

Optimering og afprøvning af solfanger til solvarmecentraler

Sagsrapport
BYG·DTU SR-07-06
2007
ISSN 1601 - 8605

Optimering og afprøvning af solfanger til solvarmecentraler

Jianhua Fan og Simon Furbo

Indholdsfortegnelse

1. Introduktion	6
2. Baggrund	6
3. Forbedringsmuligheder	7
3.1 Solfangerstørrelse	7
3.2 Isolering.....	7
3.3 Flow og manifold	11
3.4 Hældning	12
3.5 Længde af solfangerrækkerne	13
3.6 Seriekobling af solfangere.....	13
4. Effektivitetsmåling for ny solfanger	15
5 Effektivitet og ydelse med en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervælske	19
6. Flowfordelings-/kogningsproblemer	23
7. Varmetabsmålninger.....	27
8. Konklusion	34
Referencer	34

1. Introduktion

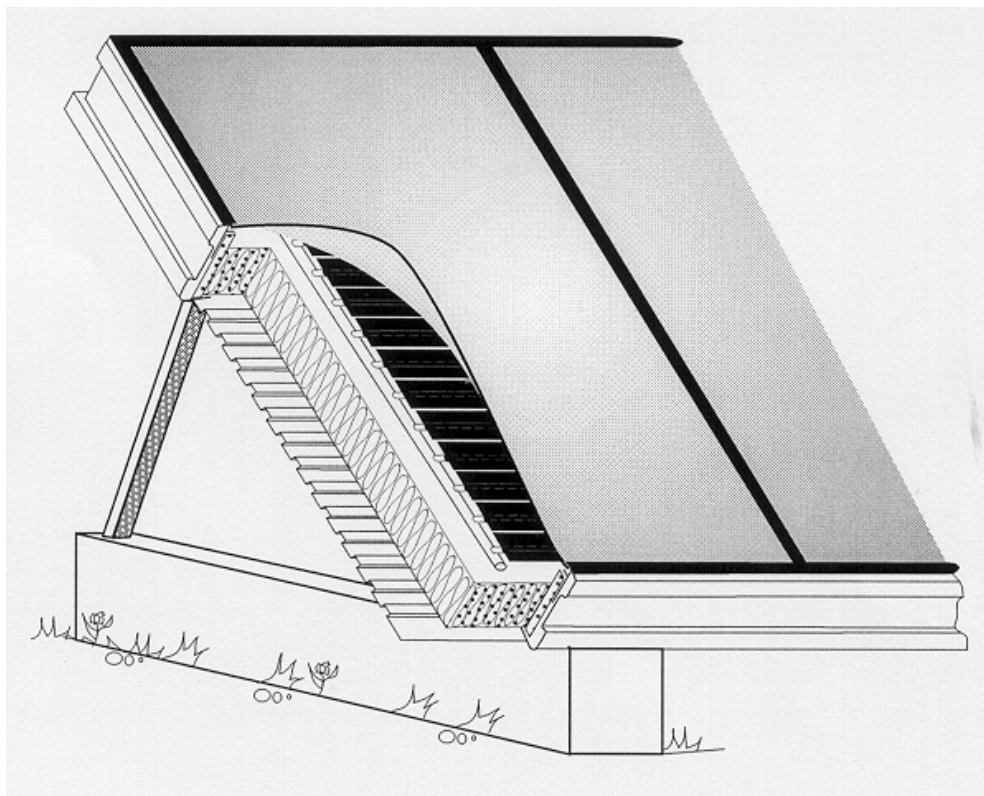
Denne rapport beskriver undersøgelser vedrørende Arcon Solvarme A/S's HT solfangere. Undersøgelserne er gennemført ved BYG.DTU i 2006-2007 i forbindelse med PSO-projektet: "Optimeret solvarmeproduktion i et liberaliseret elmarked. Demonstration af fuldskaalanlæg", j.nr. 2006-2-6369.

2. Baggrund

Effektiviteten af Arcon Solvarme A/S's HT solfanger med teflonfolie mellem absorber og dækglas er igennem et intensivt udviklingsarbejde de sidste år blevet stærkt forbedret, [1], [2]. Effektivitet og indfaldsvinkelkorrektionsfaktor for solfangeren, som er vist skematisk på figur 1, blev i 2005 bestemt til:

$$\eta = K_{\theta} * 0,81 - 2,91 * \frac{T_m - T_a}{G}, \text{ hvor}$$

$$K_{\theta} = 1 - \tan^{4,4}(\theta / 2)$$



Figur 1. Snit af HT solfanger med teflonfolie.

Solfangerens areal er 12,53 m² og solfangerens absorber består af 16 parallelle Sunstrips mellem to manifoldrør. Bagsiden af absorberen er isoleret med 75 mm mineraluld.

3. Forbedringsmuligheder

Forskellige forbedringsmuligheder for solfangeren er vurderet i et samarbejde mellem Arcon Solvarme A/S og BYG.DTU. Mulighederne er beskrevet i de følgende afsnit, afsnit 3.1-3.6.

3.1 Solfangerstørrelse

Det vurderes at solfangerens effektivitet samt solfangerfeltets ydelse kan forbedres en smule ved at gøre solfangerens højde og bredde større end henholdsvis 2,27 m og 5,96 m. Med større dimensioner kan solfangerens varmetabskoefficient nemlig reduceres da kanttabets betydning reduceres. Desuden kan længden af og dermed varmetabet fra rørene mellem solfangerne i rækkerne reduceres. Det bør bemærkes at der måske med større solfangerdimensioner er specielle problemer vedrørende flowfordeling gennem absorberne og termiske udvidelser. Dette bør klarlægges før solfangerdimensionerne gøres større.

Det vurderes at de forøgede omkostninger ved at producere og transportere større solfangerelementer ikke inden for dette projekts rammer retfærdiggør udvikling af et større solfangerelement.

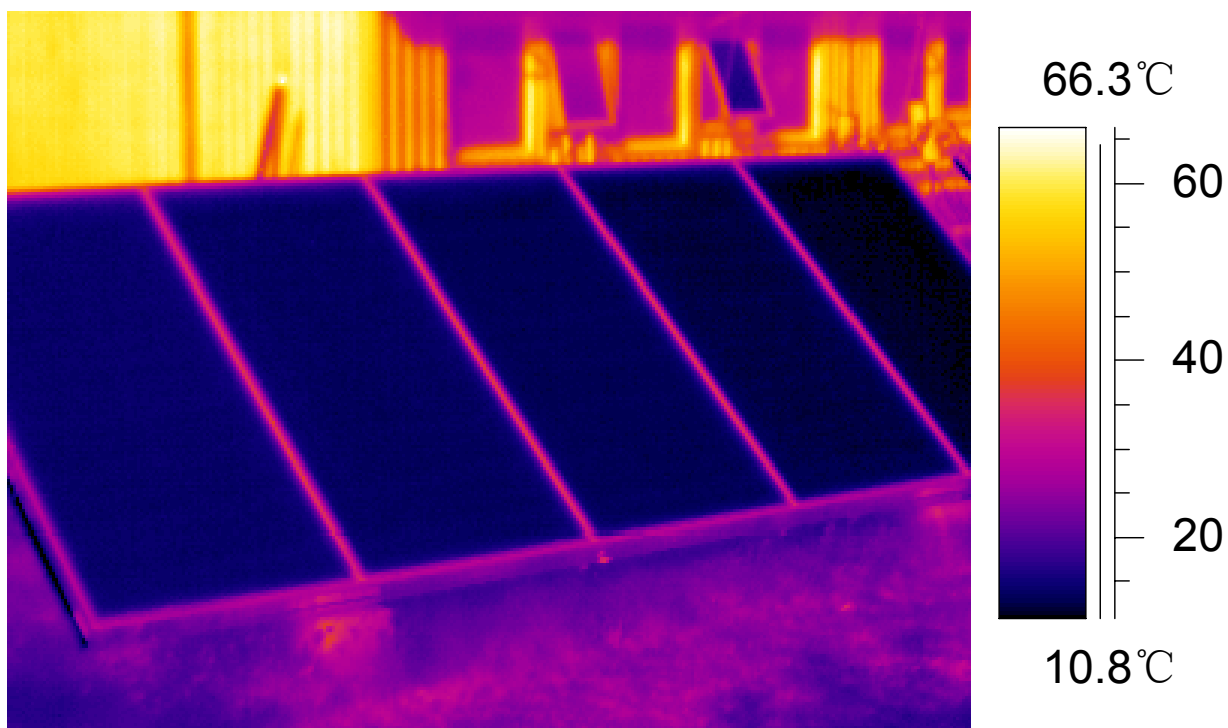
3.2 Isolering

Indledningsvis blev der gennemført termovisionsundersøgelser af solfangeren, der blev afprøvet i 2005, for at klarlægge om isoleringsforholdene kan forbedres. Figur 2, 3 og 4 viser termovisionsbilleder af solfangeren.

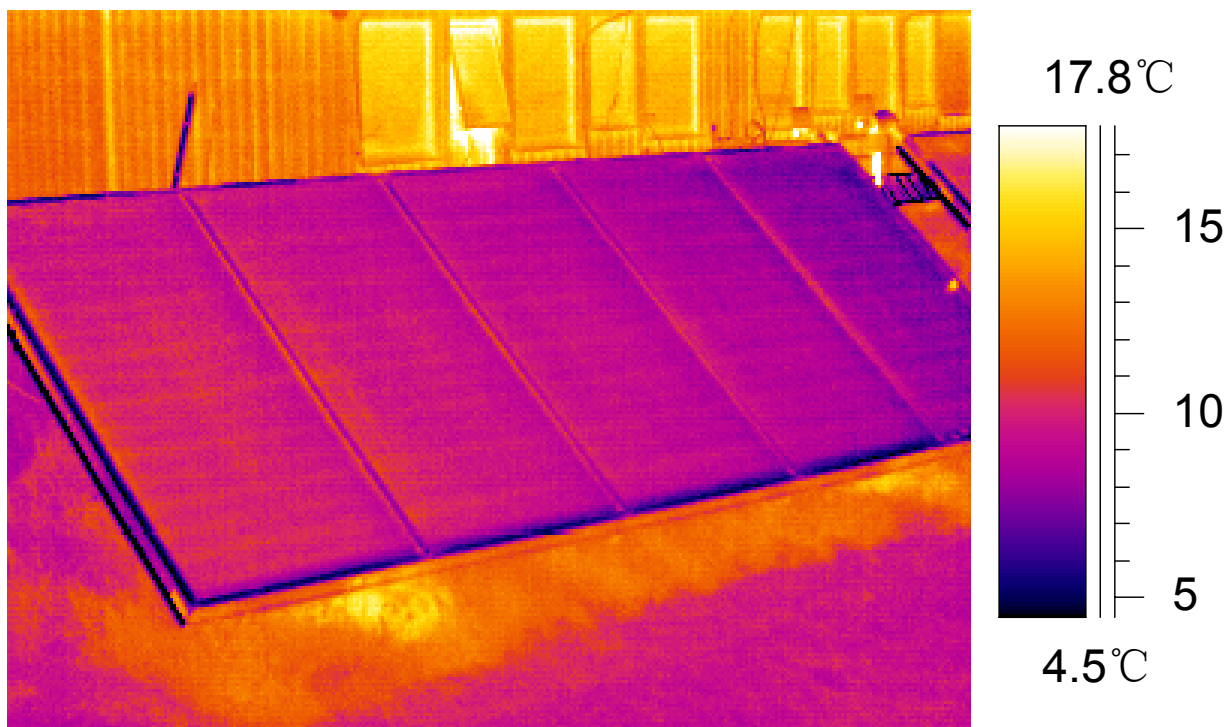
Figur 2 viser solfangerens overfladetemperaturer med solskin på solfangeren og med en middelsolfangervæsketemperatur på 55°C. Solfangervæsken pumpes igennem solfangeren fra højre mod venstre. Det ses at glastemperaturen er lidt højere i venstre del af solfangeren end i højre del, og at EPDM listerne mellem og omkring dækglassene er forholdsvis varme. Disse høje temperaturer, som skyldes den direkte solstråling på de mørke overflader, er de eneste høje overfladetemperaturer på forsiden af solfangeren. Figur 3 viser forsides overfladetemperaturer efter solnedgang. Varm solfangervæske cirkuleres gennem solfangeren. Middelsolfangervæsketemperaturen er 42°C. Det ses at EPDM listernes overfladetemperaturer nu er forholdsvis lave. Termovisionsbillederne viser altså at forsiden af solfangeren ikke har kuldebroer af betydning.

Figur 4 viser overfladetemperaturer for bagsiden af solfangeren efter solnedgang mens varm solfangervæske cirkuleres gennem solfangeren. Middelsolfangervæsketemperaturen er 42°C. Det ses at heller ikke bagsiden af solfangeren har kuldebroer af betydning. Det vurderes derfor at der ikke er behov for at ændre solfangeren for at reducere kuldebroer.

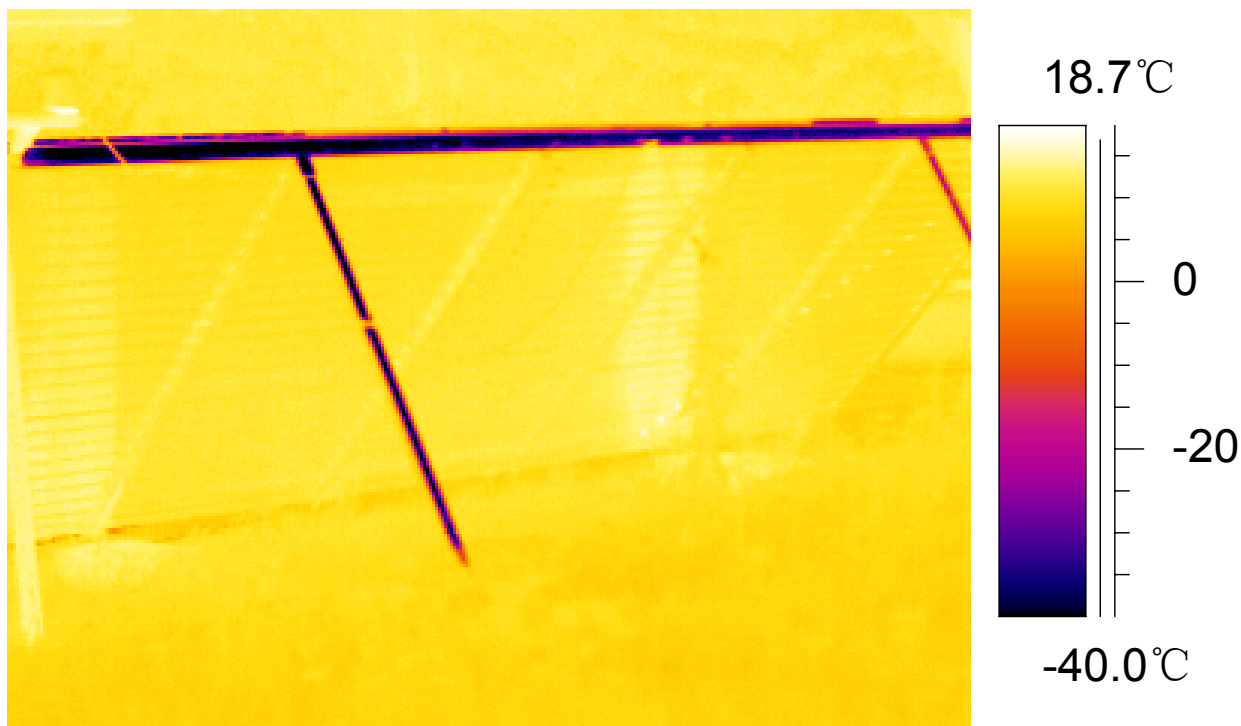
Solfangerens varmetab kan reduceres ved at benytte vakuumisoleringspaneler som en del af bagsideisoleringen. På basis af priserne for forskellige markedsførte vakuumisoleringspaneler vurderes det dog at være for dyrt at benytte disse paneler i solfangeren.



Figur 2. Termovisionsbillede af forside af HT solfanger med teflonfolie af prøvet i 2005. 31. august kl. 16:30. Middelsolfangervæsketemperatur: 55°C.



Figur 3. Termovisionsbillede af forside af HT solfanger med teflonfolie afprøvet i 2005. 31. august 2005 kl. 21:10. Middelsolfangervæsketemperatur: 42°C.

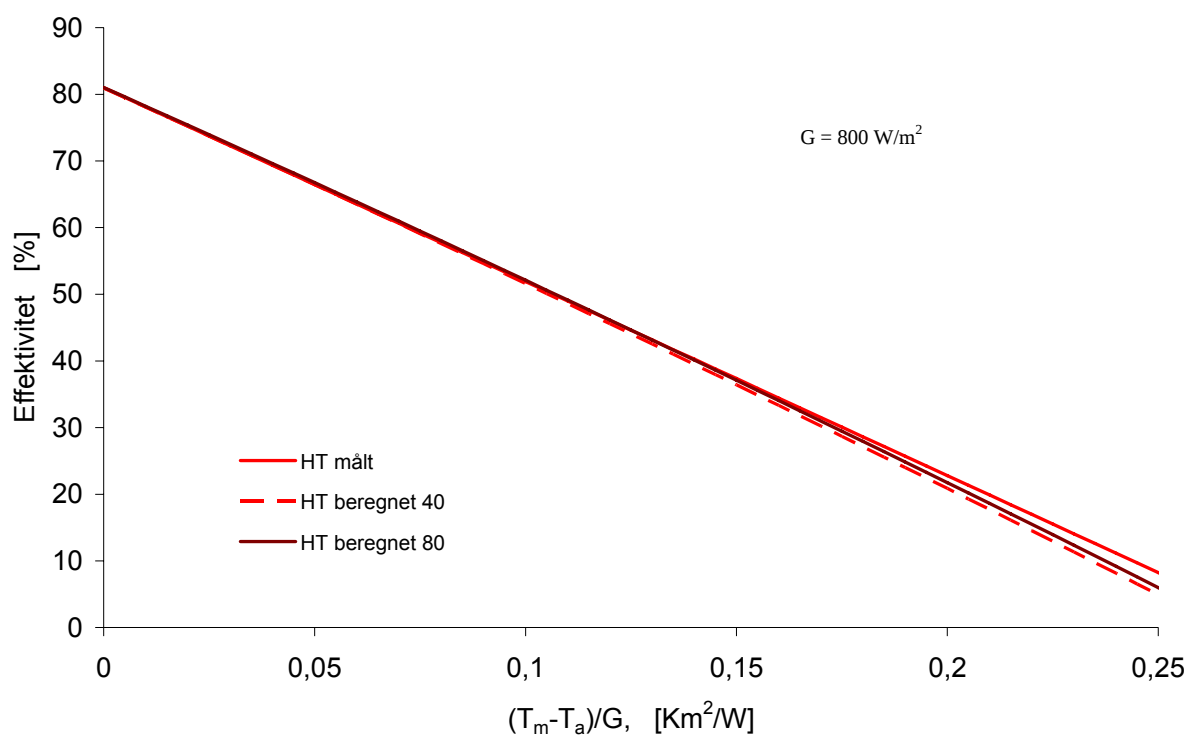


Figur 4. Termovisionsbillede af bagside af HT solfanger med teflonfolie afprøvet i 2005. 31. august kl. 21:10. Middelsolfangervæsketemperatur: 42°C.

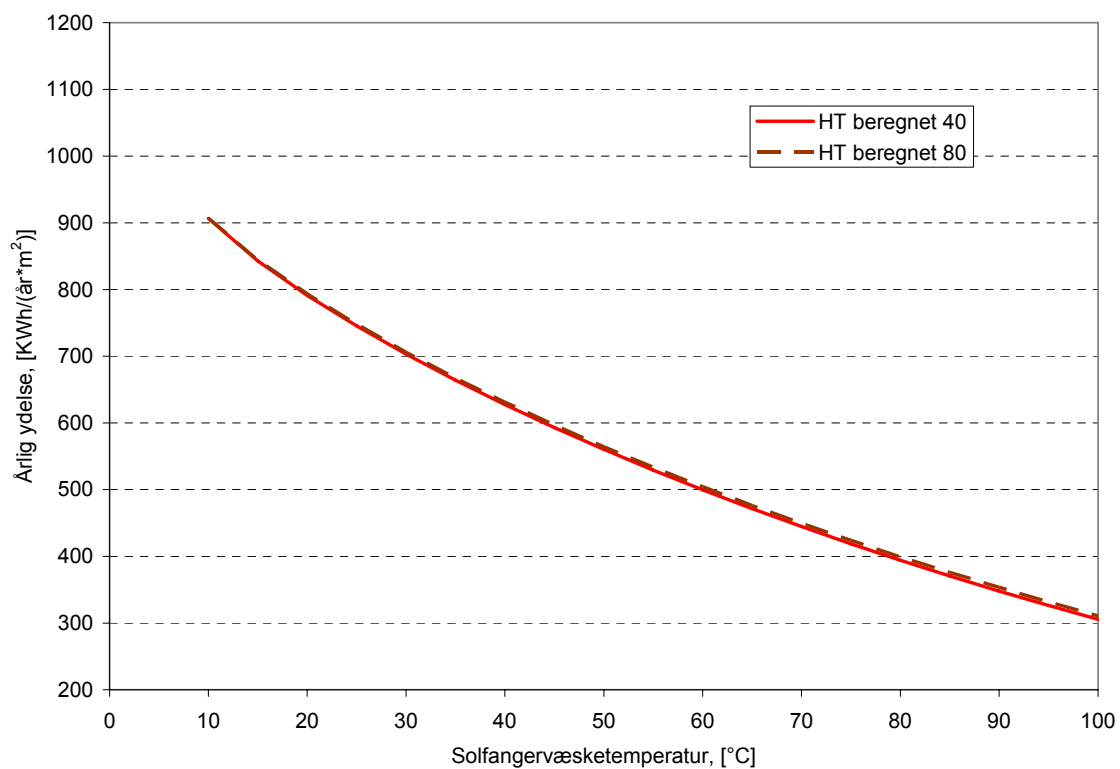
Solfangerens varmetab kan også reduceres ved at erstatte Rockwool 40 med Rockwool 80 som varmeisoleringsmateriale, idet varmeledningsevnen for Rockwool 80 er lidt mindre varmeledningsevnen end Rockwool 40. For at vurdere hvor store ydelsesmæssige fordele der kan opnås herved blev der gennemført teoretiske beregninger af hvorledes solfangereffektiviteten og solfangerydelsen afhænger af isoleringsmaterialet. Der er gennemført beregninger med isoleringsmaterialet Rockwool 40, som blev anvendt i solfangeren der blev afprøvet i 2005, og Rockwool 80. Beregningerne er gennemført med beregningsprogrammet SOLEFF, [3] og regnearket "Solvarmecentraler", [4].

Figur 5 viser for en solbestrålingsstyrke på 800 W/m² og en indfaldsvinkel på 0° den målte effektivitetskurve for solfangeren afprøvet i 2005 samt de beregnede effektivitetskurver, både med Rockwool 40 og Rockwool 80. Input til SOLEFF programmet er justeret således at den beregnede årlige ydelse af solfangeren med Rockwool 40 bliver identisk med den beregnede årlige ydelse af den afprøvede solfanger. Det ses, at effektivitetskurverne for de tre solfangere næsten er identiske. Kun for høje x-axe værdier er effektiviteten af solfangeren med Rockwool 80 en smule højere end effektiviteten af solfangeren med Rockwool 40.

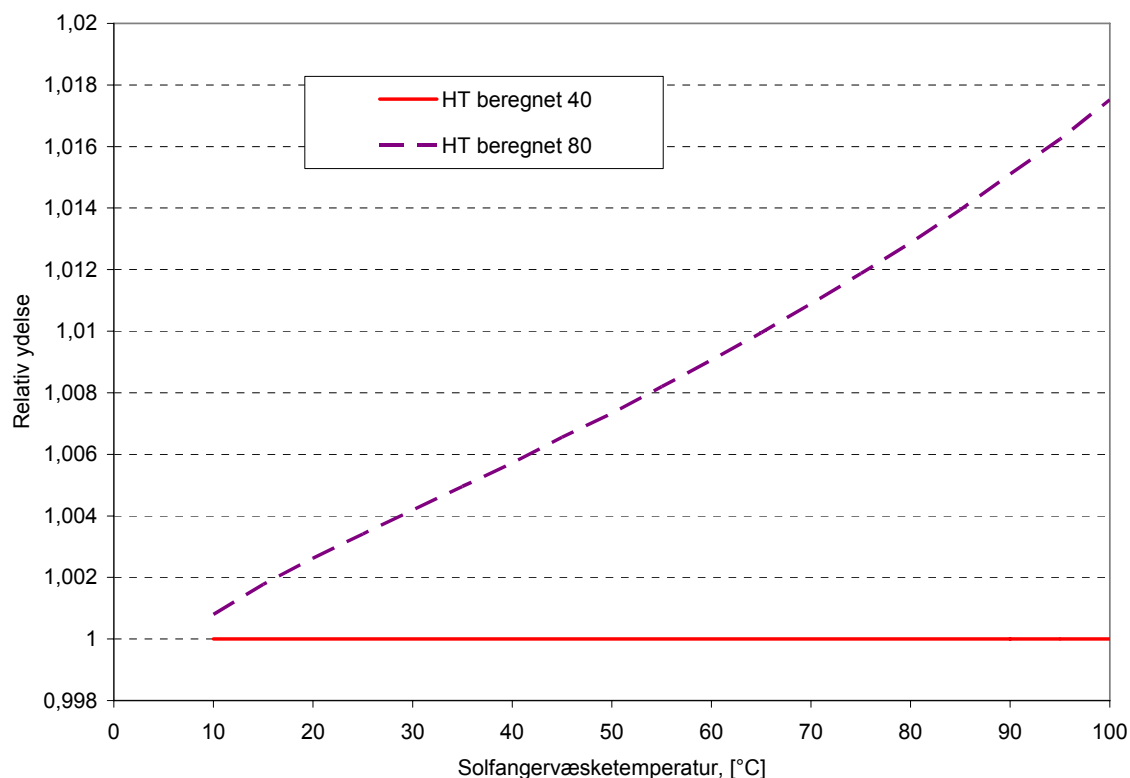
Figur 6 viser den beregnede årlige ydelse for solfangeren med Rockwool 40 og Rockwool 80 som funktion af solfangervæsketemperaturen, som holdes konstant igennem hele året. Solfangerne er sydvendte med en hældning på 40° og vejrdato fra det danske referenceår er benyttet. Figur 7 viser merydelsen ved at benytte Rockwool 80 i stedet for Rockwool 40. Merydelsen er 0,9% ved en solfangervæsketemperatur på 60°C, 1,3% ved en solfangervæsketemperatur på 80°C og 1,8% ved en solfangervæsketemperatur på 100°C.



Figur 5. Teoretisk beregnet effektivitet for HT solfanger med Rockwool 40 og Rockwool 80. Desuden er den i 2005 målte effektivitet vist.



Figur 6. Beregnet årsydelse for HT solfanger med teflonfolie med Rockwool 40 og Rockwool 80.

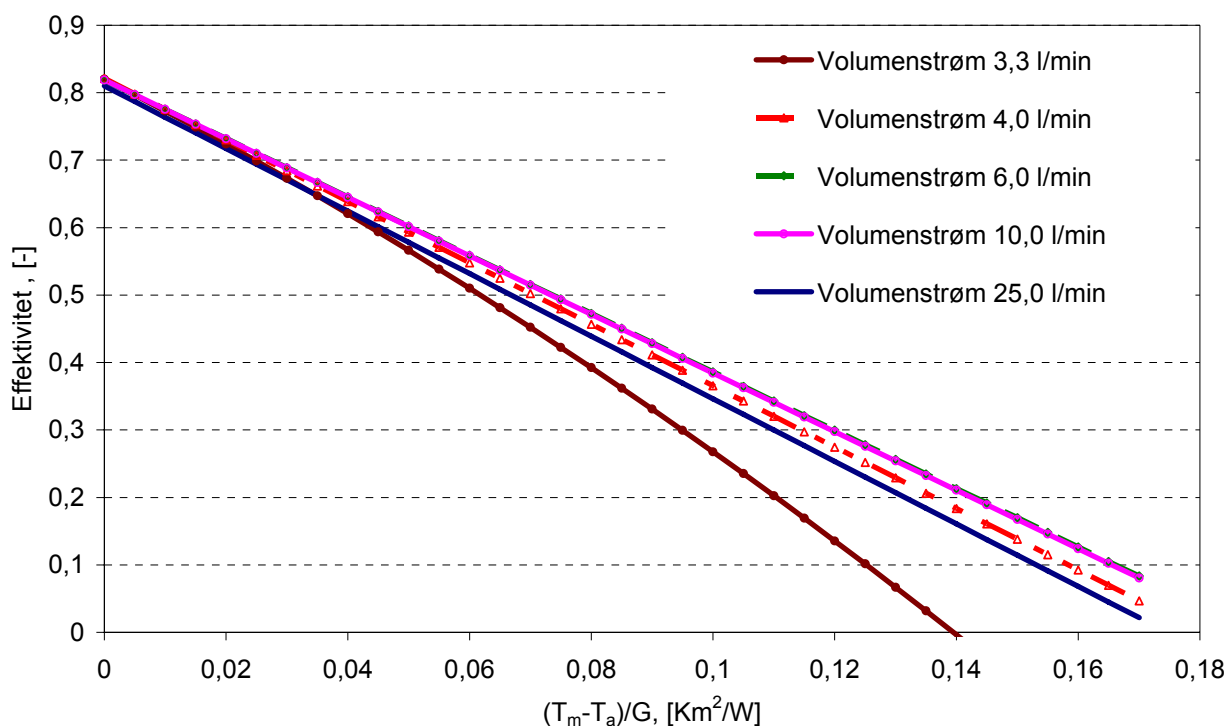


Figur 7. Beregnet ekstra årsydelse ved at benytte Rockwool 80 i stedet for at benytte Rockwool 40.

På basis af beregningerne blev det besluttet at ændre solfangerens varmeisoleringsmateriale fra Rockwool 40 til Rockwool 80 og at forbedre kantisoleringen. Effektiviteten af den forbedrede solfanger blev målt i 2006, se afsnit 4.

3.3 Flow og manifold

Der er gennemført CFD (Computational Fluid Dynamics) beregninger af effektiviteten af HT solfangeren uden teflonfolie for forskellige volumenstrømme mellem 3,3 l/min og 25 l/min for en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske, [5]. Beregningerne, som blandt andet tager flowfordelingen igennem absorberen i beregning, viser at flowfordelingen gennem absorberen er mest jævn for volumenstrømme mellem 6 l/min og 10 l/min. Hvis volumenstrømmen igennem solfangeren er lavere, vil volumenstrømmen igennem de øverste strips blive meget lav. Hvis volumenstrømmen igennem solfangeren er højere, vil volumenstrømmen igennem de nederste strips blive forholdsvis lav. Det bevirker at solfangereffektiviteten er højest for volumenstrømme mellem 6 l/min og 10 l/min, mens effektiviteten falder kraftigt hvis volumenstrømmen reduceres, og en smule når volumenstrømmen forøges, se figur 8.



Figur 8. Beregnede effektiviteter for HT solfangeren uden teflonfolie for forskellige volumenstrømme.

Hvis volumenstrømmen bliver så høj, at strømmingen i de enkelte strips bliver turbulent vil solfangereffektiviteten dog forøges. Dette sker for volumenstrømme højere end 25 l/min. Normalt benyttes volumenstrømme noget højere end 25 l/min i solfangerfelter for solvarmecentraler. Derfor er effektiviteten for solfangere i solfangerfelter normalt lige så høj eller højere end effektiviteten for solfangeren for volumenstrømme mellem 6 l/min og 10 l/min.

Flowfordelingen igennem solfangeren og dermed solfangereffektiviteten for forskellige volumenstrømme afhænger af dimensionerne for striprørene og manifoldrørene. Med tanke på de normalt høje volumenstrømme der benyttes i store solfangerfelter vurderes det at der ikke er behov for at ændre dimensionerne for striprørene og manifoldrørene.

3.4 Hældning

I [2] er der gennemført beregninger af solfangereffektiviteten og årsydelsen af solfangeren for forskellige solfangerhældninger. Beregningerne viste at solfangereffektiviteten forøges lidt når solfangerhældningen forøges. Desuden viste beregningerne at den største årsydelse opnås når solfangerhældningen er placeret i intervallet 40°-45°. For lave driftstemperaturer er den optimale solfangerhældning 40°, for høje driftstemperaturer er den optimale solfangerhældning 45°. Der er i beregningerne ikke taget højde for skygger fra foranstående solfangere. Disse skygger vil reducere de optimale solfangerhældninger en smule.

3.5 Længde af solfangerrækkerne

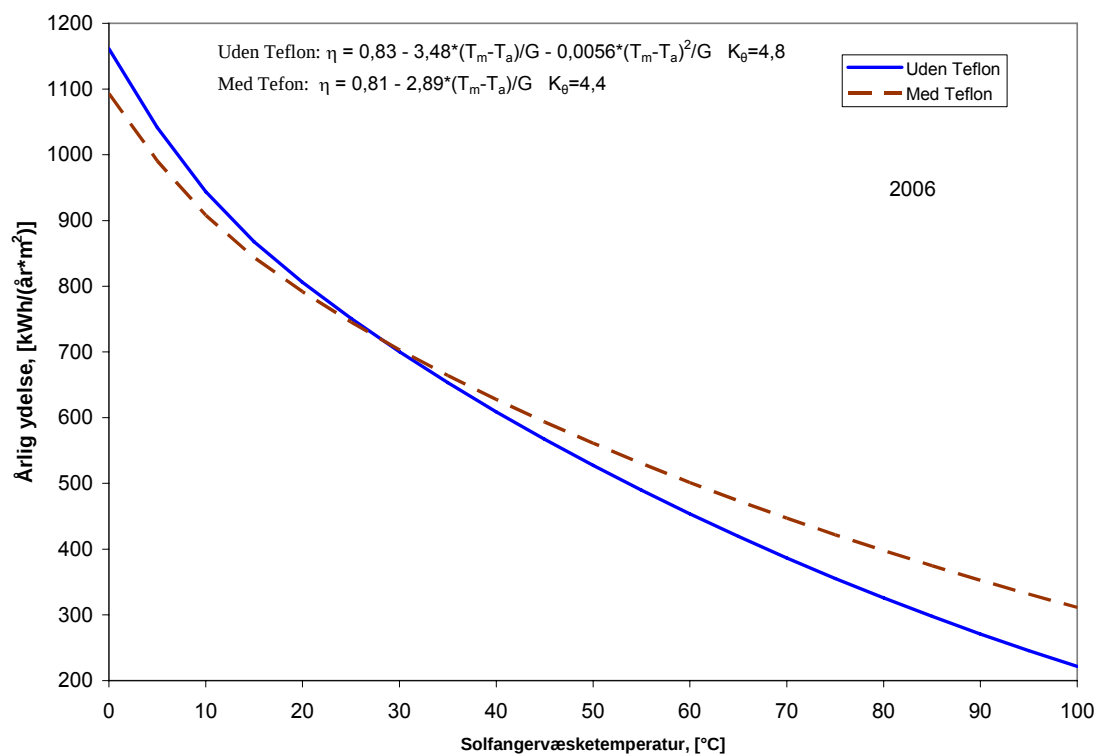
Jo længere solfangerrækkerne er des højere volumenstrøm bør benyttes igennem hver enkelt række. Som nævnt i afsnit 3.3 vil solfangereffektiviteten forøges når volumenstrømmen forøges til mere end 25 l/min. Desuden reduceres solfangerfeltets totale rørlængde ved at benytte lange solfangerrækker, hvorved varmetabet fra rørene reduceres. Ud fra et ydelsesmæssigt synspunkt er det derfor fordelagtigt med lange solfangerrækker. Selvfølgelig skal der tages højde for det forøgede tryktab i solfangerfeltet og det bør sikres at væskehastigheden ikke bliver så høj at der er risiko for turbulenskorrosion i solfangere og rør. Det vurderes at volumenstrømmen ikke bør være højere end 35 l/min, da væskehastigheden ellers bliver så høj i manifoldrørene, at der er risiko for korrosion. Det vurderes at en volumenstrøm på 35 l/min er passende til 14 seriekoblede solfangere.

3.6 Seriekobling af solfangere

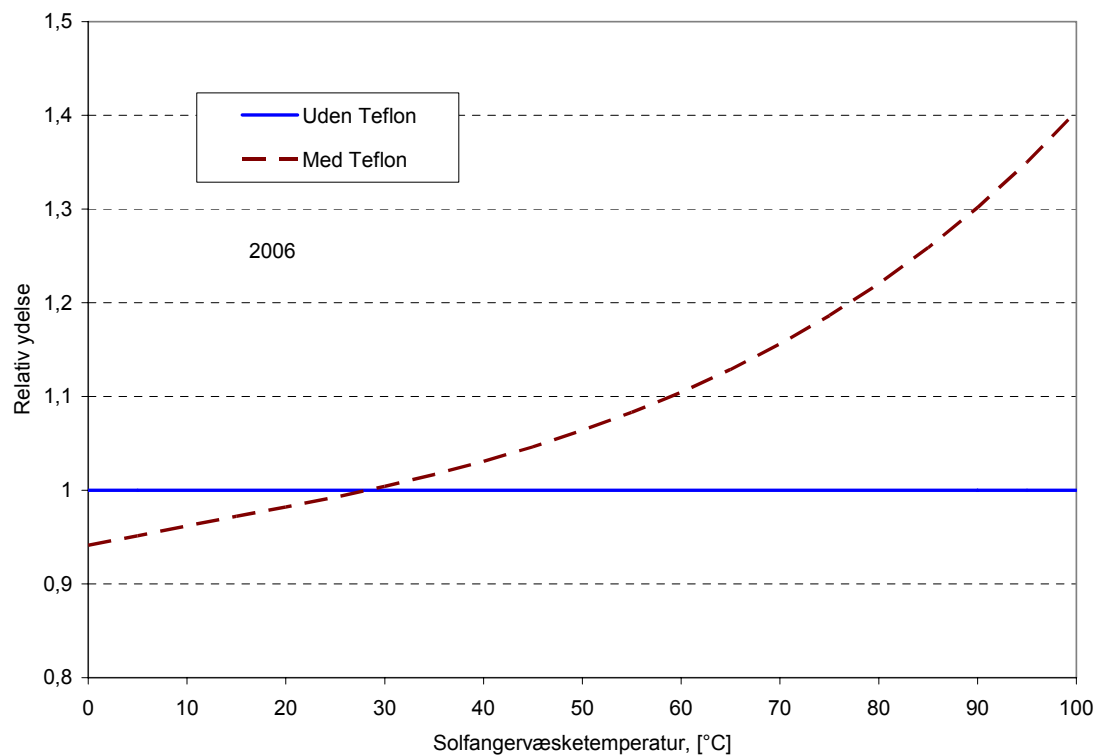
Solfangerrækker kan med fordel opbygges af en række forskellige seriekoblede solfangere. Billige laveffektive solfangere benyttes først i solfangerrækken hvor driftstemperaturen er lav. Dyre højeffektive solfangere benyttes sidst i solfangerrækken hvor driftstemperaturen er høj. Måske kan HT solfangere uden teflonfolie med fordel benyttes som de første par solfangere i en solfangerrække, mens HT solfangere med teflonfolie kan benyttes i resten af rækken? For at vurdere dette er der gennemført beregninger af årsydelsen for den nye HT solfanger med teflonfolie og for HT solfangeren uden teflonfolie. Figur 9 viser de beregnede årlige ydelser pr. m² solfanger for de to solfangere som funktion af solfangervæsketemperaturen, og figur 10 viser den beregnede ekstra årsydelse for den nye HT solfanger med teflonfolie i forhold til HT solfangeren uden teflonfolie som funktion af solfangervæsketemperaturen. Der er regnet med sydvendte solfangere med en solfangerhældning på 40°. Det danske referenceårs vejrdata er benyttet i beregningerne. Det ses, at solfangeren uden teflonfolie yder mere end solfangeren med teflonfolie så længe driftstemperaturen er lavere end ca. 30°C. For højere driftstemperaturer yder solfangeren med teflonfolie mere end solfangeren uden teflonfolie. Selv ved højere driftstemperaturer end 30°C kan det være en fordel at benytte solfangere uden teflonfolie, da disse solfangere er lidt billigere end solfangere med teflonfolie. Figur 10 kan sammen med priser for solfangeren med og uden teflonfolie benyttes til en grov vurdering af ved hvilket temperaturniveau det er fordelagtigt at skifte fra den ene solfanger til den anden.

En nøjagtig bestemmelse af hvor mange solfangere uden teflonfolie der bør benyttes i en solfangerrække for at opnå den økonomisk bedste løsning kræver detaljerede beregninger af ydelsen af hele rækken, idet en lille ydelsesreduktion for de første solfangere i en række delvist kan kompenseres af en forøget ydelse for de solfangere der er placeret sidst i rækken.

På basis af ydelses- og prisvurderinger er det besluttet at anvende solfangere uden teflonfolie som de første 2 solfangere i rækker med 14 solfangere.



Figur 9. Beregnet årsydelse for ny HT solfanger med og uden teflonfolie som funktion af solfangervæsketemperaturen.



Figur 10. Beregnet ekstra årsydelse for ny HT solfanger med teflonfolie i forhold til solfanger uden teflonfolie.

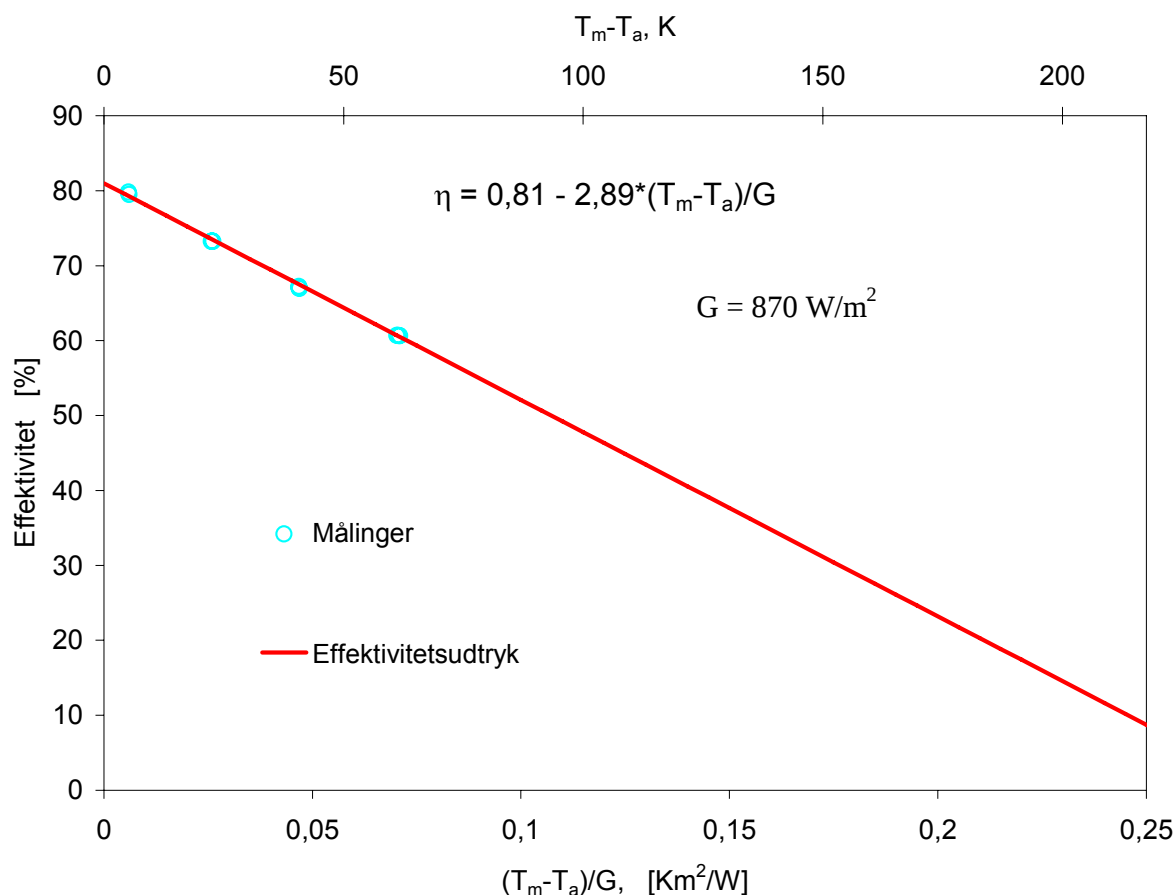
4. Effektivitetsmåling for ny solfanger

På basis af undersøgelserne beskrevet i afsnit 3 blev det som nævnt i afsnit 3.2 besluttet at ændre solfangerens varmeisoleringsmateriale fra Rockwool 40 til Rockwool 80 og at forbedre kantisoleringen. Effektiviteten af den forbedrede solfanger blev målt i BYG.DTU's prøvestand for solfangere. Figur 11 viser et foto af solfangeren i prøvestanden.



Figur 11. Foto af ny HT solfanger.

Solfangeren har en hældning på 40° , og som solfangervæske benyttes en 40% propylenglykol/vand blanding. Solfangerens effektivitet og indfaldsvinkelkorrektionsfaktor blev målt i 2006 som beskrevet i [2] med en volumenstrøm på 25 l/min. Figur 12 viser den målte solfangereffektivitet som funktion af forskellen mellem middelsolfangevæsketemperaturen og udelufttemperaturen ved en solbestrålingsstyrke på 870 W/m^2 og en indfaldsvinkel på 0° .



Figur 12. Målt effektivitet for ny HT solfanger.

Figur 13 viser effektiviteten for den nye HT solfanger og den solfanger som blev afprøvet i 2005 ved en solbestrålingsstyrke på $800 W/m^2$ og en indfaldsvinkel på 0° . Som forventet er varmetabskoefficienten for den nye HT solfanger en smule lavere end varmetabskoefficienten for den gamle solfanger. Forskellen er lille, og kun for høje x-axe værdier er der en lille effektivitetsmæssig fordel ved at benytte den nye solfanger. Figur 14 viser målte indfaldsvinkelkorrektionsfaktorer for solfangeren. Indfaldsvinkelkorrektionsfaktorerne er ens for den nye og den gamle solfanger. Effektivitet og indfaldsvinkelkorrektionsfaktor for den nye HT solfanger blev bestemt til:

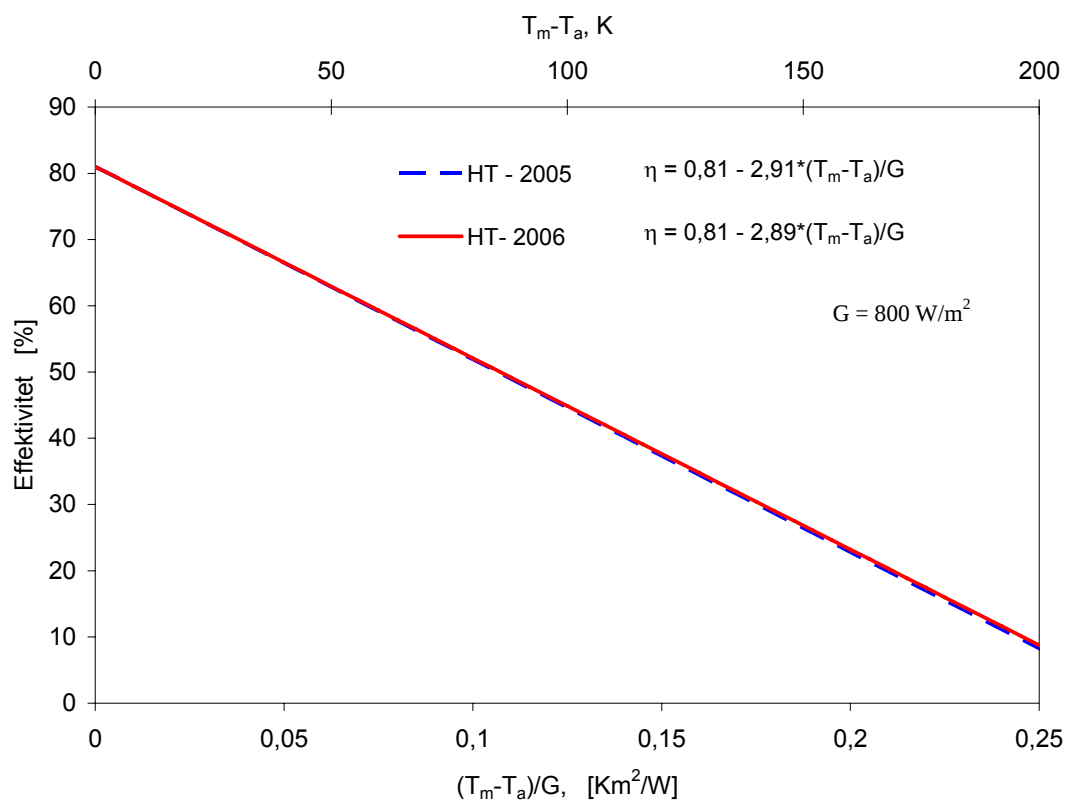
$$\eta = K_\theta * 0,81 - 2,89 * \frac{T_m - T_a}{G}, \text{ hvor}$$

$$K_\theta = 1 - \tan^{4,4}(\theta/2)$$

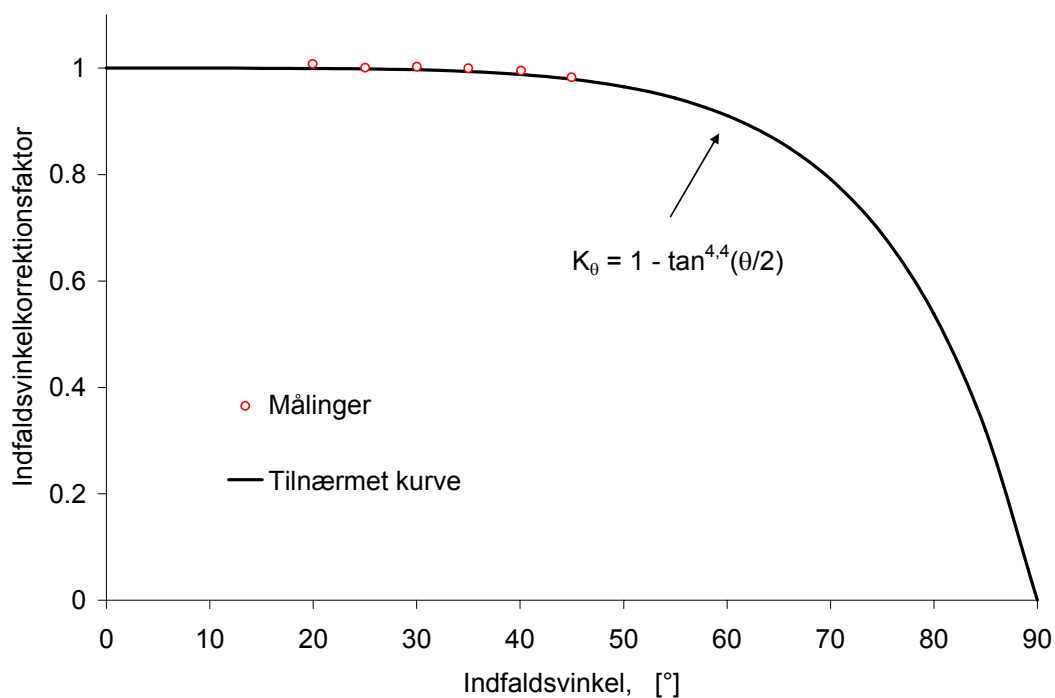
Til sammenligning er effektivitet og indfaldsvinkelkorrektionsfaktor for den gamle solfanger bestemt til::

$$\eta = K_\theta * 0,81 - 2,91 * \frac{T_m - T_a}{G}, \text{ hvor}$$

$$K_\theta = 1 - \tan^{4,4}(\theta/2)$$

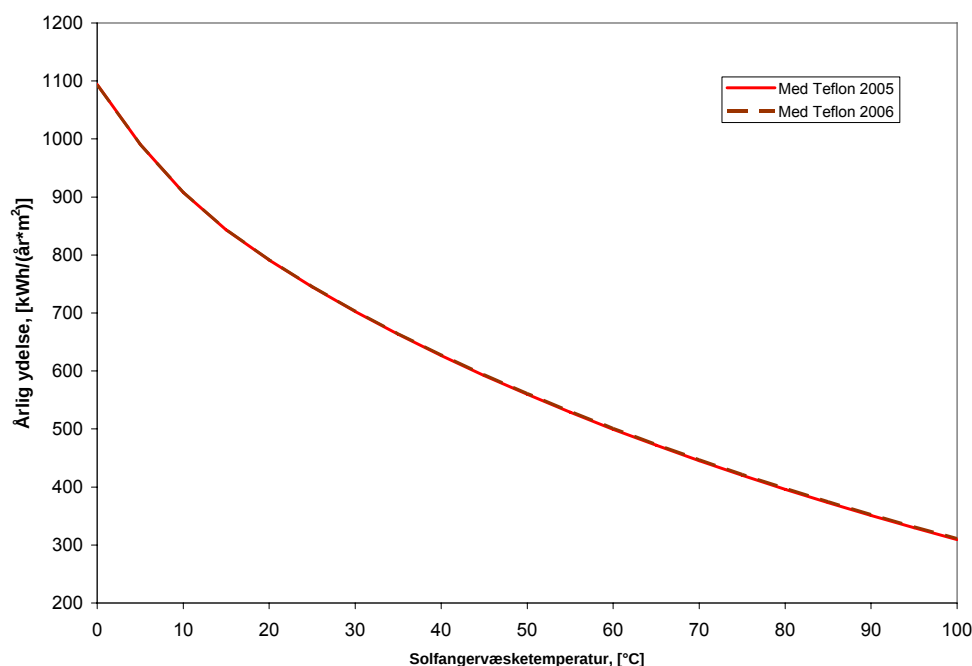


Figur 13. Effektivitet for HT solfanger afprøvet i 2005 og den nye HT solfanger afprøvet i 2006.

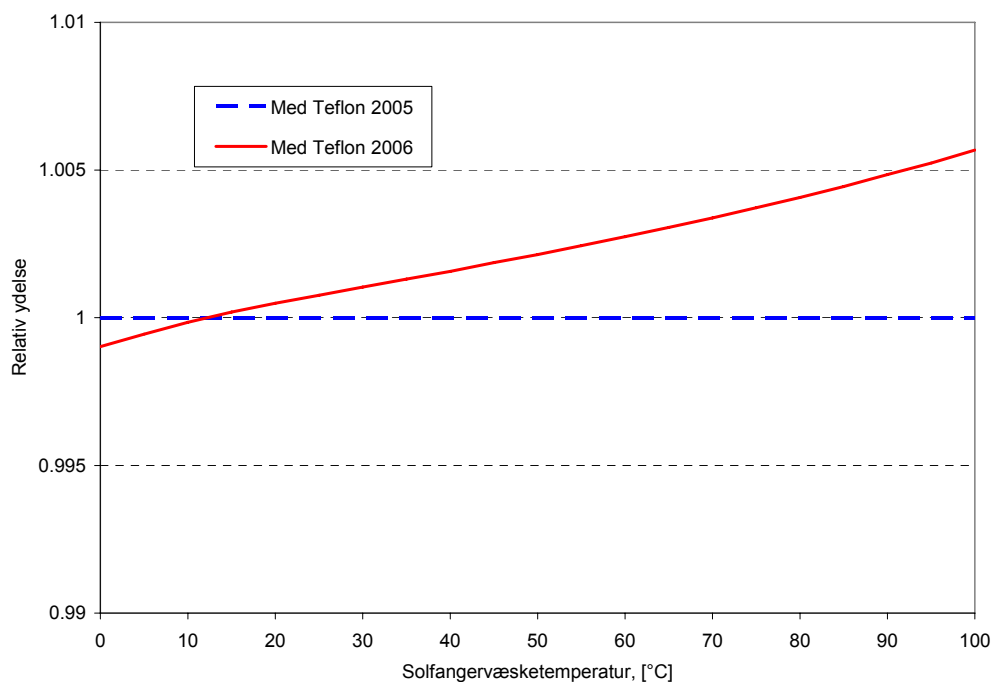


Figur 14. Indfaldsvinkelkorrektionsfaktor for HT solfanger afprøvet i 2006. Samme udtryk som for HT solfanger afprøvet i 2005.

Figur 15 viser beregnede årsydelser for den nye og gamle HT solfanger som funktion af solfangervæsketemperaturen. Solfangerne er sydvendte og hælder 40° fra vandret. Vejrparametre for det danske referenceår er forudsat. Figur 16 viser den beregnede ekstra årsydelse for den nye HT solfanger i forhold til den gamle HT solfanger. Figurerne viser at der kun opnås en beskednen forøgelse af ydelserne med den nye solfanger. Ved en driftstemperatur på 40°C opnås en ydelsesmæssig forøgelse på 0,2%, ved 60°C en forøgelse på 0,3%, ved 80°C en forøgelse på 0,4% og ved 100°C en forøgelse på 0,6%.



Figur 15. Beregnet årsydelse for HT solfanger afprøvet i 2005 og 2006.



Figur 16. Beregnet ekstra årsydelse for HT solfanger afprøvet i 2006 i forhold til HT solfanger afprøvet i 2005.

5 Effektivitet og ydelse med en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske

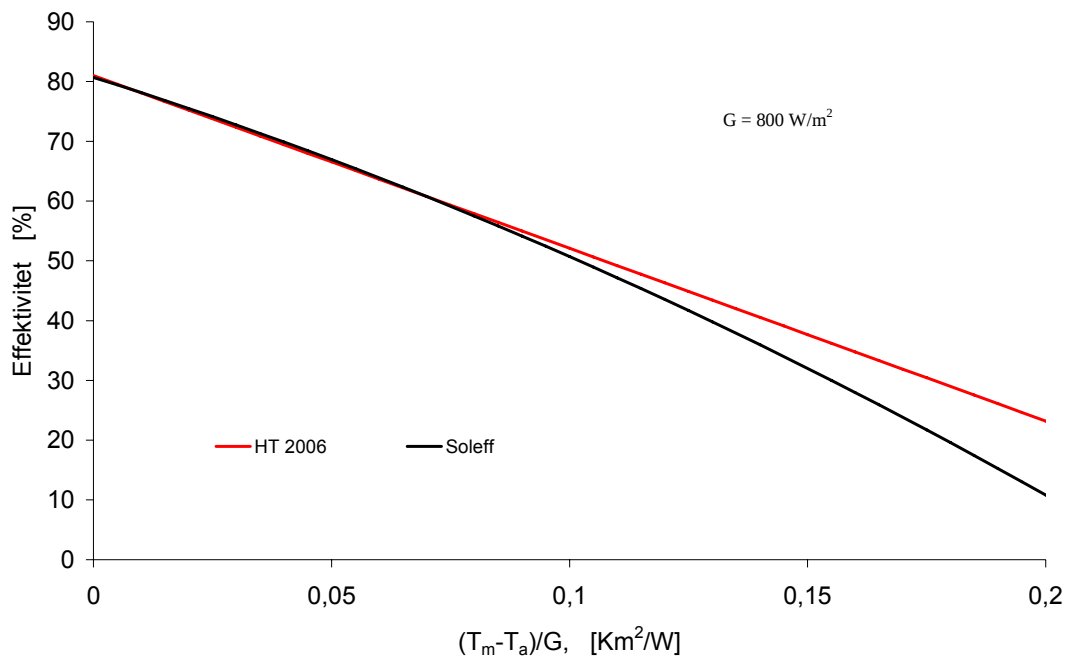
Solfangerkredsen og solfangerne frostbeskyttes af en propylenglykol/vand blanding, som benyttes som solfangervæske. Forskellige propylenglykol/vand blandingers frysepunkter og temperaturer for frostsprængningsrisiko for solfangerkreds/solfanger fremgår af tabel 1.

Solfangervæske	Frysepunkt	Temperatur for frostsprængningsrisiko
40% propyleglykol/vand blanding	-21,1°C	-24°C
35% propyleglykol/vand blanding	-16,5°C	-19°C
30% propyleglykol/vand blanding	-12,7°C	-15°C
25% propyleglykol/vand blanding	-9,6°C	-11°C
20% propyleglykol/vand blanding	-7,2°C	-8°C

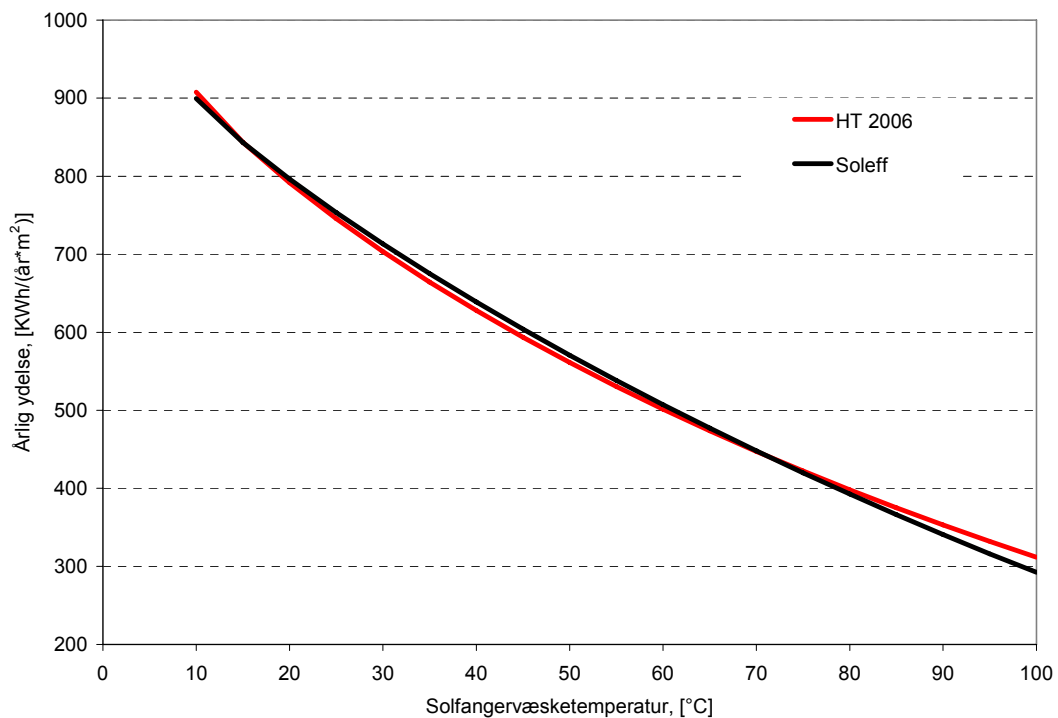
Tabel 1. Frysepunkt og temperatur for frostsprængningsrisiko for en række propylenglykol/vand blandinger, [6].

På basis af tabellen vurderes det at det er muligt at benytte en 30% propylenglykol/vand blanding i stedet for den normalt anvendte 40% propylenglykol/vand blanding.

Der er derfor gennemført teoretiske undersøgelser af hvor meget solfangerens effektivitet og ydelse forøges ved at benytte en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske i stedet for en 40% propylenglykol/vand blanding. Figur 17 viser den målte og den med beregningsprogrammet Soleff [3] beregnede effektivitet for HT solfangeren med en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske for en solbestrålingsstyrke på 800 W/m² og en indfaldsvinkel på 0°. Det ses at den målte og beregnede effektivitet næsten er ens så længe temperaturniveauet ikke er meget højt. Figur 18 viser teoretisk beregnede årsydelser for solfangeren som funktion af solfangervæsketemperaturen når der benyttes en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske. Beregningerne, som er foretaget med beregningsprogrammet udviklet i [4], er gennemført både med det målte og beregnede effektivitetsudtryk. Det forudsættes at solfangeren er sydvendt og at solfangerhældningen er 40° fra vandret. Figur 19 viser den relative ydelse for HT solfangeren med det teoretisk beregnede effektivitetsudtryk, det vil sige forholdet mellem ydelsen af solfangeren med det teoretisk beregnede effektivitetsudtryk og ydelsen af solfangeren med det målte effektivitetsudtryk. Det ses, at i temperaturintervallet fra 40°C til 90°C er der højst 3% forskel mellem årsydelserne for solfangeren med det målte og teoretisk bestemte effektivitetsudtryk.

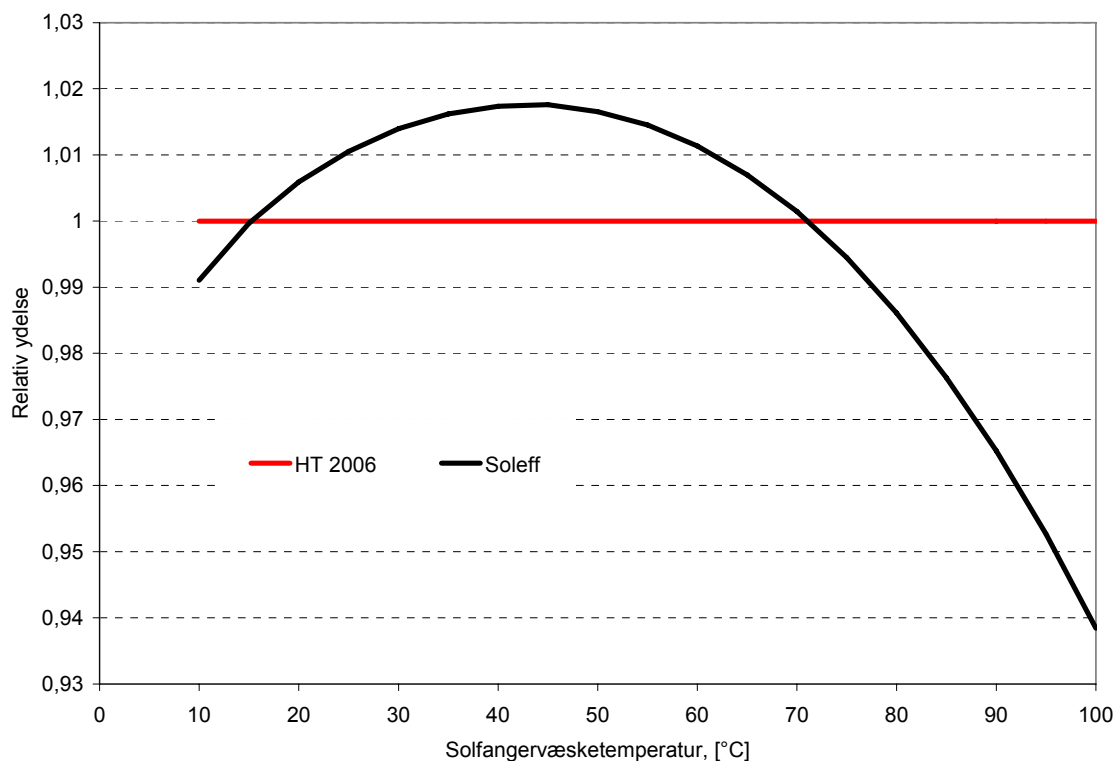


Figur 17. Målt og beregnet solfangereffektivitet med en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske.



Figur 18. Beregnede årsydelser for HT solfangeren med det målte og beregnede effektivitetsudtryk med en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske.

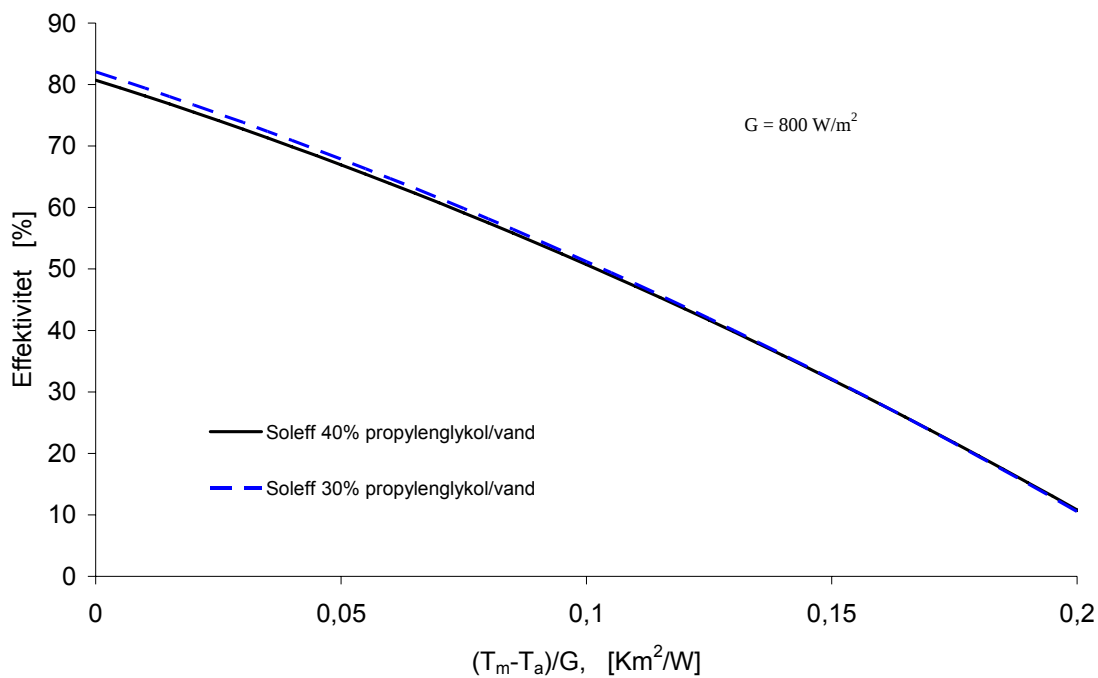
Det vurderes at nøjagtigheden af det teoretisk bestemte effektivitetsudtryk med en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske er god nok til at gennemføre en beregning af effektivitet og ydelse for solfangeren med en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske.



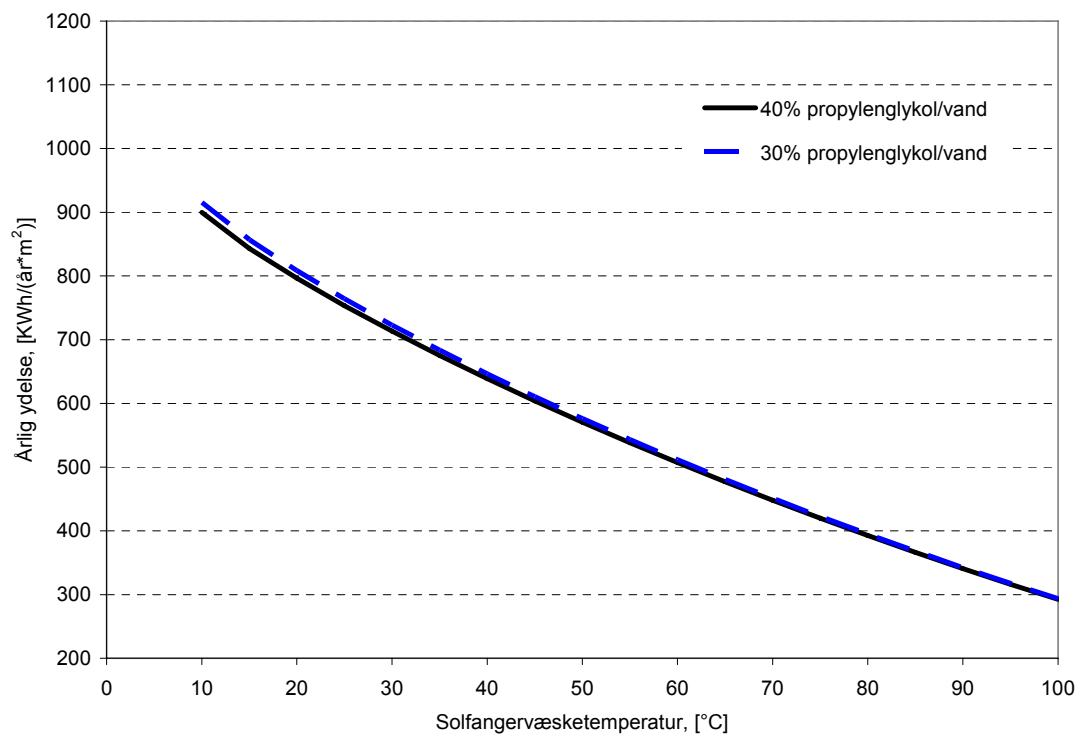
Figur 19. Relativ ydelse for HT solfangeren med en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske.

Figur 20 viser beregnede effektiviteter for HT solfangeren ved en solbestrålingsstyrke på 800 W/m^2 og en indfaldsvinkel på 0° med en 40% propylenglykol/vand blanding og en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske. Det ses, at effektiviteten for lave temperaturer er en smule højere når 30% propylenglykol/vand blandingen benyttes i stedet for 40% propylenglykol/vand blandingen.

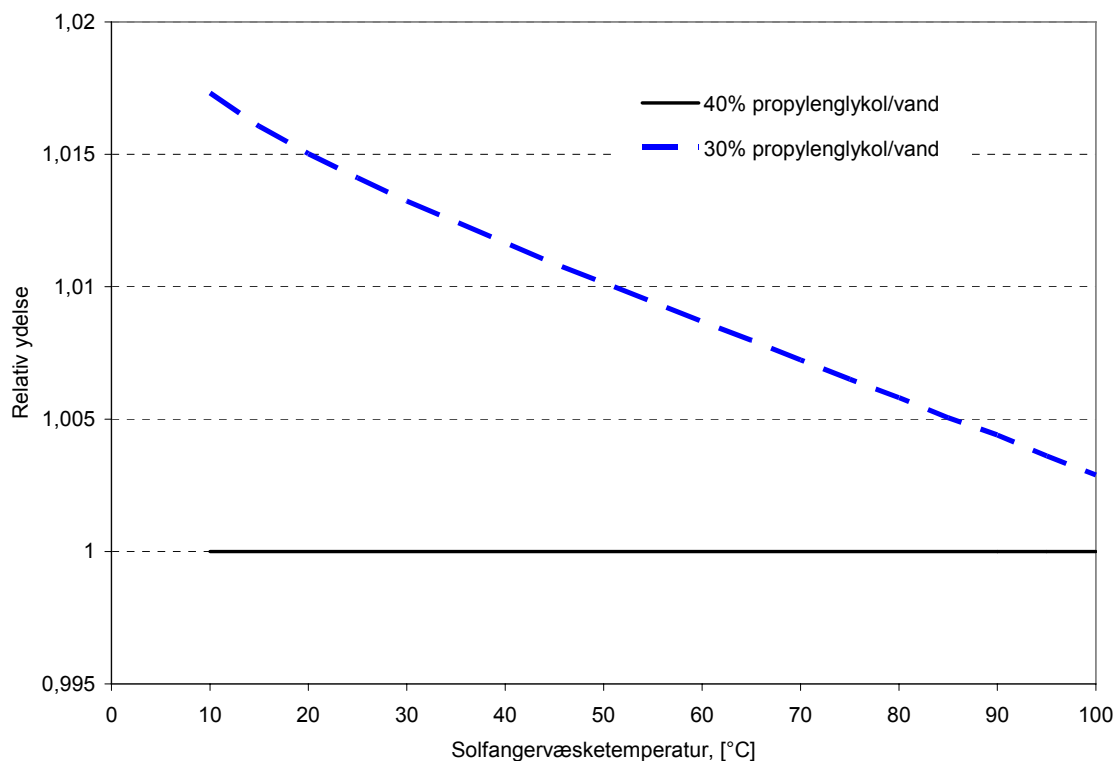
Figure 21 viser beregnede årsydelser for HT solfangeren som funktion af solfangervæsketemperaturen med en 30% propylenglykol/vand blanding og en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske. Solfangeren er sydvendt og solfangerhældningen er 40° fra vandret. Årsydelsen forøges ved at benytte en 30% propylenglykol/vand blanding i stedet for en 40% propylenglykol/vand blanding. Figur 22 viser merydelsen for HT solfangeren når der benyttes en 30% propylenglykol/vand blanding i stedet for en 40% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske. Merydelsen er størst ved lave temperaturer. Forøgelsen er ca. 1,2% ved en solfangervæsketemperatur på 40°C og 0,5% ved en solfangervæsketemperatur på 90°C .



Figur 20. Beregnet effektivitet for HT solfangeren med en 40% propylenglykol/vand blanding og en 30% propylenglykol/vand blanding.



Figur 21. Beregnede årsydelser for HT solfangeren med en 40% propylenglykol/vand blanding og en 30% propylenglykol/vand blanding som solfangervæske.



Figur 22. Beregnet merydelse for HT solfangeren når der benyttes en 30% propylenglykol/vand blanding i stedet for en 40% propylenglykol/vand blanding.

6. Flowfordelings-/kogningsproblemer

Der er gennemført eksperimentelle og teoretiske undersøgelser for at klarlægge under hvilke driftsforhold flowfordelingen gennem absorberen bliver meget ujævn, og hvilke driftsforhold der resulterer i at der optræder kogning i dele af solfangeren, [7]. Undersøgelserne er gennemført for solfangeren uden teflonfolie. Undersøgelserne viste at hvis volumenstrømmen igennem solfangeren er lav og/eller hvis fremløbstemperaturen til solfangeren er høj kan flowfordelingen gennem absorberen blive så ujævn, at der opstår kogning i dele af solfangeren.

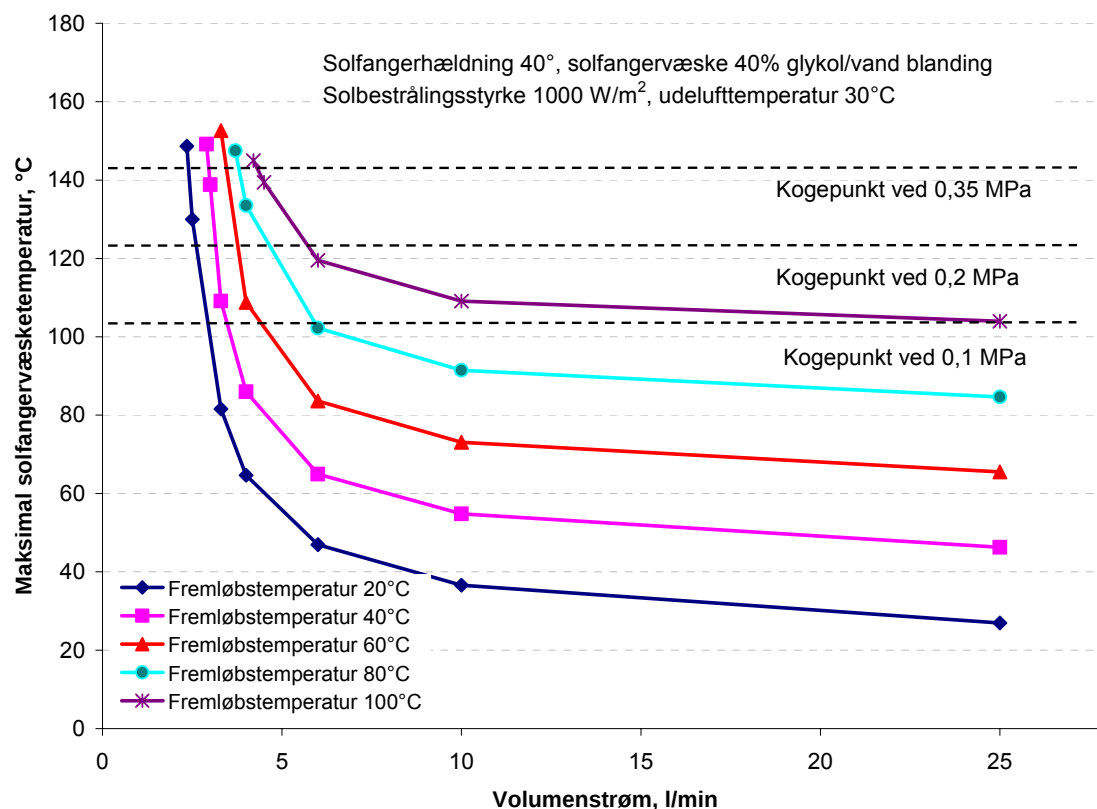
Flowfordelingen kan faktisk blive så ujævn at flowretningen igennem de øverste sunstrips er modsatrettet solfangevæskens hovedstrømningsretning gennem solfangeren og at væskehastigheden i en eller flere sunstrips er meget tæt på 0 m/s. Det vil bevirke at solfangervæsken vil koge i disse sunstrips. Figur 23 viser et foto af solfangeren med teflonfolie i en periode med kogning i næstøverste og sjetteøverste sunstrip. De to sunstrips er på grund af den termiske udvidelse bøjet ud, så de presser mod dæklaget.



Figur 23. Foto af solfanger med teflonfolie med kogning i to sunstrips.

Der kan ved kogning opstå skade på solfangeren og på solfangervæsken, som så senere kan beskadige solfangeren.

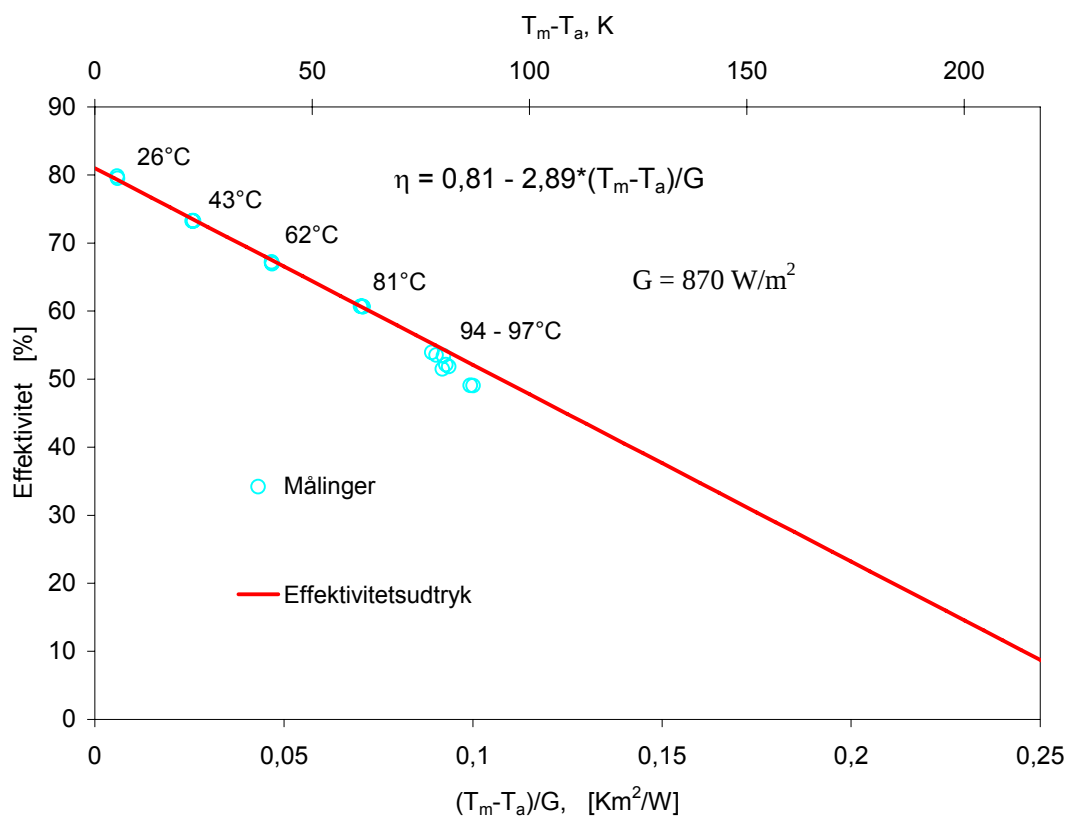
Det er derfor vigtigt at forhindre at der opstår kogning i solfangeren. Ved hjælp af CFD beregninger er det for en varm solskinsperiode med en solbestrålingsstyrke på solfangeren på 1000 W/m^2 og en udelufttemperatur på 30°C beregnet hvor høj den maksimale solfangervæsketemperatur bliver i solfangeren uden teflonfolie for forskellige volumenstrømme og fremløbstemperaturer til solfangeren. De maksimale temperaturer fremgår af figur 24. Det ses at der kan opstå kritisk høje temperaturer hvis volumenstrømmen er lavere end 5 l/min . Det ses også at jo højere fremløbstemperaturen er des højere bliver den maksimale solfangervæsketemperatur.



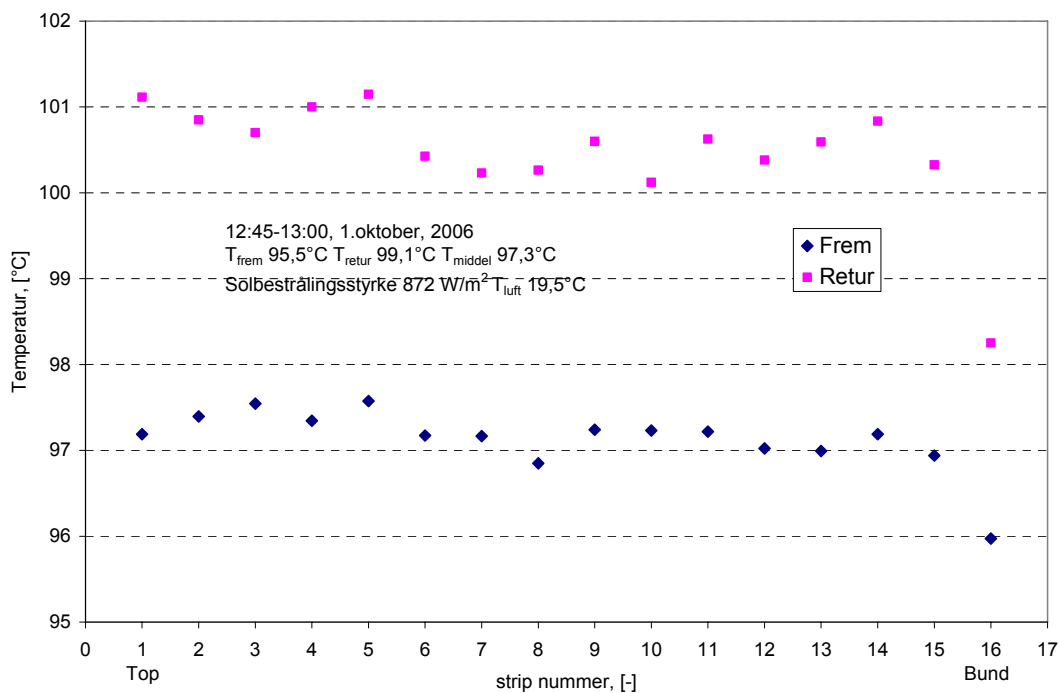
Figur 24. Beregnede maksimale solfangervæsketemperaturer i solfangeren uden teflonfolie for forskellige volumenstrømme og fremløbstemperaturer.

Solfangeren med teflonfolie vil opnå højere temperaturer end solfangeren uden teflonfolie. For at undersøge om der opstår flowfordelings-/kogningsproblemer for solfangeren med teflonfolie for en volumenstrøm på 25 l/min for høje fremløbstemperaturer blev der gennemført ekstra målinger af effektiviteten samtidig med at temperaturerne på bagsiden af absorberen registres. Figur 25 viser de ekstra målepunkter for effektiviteten med middelsolfangervæsketemperaturer mellem 94°C og 97°C. Det ses at de ekstra målepunkter ligger en smule lavere end effektivitetskurven bestemt ved hjælp af målinger ved lavere solfangervæsketemperaturer. Figur 26 viser de målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 sunstrips tæt på de to manifoldrør. Fremløbstemperaturen er 95,5°C og returtemperaturen er 99,1°C. På basis af disse temperaturer vurderes det at flowfordelingen igennem absorberen er forholdsvis jævn og at der ikke er kogningsproblemer, selv om middelsolfangervæsketemperaturen er 97,3°C.

På basis af undersøgelserne vurderes det at der ikke opstår flowfordelings-/kogningsproblemer for solfangeren med teflonfolie når blot volumenstrømmen er højere end 6 l/min og fremløbstemperaturen ikke er højere end 90°C.



Figur 25. Ekstra målte effektiviteter for HT solfangeren med teflonfolie afprøvet i 2006 ved høje middelsolfangervæsketemperaturer.

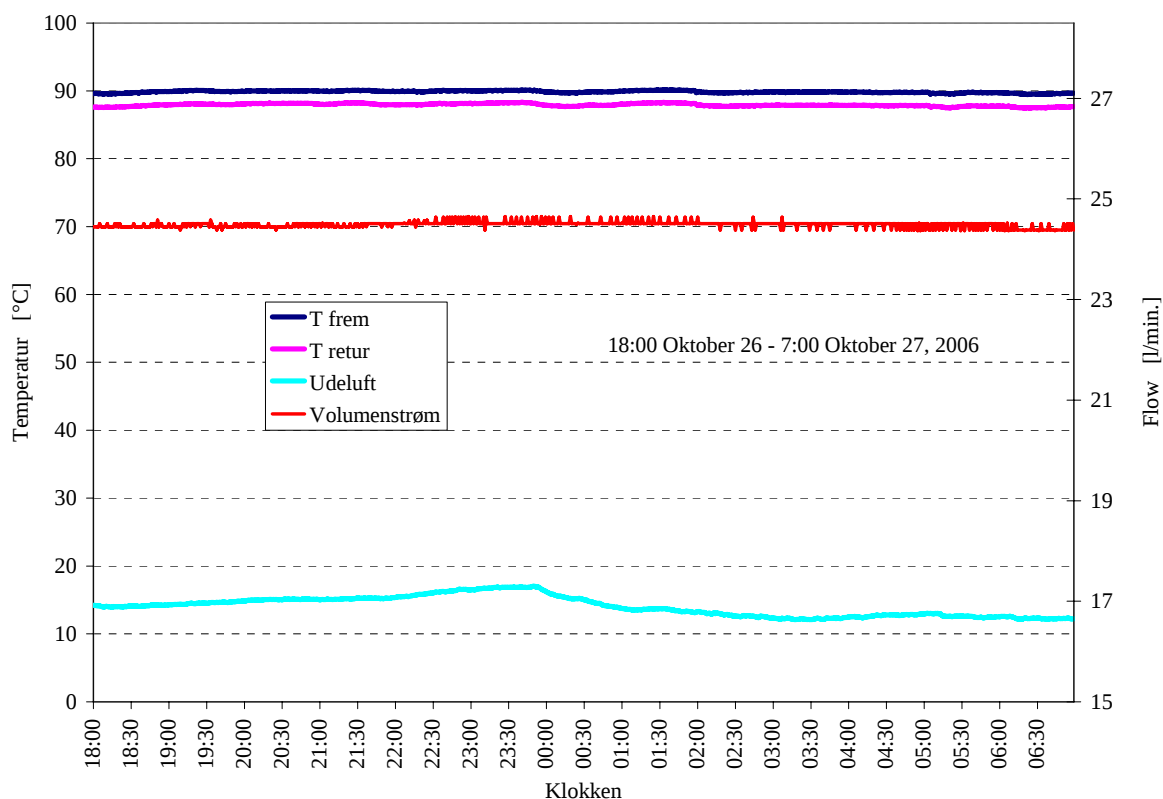


Figur 26. Målte temperaturer på bagsiden af absorberen ved en fremløbstemperatur på 95,5°C, en solbestrålingsstyrke på 872 W/m² og en udelufttemperatur på 19,5°C.

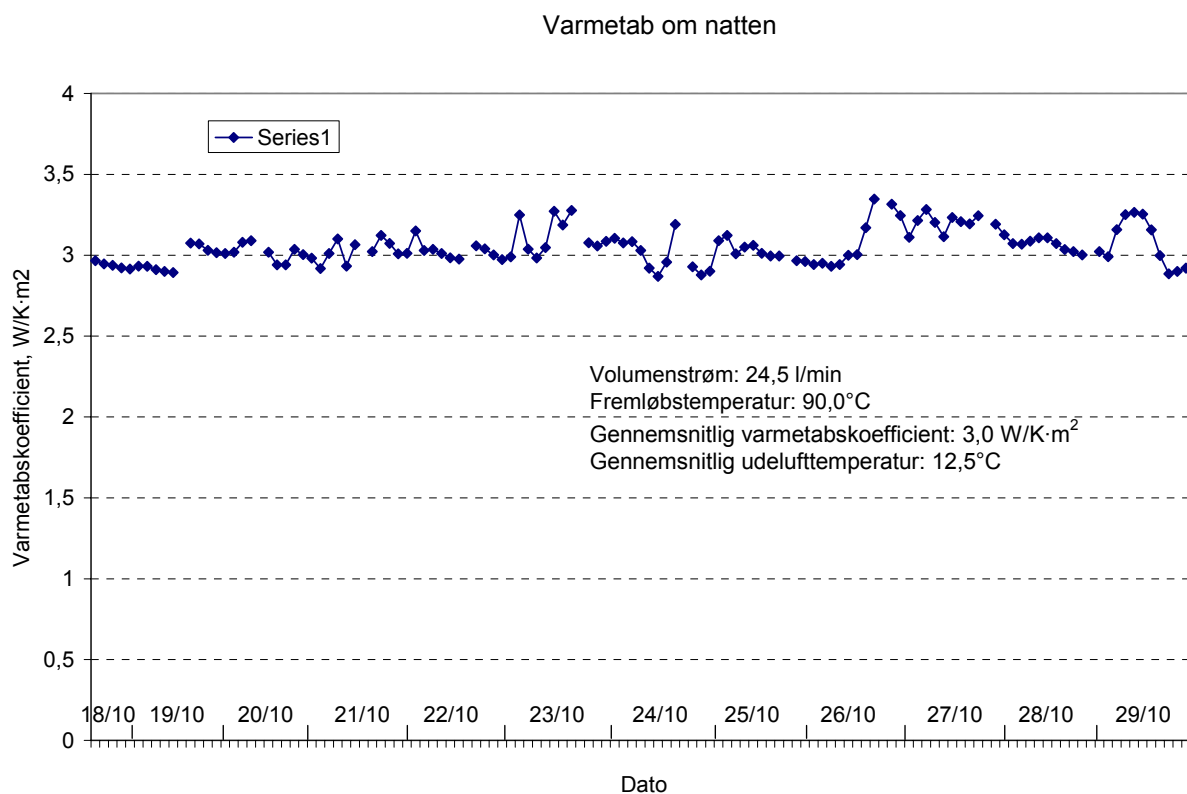
7. Varmetabsmålinger

Der er gennemført målinger af varmetabet for den ny HT solfanger med teflonfolie om natten således at kølekapaciteten for solfangerfeltet kan bestemmes. Solfangervæsken, som er en 40% propylenglykol/vand blanding, cirkuleres gennem solfangeren med en konstant fremløbstemperatur og en konstant volumenstrøm. Figur 27 viser den målte fremløbstemperatur, returtemperatur, udelufttemperatur og volumenstrømmen gennem solfangeren natten mellem den 26. og 27. oktober 2006. Baseret på målingerne beregnes solfangerens varmetabskoefficient. Der er også her regnet med det transparente areal for solfangeren på 12,53 m². Figur 28 viser de målte varmetabskoefficienter om natten for perioden 18.-29. oktober 2006. I hele perioden er der benyttet en volumenstrøm på 24,5 l/min og en fremløbstemperatur på 90,0°C. Det ses at varmetabskoefficienten varierer igennem måleperioden. De højeste varmetabskoefficienter forekommer i nætter med regn og blæst, mens varmetabskoefficienten er mindst i nætter med overskyet og vindstille vejr. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient i hele måleperioden er 3,0 W/Km².

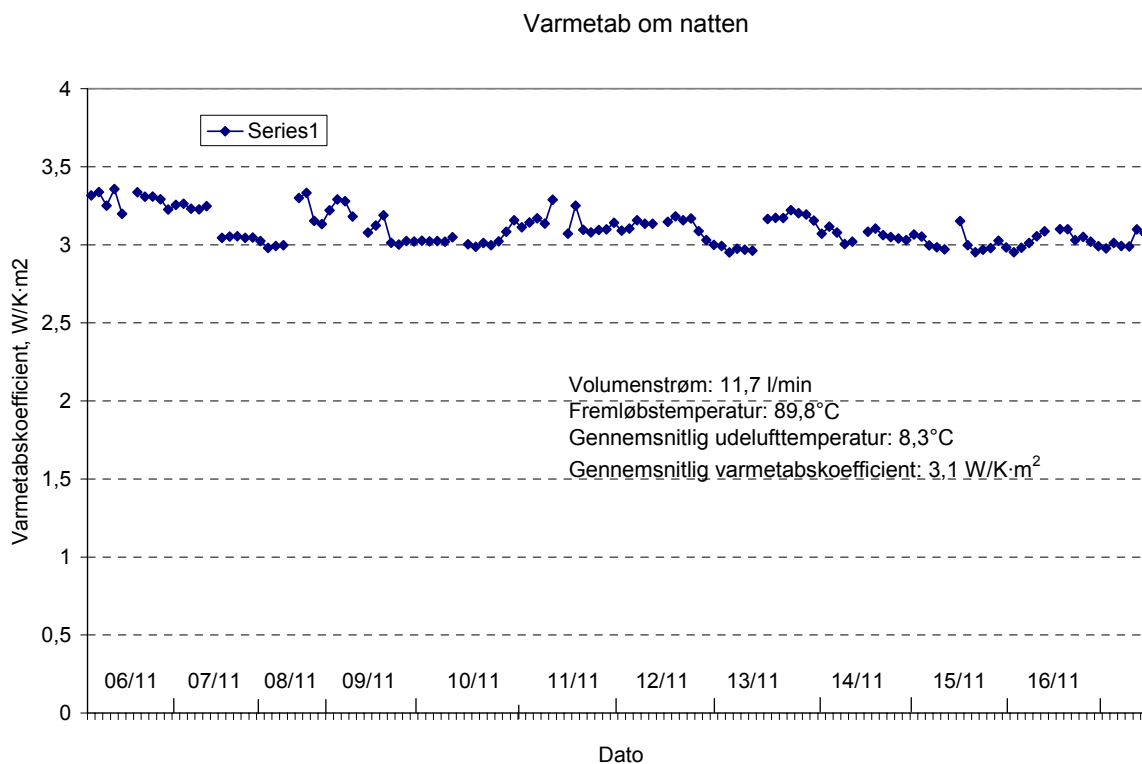
Figur 29 viser tilsvarende målte varmetabskoefficienter for en volumenstrøm på 11,7 l/min og en fremløbstemperatur på 89,8°C. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient er for måleperioden 3,1 W/Km². Figur 30 viser tilsvarende målte varmetabskoefficienter for en volumenstrøm på 5,1 l/min og en fremløbstemperatur på 91,0°C. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient er for måleperioden 3,1 W/Km².



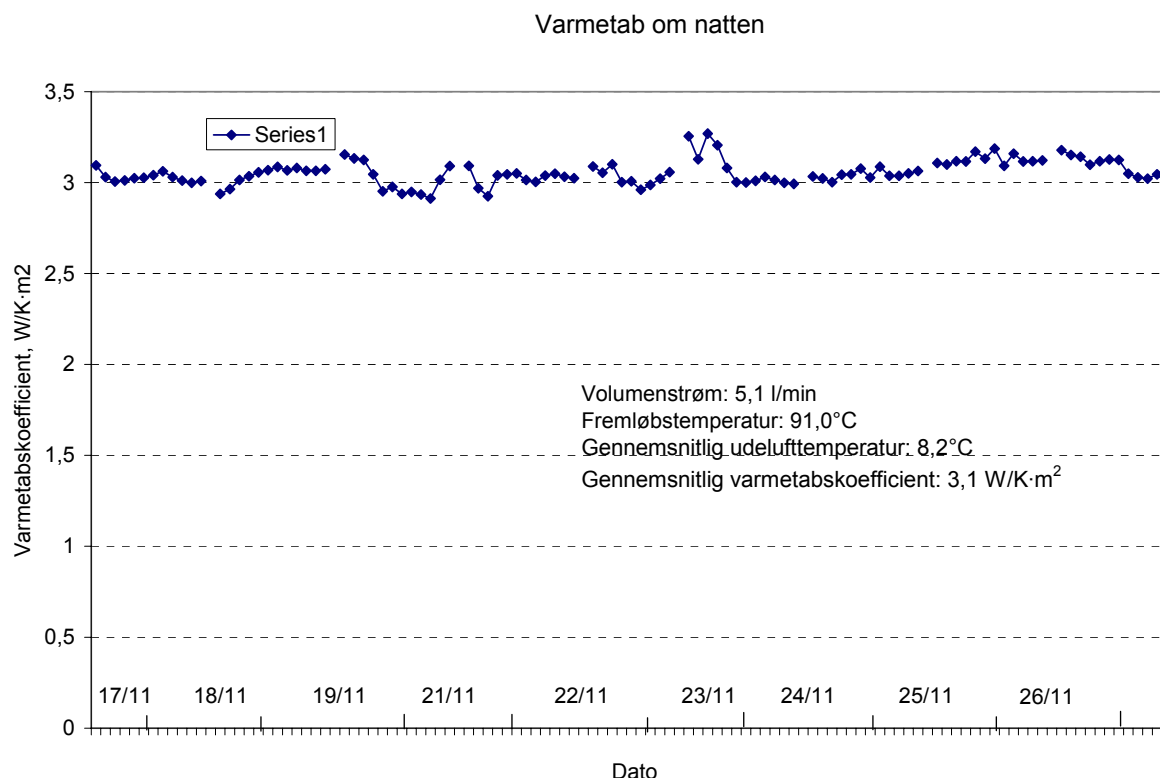
Figur 27. Målte temperaturer og flow under køleforsøg om natten med HT solfangeren den 26.-27. oktober 2006.



Figur 28. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 24,5 l/min og en fremløbstemperatur på 90,0°C.



Figur 29. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 11,7 l/min og en fremløbstemperatur på 89,8°C.



Figur 30. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 5,1 l/min og en fremløbstemperatur på 91,0°C.

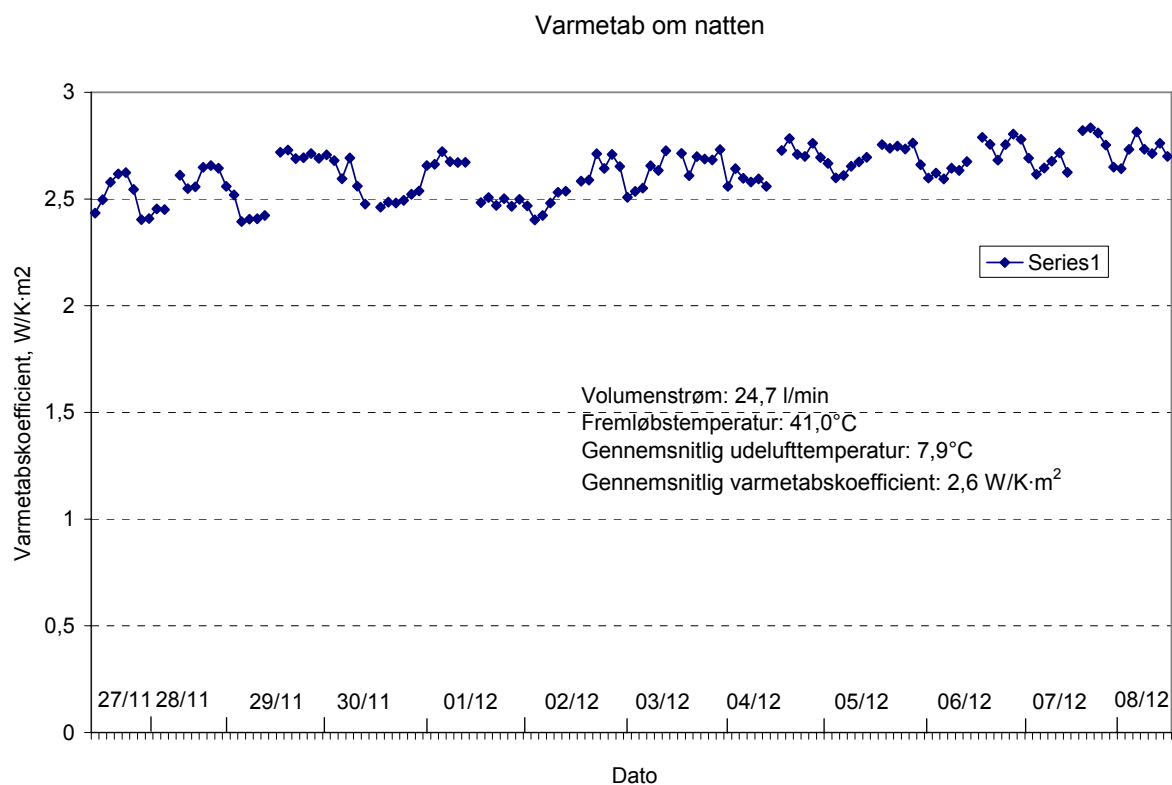
Varmetabsforsøgene blev desuden gennemført ved et lavere temperaturniveau, således at solfangerens varmetabskoefficient om natten kan bestemmes med god nøjagtighed, når blot volumenstrømmen gennem solfangeren og driftstemperaturen kendes.

Figur 31 viser målte varmetabskoefficienter for en volumenstrøm på 24,7 l/min og en fremløbstemperatur på 41,0°C. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient er for måleperioden 2,6 W/Km².

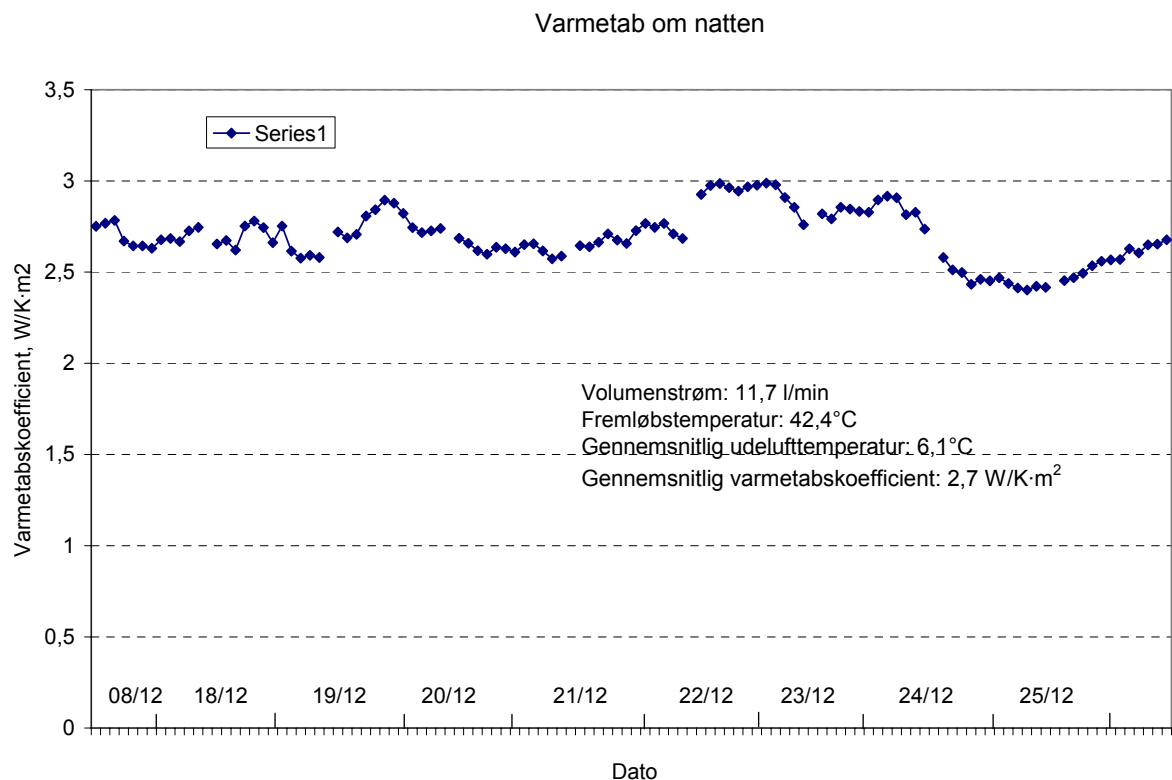
Figur 32 viser tilsvarende målte varmetabskoefficienter for en volumenstrøm på 11,7 l/min og en fremløbstemperatur på 42,4°C. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient er for måleperioden 2,7 W/Km².

Figur 33 viser tilsvarende målte varmetabskoefficienter for en volumenstrøm på 4,9 l/min og en fremløbstemperatur på 42,1°C. Den gennemsnitlige varmetabskoefficient er for måleperioden 2,8 W/Km².

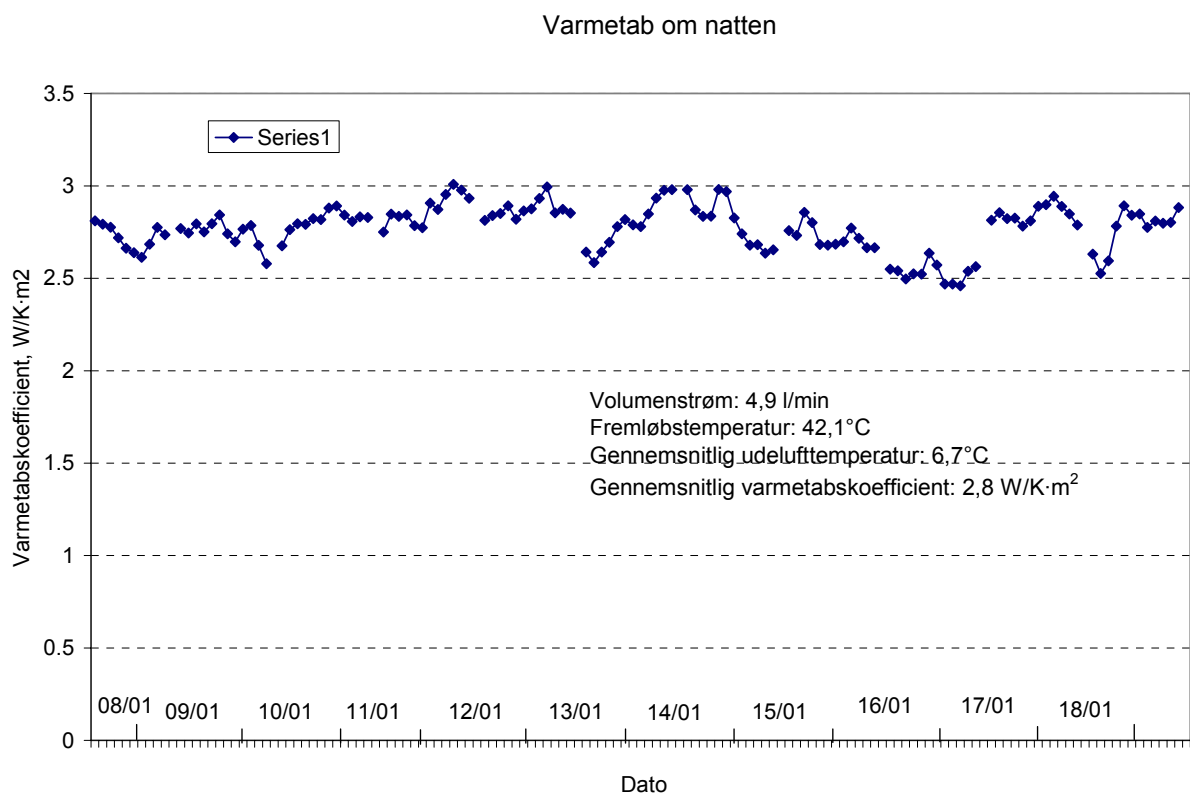
Varmetabsmålingerne er sammenfattet i figur 34, der viser varmetabskoefficienten for solfangeren om natten for forskellige volumenstrømme og middelsolfangervæsketemperaturer. Det ses, at varmetabskoefficienten først og fremmest afhænger af temperaturniveauet. Jo højere temperaturen er des højere er varmetabskoefficienten.



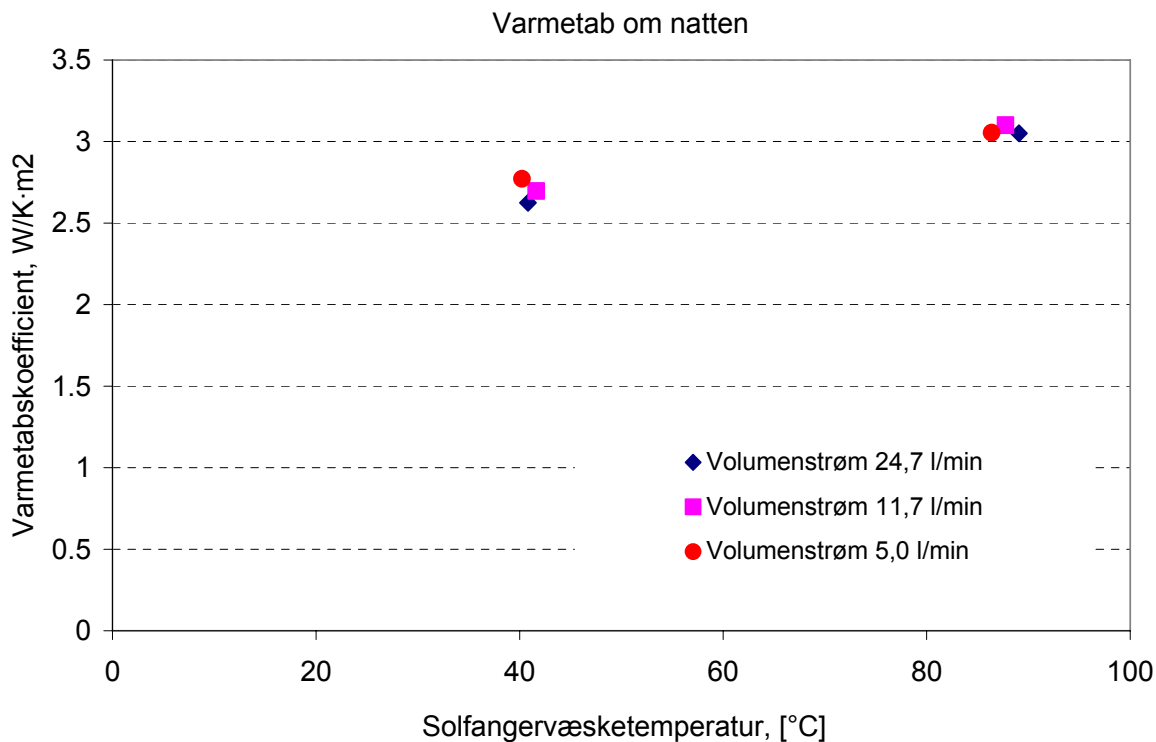
Figur 31. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 24,7 l/min og en fremløbstemperatur på 41,0°C.



Figur 32. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 11,7 l/min og en fremløbstemperatur på 42,4°C.



Figur 33. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten med en volumenstrøm på 4,9 l/min og en fremløbstemperatur på 42,1°C.

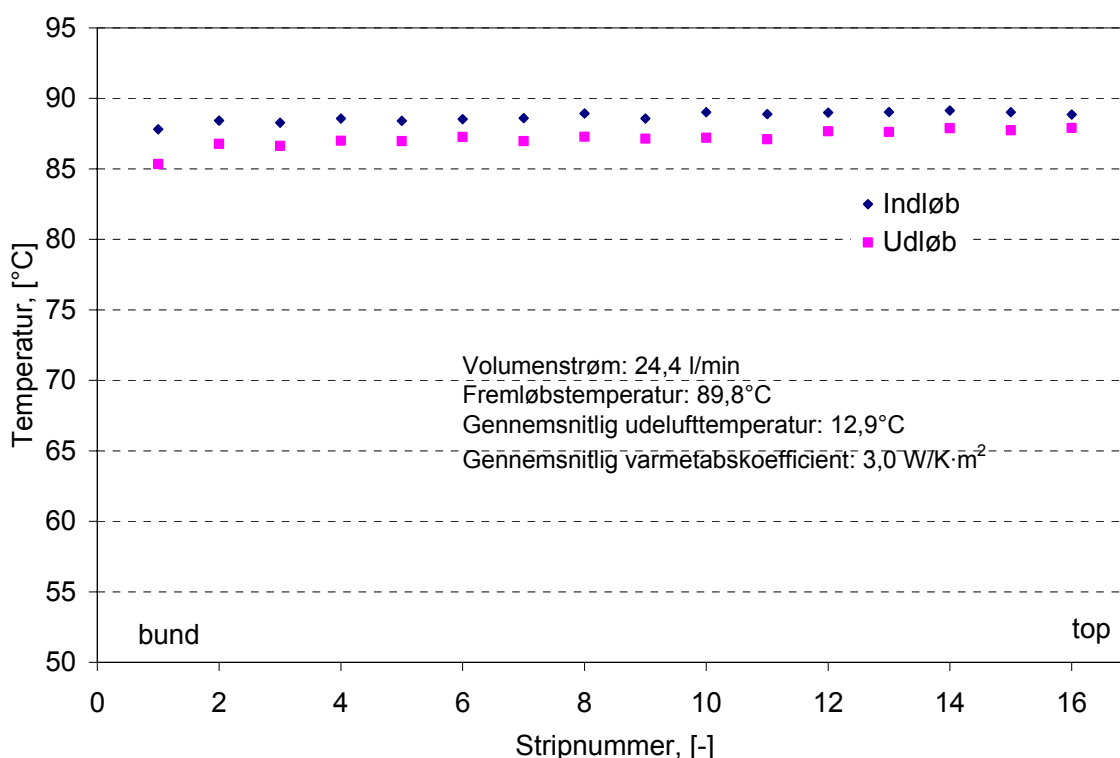


Figur 34. Målte varmetabskoefficienter for HT solfangeren om natten for forskellige volumenstrømme og middelsolfangervæsketemperaturer.

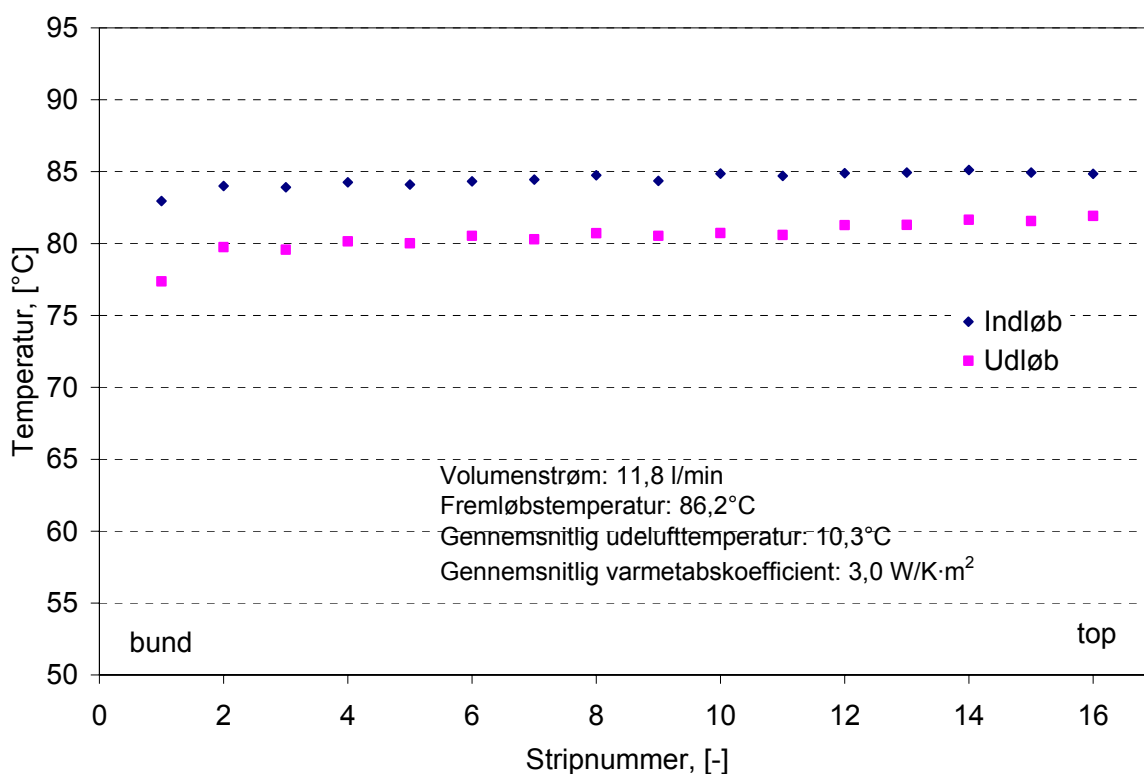
Flowfordelingen gennem absorberen er undersøgt ved hjælp af temperaturmålinger for bagsiden af absorberen for varmetabsforsøgene med høje driftstemperaturer. Figur 35 viser målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved de to manifolddrør. Volumenstrømmen gennem absorberen er 24,4 l/min og fremløbstemperaturen er 89,8°C. Der er ikke store temperaturvariationer fra solfangerens top til solfangerens bund. Det vurderes derfor at flowfordelingen gennem solfangeren om natten er forholdsvis jævn når volumenstrømmen er 24,4 l/min.

Figur 36 viser målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved de to manifolddrør når volumenstrømmen gennem absorberen er 11,8 l/min og fremløbstemperaturen er 86,2°C. Kun temperaturerne i den nederste strip er noget lavere end temperaturerne i de øvrige strips. Det vurderes derfor at flowfordelingen gennem solfangeren om natten også er forholdsvis jævn når volumenstrømmen er 11,8 l/min.

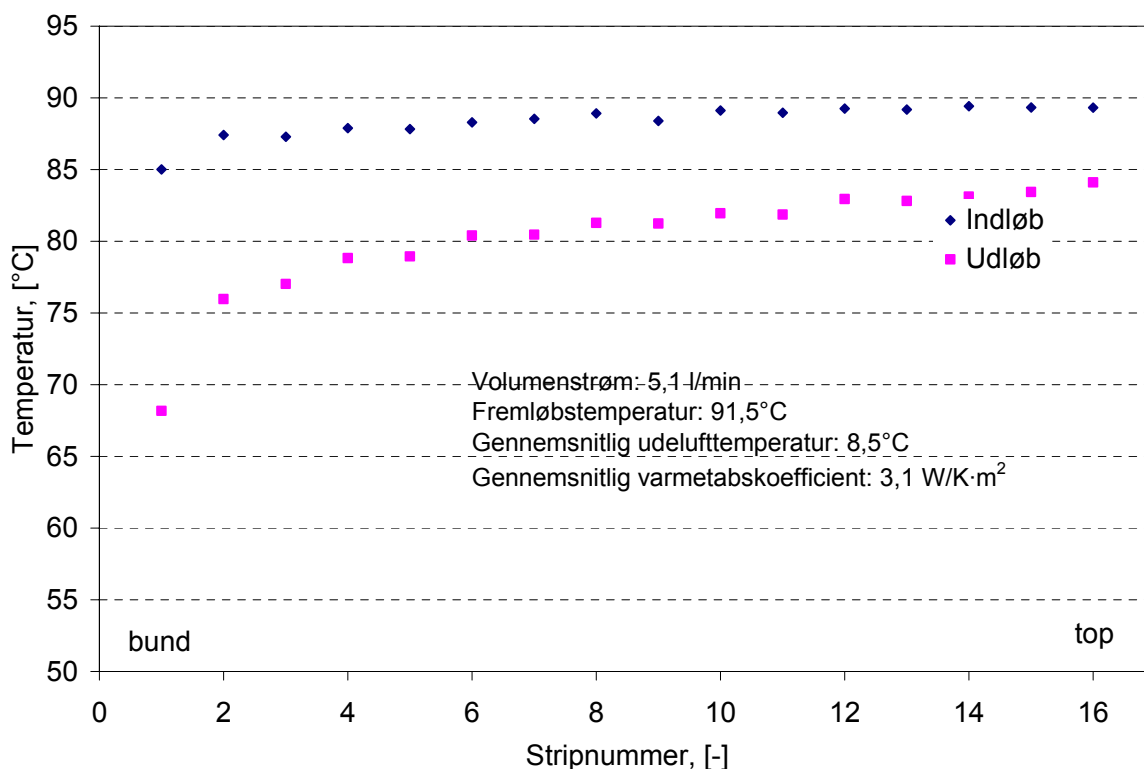
Figur 37 viser målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved de to manifolddrør når volumenstrømmen gennem absorberen er 5,1 l/min og fremløbstemperaturen er 91,5°C. Temperaturerne er lavere i bunden af solfangeren end i den øverste del af solfangeren. Det vurderes derfor at flowfordelingen er ujævn med små flow igennem de nederste sunstrips og høje flow gennem de øverste sunstrips. Forklaringen er at tryktabet igennem de nederste strips er større end tryktabet gennem de øverste strips og at de naturlige kræfter om natten på grund af temperaturforskellen mellem de to manifolddrør vil forhindre et højt flow gennem de nederste strips.



Figur 35. Målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved indløb og udløb om natten med en volumenstrøm på 24,4 l/min og en fremløbstemperatur på 89,8°C.



Figur 36. Målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved indløb og udløb om natten med en volumenstrøm på 11,8 l/min og en fremløbstemperatur på 86,2°C.



Figur 37. Målte temperaturer på bagsiden af absorberens 16 strips tæt ved indløb og udløb om natten med en volumenstrøm på 5,1 l/min og en fremløbstemperatur på 91,5°C.

8. Konklusion

HT solfangeren er undersøgt teoretisk og eksperimentelt med hensyn til effektivitet, ydelse, flowfordelingsproblemer og kogningsproblemer.

På basis af de teoretiske undersøgelser og prisvurderinger blev en ny solfanger med forbedret isolering opbygget og afprøvet. Effektivitet og indfaldsvinkelkorrektionsfaktor for den nye HT solfanger er bestemt til:

$$\eta = K_{\theta} * 0,81 - 2,89 * \frac{T_m - T_a}{G}, \text{ hvor}$$

$$K_{\theta} = 1 - \tan^{4,4}(\theta / 2)$$

Effektiviteten og ydelsen for den nye solfanger er en smule bedre end effektivitet og ydelse for den gamle solfanger, specielt for høje driftstemperaturer.

På basis af undersøgelserne vurderes det at der ikke opstår flowfordelings-/kogningsproblemer for den nye HT solfanger når blot volumenstrømmen er højere end 6 l/min og fremløbstemperaturen ikke er højere end 90°C.

Solfangerens varmetabskoefficient om natten er bestemt til ca. 2,7 W/Km² ved et temperaturniveau på 40°C og ca. 3,1 W/Km² ved et temperaturniveau på 90°C.

Referencer

- [1] "Undersøgelse af HT solfangere med og uden teflonfolie". J. Fan, J. M. Schultz, S. Furbo. Rapport SR-04-12. 2004. BYG.DTU, DTU.
- [2] "Effektivitet og flowfordeling for HT solfangere". J. Fan, S. Furbo. Rapport SR-05-11. 2005. BYG.DTU, DTU.
- [3] "SolEff Program til beregning af solfangeres effektivitet. Brugervejledning og generel programdokumentation". P. B. Rasmussen, S. Svendsen. 1996. Laboratoriet for Varmeisolering, DTU.
- [4] "Solfangerydelser i solvarmecentraler ved forskellige temperaturniveauer". K.L. Jensen, T. Nielsen, K.R. Andersen. Fagpakkeprojekt. 2001. BYG.DTU, DTU.
- [5] "The effect of volume flow rate on the efficiency of a solar collector". J. Fan, S. Furbo. EuroSun 2006 Congress Proceedings, Glasgow, Scotland. 2006.
- [6] Information fra Tyforop Chemie GmbH, Hamborg, Tyskland
- [7] "Buoyancy effects on thermal behaviour of a flat plate solar collector". J. Fan, S. Furbo. Artikel fremsendt til Solar Energy Engineering, 2007.