligere beregnet for den 1. september 2009. Derudover er der for hver af de beregnede værdier angivet afvigelsen fra den målte værdi. Her ses det at den gennemsnitlige afvigelse mellem målt og beregnet størrelse er 3% for P_t , 1% for P_b og 2% for M_{in} .

Tabel 9 Beregnede og målte værdier for den 1. september 2009

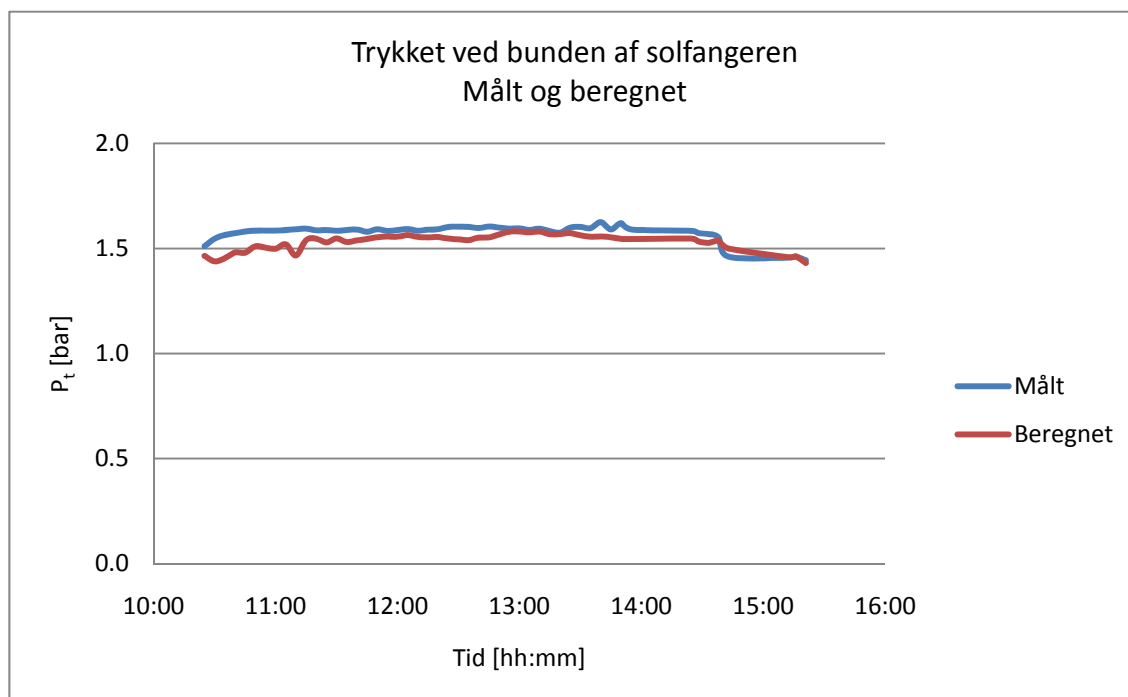
Tid	Trykket ved ekspansionsbeholder			Trykket i toppen af solfangerkredsen			Vægten af solfangervæske i ekspansionsbeholderen		
	Målt	Beregnet	Afvigelse	Målt	Beregnet	Afvigelse	Målt	Beregnet	Afvigelse
	P_b (bar)	P_b (bar)	E_{pb} (%)	P_t (bar)	P_t (bar)	E_{pt} (%)	M_{in} (kg)	M_{in} (kg)	E_{Min} (%)
10:25	1,82	1,82	0,39	1,51	1,47	3,04	5,54	5,70	2,81
10:30	1,86	1,80	3,44	1,55	1,44	6,98	5,71	5,59	2,19
10:35	1,88	1,82	3,61	1,57	1,45	7,09	5,79	5,66	2,26
10:40	1,90	1,84	2,69	1,57	1,48	5,85	5,81	5,80	0,24
10:45	1,91	1,85	3,20	1,58	1,48	6,39	5,85	5,78	1,09
10:50	1,92	1,88	2,04	1,59	1,51	4,73	5,87	5,94	1,23
10:55	1,92	1,87	2,50	1,59	1,50	5,11	5,88	5,92	0,71
11:00	1,92	1,87	2,86	1,59	1,50	5,43	5,88	5,88	0,09
11:05	1,93	1,89	1,97	1,59	1,52	4,34	5,89	5,99	1,63
11:10	1,93	1,84	4,87	1,59	1,47	7,85	5,91	5,69	3,67
11:15	1,93	1,91	1,34	1,60	1,54	3,45	5,93	6,02	1,67
11:20	1,93	1,92	0,67	1,59	1,55	2,52	5,90	6,09	3,29
11:25	1,93	1,90	1,66	1,59	1,53	3,72	5,90	6,00	1,64
11:30	1,93	1,92	0,62	1,59	1,55	2,33	5,90	6,08	3,07
11:35	1,93	1,90	1,61	1,59	1,53	3,59	5,91	6,00	1,47
11:40	1,93	1,91	1,34	1,59	1,54	3,27	5,93	6,03	1,64
11:45	1,92	1,91	0,57	1,58	1,55	2,22	5,89	6,07	3,09

11:50	1,94	1,92	0,72	1,59	1,55	2,39	5,94	6,08	2,39
11:55	1,93	1,93	0,05	1,58	1,56	1,70	5,91	6,10	3,30
12:00	1,93	1,93	0,41	1,59	1,56	2,02	5,93	6,08	2,50
12:05	1,94	1,93	0,26	1,59	1,56	1,82	5,95	6,11	2,57
12:10	1,93	1,92	0,31	1,59	1,56	1,89	5,92	6,09	2,85
12:15	1,94	1,92	0,72	1,59	1,55	2,33	5,96	6,06	1,76
12:20	1,94	1,92	0,77	1,59	1,56	2,32	5,97	6,07	1,68
12:25	1,95	1,92	1,74	1,60	1,55	3,49	6,02	6,03	0,23
12:30	1,95	1,91	1,95	1,60	1,54	3,74	6,03	6,05	0,25
12:35	1,95	1,91	2,20	1,60	1,54	3,93	6,04	6,03	0,13
12:40	1,95	1,92	1,28	1,60	1,55	2,88	6,02	6,08	1,05
12:45	1,95	1,92	1,59	1,61	1,55	3,24	6,06	6,04	0,26
12:50	1,95	1,94	0,51	1,60	1,57	2,06	6,04	6,08	0,55
12:55	1,94	1,95	0,41	1,60	1,58	0,94	6,02	6,14	1,94
13:00	1,94	1,95	0,41	1,60	1,58	0,94	6,03	6,14	1,74
13:05	1,94	1,95	0,62	1,59	1,58	0,76	6,00	6,13	2,17
13:10	1,94	1,95	0,46	1,60	1,58	0,88	6,03	6,12	1,54
13:15	1,93	1,94	0,41	1,58	1,57	0,95	5,99	6,08	1,50
13:20	1,92	1,94	0,78	1,58	1,57	0,44	5,97	6,09	2,06
13:25	1,95	1,94	0,26	1,60	1,57	1,69	6,07	6,09	0,35
13:30	1,95	1,93	0,87	1,60	1,56	2,50	6,08	6,07	0,21
13:35	1,94	1,93	0,93	1,60	1,56	2,57	6,08	6,05	0,61
13:40	1,97	1,93	2,33	1,63	1,56	4,24	6,20	6,06	2,39
13:45	1,94	1,92	0,77	1,59	1,55	2,33	6,08	6,09	0,18
13:50	1,97	1,92	2,64	1,62	1,55	4,63	6,21	6,04	2,74
13:55	1,94	1,92	1,24	1,59	1,55	2,89	6,08	6,06	0,43
14:25	1,93	1,92	0,57	1,58	1,55	2,34	6,06	6,07	0,15
14:28	1,92	1,90	0,83	1,57	1,53	2,54	6,03	6,01	0,43
14:33	1,92	1,90	0,94	1,57	1,53	2,68	6,00	5,97	0,62
14:38	1,90	1,91	0,26	1,55	1,54	1,09	5,96	6,02	0,99
14:43	1,82	1,87	3,09	1,46	1,50	2,67	5,51	5,88	6,87
15:13	1,81	1,83	1,11	1,46	1,46	0,07	5,51	5,68	3,18
15:16	1,81	1,83	1,21	1,46	1,46	0,07	5,52	5,71	3,37
15:21	1,80	1,80	0,28	1,44	1,43	0,90	5,45	5,53	1,41

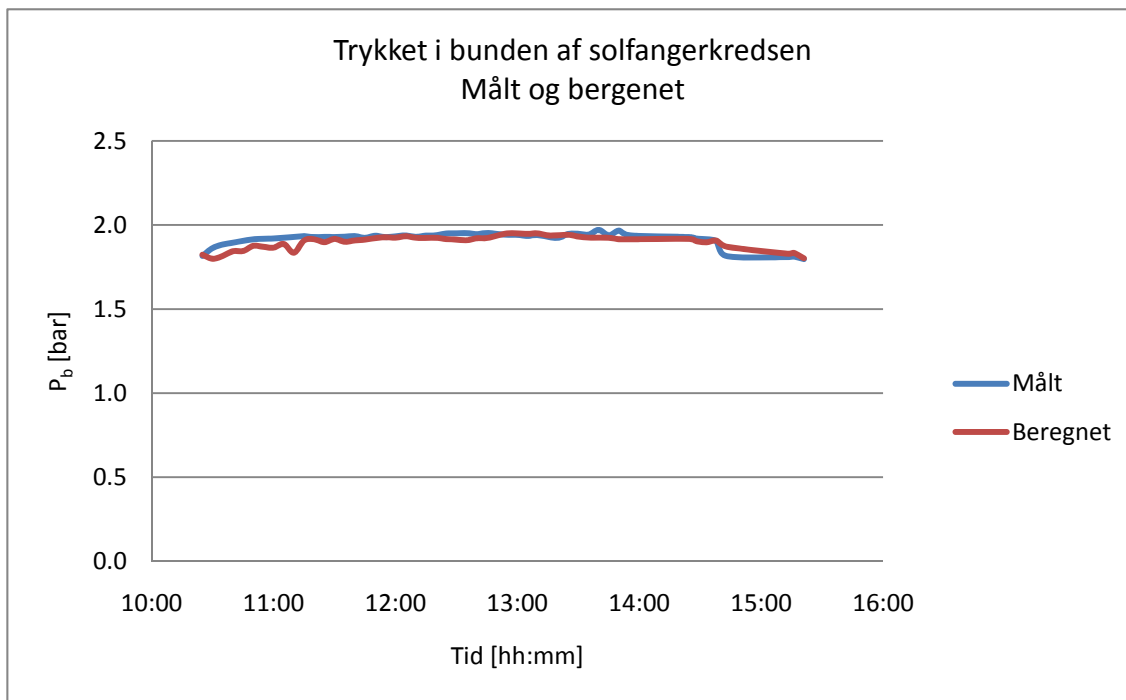
På Figur 42 til Figur 44 ses sammenligningen mellem de målte og beregnede værdier for væsken i ekspansionsbeholderen, samt trykket i top og bund af solfangerkredsen. Af figurerne fremgår det at der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede værdier.



Figur 42. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for solfangervæsken i ekspansionsbeholderen den 1. september 2009.



Figur 43. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for trykket i toppen af solfangerkredsen den 1. september 2009.



Figur 44. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for trykket i bunden af solfangerkredsen den 1. september 2009.

7.4.2 Sammenligning mellem beregnede og målte værdier for kogepunktstemperaturen og stagnationstemperaturen den 1. september 2009

I Tabel 10 ses beregnede værdier for kogningstemperaturen (T_e) i den del af solfangeren der er under kogning, samt den beregnede temperatur i dampen under stagnation. Ligeledes er vist 3 målte temperaturer:

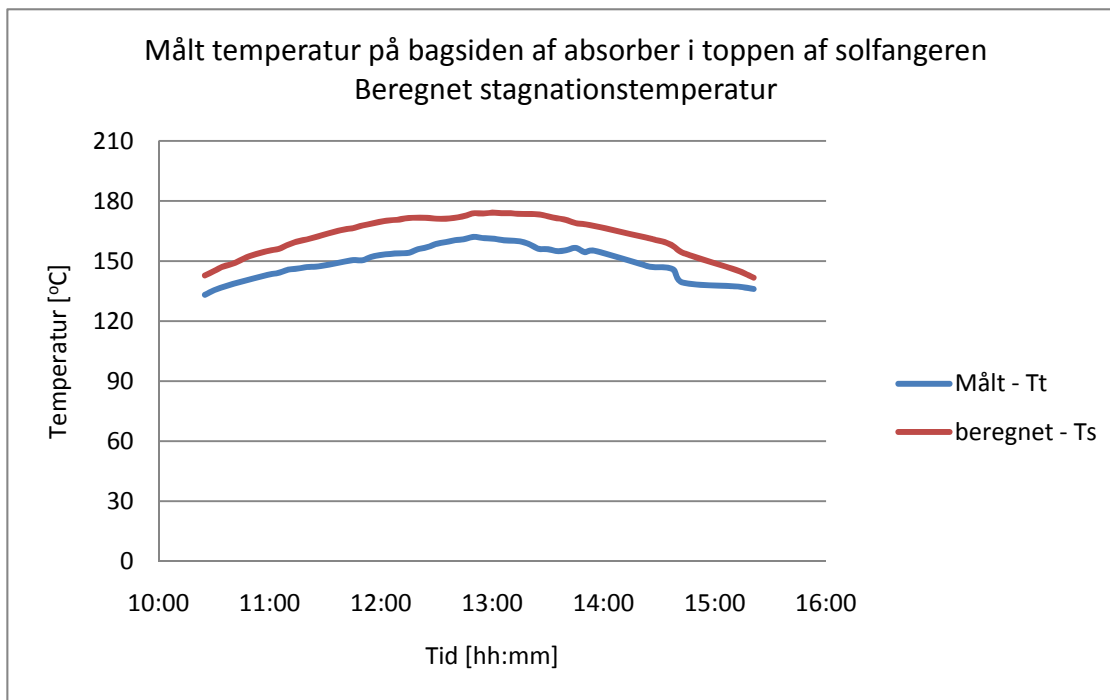
- Temperatur målt på bagsiden af den midterste Cu-strip ved bunden af solfangeren (T_b)
- Temperatur målt på bagsiden af den midterste Cu-strip i toppen af solfangeren (T_t)
- Temperatur målt ved udløbet fra solfangeren (T_{out})

Tabel 10 Målte og beregnede temperaturer den 1. september 2009

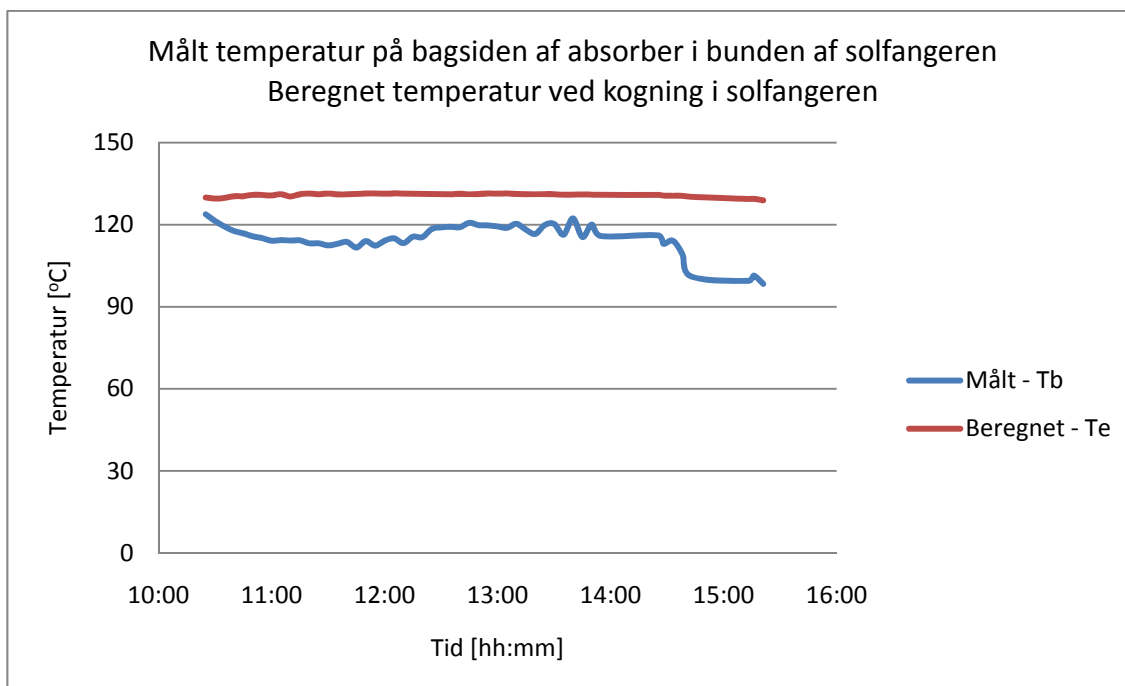
Tid	Målte temperaturer i solfangeren			Beregnete temperaturer for kogning og stagnation i solfangeren	
	T_b (°C)	T_t (°C)	T_{out} (°C)	T_e (°C)	T_s (°C)
10:25	123,8	133,1	119,1	130,2	142,8
10:30	121,3	135,4	121,8	130,0	145,0
10:35	119,3	137,1	122,1	130,1	147,4
10:40	117,7	138,5	121,8	130,8	148,6
10:45	116,9	139,7	121,9	130,9	150,8
10:50	115,8	141,1	122,1	130,8	152,8
10:55	115,1	142,1	122,1	130,8	154,0
11:00	114,1	143,3	122,1	131,1	155,3
11:05	114,4	144,1	122,8	131,4	156,1
11:10	114,2	145,7	122,4	131,5	158,2
11:15	114,3	146,2	122,2	131,8	159,9
11:20	113,2	147,0	121,6	131,6	160,8
11:25	113,2	147,2	121,8	131,8	162,0
11:30	112,4	147,9	121,2	131,8	163,4
11:35	113,0	148,8	121,8	131,8	164,6
11:40	113,7	149,6	121,8	131,8	165,8
11:45	111,7	150,5	121,0	131,8	166,4
11:50	114,0	150,4	122,1	131,8	167,8
11:55	112,3	152,2	121,3	131,8	168,6
12:00	114,1	153,1	121,6	131,9	169,8
12:05	115,0	153,6	121,5	132,0	170,3
12:10	113,3	153,9	120,8	131,9	170,7
12:15	115,6	154,1	122,1	131,9	171,6
12:20	115,5	155,9	122,0	132,0	171,6
12:25	118,4	156,9	122,9	132,0	171,6
12:30	119,0	158,6	123,2	131,9	171,2
12:35	119,2	159,5	123,0	131,8	171,1
12:40	119,1	160,4	123,0	131,8	171,6

12:45	120,7	161,0	123,1	132,0	172,5
12:50	119,8	162,1	122,7	132,0	173,9
12:55	119,8	161,5	121,5	132,1	173,7
13:00	119,3	161,2	122,4	132,0	174,2
13:05	118,9	160,6	121,6	132,0	173,9
13:10	120,3	160,2	122,6	132,1	173,9
13:15	118,2	159,9	121,4	132,1	173,5
13:20	116,6	158,4	120,8	131,9	173,5
13:25	119,9	156,1	121,9	132,1	173,4
13:30	120,3	156,0	121,9	132,0	172,3
13:35	116,3	154,9	122,3	132,0	171,3
13:40	122,3	155,4	123,5	132,0	170,5
13:45	115,5	156,6	122,4	131,9	168,9
13:50	120,0	154,4	122,7	131,9	168,4
13:55	115,9	155,2	122,4	131,7	167,6
14:25	116,1	147,2	122,5	131,7	161,3
14:28	113,0	146,9	122,4	131,6	160,6
14:33	114,1	146,8	122,4	131,7	159,5
14:38	109,3	145,5	122,1	131,5	157,3
14:43	101,0	139,1	120,7	130,5	154,1
15:13	99,5	137,2	120,7	129,3	145,1
15:16	101,4	136,7	120,9	129,3	143,9
15:21	98,4	136,0	120,7	129,6	141,7

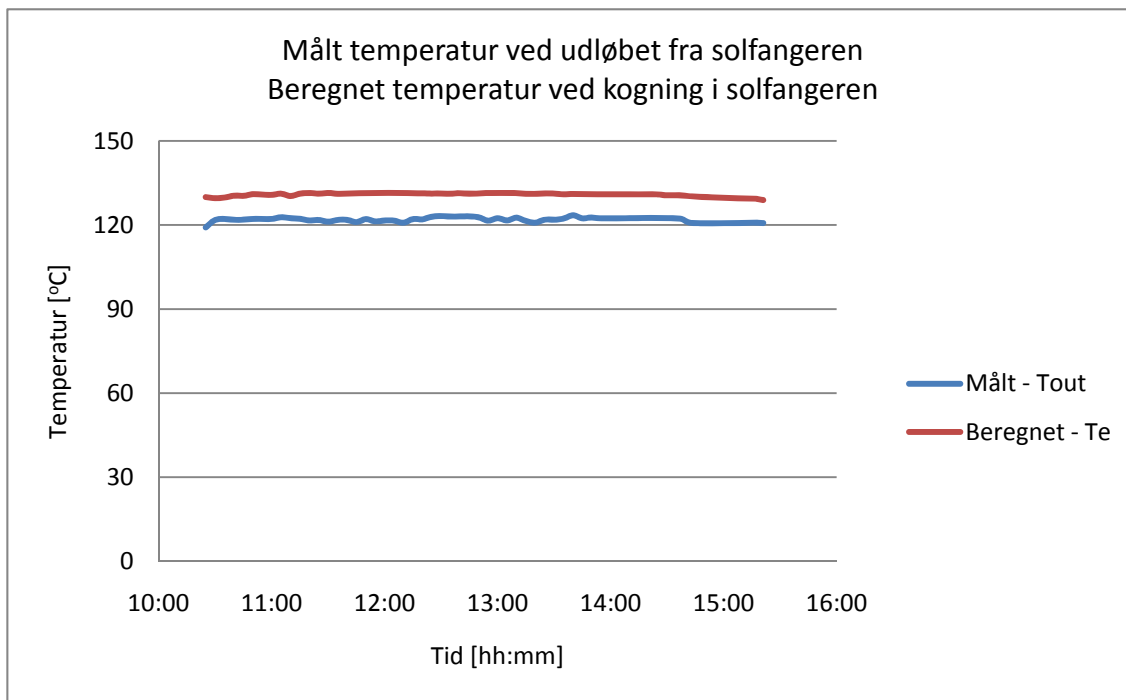
På Figur 45 til Figur 47 ses at der er god overensstemmelse mellem beregnede og målte temperaturer forskellige steder i solfangeren.



Figur 45. Målt og beregnet temperatur i toppen af solfangeren den 1. september 2009.



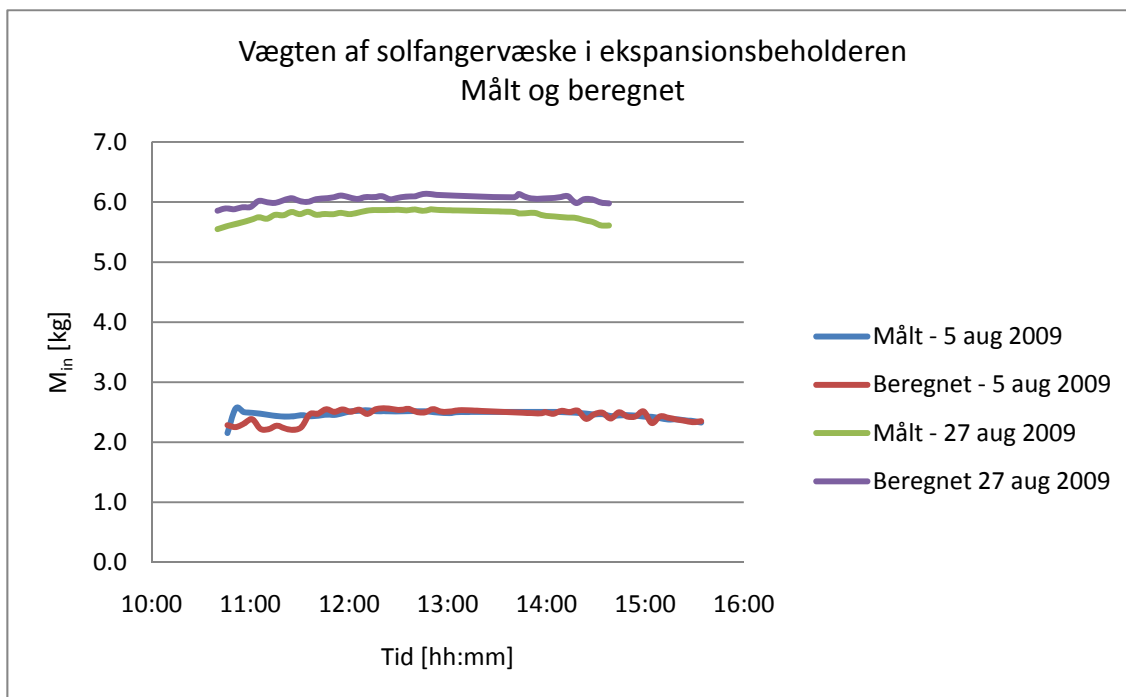
Figur 46. Målt og beregnet temperatur i bunden af solfangeren den 1. september 2009.



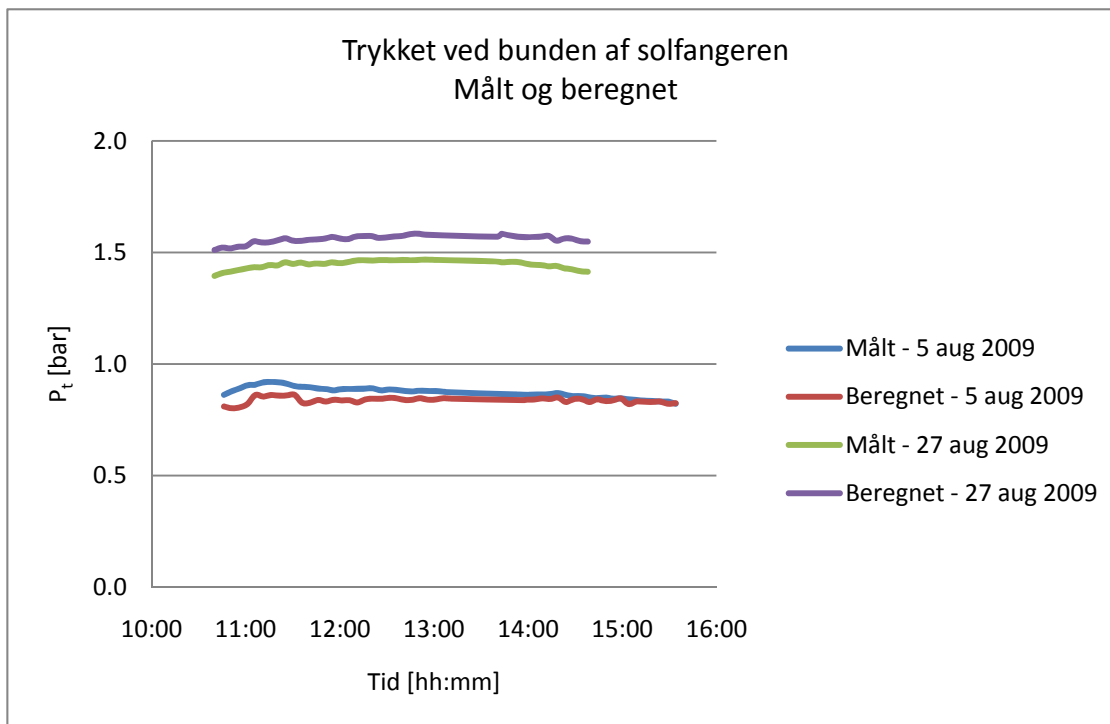
Figur 47. Målt temperatur ved udløbet fra solfangeren samt beregnet kogningstemperatur i bunden af solfangeren den 1. september 2009.

7.4.3 Yderligere sammenligning mellem målte og beregnede værdier for 5. og 27. August 2009

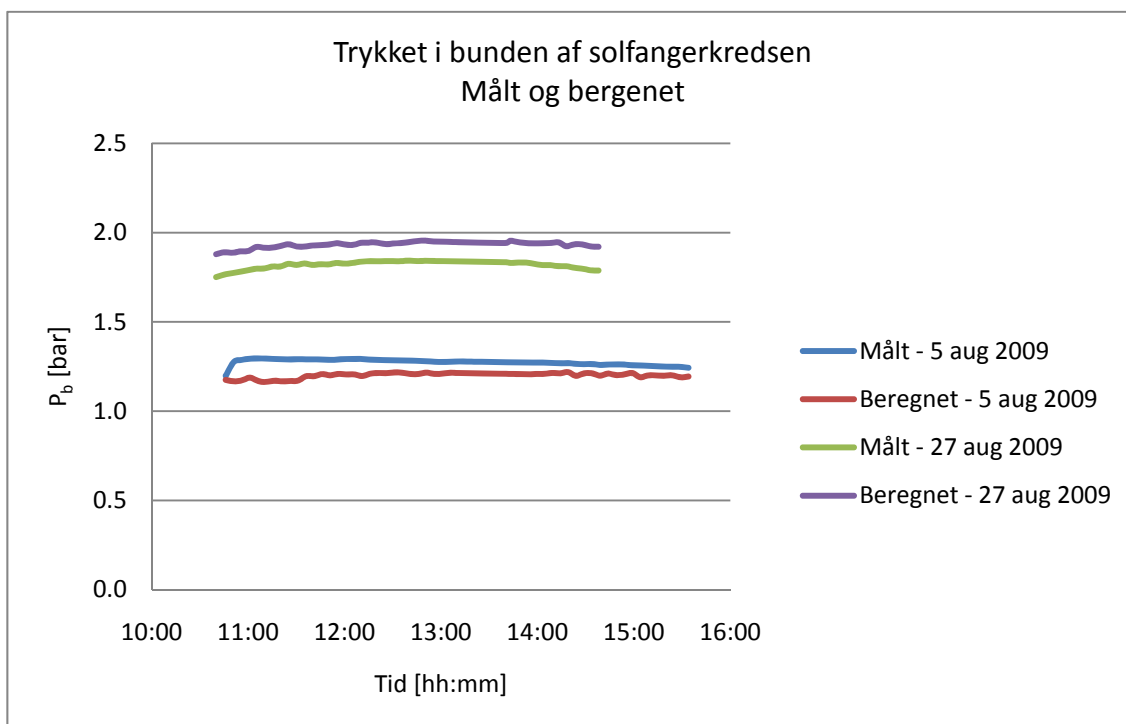
På Figur 48 og frem til Figur 50 ses en sammenligning mellem målte og beregnede værdier for trykket i toppen og bunden af solfangerkredsen, samt vægten af solfangervæsken i ekspansionsbeholderen for den 5. august 2009 og den 27. august 2009. Af figurerne fremgår det at det er god overensstemmelse mellem målingerne og de beregnede værdier.



Figur 48. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for solfangervæsken i ekspansionsbeholderen den 5. og 27. august 2009.



Figur 49. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for trykket i toppen af solfangerkredsen den 5. og 27. august 2009.



Figur 50. Sammenligningen mellem målte og beregnede værdier for trykket i bunden af solfangerkredsen den 5. og 27. august 2009.

7.5 Volumenet af ekspansionsbeholderen

Med den validerede teori undersøges det hvordan det nødvendige volumen af ekspansionsbeholderen afhænger af solfangerkredsens udformning.

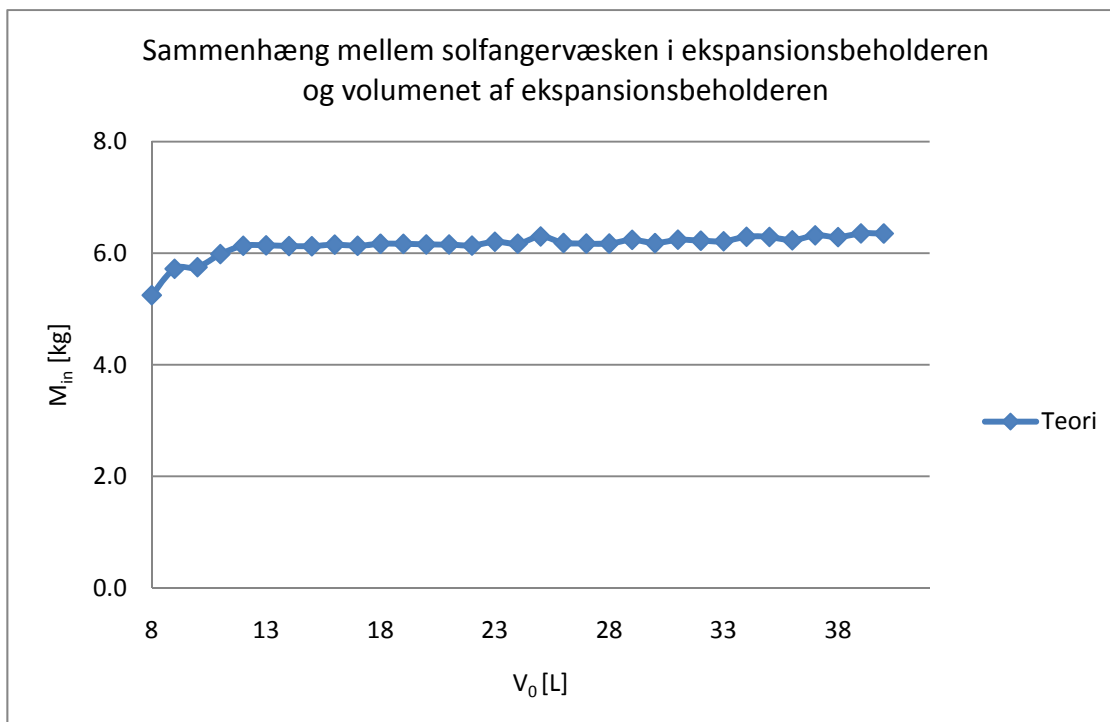
De følgende beregningseksempler er baseret på anlægget beskrevet tidligere med 3 BA30 solfangere.

7.5.1 Fast installationstryk og fortryk

Medmindre andet angives, fastholdes disse størrelser:

- fortrykket for ekspansionsbeholderen (P_{pr}): 1,0 bar
- installationstrykket (P_s): 1,05 bar
- solbestrålingsstyrken på solfangeren (G): 1000 W/m²
- udelufttemperatur (T_a): 25 °C.

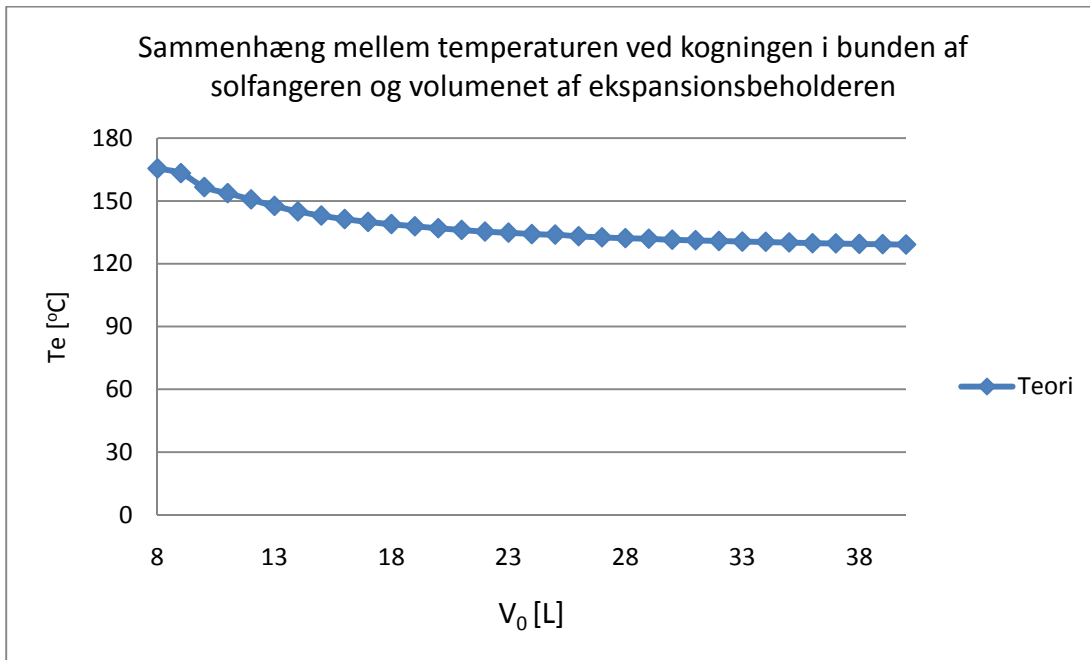
Sammenhængen mellem volumenet af ekspansionsbeholderen og mængden af solfangervæske der presses ned i ekspansionsbeholderen ses på Figur 51. Hvis volumenet af ekspansionsbeholderen er større end 13 liter vil mængden af propylen/glykol vand blandingen der presses ned i ekspansionsbeholderen under stagnation kun stige lidt med stigende volumen af ekspansionsbeholderen.



Figur 51. Sammenhængen mellem solfangervæske i ekspansionsbeholderen (M_{in}) og volumenet af ekspansionsbeholderen (V_0).

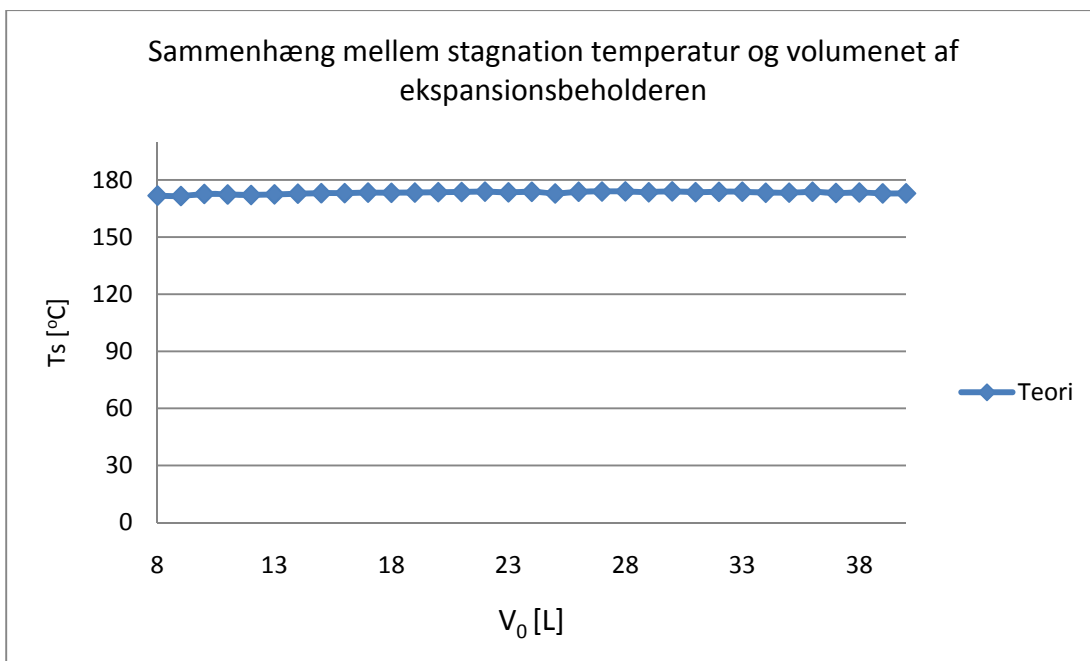
På Figur 52 ses sammenhængen mellem temperaturen ved kogning i bunden af solfangeren under stagnation og volumenet af ekspansionsbeholderen. Ved voksende volumen af

ekspansionsbeholderen falder kogepunktet. Når ekspansionsbeholderen er større end 13 liter har en yderligere stigning ikke afgørende indflydelse på kogepunktstemperaturen.



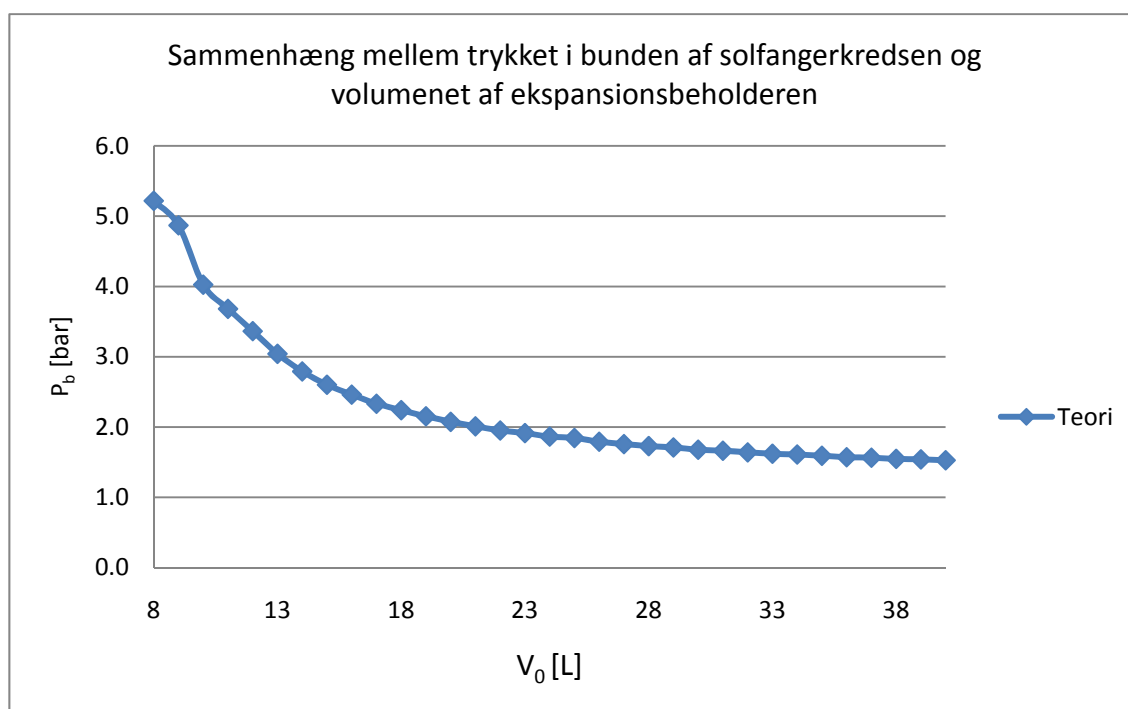
Figur 52. Sammenhængen mellem temperaturen ved kogningen i solfangeren (T_e) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0).

Sammenhængen mellem stagnationstemperaturen og volumen af ekspansionsbeholderen er vist på Figur 53, og her ses det at stagnationstemperaturen ikke er afhængig af volumen af ekspansionsbeholderen.



Figur 53. Sammenhængen mellem stagnationstemperaturen i toppen af solfangeren (T_s) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0).

På Figur 54 er vist sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangerkredsen og volumen af ekspansionsbeholderen. Ved stigende volumen af ekspansionsbeholderen vil trykket i bunden af solfangerkredsen under stagnation falde.

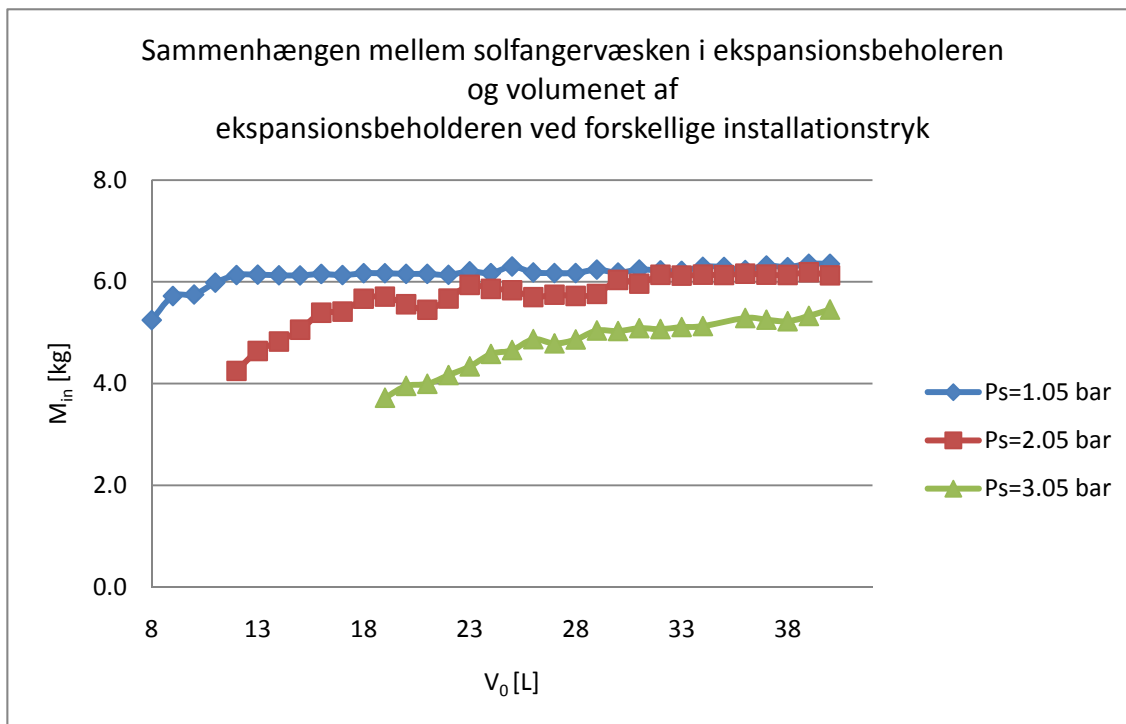


Figur 54. Sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangerkredsen (P_b) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0).

7.5.2 Fast fortryk og varieret installationstryk

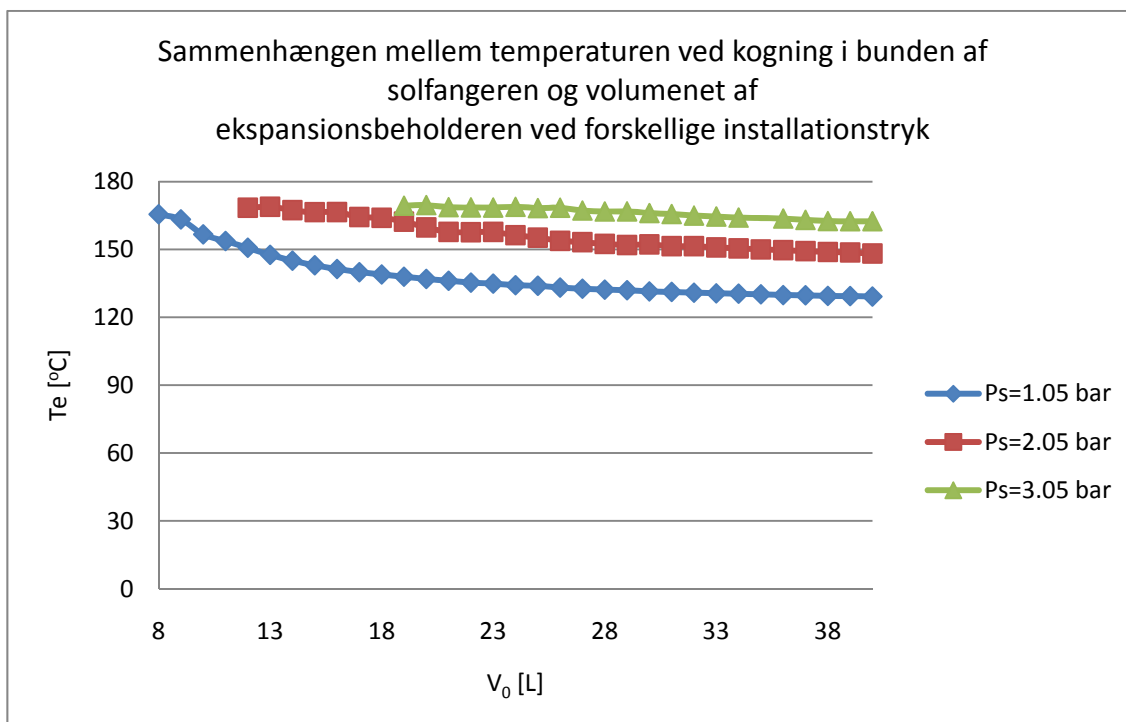
I det følgende undersøges yderligere afhængighed af volumen af ekspansionsbeholderen, mens fortrykket for ekspansionsbeholderen fastholdes til 1,0 bar, og installationstrykket varieres fra 1,05 bar til 3,05 bar.

På Figur 55 er vist indflydelsen af installationstrykket og volumen af ekspansionsbeholderen på væskemængden, som presses ud i ekspansionsbeholderen. Ved stigende installationstryk reduceres væskemængden i ekspansionsbeholderen. Ved stigende volumen af ekspansionsbeholderen øges mængden af solfangervæske i ekspansionsbeholderen.



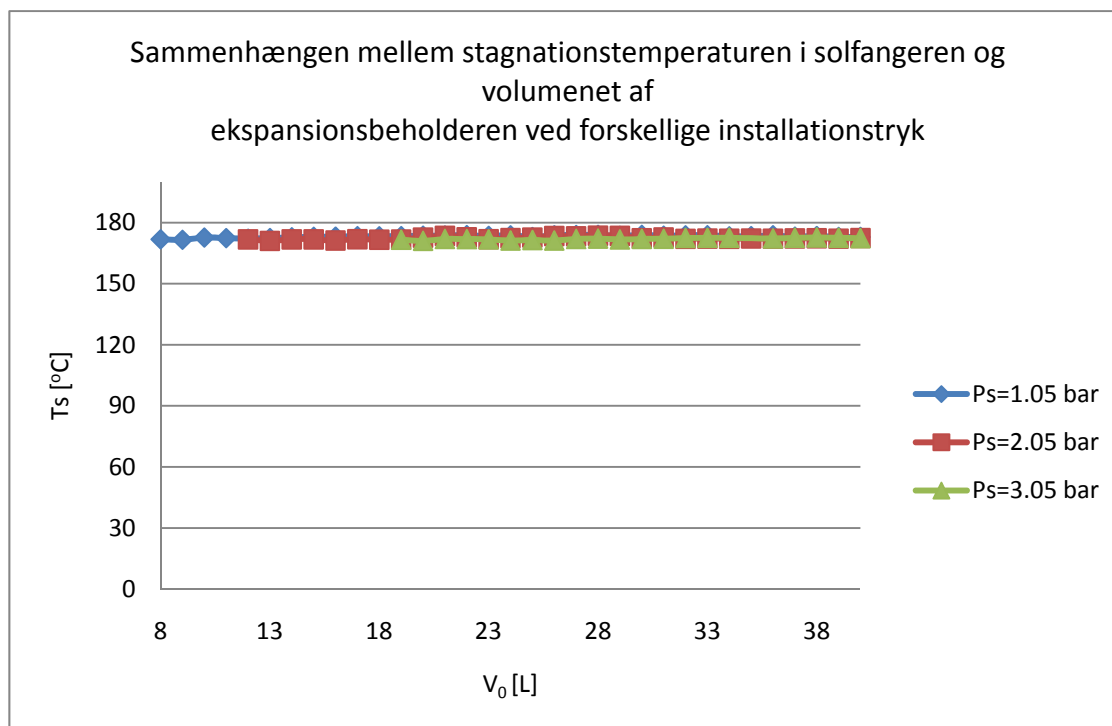
Figur 55. Installationstrykkets (P_s) og volumen af ekspansionsbeholderens (V_0) indflydelse på væskemængden i ekspansionsbeholderen.

Temperaturen ved kogning i bunden af solfangeren er ved forskellige installationstryk og volumener af ekspansionsbeholderen vist på Figur 56. Kogningstemperaturen reduceres ved stigende volumen af ekspansionsbeholderen og ved faldende installationstryk.



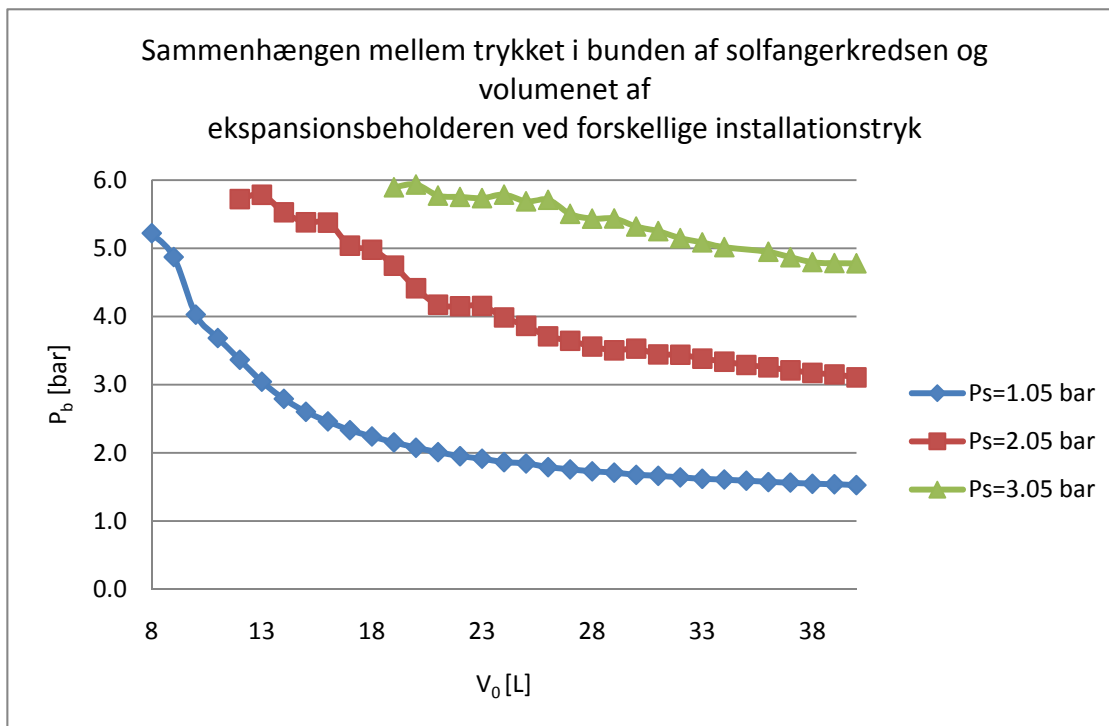
Figur 56. Temperaturen ved kogningen i bunden af solfangeren (T_e) som funktion af volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) og installationstrykket.

På Figur 57 er vist sammenhængen mellem stagnationstemperaturen i solfangeren og volumen af ekspansionsbeholderen ved forskellige installationstryk. Som tidligere ses der ikke den store variation i stagnationstemperatur ved stigende volumen, heller ikke ved forskellige installationstryk.



Figur 57. Sammenhængen mellem stagnationstemperaturen (T_s) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) og installationstrykket.

Sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangerkredsen og volumen af ekspansionsbeholderen ved forskellige installationstryk er vist på Figur 58. Igen ses det at trykket falder ved stigende volumen af ekspansionsbeholderen. Ved stigende installationstryk øges trykket i bunden af solfangerkredsen.

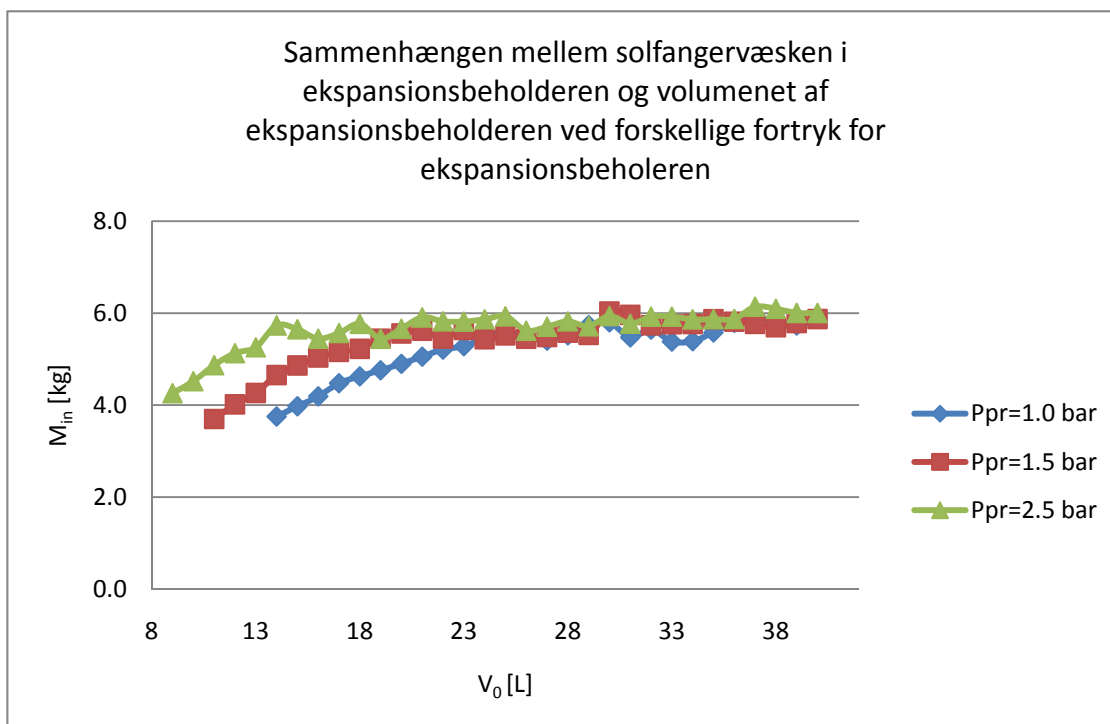


Figur 58. Sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangeren (P_b) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) og installationstrykket.

7.5.3 Fast installationstryk og varieret fortryk

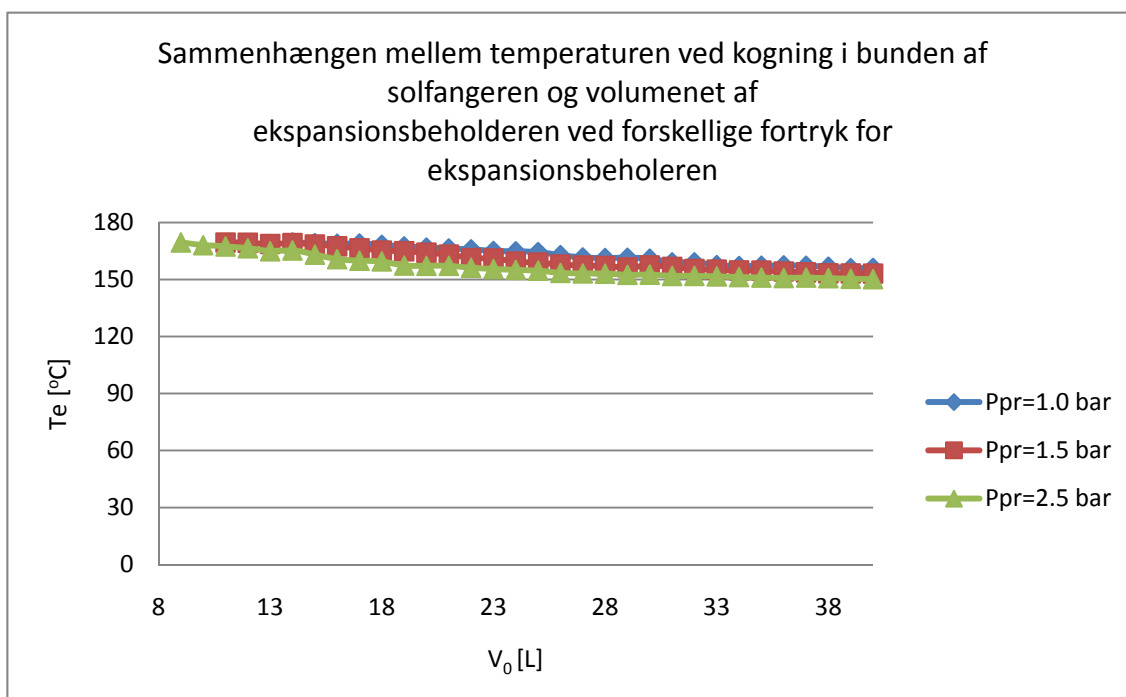
I det følgende fastholdes installationstrykket til 2,55 bar, mens fortrykket på ekspansionsbeholderen varieres fra 1,0 bar til 2,5 bar.

På Figur 59 ses sammenhængen mellem væsken der presse ud i ekspansionsbeholderen under stagnation og volumen af ekspansionsbeholderen ved forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen. Væskemængden øges ved voksende volumen af ekspansionsbeholderen og voksende fortryk.



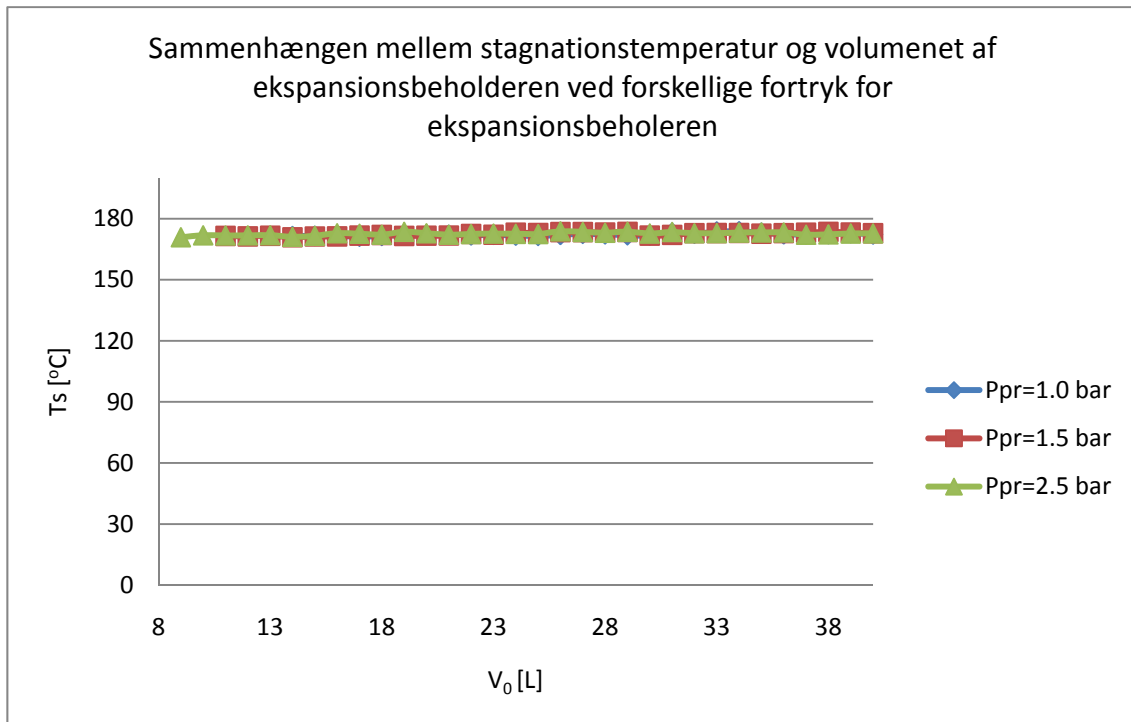
Figur 59. Sammenhængen mellem solfangervæsken i ekspansionsbeholderen under stagnation (M_{in}) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) og fortrykket for ekspansionsbeholderen.

Sammenhængen mellem temperaturen ved kogning og volumen på ekspansionsbeholderen ved varierende fortryk ses på Figur 60. Her ses det at kogningstemperaturen er svagt aftagende ved stigende volumen for ekspansionsbeholderen. Derudover er der ingen nævneværdi afhængighed af fortryk på ekspansionsbeholderen.



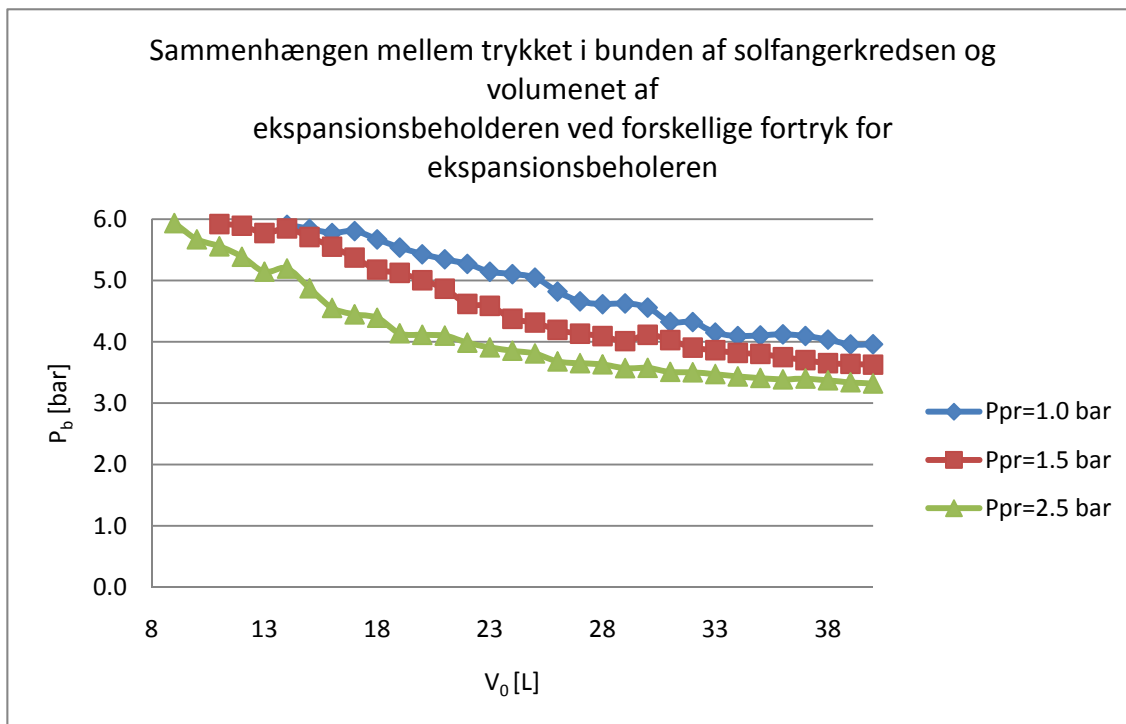
Figur 60. Sammenhængen mellem temperaturen ved kogning i bunden af solfangeren (T_e) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) ved forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen.

På Figur 61 ses sammenhængen mellem stagnationstemperaturen og volumenet af ekspansionsbeholderen ved forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen. Som set tidligere er stagnationstemperaturen ikke afhængig af volumenet på ekspansionsbeholderen.



Figur 61. Sammenhængen mellem stagnationstemperatur (T_s) og volumenet af ekspansionsbeholderen (V_o) for forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen.

På Figur 62 er vist sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangerkredsen og volumenet af ekspansionsbeholderen. Som tidligere set falder trykket ved stigende volumen af ekspansionsbeholderen. Ved et stigende fortryk reduceres trykket i bunden af solfangerkredsen.



Figur 62. Sammenhængen mellem trykket i bunden af solfangeren (P_B) og volumen af ekspansionsbeholderen (V_0) ved forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen.

7.6 Undersøgelse af afhængighed af den øverste rørstrækning i solfangerkredsen under stagnation

På baggrund af målingerne og den teoretiske model har det vist sig at mængden af solfangervæske der presses ud i ekspansionsbeholderen er afhængig af den øverste rørstrækning i solfangerkredsen der er placeret over den nederste del af solfangeren. Denne afhængighed vil i det følgende blive undersøgt nærmere, og vurderet ved hjælp af volumenforholdet R:

$$R = \frac{V_{up}}{V_c} \quad [9]$$

hvor V_{up} er det indvendige rørvolumen af rørstrækningen over den nederste del af solfangeren [L]

V_c er solfangervæsken i solfangeren [L]

7.6.1 Analyse af rørdiameteren på rørstrækningen over den nederste del af solfangeren

I det følgende vil diameteren og længden af den øverste del af solfangerkredsen blive undersøgt.

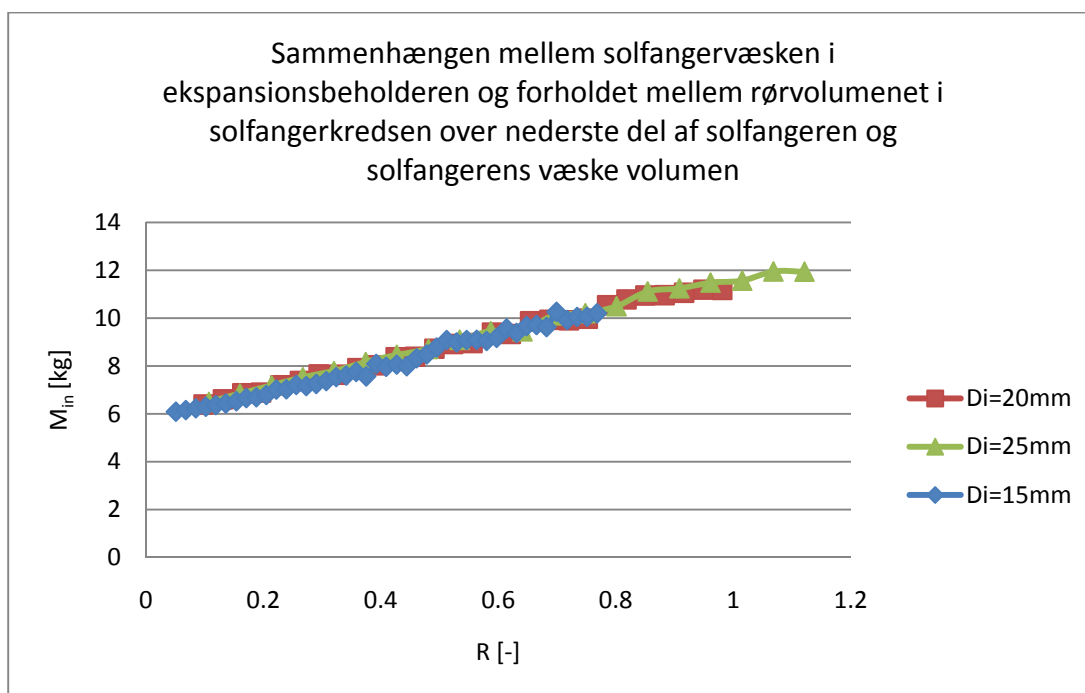
Yderligere anvendte parametre er:

- Udelufttemperatur 25 °C
- Solbestrålingsstyrke på solfangerne 1000 W/m²
- Volumen af ekspansionsbeholder 20,86 liter

- Solfangervæske i solfangere 6,78 liter
- Fortryk for ekspansionsbeholder 0,99 bar
- Installationstryk 1,06 bar
- Isoleringstykkelse for den øverste rørstrækning 10 mm
- Isoleringsmaterialet er mineraluld

Den indre rørdiameter varieres fra 15 mm til 25 mm og længden af rørstrækningen over den nederste del af solfangeren varieres fra 3 m til 45 m.

På Figur 63 ses sammenhængen mellem volumenforholdet R og væskemængden i ekspansionsbeholderen. Jo større volumenforholdet er, des større er væskemængden i ekspansionsbeholderen. Det ses også at rørdiameteren ikke har væsentlig betydning for væskemængden i ekspansionsbeholderen. Det vil sige at jo længere rørkredsen over nederste del af solfangerne er, des større er væskemængden i ekspansionsbeholderen.



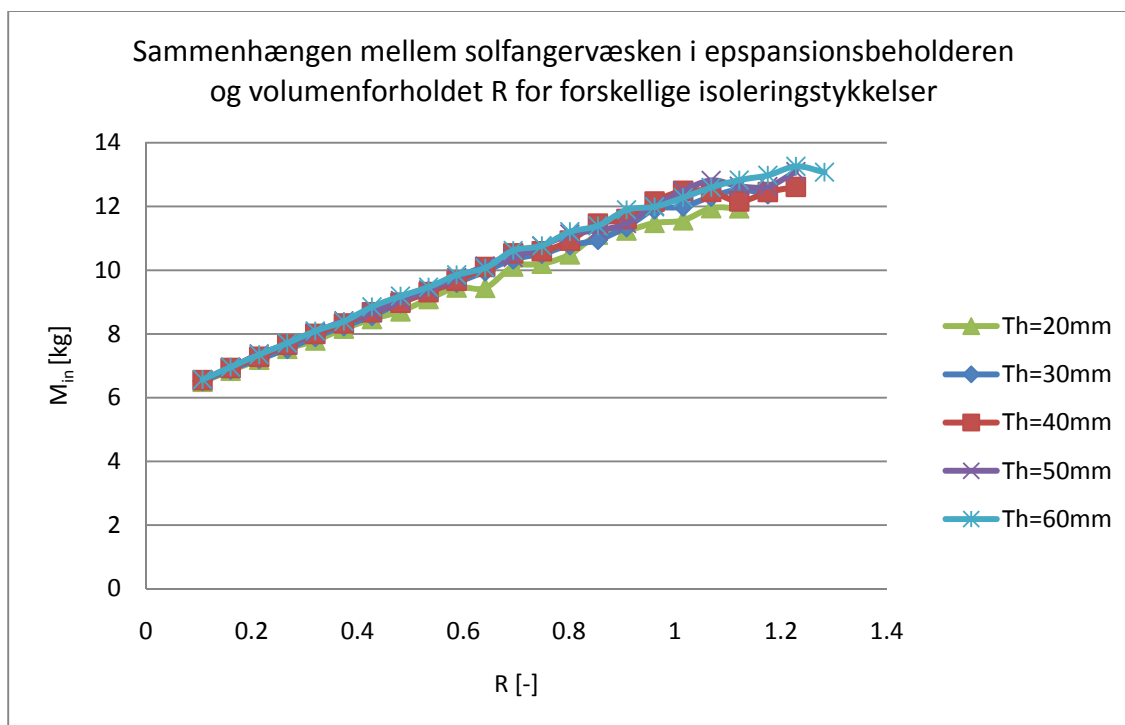
Figur 63. Sammenhængen mellem solfangervæsken i ekspansionsbeholderen (M_{in}) og forholdet mellem rørvolumenet i solfangerkredsen over nederste del af solfangeren og solfangerens væskevolumen.

7.6.2 Analyse af isoleringstykkelsen for rørstrækningen over den nederste del af solfangeren

På samme måde er indflydelsen af isoleringstykkelsen undersøgt. Der anvendes samme anlæg som beskrevet tidligere, dog er den indre rørdiameter sat til 25 mm.

Isoleringstykkelsen varieres fra 10 mm til 30 mm.

På Figur 64 ses indflydelsen af isoleringstykkelsen. Isoleringstykkelsen har kun lille indflydelse på væskeindholdet i ekspansionsbeholderen.



Figur 64. Sammenhængen mellem solfangervæsken i ekspansionsbeholderen (M_{in}) og volumenforholdet R for forskellige isoleringstykkelser.

7.7 Konklusion teori

Beregninger med den opstillede teori er sammenlignet med målinger. Der er alt i alt en god overensstemmelse mellem målte og beregnede størrelser. Den opstillede teori kan derfor med rimelighed benyttes til at undersøge hvorledes solfangerkredsens udformning og indstillinger påvirker tryk- og temperaturforhold i solfangerkredsen samt væskemængden, som presses ud i ekspansionsbeholderen under stagnation.

Undersøgelserne viste at stagnationstemperaturen ikke påvirkes nævneværdigt af ekspansionsbeholderens volumen og fortryk. Væskemængden, der presses ud i ekspansionsbeholderen under stagnation øges, hvis ekspansionsbeholderens volumen og fortryk øges, og hvis solfangerkredsens væskevolumen over den nederste del af solfangerne øges.

På baggrund af den fremsatte teori kan det nødvendige volumen for ekspansionsbeholderen beregnes på baggrund af oplysninger om anlægget.

8 Regneark

På baggrund af den fremlagte teori er der udarbejdet et regneark til dimensionering af ekspansionsbeholderen for et givent anlæg. Regnearket består af 9 sider hvor den første side '**Information**' giver en introduktion til arket samt en vejledning i hvilke anlægsværdier der skal indtastes. På siden '**Dimensionering**' skal værdierne indtastes og her beregnes det nødvendige volumen for ekspansionsbeholderen. Næste side '**Tabeller**' med beregningerne for 6 forskellige anlæg hvor størrelsen af ekspansionsbeholderen bestemmes med stigende installationstryk og fortryk for ekspansionsbeholderen. Herefter følger 6 sider '**Diagram1 – Diagram6**' der viser beregningsresultaterne for de 6 forskellige anlæg.

8.1 Information

Siden 'information' indeholder en kort vejledning i brugen af regnearket, samt vigtig information angående begrænsningerne for arket, se Figur 65.





Begrænsningerne for regnearket består i at solfangerne skal have en rørføring i solfangerne som en BA30 solfanger og derved en lige så god mulighed for tømning som en BA30 solfanger. Derudover er der i forsøget benyttet en ekspansionsbeholder fra Elbi, hvor fabrikanten har oplyst at kun 70 % af det totale volumen er tilgængeligt for propylenglykol/vand blandingen. Dette er der derfor taget højde for i beregningerne i regnearket.

Dimensionering af ekspansionsbeholder

Dette excel-ark til dimensionering af ekspansionsbeholder er udarbejdet i forbindelse med EUDP projektet "Kvalitetssøkring ad solvarmeanlæg - fase III".

Vejledning

I arket 'Dimensionering' indtastes parametre for solvarmeanlægget i de orange felter. Der vil blive anbefalet et interval for fortryk for ekspansionsbeholderen i de brune felter, og på baggrund af disse vælges et fortryk for ekspansionsbeholderen. Der vil herefter blive anbefalet et interval for installationstrykket, ligeledes i et brunt felt, og der skal vælges det ønskede installationstryk. På baggrund af indtastningerne angives nu et passende ekspansionsbeholdervolumen. Bemærk de lilla felter der angiver begrænsningerne for regnearket.

	Felter til indtastning af parametre for solvarmeanlægget
	Begrænsninger for regnearket
	Interval mht. fortryk for ekspansionsbeholderen og installationstryk for solvarmeanlægget
	Angiver den nødvendige størrelse på ekspansionsbeholderen.

Informatiernerne der skal indtastes er:

- *Antal solfangere*
- *Væskeindhold i en solfanger*
- *Indre diameter i den øverste del af solfangerkredsen*
- *Længden af den øverste del af solfangerkredsen*
- *Det totale volumen af propylenglykol/vand blanding i solfangerkredsen*
- *Koncentration af propylenglykol i solfangervæsken*
- *Maksimal tilladt temperatur for propylenglykol/vand blandingen*
- *Afstand mellem toppen af solfangerkredsen og ekspansionsbeholderen*

I arket 'tabeller' er der opbygget eksempler på anlæg hvor størrelsen af ekspansionsbeholderen er beregnet for forskellige fortryk for ekspansionsbeholderen og forskellige installationstryk. I Arkene 'Diagram1' til 'Diagram6' er resultaterne vist på grafer.

Vigtig information

Excel-arket er udarbejdet på basis af målinger med Batec BA30 solfangere og ekspansionsbeholder fra Elbi. Det kan kun benyttes til Batec anlæg eller anlæg der er designet på samme måde med hensyn til solfangere og kobling af solfangere.

Baggrunden for regnearket er beskrevet i rapporten SR-10-04 fra DTU Byg.

Figur 65 Introduktionsside og indtastningsside fra regnearket til dimensionering af ekspansionsbeholderen.

8.2 Dimensionering

Regnearket er som nævnt tidligere baseret på at brugeren indtaster informationer om anlægget der skal bestemmes en ekspansionsbeholder til. På Figur 66 er vist dimensioneringssiden i regnearket.

Anlægsinformationerne er:

- *Antal solfangere*
- *Væskeindhold i en solfanger*
- *Indre rørdiameter i den øverste del af solfangerkredsen*
- *Rørlængden af den øverste del af solfangerkredsen*
- *Det totale volumen af propylenglykol/vand blanding i solfangerkredsen*
- *Koncentration af propylenglykol i solfangervæsken*
- *Maksimal tilladt temperatur for propylenglykol/vand blandingen*
- *Afstand mellem toppen af solfangerkredsen og ekspansionsbeholderen*

Herefter angives et interval for fortrykket for ekspansionsbeholderen, og på baggrund af det valgte fortryk, angives yderligere et interval for installationstrykket for anlægget. Nu angives det mindste volumen for ekspansionsbeholderen.

Som hovedregel skal man vælge det mindste tilladte fortryk for ekspansionsbeholderen og det mindste tilladte installationstryk, dog skal installationstrykket være større end fortrykket. Dette vil resultere i det mindste volumen for ekspansionsbeholderen.

System oplysninger

Antal solfangere		N	3	-
Væskeindhold i en solfanger		V_c	2,26	liter
Indre diameter for rør i den øverste del af solfangerkredsen		D_i	0,013	m
Længden af den øverste del af solfangerkredsen		L_{max}	5	m
Det totale volumen af propylenglykol/vand blanding i solfangerkredsen	$V_t > 7,44$ Litre	V_t	15	liter
Koncentration af propylenglykol i solfangervæsken	$C_o \leq 60$ %	C_o	40	%
Maksimal tilladt temperatur for propylenglykol/vand blandingen	$122 \leq T_{e-max} \leq 178$	T_{e-max}	150	°C
Afstand mellem toppen af solfangerkredsen og ekspansionsbeholderen	$H_t \leq 90$ m	H_t	10	m

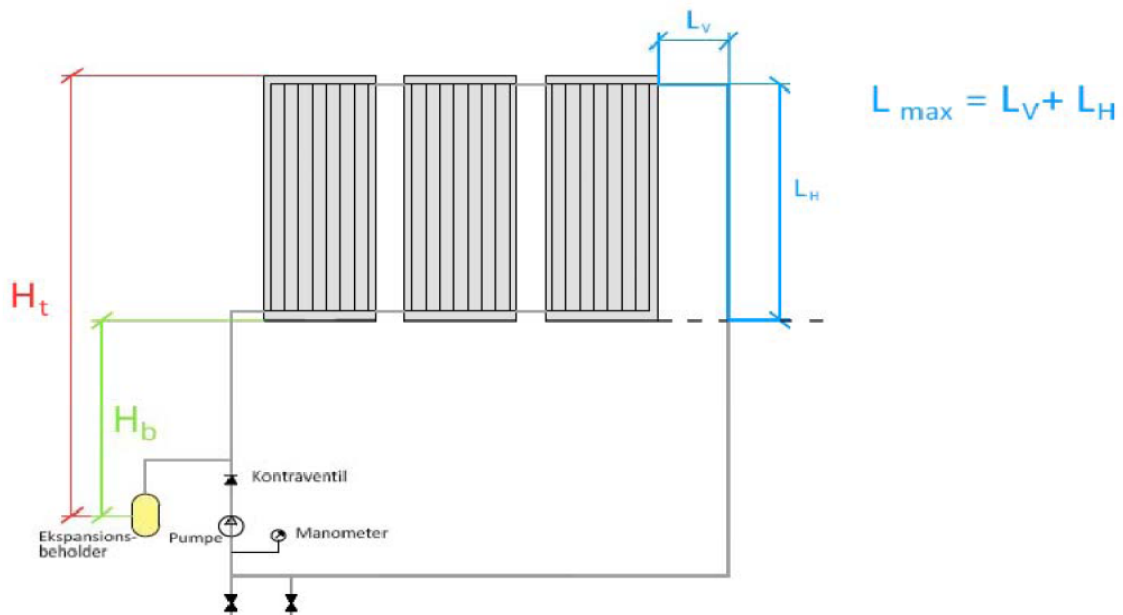
Interval for fortryk i ekspansionsbeholderen på baggrund af de indtastede oplysninger

Fortrykket i ekspansionsbeholderen	$0,89 \text{ bar} \leq P_{pre} \leq 3,62 \text{ bar}$	P_{pre}	1,00	bar
------------------------------------	---	-----------	------	-----

Interval for installationstryk på baggrund af det indtastede fortryk for ekspansionsbeholderen

Installationstrykket i solfangerkredsen ved ekspansionsbeholderen	$1,21 \text{ bar} \leq P_{sys} \leq 3,84 \text{ bar}$	P_{sys}	1,30	bar
---	---	-----------	------	-----

Nødvendigt volumen af ekspansionsbeholderen	V_0	$\geq 21,2$	liter
---	-------	-------------	-------



Figur 66 Dimensioneringside fra regnearket.

Målinger har vist at dampen både kan forekomme i solfangeren og i solfangerkredsens rørstrækning der ligger over det nederste niveau for solfangeren.

Det er derfor vigtigt at denne del af rørstrækningen medtages når volumenet af ekspansionsbeholderen bestemmes. I regnearket medtages denne del af rørstrækningen ved at

indtaste 'Indre diameter i den øverste del af solfangerkredsen' og 'Længden af den øverste del af solfangerkredsen'. Når længden af rørstrækningen der ligger over det nederste niveau for solfangeren indtastes er det vigtigt at medtage både vandrette og lodrette rørstrækninger.

8.3 Tabeller og diagrammer

På siden 'tabeller' er der beregnet volumener af ekspansionsbeholderen for 6 forskellige anlæg hvor fortryk og installationstryk varieres. Indtastningerne for de tre anlæg kan ses i Tabel 11.

Tabel 11 Anlægsbeskrivelse af anlæg beregnet i regnearket til dimensionering af ekspansionsbeholderen.

Anlægsbeskrivelse	A	B	C	D	E	G
Antal BA30 solfangere	1	2	3	4	5	6
Indre rørdiameter i øverste del af solfangerkredsen	0,013 m	0,013 m	0,013 m	0,013 m	0,013 m	0,013 m
Længden af den øverste del af solfangerkredsen	3,5 m	3,5 m	3,5 m	5 m	5 m	5 m
Totalt volumen af propylenglykol/vand i solfangerkredsen	10 l	10 l	10 l	18 l	18 l	18 l
Propylenglykol procent	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
Max. temperatur for solfangervæsken	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C
Afstand mellem top af solfangerkreds og ekspansionsbeholder	6 m	6 m	6 m	10 m	10 m	10 m

I Tabel 12 og frem til Tabel 17 ses tabellerne fra regnearket. Både fortryk og installationstryk varieres, og som tidligere nævnt resulterer det mindste tilladelige fortryk og installationstryk i det mindste volumen af ekspansionsbeholderen.

Tabel 12 Tabel 1 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	0,6	1	1,5	2	2,5	3
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
0,8	7,1					
0,9	7,7					
1,0	8,3					
1,1	9,0					
1,2	9,7					
1,3	10,4	8,6				
1,4	11,3	9,2				
1,5	12,2	10,0				
1,6	13,3	10,8				
1,7	14,4	11,7	9,53			
1,8	15,6	12,7	10,3			
1,9	17,0	13,8	11,2			
2,0	18,5	15,0	12,1			
2,1	20,2	16,4	13,2			
2,2	22,2	17,9	14,5	12,2		
2,3	24,2	19,7	15,9	13,4		
2,4	26,9	21,7	17,5	14,8		
2,5	29,9	24,1	19,5	16,3		
2,6	33,4	26,9	21,7	18,2		
2,7	37,6	30,2	24,4	20,4	17,6	
2,8	42,6	34,3	27,6	23,2	20	
2,9	48,9	39,3	31,6	26,5	22,8	
3,0	56,9	45,7	36,8	30,8	26,5	
3,1	67,5	54,2	43,6	36,5	31,4	
3,2	82,0	65,9	52,9	44,2	38	33,4
3,3	103,0	82,9	66,6	55,7	47,8	42
3,4	137,0	110,0	88,6	74	63,6	55,8

Tabel 13 Tabel 2 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	0,6	1	1,5	2	2,5	3
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
0,8	12,6					
0,9	13,7					
1,0	14,8					
1,1	16,0					
1,2	17,3					
1,3	18,8	15,3				
1,4	20,3	16,5				
1,5	22,0	17,9				
1,6	23,9	19,4				
1,7	25,9	21,0	17			
1,8	28,2	22,8	18,5			
1,9	30,7	24,8	20,1			
2,0	33,4	27,0	21,9			
2,1	36,6	29,5	23,9			
2,2	40,1	32,3	26,1	22		
2,3	44,1	35,6	28,7	24,1		
2,4	48,7	39,3	31,7	26,6		
2,5	54,1	43,6	35,1	29,5		
2,6	60,5	48,7	39,2	32,9		
2,7	68,0	54,7	44,1	36,9	31,8	
2,8	77,2	62,1	50	41,9	36,1	
2,9	88,6	71,3	57,3	48	41,3	
3,0	103,0	82,9	66,6	55,8	48	
3,1	122,0	98,3	79	66	56,8	
3,2	148,0	119,0	95,9	80,2	68,9	60,5
3,3	187,0	150,0	120	100	86,7	76,1
3,4	249,0	200,0	160	134	115	101

Tabel 14 Tabel 3 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	0,6	1	1,5	2	2,5	3
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
0,8	18,1					
0,9	19,6					
1,0	21,3					
1,1	23,1					
1,2	25,0					
1,3	27,0	22,0				
1,4	29,3	23,8				
1,5	31,8	25,7				
1,6	34,4	27,9				
1,7	37,4	30,3				
1,8	40,7	32,9	26,6			
1,9	44,3	35,8	28,9			
2,0	48,3	39,0	31,5			
2,1	52,8	42,6	34,4			
2,2	57,9	46,7	37,7	31,7		
2,3	63,8	51,4	41,5	34,8		
2,4	70,5	56,8	45,8	38,4		
2,5	78,5	63,0	50,8	42,6		
2,6	87,5	70,4	56,7	47,5		
2,7	98,5	79,2	63,7	53,1	46	
2,8	111,0	89,9	72,3	60,5	52,1	
2,9	128,0	103,0	82,9	69,4	59,1	
3,0	149,0	120,0	96,4	80,7	69,4	
3,1	177,0	142,0	114	95,6	82,2	
3,2	215,0	173,0	138	116	99,8	87,5
3,3	271,0	218,0	174	146	125	110
3,4	362,0	290,0	232	194	167	146

Tabel 15 Tabel 4 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
1,3	27,5					
1,4	29,6					
1,5	31,9					
1,6	34,3					
1,7	37,0					
1,8	39,9	32,3				
1,9	43,0	34,8				
2,0	46,4	37,6				
2,1	50,2	40,6				
2,2	54,4	43,9				
2,3	59,0	47,6	40			
2,4	64,2	51,8	43,5			
2,5	70,0	56,5	47,4			
2,6	76,6	61,7	51,8			
2,7	84,2	67,8	56,8	49		
2,8	92,8	74,7	62,6	54		
2,9	103,0	82,9	69,4	59,8		
3,0	114,0	92,4	77,4	66,7		
3,1	129,0	103,0	87	74,9		
3,2	146,0	118,0	98,7	84,9	74,6	
3,3	168,0	135,0	113	97,4	85,5	
3,4	196,0	158,0	132	113	99,6	
3,5	234,0	187,0	157	134	118	
3,6	286,0	229,0	191	164	144	
3,7	364,0	292,0	243	209	183	163
3,8	492,0	395,0	329	283	248	220

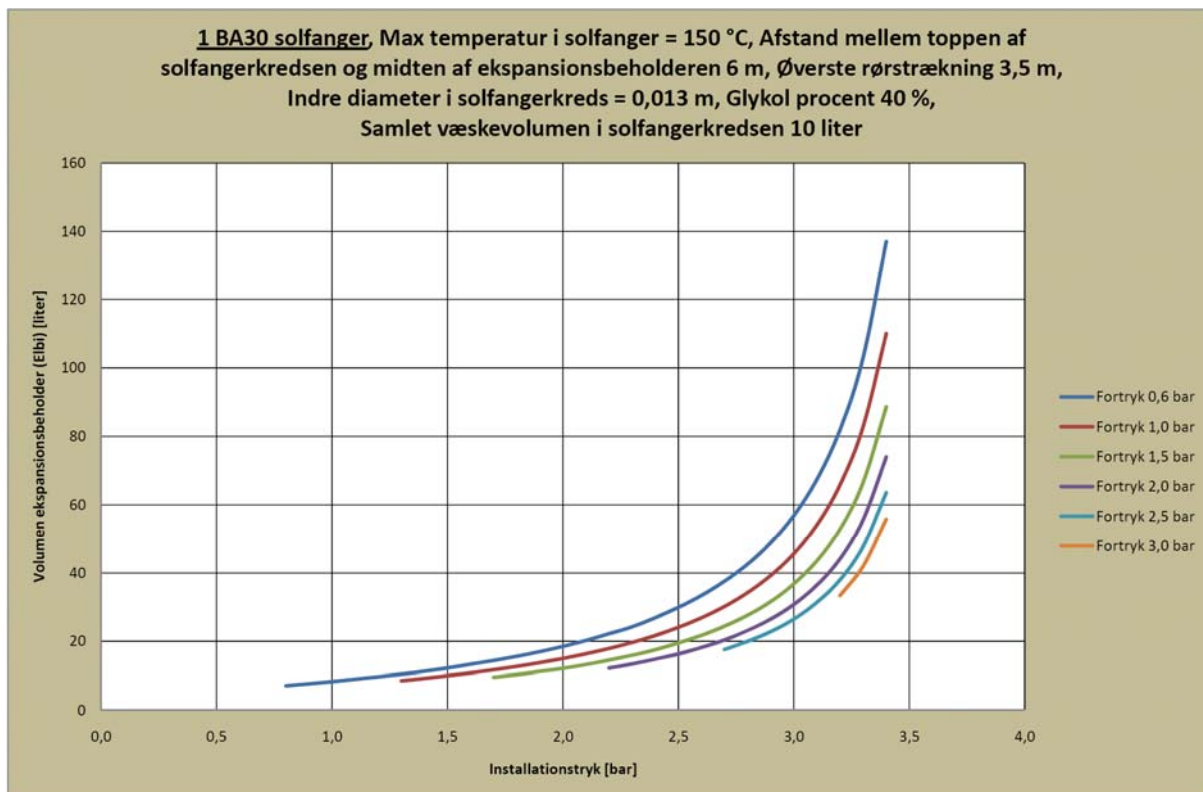
Tabel 16 Tabel 5 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
1,3	33,8					
1,4	36,4					
1,5	39,2					
1,6	42,2					
1,7	45,4					
1,8	49,0	39,7				
1,9	52,8	42,8				
2,0	57,1	46,2				
2,1	61,7	49,9				
2,2	66,9	54,0				
2,3	72,6	58,6	49,2			
2,4	79,0	63,7	53,5			
2,5	86,1	69,4	58,3			
2,6	94,3	75,9	63,7			
2,7	103,0	83,4	69,6	60,3		
2,8	114,0	91,9	77	66,4		
2,9	126,0	101,0	85,4	73,5		
3,0	141,0	113,0	95,2	82		
3,1	159,0	127,0	107	92,1		
3,2	180,0	145,0	121	104	91,7	
3,3	207,0	166,0	139	119	105	
3,4	242,0	194,0	162	139	122	
3,5	288,0	231,0	193	166	145	
3,6	352,0	282,0	236	202	177	
3,7	448,0	359,0	300	257	225	201
3,8	606,0	486,0	406	348	305	271

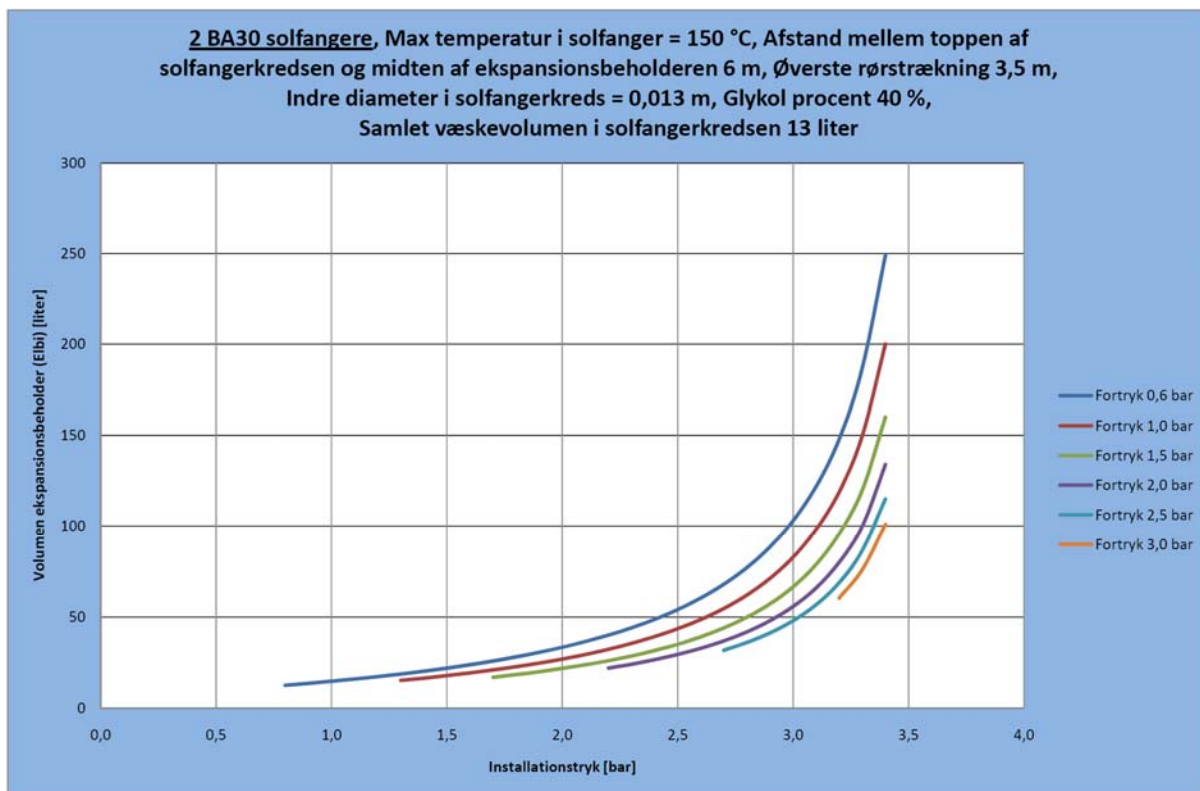
Tabel 17 Tabel 6 fra regnearket.

Installationstryk [bar]	Fortryk [bar]					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	Nødvendigt ekspansionsbeholdervolumen [liter]					
1,3	40,1					
1,4	43,2					
1,5	46,5					
1,6	50,1					
1,7	54,0					
1,8	58,2	47,1				
1,9	62,8	50,8				
2,0	67,8	54,8				
2,1	73,3	59,2				
2,2	79,4	64,1				
2,3	86,2	69,6	58,4			
2,4	93,8	75,6	63,5			
2,5	102,0	82,5	69,2			
2,6	112,0	90,2	75,6			
2,7	123,0	99,0	83	71,6		
2,8	135,0	109,0	91,5	78,9		
2,9	150,0	121,0	101	87,3		
3,0	168,0	135,0	113	97,4		
3,1	189,0	151,0	127	109		
3,2	214,0	172,0	144	124	109	
3,3	246,0	198,0	165	142	125	
3,4	287,0	231,0	193	166	145	
3,5	342,0	274,0	229	197	173	
3,6	418,0	335,0	280	241	211	
3,7	537,0	427,0	356	306	268	238
3,8	720,0	578,0	482	414	362	323

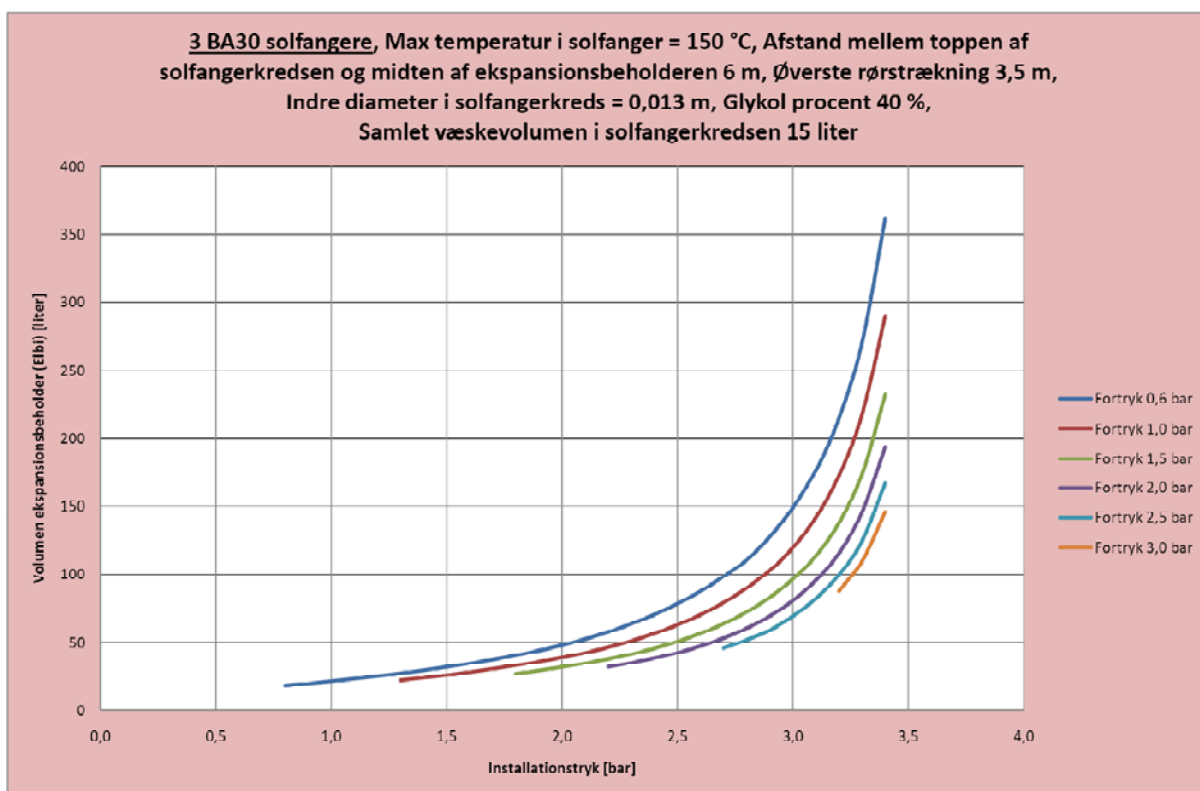
Figur 67 og frem til Figur 72 viser diagrammer til bestemmelse af volumen af ekspansionsbeholderen for de 6 anlæg.



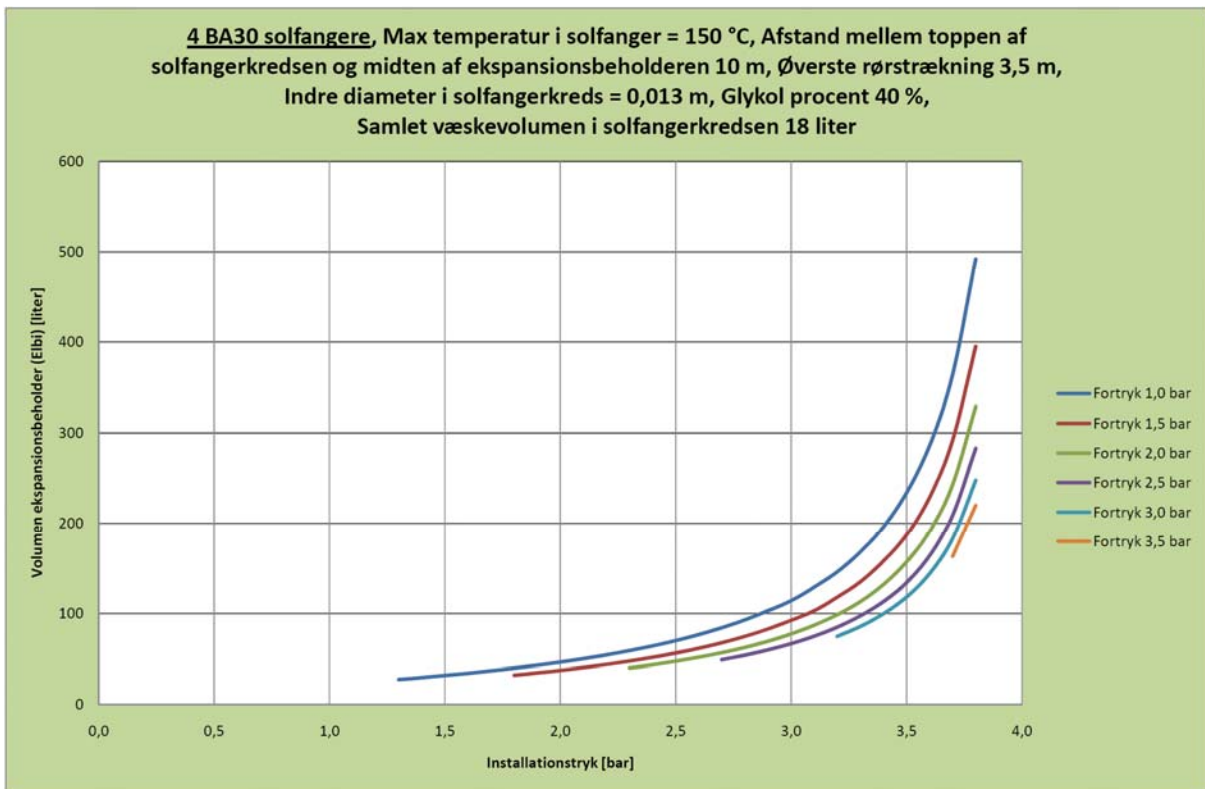
Figur 67 Diagram 1 fra regnearket.



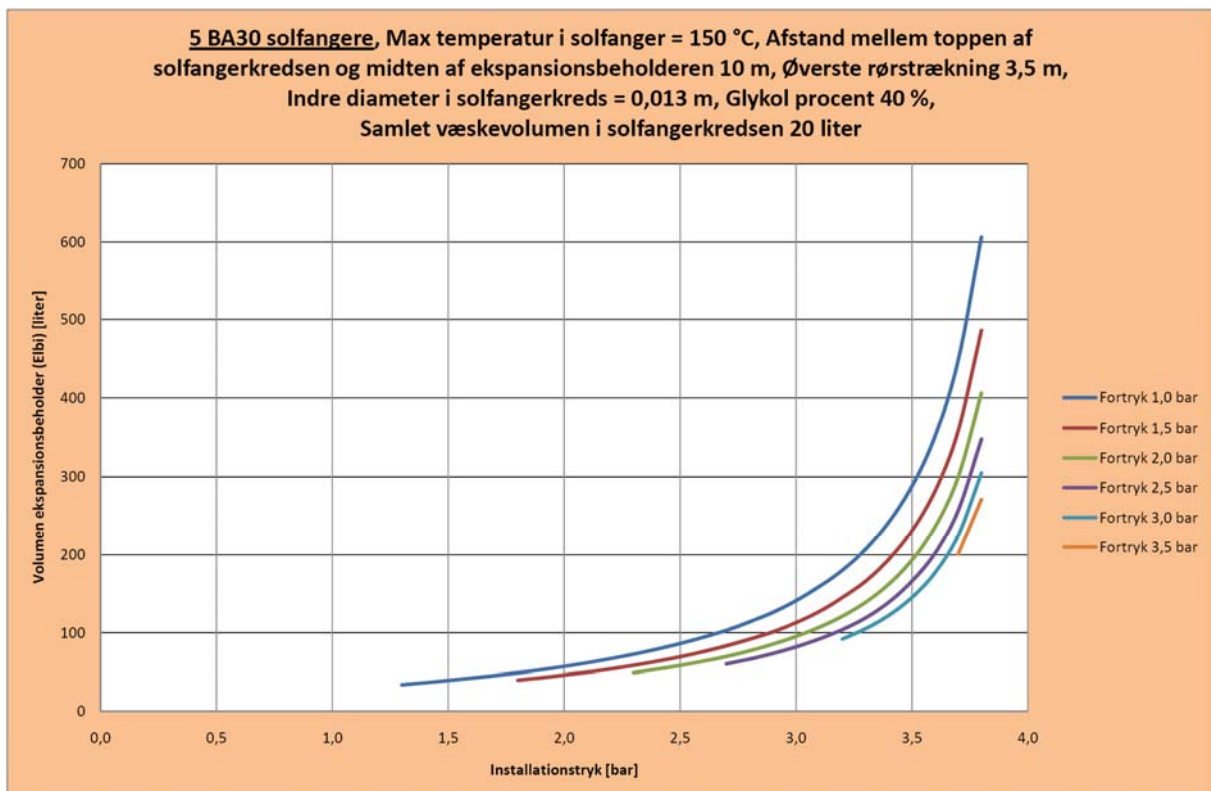
Figur 68 Diagram 2 fra regnearket.



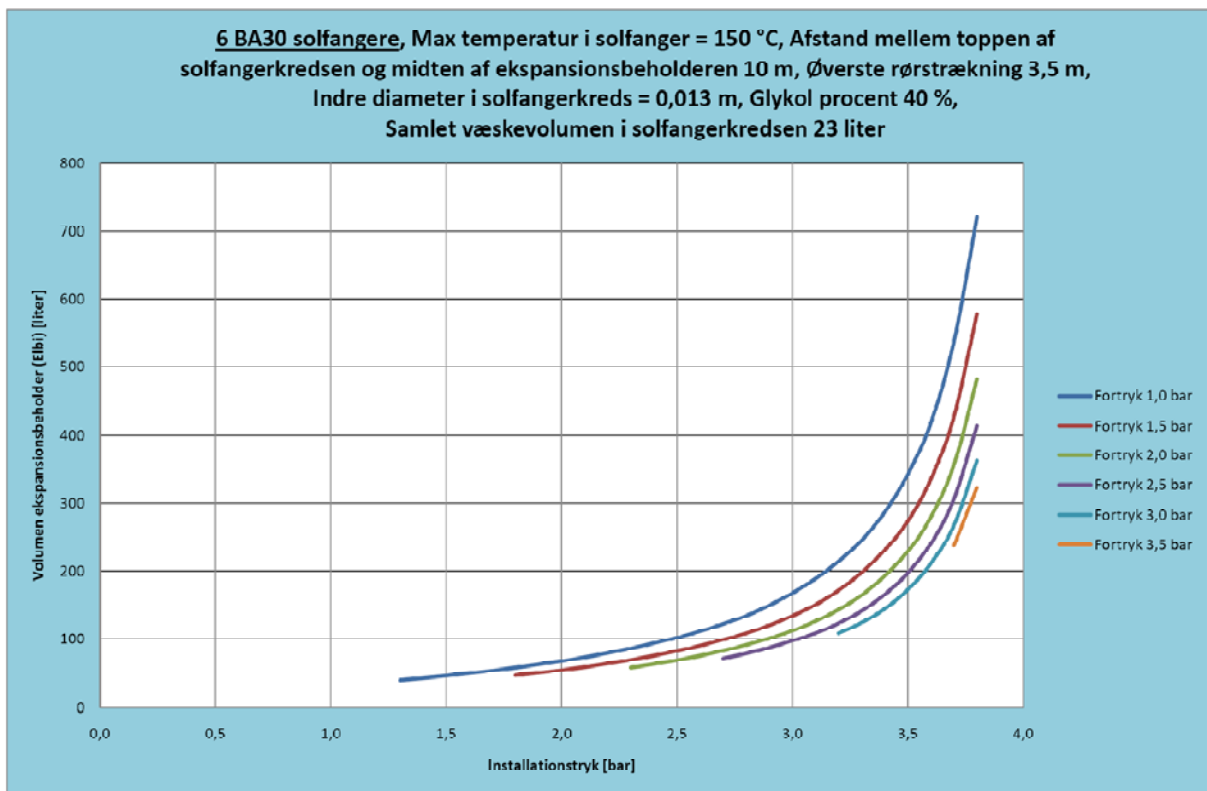
Figur 69 Diagram 3 fra regnearket.



Figur 70 Diagram 4 fra regnearket.



Figur 71 Diagram 5 fra regnearket.



Figur 72 Diagram 6 fra regnearket.

9 Konklusion

Der er gennemført eksperimentelle undersøgelser af en solfangerkreds med Batec Solvarmes BA30 solfangere, med en stor ekspansionsbeholder, med Batecs propylenglykol/vand blanding som solfangervæske og med en cirkulationspumpe, som stoppes ved høje temperaturer.

Undersøgelsen viste at solfangervæske under stagnation fordamper i toppen af solfangeren under stor udvidelse. Udvidelsen presser solfangervæsken ud af solfangerens nederste tilslutningsrør, og solfangervæsken presses herved ud i ekspansionsbeholderen. Under stagnation opretholdes meget høje temperaturer i solfangeren, mens kritisk høje temperaturer i øvrigt ikke forekommer i solfangerkredsen, uafhængigt af solfangerkredsens rørføring. Volumenet der optages i ekspansionsbeholderen under stagnation og solfangervæskens kogepunkt afhænger af trykket i solfangerkredsen og fortrykket for ekspansionsbeholderen.

Undersøgelser blev gennemført fra 15. juli 2009 til 31. marts 2010. I alt blev der registeret 97 stagnationsperioder med kogning af solfangervæsken. Den højeste kogepunktstemperatur var 159 °C og volumenet, som blev optaget af ekspansionsbeholderen under stagnation varierede mellem 90 % og 109 % af solfangerens væskevolumen. Solfangervæskens PH-værdi blev ikke reduceret igennem forsøgsperioden. Det konkluderes derfor at princippet med en for ekspansionsbeholder og et styresystem, der stopper cirkulationspumpen ved høje temperaturer, er velegnet til at sikre Batecs anlæg mod faretruende høje temperaturer, idet Batecs solfangere har særdeles gode tømmegenskaber under stagnation.

Der er opstillet en teoretisk model til bestemmelse af tryk- og temperaturforhold for Batecs solfangerkreds under stagnation. Modellen er valideret ved hjælp af målinger.

Modellen er benyttet til at udarbejde et regneark, som kan benyttes til at bestemme det nødvendige volumen af ekspansionsbeholderen for Batecs solfangerkreds, når udformningen af solfangerkredsen og den maksimale tilladelige solfangervæsketemperatur kendes.

10 Referencer

- [1] R. Haussner, C. Fink Stagnation behaviour of solar thermal systems. A report of IEA SHC Task 26 Solar Combisystems. (2002)
- [2] R. Haussner, C. Fink Stagnation behaviour of solar thermal systems. Proceedings Eurosun 2002 Bologna.
- [3] R. Haussner, C. Fink Stagnation behaviour of solar thermal systems. ISES Solar World Congress, Gothenburg 2003.
- [4] Wedel, Signe and Bezzel, Eik. Heat Transfer Fluids for solar DHW systems- Report SEC-R-8 from Solar Energy Centre Denmark,DTI.
- [5] M Rommel et al: Entwicklung von Techniken zur Beherrschung des Stillstandsbetriebs . Fraunhofer ISE. Endbericht "StagSim" (0329268C). (2007)
- [6] J. Scheuren, W. Eisenmann. Stagnationsuntersuchungen in den Kollektorkreisen hochdimensionierter grosser thermischer Solaranlagen. ISFH (2007).
- [7] A.Schenke, H.Drück. Analyse und evaluierung grosser Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung. SWT (Nov 2007).
- [8] R.Hausner, C.Flink, W.Wagner, R.Riva, F.Hillems. Entwicklung von solarthermischen systemen mit unproblematischen stagnationsverhalten. Bmvit Bundesministerium für Ferkehr, Innovation und Technik (Austria). Berichte aus Energie-und Umweltforschung 9/2003.
- [9] R.Hausner. Stagnation thermischer solarer Großanlagen. Erneuerbare Energie, Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft 1/2010.

Der er gennemført eksperimentelle og teoretiske undersøgelser af en solfangerkreds med Batec Solvarmes BA30 solfangere, med en stor ekspansionsbeholder, med propylenglykol/vand blanding uden additiver som solfangervæske og med en cirkulationspumpe, som stoppes ved høje temperaturer. Temperatur- og trykforhold under solrige stagnationsperioder er klarlagt for solfangerkredsen. Den undersøgte solfangerkreds sikrer solvarmeanlæg og solfangervæske mod faretruende høje temperaturer.

Der er udarbejdet et regneark, som kan benyttes til at bestemme ekspansionsbeholderens volumen på basis af solfangerkredsens udformning og den maksimale tilladelige solfangervæsketemperatur.

DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg
Danmarks Tekniske Universitet

Brovej, Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
Tlf. 45 25 17 00

www.byg.dtu.dk

ISSN 1601-8605