



Dansk-Schweizisk samarbejde vedrørende effektiviteten af solfangere med små volumenstrømme

Duer, Karsten

Publication date:
1994

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Duer, K. (1994). *Dansk-Schweizisk samarbejde vedrørende effektiviteten af solfangere med små volumenstrømme*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DANSK-SCHWEIZISK
SAMARBEJDE VEDRØRENDE
EFFEKTIVITETEN AF SOLFANGERE
MED SMÅ VOLUMENSTRØMME

KARSTEN DUER

OKTOBER 1994

MEDDELELSE NR. 268

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Universitet

FORORD

Nærværende rapport beskriver et arbejde, som er gennemført under Energiministeriets Forsknings Program, projektets navn: "Dansk/Schweizisk samarbejde vedrørende effektiviteten af solfangere med små volumenstrømme". Journal nr. 165-0001, tilsagn nr. 6500/91-9901.

Projektet er blevet udarbejdet på Laboratoriet for Varmeisolering, DTU med deltagelse af følgende personer:

Professor Svend Svendsen (Projektleder)
Civilingeniør Karsten Duer (Projektansvarlig)
Civilingeniør Anne Mette Espersen
Civilingeniør Christine Weibøl
Maskinarbejder Poul Dedenroth

RESUME

Målinger gennemført bl.a. på Laboratoriet for Varmeisolering (LfV) har vist, at solvarmeanlæg med små volumenstrømme (low-flow) har en højere ydelse end solvarmeanlæg med traditionelt flow. Ydelsen af selve solfangeren som komponent under low-flow drift har hidtil ikke været tilstrækkelig undersøgt og rent beregningsmæssigt har man endnu ikke rådet over metoder til at forudsige ydelsen for en low-flow solfanger under drift udendørs.

Formålet med projektet har været at foretage en undersøgelse af ydelsen for typiske solfangere under low-flow drift med henblik på at udvikle en metode til at beskrive langtidsydelsen for low-flow solfangere under realistisk drift.

Projektet er til dels gennemført som et samarbejdsprojekt mellem Interkantonalet Teknikum i Rapperswill, Schweiz og LfV.

Der blev i projektet foretaget en række karakteriseringsmålinger for to forskellige serieproducerede solfangere (Solfanger I og II) ved såvel standard som low-flow. De fleste målinger skete i LfV's indendørs solsimulator, men der blev også foretaget effektivitetsmålinger ved standard og low-flow i en udendørs prøvestand i Schweiz på to solfangere magen til Solfanger I og II.

Undersøgelserne har været rettet mod solfangeren som komponent og på basis af undersøgelserne er opstillet en enkel metode til at beskrive solfangerydelsen ved low-flow drift og under realistiske driftforhold i øvrigt: Det foreslås, at flowets indflydelse på ydelsen beskrives vha. en "korrektionsfaktor for flow" K_M defineret som forholdet mellem solfangereffektiviteten ved hhv. low-flow og standard flow fundet for ens betingelser mht. solbestråling, lufttemperatur og middelvæsketemperatur: $K_M = \eta_{lowflow}/\eta_{standard}$.

På baggrund af de gennemførte karakteriseringsmålinger i Danmark og Schweiz opnåedes følgende resultater:

- Der blev fundet meget fin overensstemmelse mellem standard effektivitetsmålingerne foretaget indendørs i Danmark og udendørs i Schweiz
- Solfangernes ydelse som funktion af solfangerhældning, vindhastighed over dæklaget, indfaldsvinkel, diffus andel af solbestrålingen samt masseflow blev karakteriseret og der blev opstillet korrektionsfaktorer for hver af disse parametre
- Ved low-flow målingerne blev det som ventet konstateret, at solfangerydelsen kun

- max. 6% ved en flowreduktion til under 10% af standard flowet på 0,02 kg/sm²
- Solfangernes varmetab var stort set uafhængigt af flowet, dog lå varmetabet ved low-flow en smule over varmetabet ved standard flow (max. 3%).

For at kontrollere den fundne korrektionsfaktor for flow K_M under realistiske drift- og vejrforhold blev der på LfV foretaget udendørs ydelsesmålinger på den ene solfanger. Målingerne blev udført under stærkt varierende solbestrålingsstyrke og ved såvel standard som low-flow. På basis af de gennemførte målinger af vejr- og driftforhold blev der foretaget beregninger af den forventede solfangerydelse ved både standard og low-flow. Beregningerne blev udført vha. et numerisk beregningsprogram udviklet på LfV. For såvel standard som low-flow var der pæn overensstemmelse mellem målt og beregnet solfangerydelse og der blev for begge flow fundet en middel afvigelse mellem målt og beregnet ydelse på ca 4%. Den beregnede ydelse i tilfældet med low-flow under hensyntagen til K_M beskrev altså solfangerydelsen med samme nøjagtighed som i tilfældet med standard flow.

På denne baggrund konkluderes det, at solfangerydelsen som funktion af flowet med tilstrækkelig nøjagtighed kan karakteriseres ved en korrektionsfaktor for flow K_M , og at denne kan findes ved nogle få indendørs effektivitetsmålinger ved varierende flow i en solsimulator.

SUMMARY

Measurements carried out at the Thermal Insulation Laboratory (TIL) have shown that low-flow solar heating systems for domestic hot water systems have a better thermal performance than similar solar heating systems with traditional flow rate. The thermal performance of the low-flow solar collector itself has so far not been sufficiently investigated and no method for calculating the long term performance of a low-flow solar collector in operation has yet been given.

The purpose of this project has been to investigate the thermal performance of typical solar collectors in low-flow operation in order to develop a method for predicting the long term performance of low-flow solar collectors in realistic operation.

The project has partly been carried out in cooperation with Interkantonales Technikum in Rapperswill, Switzerland.

A number of tests have been carried out on two mass produced solar collectors in standard as well as low-flow operation. Most of the tests have been performed in the indoor solar simulator at TIL, but efficiency tests at standard and low-flow have also been carried out in an outdoor test facility in Switzerland.

A simple and easy to use method to characterize the collector performance at different flow rates has been described: It is proposed to present the influence of the flow rate on the collector performance by means of a "correction factor for flow", K_M , defined as the ratio between the collector efficiency at low-flow and standard flow operation respectively, $K_M = \eta_{\text{low}} / \eta_{\text{standard}}$. η_{low} and η_{standard} have to be found under the same conditions regarding solar irradiance and temperatures.

From the tests carried out in Denmark and in Switzerland the following results have been derived:

- There was found very good agreement between the results of the standard efficiency tests carried out indoor in Denmark and outdoor in Switzerland
- The collector performance as a function of the collector tilt, windspeed, incidence angle, diffuse fraction of the total solar irradiance and flow rate was found and correction factors for each of these parameters were found
- From the low-flow tests it was found (as expected) that the flow rate has only small influence on the collector performance - there was found maximum 6%

reduction in performance by a reduction of the flow rate to less than 10% of the standard flow rate (0.02 kg/sm²)

- The heat loss from the collectors was found to be almost independent of the flow rate - the heat loss at low-flow was found to be maximum 3% bigger than the heat loss at standard flow operation.

In order to verify the proposed correction factor for flow K_M , outdoor performance tests on one of the two collectors were carried out at TIL. The tests were made under rapidly changing solar irradiance and at standard as well as low-flow operation. On the basis of the measurements (weather and operating conditions) calculations of the collector performance were made by means of a numerical computerprogram developed at TIL.

For standard as well as low-flow a good agreement between measured and calculated performance was found and for both flow rates the mean difference between measured and calculated performance was about 4%. In other words the calculated performance in the low-flow case using K_M gave a description of the collector performance just as precise as in the standard flow case.

On this background it is concluded that the collector performance as a function of the flow rate can be found by means of a correction factor for flow K_M and that K_M can be found from a few indoor tests carried out at different flow rates in a solar simulator.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	1
RESUMÉ	2
SUMMARY	4
1. INDLEDNING	1
2. PRØVNINGSBESKRIVELSE	2
1.1 Solsimulatoren	3
1.2 Målenøjagtighed for de indendørs målinger	3
1.3 Udendørs prøvestand i Rapperswill, Schweiz	3
3. BESKRIVELSE AF DE PRØVEDE SOLFANGERE	5
4. RESULTATER AF KARAKTERISERINGSPRØVNINGER	6
4.1 Standard effektivitetsudtryk	6
4.1.1 Schweiziske resultater	8
4.2 Korrektion for varmetab ved forskellige solfangerhældninger	9
4.3 Korrektion for varmetab ved forskellige vindhastigheder over dæklaget	11
4.4 Korrektion for effektivitet ved forskellige indfaldsvinkler	14
4.4.1 Baggrund for korrektionen	15
4.4.2 Indfaldsvinkelforsøg med Solfanger I	17
4.4.3 Indfaldsvinkelforsøg med Solfanger II	18
4.5 Korrektion for diffus stråling og indfaldsvinkel	19
4.6 Korrektion for low-flow	20
4.6.1 Baggrund for korrektionen	20
4.6.2 Low-flow forsøg med Solfanger I	23
4.6.2.1 Kontrolforsøg med low-flow	23
4.6.2.2 Schweiziske low-flow målinger for Solfanger I	25
4.6.3 Low-flow forsøg med Solfanger II	25
4.6.3.1 Schweiziske low-flow målinger for Solfanger II	27

5.	DANSKE MÅLINGER FORETAGET UDENDØRS	29
5.1	Udendørs målesystem	29
5.2	Resultat af udendørs målinger	29
6.	BEREGNINGSPROGRAM	31
6.1	Beskrivelse af AKTIVSOL	31
6.1.1	Beregninger for standard flow	31
6.1.2	Beregninger for low-flow	32
7.	MÅLT OG BEREGNET YDELSE FOR SOLFANGER	33
	NR. I VED UDENDØRS DRIFT	
7.1	Generelt om sammenligningen	33
7.1.1	Sammenligning for standard flow	33
7.1.2	Sammenligning for low-flow	34
7.2	Diskussion af sammenligninger mellem målt og	35
	beregnet solfangerydelse	
8.	KONKLUSION	36
	SYMBOLLISTE	38
	REFERENCER	40
	BILAG A: Usikkerhedsberegning for effektivitetsmålinger i solsimulator	
	BILAG B: Undersøgelse af starteffektivitetens afhængighed af vindhastigheden.	

1. INDLEDNING

Målinger gennemført bl.a. på LfV har vist, at solvarmeanlæg med små volumenstrømme (low-flow) har en højere ydelse end solvarmeanlæg med traditionelt flow. Dette har bl.a. sin forklaring i den meget hensigtsmæssige temperaturlagdeling, der opstår i lagertanken i low-flow solvarmeanlæg med kappebeholder. Ydelsen af selve solfangeren som komponent under low-flow drift har hidtil ikke været tilstrækkelig undersøgt og rent beregningsmæssigt har man endnu ikke rådet over metoder til at forudsige ydelsen for en low-flow solfanger under drift udendørs.

Formålet med projektet har været at foretage en undersøgelse af ydelsen for typiske solfangere med små volumenstrømme med henblik på at udvikle en metode til at beskrive langtidscyklusen for low-flow solfangere under realistisk drift.

Undersøgelserne har været rettet mod solfangeren som komponent og er hovedsagelig foretaget i Laboratoriet for Varmeisolering (LfV's) indendørs solsimulator. På basis af resultaterne herfra er opstillet en enkel metode til at beskrive solfangerydelsen ved low-flow drift og under realistiske driftforhold i øvrigt.

Projektet er til dels gennemført som et samarbejdsprojekt mellem Interkantonalet Technikum i Rapperswill, Schweiz og LfV, idet de undersøgte solfangere har været prøvet både i en udendørs prøvestand i Schweiz og i LfV's indendørs solsimulator. Dette er hovedsagelig gjort med henblik på at foretage sammenligninger mellem resultaterne fra standard- og low-flow effektivitetsprøvningerne foretaget i hhv. Schweiz og Danmark.

Den udviklede model er verificeret vha. udendørs langtidsmålinger og ved projektets start var der forventninger om, at der udover resultaterne fra standard- og low-flow effektivitetsprøvningerne kunne skaffes resultater fra udendørs langtidsmålinger foretaget i den udendørs prøvestand i Rapperswill, Schweiz. Dette har desværre ikke vist sig muligt. I stedet er der ved hjælp af et nylig opbygget væskekontrollsystem foretaget udendørs målinger på LfV i løbet af sommeren/efteråret 1993.

2. PRØVNINGSBESKRIVELSE

Alle indledende danske prøvninger af de undersøgte solfangere er foretaget i LfV's indendørs solsimulator. Prøvningerne er foretaget under en række forskellige driftforhold med henblik på at opnå et øget kendskab til solfangernes ydelse, specielt ved små volumenstrømme - low-flow.

Målingerne er udført under stationære forhold, dvs. betydende parametre som solbestrålingsstyrke, væskeflow, væskens ind- og udløbstemperatur, lufttemperatur, vindhastighed, indfaldsvinkel og hældning er konstante over en periode på mindst 20 minutter.

Der er foretaget målinger for at bestemme:

1. Standard effektivitetsudtryk, flow 0,02 kg/sm². Se kapitel 4.1
2. Varmetab ved forskellige hældninger. Målingerne er udført ved flow på både 0,02 kg/sm² (standard flow) og 0,0025 kg/sm² (low-flow). Se kapitel 4.2
3. Varmetab ved forskellige vindhastigheder. Se kapitel 4.3
4. Effektivitet ved forskellige indfaldsvinkler. Se kapitel 4.4 og 4.5
5. Effektivitet ved low-flow. Se kapitel 4.6.

I det omfang målingerne er beskrevet i ISO 9806-1.2 normforslaget [1], er målingerne udført i overensstemmelse hermed. Dette gælder pkt. 1 og 4 ovenfor.

Ved målinger i solsimulatoren opnås kendskab til solfangerens ydelse under et bestemt sæt vejr- og driftforhold, herunder: Solbestrålingsstyrke, diffus andel, solstrålingens indfaldsvinkel på solfangeren, lufttemperatur, vindhastighed, væskens indløbstemperatur og væskeflow. For at beskrive solfangerens ydelse under vejr- og driftforhold, der afviger fra prøvningsforholdene, må der foretages korrektioner for de aktuelle forhold.

Formålet med de ovenfor nævnte målinger har således været at karakterisere de forskellige vejr- og driftparametres indflydelse på solfangerens effektivitet med henblik på senere at verificere de opnåede korrektioner - specielt mht. flow - ved hjælp af udendørs målinger under skiftende forhold.

2.1 Solsimulatoren

LfV's solsimulator er opbygget af 64 stk. Thorn CSI 1000W lamper. Lamperne er monteret i en kvadratisk ramme, hvorpå der også er placeret fire tværstrømsblæsere til køling af lamperne.

Hver solfanger monteres under prøvningerne på et 3x3 m stort prøvebord, udformet som et udsnit af et bølgeeternittag. Prøvebordet kan vippes om en vandret akse og drejes om en lodret, således at der er mulighed for at prøve solfangerne under forskellige hældningsvinkler og indfaldsvinkler. Prøvebordet er desuden udstyret med blæsere til generering af simuleret vind over solfangerne.

Såvel solbestrålingsstyrken som vindhastigheden bestemmes ved at foretage målinger af hhv. solbestrålingsstyrken og vindhastigheden i et 10x10 cm net over solfangerens dæklag og foretage en midling af målingerne.

2.2 Målenøjagtighed for de indendørs målinger

Effektiviteten udtrykkes ved udtrykket:

$$\eta = \frac{M \cdot C_f \cdot T_{diff}}{A \cdot G} \quad [-] \quad (1)$$

hvor	M	=	Masseflow [kg/s]
	C_f	=	Solfangervæskens varmekapacitet [J/kgK]
	T_{diff}	=	Temperaturdifferens over solfangeren [K]
	A	=	Solfangerens transparente areal [m ²]
	G	=	Middel solbestrålingsstyrke på solfangerplanet [W/m ²]

I bilag A er foretaget en gennemregning af usikkerheden på en effektivitetsprøvning af en dansk solfanger svarende til Solfanger I beskrevet i kapitel 3. Der tages hensyn til samtlige indgående usikkerheder ud fra foretagne kalibreringer og resultatet er, at η bestemmes med en usikkerhed på max $\pm 1,5\%$.

2.3 Udendørs prøvestand i Rapperswill, Schweiz

Målingerne i Rapperswill udføres generelt efter ISO 9806-1.2 [1], bortset fra, at vindhastigheden over dæklaget søges holdt meget lav (< 1 m/s), hvor der i normen

foreskrives 2-4 m/s.

Under prøvning af solfangere i den udendørs prøvestand i Rapperswill monteres solfangeren i en sol-tracker, der gennem måleperioden følger solen for at holde solbestrålingens indfaldsvinkel på dæklaget konstant lig nul. Dette bevirker, at solfangerhældningen ikke er konstant gennem målingerne, og at hældningen endvidere afhænger af, hvornår på dagen og året målingerne foregår.

Ifølge oplysninger fra Rapperswill er målenøjagtigheden opgjort således, at η bestemmes med en usikkerhed på max $\pm 1\%$.

3. BESKRIVELSE AF DE PRØVEDE SOLFANGERE

De i kapitel 2 omtalte prøvninger er gennemført for to forskellige solfangere. Begge er serieproducerede, men er ellers forskellige i opbygningen. De vigtigste data for solfangerne fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Beskrivelse af de prøvede solfangere

	Solfanger I	Solfanger II
Fabrikat	ARCON Solvarme, DK	Agema SA, CH
Type	ST	Azur 3
Ydre dimensioner (hxb)	1,22 x 2,27 m	2,44 x 0,93 m
Transparant areal	2,52 m ²	2,08 m ²
Absorber areal	2,46 m ²	1,99 m ²
Dæklag 1	4,5 mm hærdet nopret jernfattigt glas	4,0 mm hærdet nopret jernfattigt glas
Dæklag 2	0,025 mm Teflonfolie	intet
Absorber	8 serieforbundne vandret liggende Sunstrips	Vaffelformet dobbelt plade af rustfrit stål
Absorberbelægning	Selektiv, sort nikkel	Selektiv, sort krom
Bagsideisolering	40 mm mineraluld	20 mm mineraluld + 40 mm PUR-skum
Kantisolering	10 mm mineraluld	20 mm mineraluld + fastgørelsesprofil
Vægt, tom	47,5 kg	56,0 kg
Væskeindhold	1,25 l	5,6 l

4. RESULTATER AF KARAKTERISERINGSPRØVNINGER

Solfangerens effektivitet beskrives ved den velkendte solfangerligning:

$$\eta = \eta_0 - k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (2)$$

hvor	η	=	Solfangerens øjeblikkelige effektivitet
	η_0	=	Solfangerens starteffektivitet
	k_0	=	Varmetabskoefficientens startværdi [W/m ² °K]
	k_1	=	Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient [W/m ² °K ²]
	T_m	=	Middeltemperatur af solfangervæsken [°C]
	T_a	=	Lufttemperatur [°C]
	G	=	Solbestrålingsstyrken på solfangerplanet [W/m ²]

Solfangerens varmetabskoefficient U bestemt ved effektivitetsmålingerne beskrives altså som:

$$U = k_0 + k_1 (T_m - T_a) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3)$$

Som tidligere nævnt beskriver effektivitetsligningen (2) solfangerens ydelse under et bestemt sæt vejr- og driftforhold. For at beskrive solfangerens ydelse generelt indføres en række korrektionsfaktorer i effektivitetsudtrykket, hvorved følgende korrigerede udtryk fremkommer: [5], [9] og [10]

$$\eta_{\text{kor}} = K_M \left[\eta_0 K_G - K_S K_V k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - K_S K_V k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \right] \quad [-] \quad (4)$$

hvor	η_{kor}	=	Korrigeret effektivitet
	K_M	=	Korrektionsfaktor for masseflow
	K_G	=	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus andel i solbestråling
	K_S	=	Korrektionsfaktor for solfangerens hældning
	K_V	=	Korrektionsfaktor for vindens hastighed over solfangerens dæklag.

4.1 Standard effektivitetsudtryk

De to solfangeres effektivitetsudtryk er ved målingerne bestemt til:

3. BESKRIVELSE AF DE PRØVEDE SOLFANGERE

De i kapitel 2 omtalte prøvninger er gennemført for to forskellige solfangere. Begge er serieproducerede, men er i øvrigt forskellige i opbygningen. De vigtigste data for solfangerne fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Beskrivelse af de prøvede solfangere

	Solfanger I	Solfanger II
Fabrikat	ARCON Solvarme, DK	Agena SA, CH
Type	ST	Azur 3
Ydre dimensioner (hxb)	1,22 x 2,27 m	2,44 x 0,93 m
Transparant areal	2,52 m ²	2,08 m ²
Absorber areal	2,46 m ²	1,99 m ²
Dæklag 1	4,5 mm hærdet nopret jernfattigt glas	4,0 mm hærdet nopret jernfattigt glas
Dæklag 2	0,025 mm Teflonfolie	intet
Absorber	8 serieforbundne vandret liggende Sunstrips	Vaffelformet dobbelt plade af rustfrit stål
Absorberbelægning	Selektiv, sort nikkel	Selektiv, sort krom
Bagsideisolering	40 mm mineraluld	20 mm mineraluld + 40 mm PUR-skum
Kantisolering	10 mm mineraluld	20 mm mineraluld + fastgørelsesprofil
Vægt, tom	47,5 kg	56,0 kg
Væskeindhold	1,25 l	5,6 l

4. RESULTATER AF KARAKTERISERINGSPRØVNINGER

Solfangerens effektivitet beskrives ved den velkendte solfangerligning:

$$\eta = \eta_0 - k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (2)$$

hvor	η	=	Solfangerens øjeblikkelige effektivitet
	η_0	=	Solfangerens starteffektivitet
	k_0	=	Varmetabskoefficientens startværdi [W/m ² °K]
	k_1	=	Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient [W/m ² °K ²]
	T_m	=	Middeltemperatur af solfangervæsken [°C]
	T_a	=	Lufttemperatur [°C]
	G	=	Solbestrålingsstyrken på solfangerplanet [W/m ²]

Solfangerens varmetabskoefficient U bestemt ved effektivitetsmålingerne beskrives altså som:

$$U = k_0 + k_1 (T_m - T_a) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3)$$

Som tidligere nævnt beskriver effektivitetsligningen (2) solfangerens ydelse under et bestemt sæt vejr- og driftforhold. For at beskrive solfangerens ydelse generelt indføres en række korrektionsfaktorer i effektivitetsudtrykket, hvorved følgende korrigerede udtryk fremkommer: [5], [9] og [10]

$$\eta_{\text{kor}} = K_M \left[\eta_0 K_G - K_S K_V k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - K_S K_V k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \right] \quad [-] \quad (4)$$

hvor	η_{kor}	=	Korrigeret effektivitet
	K_M	=	Korrektionsfaktor for masseflow
	K_G	=	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus andel i solbestråling
	K_S	=	Korrektionsfaktor for solfangerens hældning
	K_V	=	Korrektionsfaktor for vindens hastighed over solfangerens dæklag.

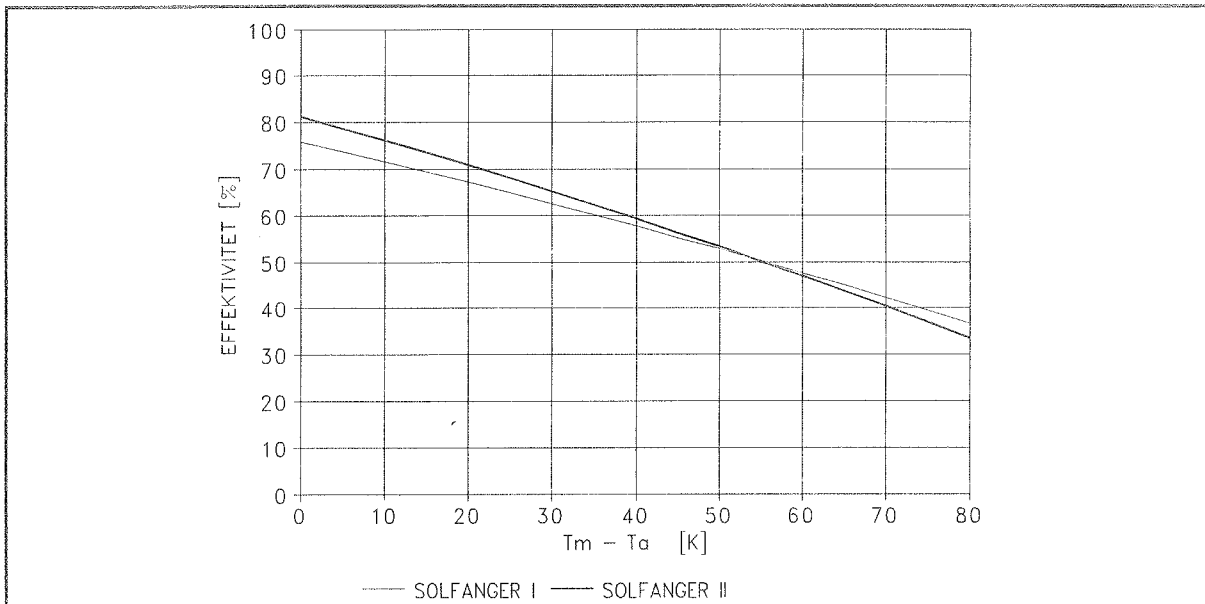
4.1 Standard effektivitetsudtryk

De to solfangeres effektivitetsudtryk er ved målingerne bestemt til:

$$\eta_I = 0,759 - 3,51 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,008 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (5)$$

$$\eta_{II} = 0,813 - 3,98 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,010 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (6)$$

Udtrykkene ses optegnet på figur 1. Kurverne er optegnet for en middel solbe-strålingsstyrke på 800 W/m² og i tabel 2 er listet de øvrige prøvningsbetingelser, der ligger til grund for kurverne.



Figur 1. Effektivitet for solfanger I og II.

Tabel 2. Standard prøvningsbetingelser i solsimulator

	Solfanger I	Solfanger II
Vindhastighed	2,6 m/s	2,4 m/s
Indfaldsvinkel	0°	0°
Hældning	67,5°	67,5°
Væskeflow	0,02 kg/sm ²	0,02 kg/sm ²
Transparent areal	2,52 m ²	2,08 m ²

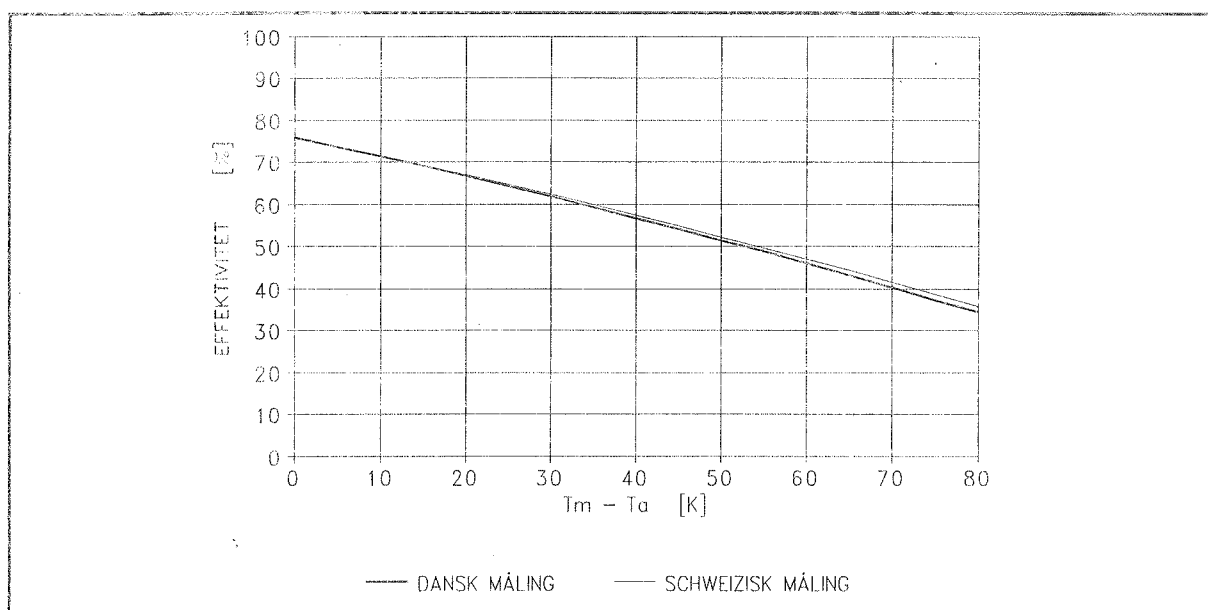
4.1.1 Schweiziske resultater

Resultaterne af de schweiziske standard effektivitetsmålinger er opgivet til:

$$\eta_{CH,I} = 0,758 - 3,36 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,008 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (7)$$

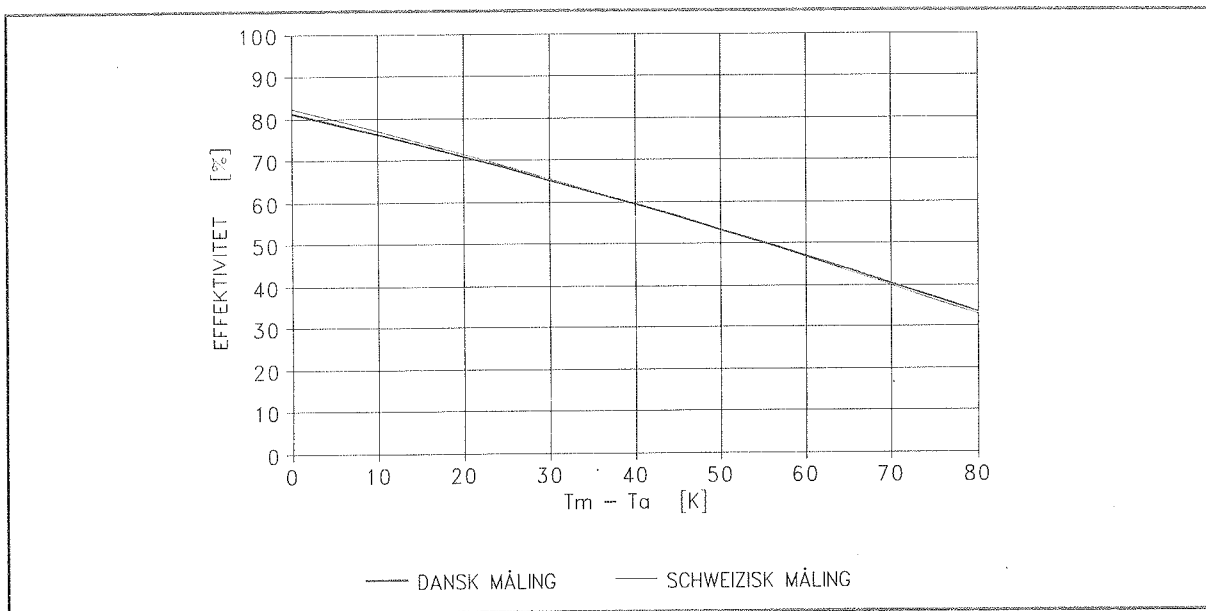
$$\eta_{CH,II} = 0,823 - 4,15 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,010 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (8)$$

Udtrykkene ses optegnet på figur 2 og 3, hvor resultatet af de danske målinger ligeledes er indtegnet. Kurverne er optegnet for en middel solbestrålingsstyrke på 800 W/m² og er baseret på solfangerarealerne angivet i tabel 1.



Figur 2. Resultat af schweizisk og dansk standardprøvning, Solfanger I

Prøvningsbetingelserne for de schweiziske udendørs målinger afviger en smule fra de danske: Vindhastigheden er ikke oplyst, men angives som < 1 m/s, og da målingerne foregår med solfangeren placeret i en sol-tracker for at holde indfaldsvinklen konstant lig nul, er målingerne foretaget for varierende solfangerhældninger i intervallet 25-40°. Herudover er himmelstrålingstemperaturen for de udendørs målinger i Schweiz lavere end for de indendørs målinger i Danmark. Betydningen af disse afvigelser er dog lille: I forhold til de danske prøvningsbetingelser reducerer den lave vindhastighed



Figur 3. Resultat af schweizisk og dansk standardprøvning, Solfanger II

varmetabet fra solfangeren, medens den mindre solfangerhældning og den lavere himmelstrålingstemperatur stort set øger varmetabet tilsvarende.

På denne baggrund ses, at der er meget fin overensstemmelse mellem resultaterne af de indendørs og udendørs standard effektivitetsmålinger.

4.2 Korrektion for varmetab ved forskellige solfangerhældninger

For at bestemme solfangernes varmetab som funktion af hældningen, er der foretaget varmetabsmålinger ved forskellige solfangerhældninger. Målingerne er foretaget uden solbestråling, idet varm solfangervæske er cirkuleret gennem solfangeren fra top til bund. Varmetabsmålingerne er foretaget ved såvel standardflow $0,02 \text{ kg/sm}^2$ som low-flow $0,0025 \text{ kg/sm}^2$. Temperaturen af solfangervæsken blev styret, så der for begge flow-tilfælde blev opnået en middelvæsketemperatur i solfangeren på ca 70°C .

Udover den manglende solbestråling, foretages målingerne ud fra samme kriterier som effektivitetsmålingerene, dvs. stationære forhold i mindst 20 minutter.

For alle tilfælde er fundet en retlinet sammenhæng mellem hældning og varmetabskoefficient.

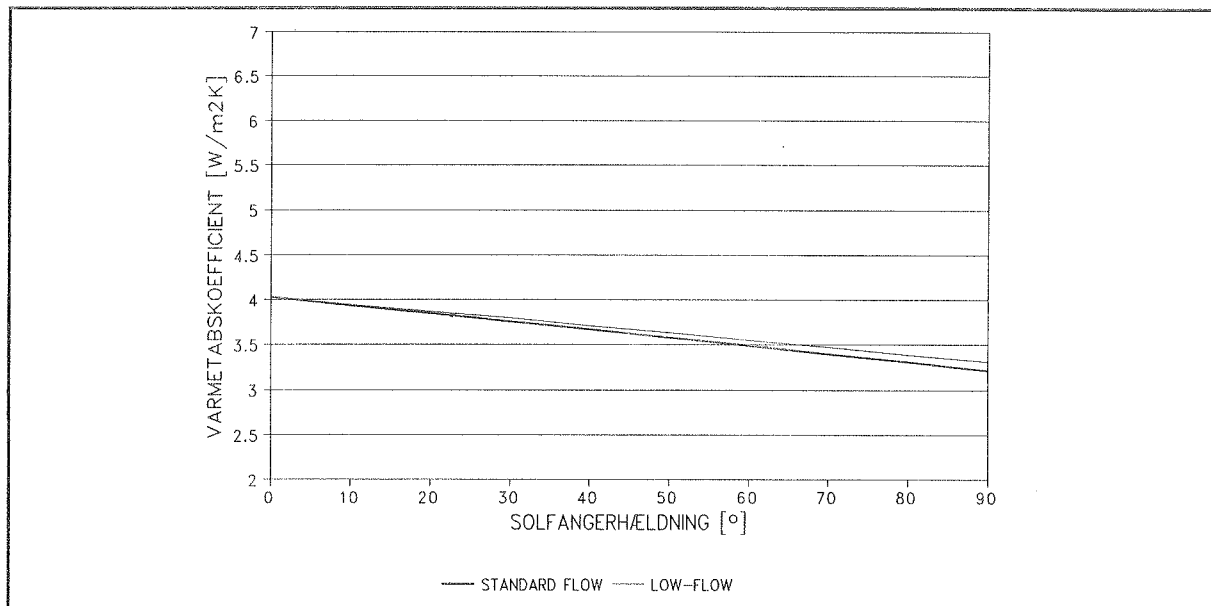
For solfanger I er fundet flg. sammenhæng for hhv. standard og low flow.:

$$U_{S,I_{stand}} = 4,03 - 0,009 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (9)$$

$$U_{S,I_{low}} = 4,03 - 0,008 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (10)$$

hvor U_S = Varmetabskoefficient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 S = Solfangerhældningen [$^\circ$]

På figur 4 er optegnet kurverne for varmetabskoefficient versus hældning for solfanger I.



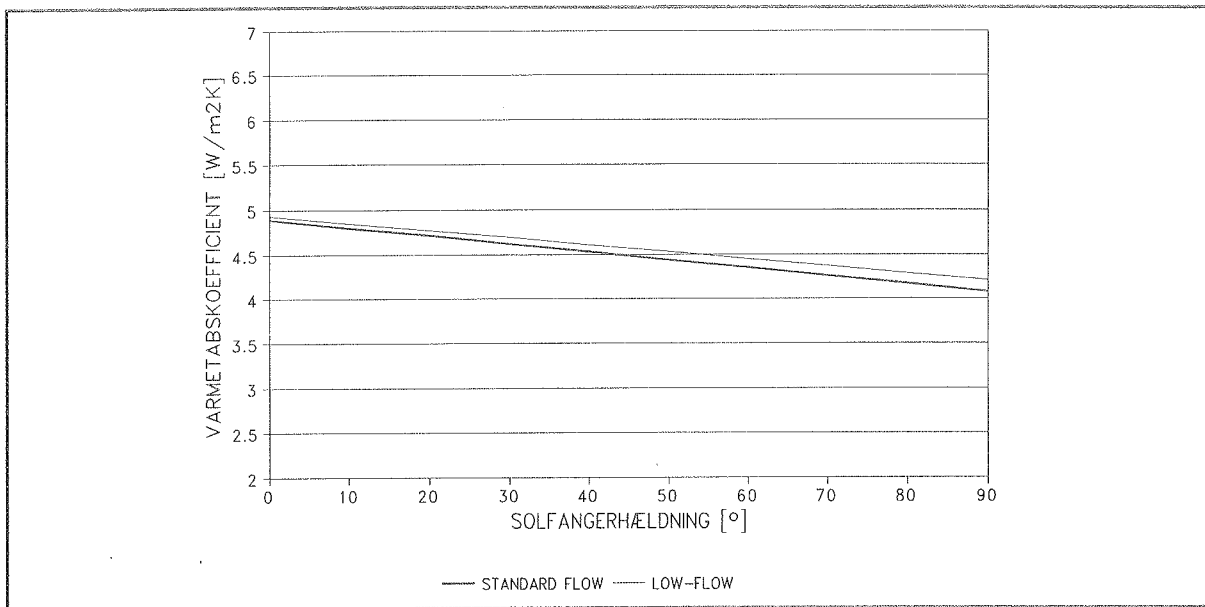
Figur 4. Varmetab som funktion af hældning for Solfanger I, standard og low-flow.

For solfanger II er tilsvarende fundet flg. sammenhæng:

$$U_{S,II_{stand}} = 4,89 - 0,009 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (11)$$

$$U_{S,II_{low}} = 4,93 - 0,008 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (12)$$

På figur 5 er optegnet varmetabskoefficient versus hældning for solfanger II.



Figur 5. Varmetab som funktion af hældning for Solfanger II standard og low-flow.

Som det ses af figur 4 og 5 ligger varmetabet for low-flow en smule over varmetabet for standard flow. Forskellen er dog beskednen, max 3% for solfangeren lodret placeret.

Korrektionsfaktoren for hældning K_s findes nu for standard flow til:

$$K_s = \frac{U_{S,aktuel}}{U_{S,standard}} \quad [-] \quad (13)$$

Dette giver for Solfanger I og II:

$$K_{s, I} = \frac{4,03 - 0,009 \cdot S}{4,03 - 0,009 \cdot 67,5} = 1,18 - 0,003 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (14)$$

$$K_{s, II} = \frac{4,89 - 0,009 \cdot S}{4,89 - 0,009 \cdot 67,5} = 1,14 - 0,002 \cdot S \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (15)$$

4.3 Korrektion for varmetab ved forskellige vindhastigheder over dæklaget

Med henblik på at beskrive solfangernes effektivitet ved varierende vindhastighed er

der foretaget målinger af solfangernes varmetab som funktion af vindhastigheden, idet det for de undersøgte solfangere med god tilnærmelse kan antages, at kun solfangerligningens varmetabsled varierer ved varierende vindhastighed. Det skal dog bemærkes, at en solfangers starteffektivitet η_0 bl.a. afhænger af solfangerens varmetabskoefficient og således også af vindhastigheden. Betydningen afhænger af den enkelte solfangergeometri og i bilag B er foretaget en teoretisk beregning, der viser, at vindhastighedens indflydelse på η_0 er meget lille for de undersøgte solfangere, og derfor kan negligeres.

Da undersøgelserne i forrige kapitel viste, at flowets størrelse kun har lille betydning for varmetabet, er varmetabsmålingerne kun foretaget for standard flow ($0,02 \text{ kg/sm}^2$).

I det følgende opstilles et udtryk for varmetabets afhængighed af vindhastigheden over dæklaget:

Varmetabet fra dæklaget til omgivelserne kan skrives som:

$$Q_t = h_{id} (T_d - T_a) A \quad [\text{W}] \quad (16)$$

hvor Q_t = Varmetabet fra solfangerens dæklag [W]
 h_{id} = Varmeoverføringskoefficient mellem luft og dæklag [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 T_d = Temperatur af dæklagets yderside [$^{\circ}\text{C}$]

h_{id} findes ved hjælp af:

$$h_{id} = \frac{Nu k_l}{l} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (17)$$

hvor k_l = Varmeledningsevnen for luften [W/mK]
 l = Karakteristisk længde $= 4A/o$, o er omkredsen af solfangeren
 Nu = Nusselts tal

Ifølge [2] gælder følgende sammenhæng mellem Nu , Re og Pr :

$$Nu = 0,86Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (18)$$

$$Re = \frac{V l}{\nu} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\sigma} \quad (20)$$

hvor V = Vindhastighed over dæklaget [m/s]
 ν = Kinematisk viskositet for luften [m²/s]
 σ = Termisk diffusivitet for luften [m²/s]

Stofkonstanterne bestemmes ved middeltemperaturen $\frac{1}{2}(T_d + T_a)$.

Af sammenhængen mellem varmeoverføringskoefficienten h_{id} og vindens hastighed V , opstilles et udtryk for den totale varmetabskoefficient for solfangeren som funktion af vinden:

$$U_V = a + b V^{0,5} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (21)$$

hvor U_V = Varmetabskoefficient som funktion af vindhastigheden [W/m²K]
 a = Konstant varmetabsbidrag når $V = 0$ m/s.

Ud fra de foretagne varmetabsmålinger og (21) er for de to solfangere fundet følgende sammenhæng mellem varmetabskoefficient og vindhastighed:

$$U_{V_I} = 2,96 + 0,28 \cdot V^{0,5} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (22)$$

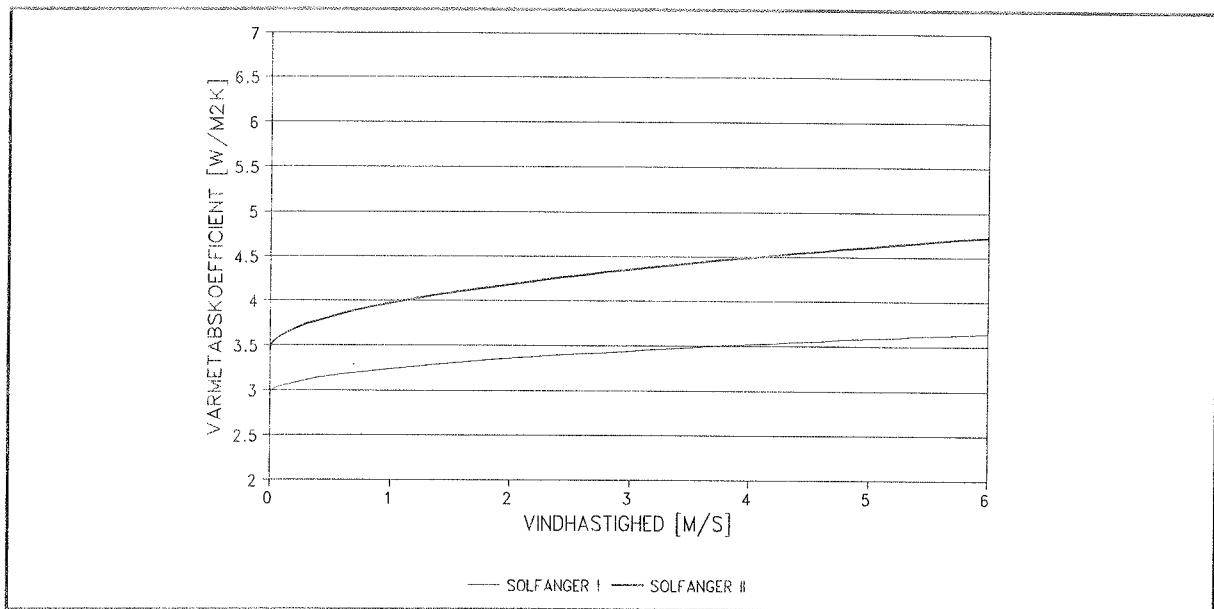
$$U_{V_{II}} = 3,45 + 0,52 \cdot V^{0,5} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (23)$$

hvor a og b i (21) er bestemt ved regression ud fra varmetabsmålingerne.

På figur 6 ses varmetabskoefficienten for de to solfangere optegnet som funktion af vindhastigheden.

Korrektionsfaktoren for vindens hastighed over dæklaget K_V findes af:

$$K_V = \frac{U_{V, \text{aktuel}}}{U_{V, \text{standard}}} \quad [-] \quad (24)$$



Figur 6. Varmetabskoefficient som funktion af vindhastighed

Hermed findes for de to solfangerne:

$$K_{V, I} = \frac{2,96 + 0,28 \cdot V^{0,5}}{2,96 + 0,28 \cdot 2,6^{0,5}} = 0,87 + 0,08 \cdot V^{0,5} \quad [-] \quad (25)$$

$$K_{V, II} = \frac{3,45 + 0,52 \cdot V^{0,5}}{3,45 + 0,52 \cdot 2,4^{0,5}} = 0,81 + 0,12 \cdot V^{0,5} \quad [-] \quad (26)$$

4.4 Korrektion for effektivitet ved forskellige indfaldsvinkler

I dette kapitel bestemmes korrektionsfaktorer for solbestrålingens indfaldsvinkel på solfangerne.

Målingerne foretages ved at vippe prøvebordet om dets vandrette akse, således at solfangerhældningen bliver 90°. Indfaldsvinklen er nu 22,5° og ved at dreje prøvebordet om dets lodrette akse, kan opnås indfaldsvinkler større end 22,5°.

Målingerne udføres ved samme væskeflow og vindhastighed som standar effektivitetsprøvningerne (se tabel 2) og foretages efter samme kriterier som de tidligere beskrevne effektivitetsmålinger, dvs. stationære forhold i mindst 20 minutter.

4.4.1 Baggrund for korrektionen

En solfangers ydelse er afhængig af solstrålingens indfaldsvinkel på solfangerens dæklag. Dette skyldes, at såvel transmittansen af solstrålingen gennem dæklaget som absorberens absorptans er afhængige af solstrålingens indfaldsvinkel.

I [1] foreslås solfangerens effektivitet ved en vilkårlig indfaldsvinkel bestemt af:

$$\eta = K_i \eta_0 - k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (27)$$

Solfangerens starteffektivitet kan skrives som:

$$\eta_0 = F' (\tau\alpha)_e \quad [-] \quad (28)$$

og K_i bestemmes for hver indfaldsvinkel i ud fra:

$$K_i = \frac{(\tau\alpha)_{e,i}}{(\tau\alpha)_{e,i=0}} \quad [-] \quad (29)$$

hvor K_i = Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel
 $(\tau\alpha)_{e,i=0}$ = Effektivt transmittans-absorptans produkt for solfangeren ved indfaldsvinkel $i = 0^\circ$
 $(\tau\alpha)_{e,i}$ = Effektivt transmittans-absorptans produkt for solfangeren ved vilkårlig indfaldsvinkel i
 F' = Solfangerens effektivitetsfaktor (uafhængig af indfaldsvinkel).

K_i blev fundet ved målinger i solsimulatoren, idet effektiviteten η_i blev bestemt for hver undersøgt indfaldsvinkel, hvorefter K_i kan bestemmes ud fra:

$$K_i = \frac{\eta_i + k_0 \frac{T_m - T_a}{G} + k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G}}{\eta_0} \quad [-] \quad (30)$$

Målingerne udføres som før nævnt ved solfangerhældning på 90° og dette bevirker, at varmetabskoefficienterne i standardefektivitetsudtrykket må korrigeres til denne hældning. Dette gøres vha. hældningskorrektionsfaktoren fundet i kapitel 4.2.

$$K_S = \frac{U_{S,aktuel}}{U_{S,standard}} \quad [-] \quad (31)$$

hvor $U_S = a + b S$

Hædningskorrektionsfaktoren multipliceres på varmetabskoefficienterne k_o og k_l fra (30), hvorved de nye varmetabskoefficienter bliver:

$$k_{o(90^\circ)} = k_o K_{S,90^\circ}$$

$$k_{l(90^\circ)} = k_l K_{S,90^\circ}$$

K_i findes nu af:

$$K_i = \frac{\eta_i + k_{o(90^\circ)} \frac{T_m - T_a}{G} + k_{l(90^\circ)} \frac{(T_m - T_a)^2}{G}}{\eta_0} \quad [-] \quad (32)$$

Ved indfaldsvinkelforsøgene sørges for, at varmetabet er tæt på nul ved at indløbstemperaturen holdes nær omgivelsestemperaturen. Herved mindskes betydningen af varmetabet i udregningen af K_i .

Der er foreslået følgende formel til beskrivelse af sammenhængen mellem indfaldsvinklen i og korrektionsfaktoren K_i :

$$K_i = 1 - \tan^a\left(\frac{i}{2}\right) \quad [-] \quad (33)$$

For at bestemme potensen a omskrives formel (33) til:

$$\ln(1 - K_i) = a \ln\left(\tan\left(\frac{i}{2}\right)\right) \quad (34)$$

svarende til, at den ikke-lineære ligning (33) transformeres til en linær ligning af formen

$$y_i = a x_i$$

hvor

$$y_i = \ln(1 - K_i)$$

$$x_i = \ln\left(\tan\left(\frac{i}{2}\right)\right)$$

Der udføres nu en lineær regression på basis af måleresultaterne og med $\ln(\tan(i/2))$ som uafhængige variable x_i og $\ln(1-K_i)$ som afhængige variable y_i , hvorved a bestemmes.

Regressionen kan forbedres ved at indføre vægtning af de enkelte måledata. En sådan vægtning er foreslået ud fra numeriske principper i [4], idet metoden er egnet ved kurvefitting af transformererede lineære ligninger. (Metoden bygger på, at afvigelsen fra måledata til den tilnærmede kurve skal være lige stor for såvel store som små værdier af i). Som vægtningsværdi foreslås i [4], at der vælges en værdi af formen:

$$\frac{1}{y_i'} = \frac{1}{\ln(1 - K_i)'} = 1 - K_i \quad (35)$$

Både x_i og y_i for hver indfaldsvinkel vægtes med $(1 - K_i)$, således at regressionen foretages efter:

$$a(1 - K_i) \ln(\tan(\frac{i}{2})) = (1 - K_i) \ln(1 - K_i) \quad (36)$$

hvor de uafhængige variable er $x_i = (1 - K_i) \ln(\tan(i/2))$ og de afhængige variable er $y_i = (1 - K_i) \ln(1-K_i)$.

Den netop beskrevne metode vil i det følgende blive anvendt til at bestemme K_i som funktion af i for de to undersøgte solfangere.

4.4.2 Indfaldsvinkelforsøg med solfanger I

Udtrykket for solfangereffektiviteten ved $S = 90^\circ$ for solfanger I findes efter korrektion for hældning til:

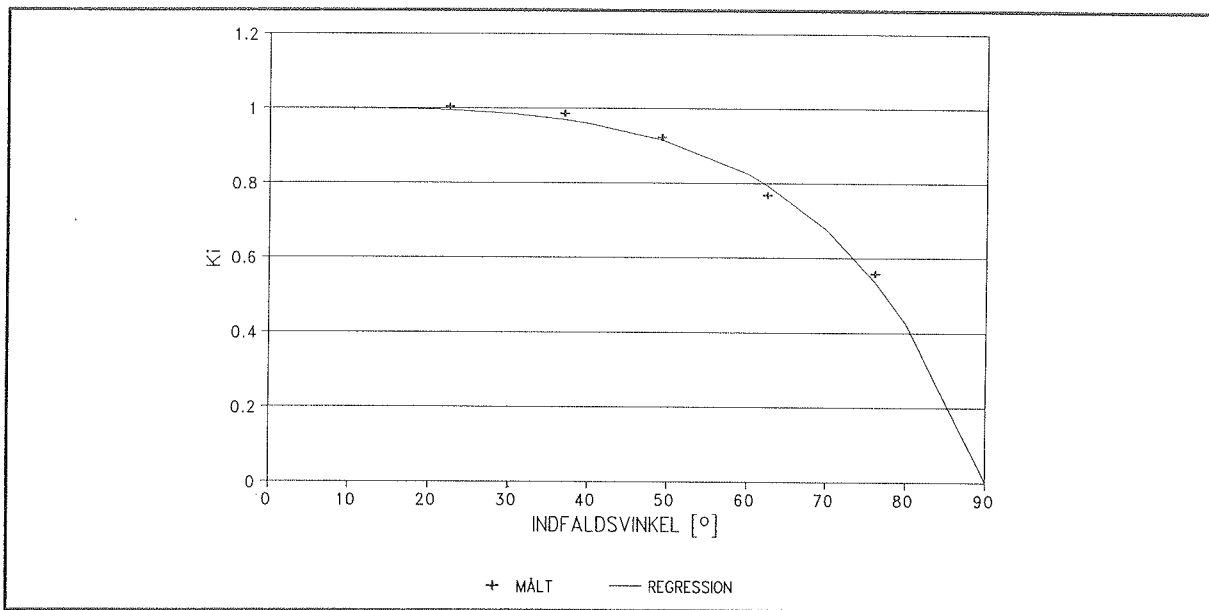
$$\eta = 0,759 - 3,31 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,008 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (37)$$

Effektiviteten måles for indfaldsvinklerne $22,5^\circ$ $36,9^\circ$ $49,2^\circ$ $62,5^\circ$ og $76,2^\circ$, hvorefter K_i bestemmes for hvert tilfælde.

En regression er foretaget for at tilnærme (36) til effektivitetsmålingerne. Regressionen er foretaget ved vægtning efter metoden skitseret ovenfor og K_i findes til:

$$K_i = 1 - \tan^{3,15}\left(\frac{i}{2}\right) \quad [-] \quad (38)$$

K_i ses optegnet på figur 7, hvor også måleresultaterne er vist.



Figur 7. Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel, Solfanger I

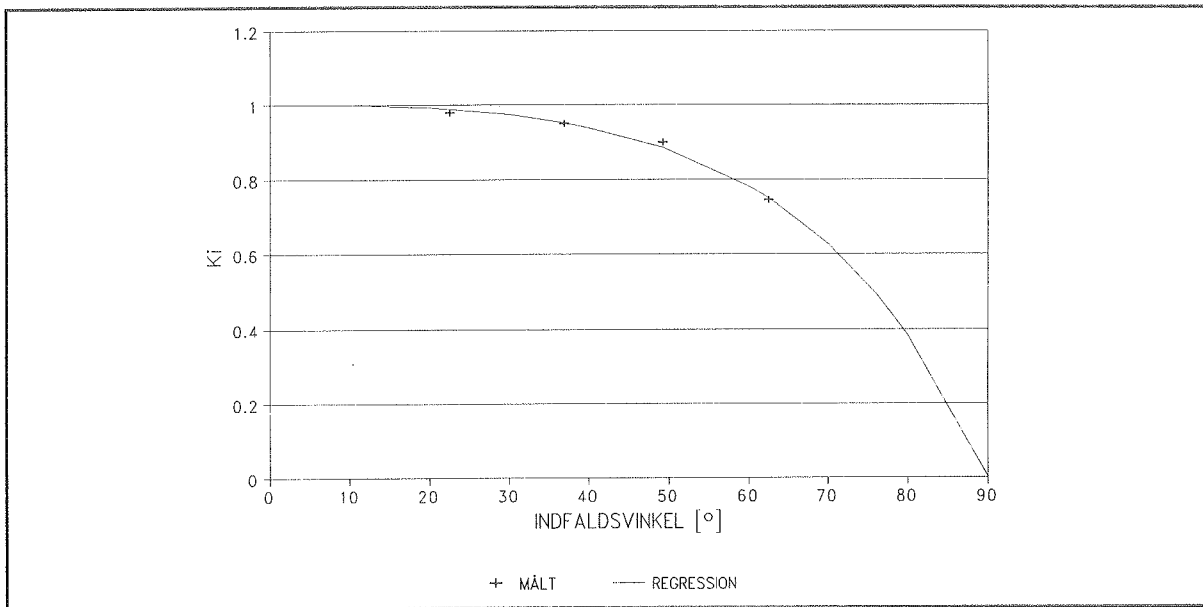
4.4.3 Indfaldsvinkelforsøg med solfanger II

Svarende til solfanger I er der for solfanger II foretaget en række effektivitetsmålinger i solsimulatoren ved forskellige indfaldsvinkler: 22,5° 36,9° 49,2° og 62,5°. For hver indfaldsvinkel er udregnet K_i efter (32) og der er derefter foretaget en regression med vægtning for at tilnærme (36) til effektivitetsmålingerne.

Ved regressionen er K_i fundet til:

$$K_i = 1 - \tan^{2,76}\left(\frac{i}{2}\right) \quad [-] \quad (39)$$

K_i ses optegnet på figur 8, hvor også måleresultaterne er vist.



Figur 8. Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel, Solfanger II

4.5 Korrektion for diffus stråling og indfaldsvinkel

Da der ikke kan skabes realistisk diffus solstråling i solsimulatoren, er der ikke foretaget målinger i solsimulatoren for at bestemme korrektionen for diffus stråling. I stedet er valgt at anvende en teoretisk udregnet korrektion som angivet i [2]. Her beskrives det diffuse lys ved at betragte det som direkte lys ved en ækvivalent indfaldsvinkel på $i = 60^\circ$. Hermed kan korrektionen for det diffuse lys udtrykkes ved:

$$K_d = 1 - \tan^a\left(\frac{60}{2}\right) \quad [-] \quad (40)$$

Korrektionen for diffus stråling K_d vil blive foretaget sammen med korrektionen for indfaldsvinkel K_i fundet i forrige kapitel. Den samlede korrektion K_G findes til:

$$K_G = (1 - P_d) K_i + P_d K_d \quad [-] \quad (41)$$

hvor P_d er den diffuse andel af den totale solstråling på solfangerens plan.

Potensen a blev i kapitel 4.4 for solfanger I og II fundet til hhv. 3,15 og 2,76 og K_G for de to solfangerer findes til:

$$K_{G, I} = (1 - P_d) (1 - \tan^{3,15} (\frac{i}{2})) + P_d \cdot 0,18 \quad [-] \quad (42)$$

$$K_{G, II} = (1 - P_d) (1 - \tan^{2,76} (\frac{i}{2})) + P_d \cdot 0,22 \quad [-] \quad (43)$$

4.6 Korrektion for low-flow

4.6.1 Baggrund for korrektionen

Flowets størrelse har generelt kun lille indflydelse på solfangereffektiviteten, så længe effektiviteterne er baseret på samme middeltemperatur af solfangervæsken. Som korrektion for flowets størrelse foreslås derfor indført en "korrektionsfaktor for flow" K_M , defineret som:

$$K_M = \frac{\eta_{low}}{\eta_{standard}} \quad [-] \quad (44)$$

hvor η_{low} og $\eta_{standard}$ er solfangereffektiviteten ved hhv. low-flow og standard flow, idet η_{low} og $\eta_{standard}$ er fundet for ens betingelser (temperaturer og solbestrålingsstyrke).

$\eta_{standard}$ er fundet ved standard effektivitetsprøvningen og udtrykkes ved:

$$\eta = \eta_0 - k_0 \frac{T_m - T_a}{G} - k_1 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (45)$$

η_{low} kan ved målinger findes for forskellige flowstørrelser og ved væskeindløbs-temperaturer nær lufttemperatur. Det eneste problem består nu i at finde middelvæsketemperaturen T_m i solfangeren ved low-flow målingerne. Ved standard flow kan T_m med meget god tilnærmelse sættes lig den aritmetiske middelværdi af væskens ind- og udløbstemperatur. Dette er ikke muligt ved low-flow, da temperaturstigningen over solfangeren er væsentlig større end ved standard flow, og da varmetabet fra solfangeren stiger med væsketemperaturen, vil væsketemperaturen ikke stige lineært over solfangeren. I stedet er det nødvendigt at finde T_m ved at integrere væsketemperaturen over solfangeren fra indløb til udløb.

Den integrerede middelvæsketemperatur kan findes vha [2]:

$$T_m = T_i + \frac{(Q_u/A)}{F_R U_L} (1-F'') \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (46)$$

hvor	Q_u	=	Solfangerens ydelse [W]
	U_L	=	Varmetabskoefficient fra absorberplade til omgivende luft [W/m ² K]
	F''	=	Solfangerens flow factor (Se formel 54)
	F_R	=	Solfangerens heat removal factor (Se formel 49)

Solfangerens øjeblikkelige effektivitet er:

$$\eta = \frac{Q_u}{AG} \quad [-] \quad (47)$$

og man får derfor af (46):

$$T_m = T_i + \eta G \frac{1}{F_R U_L} (1-F'') \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (48)$$

Der gælder følgende sammenhæng: [2]

$$F_R = F'' F' \quad [-] \quad (49)$$

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad [-] \quad (50)$$

$$F_R = F'' \frac{U_0}{U_L} \quad [-] \quad (51)$$

hvor	U_0	=	Varmetabskoefficienten fra væsken til omgivende luft
	U_L	=	Varmetabskoefficienten fra absorber til omgivende luft
	F'	=	Solfangerens effektivitetsfaktor

Ved at indsætte (51) i (48) bliver middelvæsketemperaturen således:

$$T_m = T_i + \eta G \frac{1-F''}{F''U_0} \quad [^\circ\text{C}] \quad (52)$$

Som værdi for varmetabet U_0 bruges varmetabskoefficienterne k_0 og k_1 :

$$U_0 = k_0 + k_1 (T_m - T_a) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (53)$$

hvor k_0 og k_1 er fundet ud fra standard effektivitetsprøvningen.

Fra [2] fås:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{MC_p}{AU_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{AU_L F'}{MC_p}\right) \right] \quad [-] \quad (54)$$

og da $U_L F' = U_0$ fås:

$$F'' = \frac{MC_p}{AU_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_0}{\left(\frac{M}{A} C_p\right)}\right) \right] \quad [-] \quad (55)$$

Solfangervæsken er leveret fra Schweiz og består af 1/3 ethylenklykol og 2/3 vand. Varmekapaciteten som funktion af væsketemperaturen er fra Schweiz oplyst til:

$$C_f = 3,57944 + 2,67807E-03 \cdot T_m - 3,97773E-06 \cdot (T_m)^2 + 2,3518E-08 \cdot (T_m)^3 \quad (56)$$

C_f fås i kJ/kgK og T_m skal indsættes i $^\circ\text{C}$.

Middelvæsketemperaturen findes nu ved iteration:

- Først gættes på en middelvæsketemperatur
- herefter udregnes C_f efter (56)
- U_0 udregnes efter (53)
- F'' udregnes efter (55)
- ny middelvæsketemperatur udregnes efter (52), idet både solbestråling G og effektiviteten η er kendte fra low-flow prøvningen
- Den udregnede væsketemperatur sammenlignes med startgættet og iterationen fortsætter, indtil forskellen i T_m bliver tilstrækkelig lille.

Forudsætningen for at anvende denne metode er, at varmetabskoefficienten (53) ikke

er flowafhængig. (Idet k_0 og k_1 bruges som koefficienter, og disse er fundet ved standard effektivitetsprøvningen). Dette problem er behandlet i kapitel 4.2. Her er beskrevet nogle varmetabsmålinger udført ved hhv. low-flow og standard flow ved samme middelvæsketemperatur. Konklusionen var, at flowet ikke har nogen signifikant betydning for varmetabet og dermed for de to koefficienter k_0 og k_1 .

I øvrigt vil en variation af U_0 på $\pm 10\%$ kun resultere i meget små ændringer i den beregnede T_m - metoden er med andre ord ikke særlig følsom overfor mindre usikkerheder på bestemmelsen af U_0 .

Når T_m fra low-flow testen er fundet, kendes de betydende parametre for prøvningen (T_m , T_a og G) og ved at indsætte disse størrelser i (45) findes solfangerens effektivitet ved standard flow og K_M kan vha. (44) findes for det aktuelle flow. K_M varierer naturligvis med flowets størrelse.

4.6.2 Low-flow forsøg med Solfanger I

Standard effektivitetsudtrykket for Solfanger I er ved hældningen $67,5^\circ$ fundet til:

$$\eta = 0,759 - 3,51 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,008 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (57)$$

Der er udført effektivitetsforsøg ved følgende masseflow:

0,0017 kg/sm², 0,0025 kg/sm², 0,0049 kg/sm² og 0,01 kg/sm².

Indløbstemperaturen var for alle fire forsøg ca 25°C . Måleresultaterne fremgår af tabel 3 på næste side, hvor også T_m og K_M er beregnet efter den netop beskrevne metode.

4.6.2.1 Kontrolforsøg med low-flow

For Solfanger I er der udover de beskrevne low-flow forsøg udført yderligere effektivitetsmålinger ved fire forskellige væsketemperaturer og et flow på ca 0,0025 kg/sm². Måleresultaterne fremgår af tabel 4, hvor også T_m og K_M er beregnet som angivet i kapitel 4.6.1.

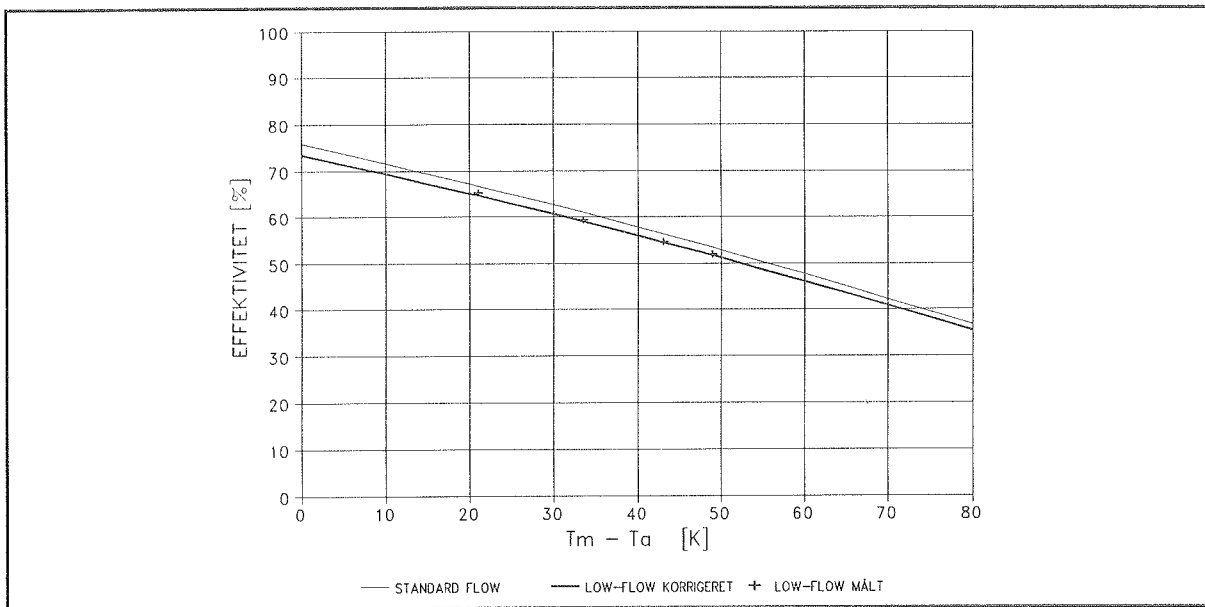
Tabel 3. Danske resultater fra low-flow prøvning, Solfanger I

Flow	G	T _a	T _i	T _m	η _{low}	η _{standard}	K _M
kg/sm ²	W/m ²	°C	°C	°C	%	%	-
0,0017	875	22,8	24,0	66,2	54,6	56,7	0,963
0,0025	854	23,8	24,0	53,8	60,7	62,7	0,968
0,0049	870	23,4	24,3	40,9	67,0	68,5	0,979
0,01	874	23,9	25,3	33,8	70,3	71,8	0,980

Tabel 4. Resultater fra low-flow kontrolprøvning, Solfanger I

Flow	G	T _a	T _i	T _m	η _{low}	η _{standard}	K _M
kg/sm ²	W/m ²	°C	°C	°C	%	%	-
0,0026	847	22,6	12,6	43,7	65,2	66,7	0,977
0,0027	847	23,2	29,7	56,7	59,5	60,9	0,976
0,0025	846	22,2	38,9	65,3	54,7	56,2	0,973
0,0026	851	23,5	48,2	72,5	51,9	53,4	0,973

På figur 9 er resultaterne optegnet. Øverste kurve repræsenterer effektiviteten ved standard flow, nederste kurve den forventede low-flow effektivitet opnået ved korrektion med $K_M = 0,968$ (fra tabel 3). Herudover er de fire kontrolforsøg med low-flow indtegnet. Kurverne er optegnet for en solbestrålingsstyrke på 848 W/m² svarende til middelstrålingen ved kontrolforsøgene. Som det ses er der pæn overensstemmelse mellem forventet (low-flow korrigeret) og målt effektivitet ved low-flow uanset temperaturniveau.



Figur 9. Forventet og målt effektivitet ved low-flow, Solfanger I

4.6.2.2 Schweiziske low-flow målinger for Solfanger I

Svarende til de ovenfor beskrevne low-flow målinger er der for Solfanger I i Schweiz udført en række udendørs effektivitetsmålinger ved flg. flow: 0,0046 og 0,0035 kg/sm². De tilhørende K_M -værdier er beregnet og er sammen med de danske resultater vist på figur 10. De danske resultater for flow 0,0046 og 0,0035 kg/sm² er fundet ved lineær interpolation mellem måleresultaterne i tabel 3 og 4.

Som det ses af tabel 3 + 4 og figur 10 betyder et mindre flow en reduktion i solfangerydelsen. Reduktionen er dog beskednen selv ved en formindskelse af flowet til ca 10% af standard flowet på 0,02 kg/sm².

4.6.3 Low-flow forsøg med Solfanger II

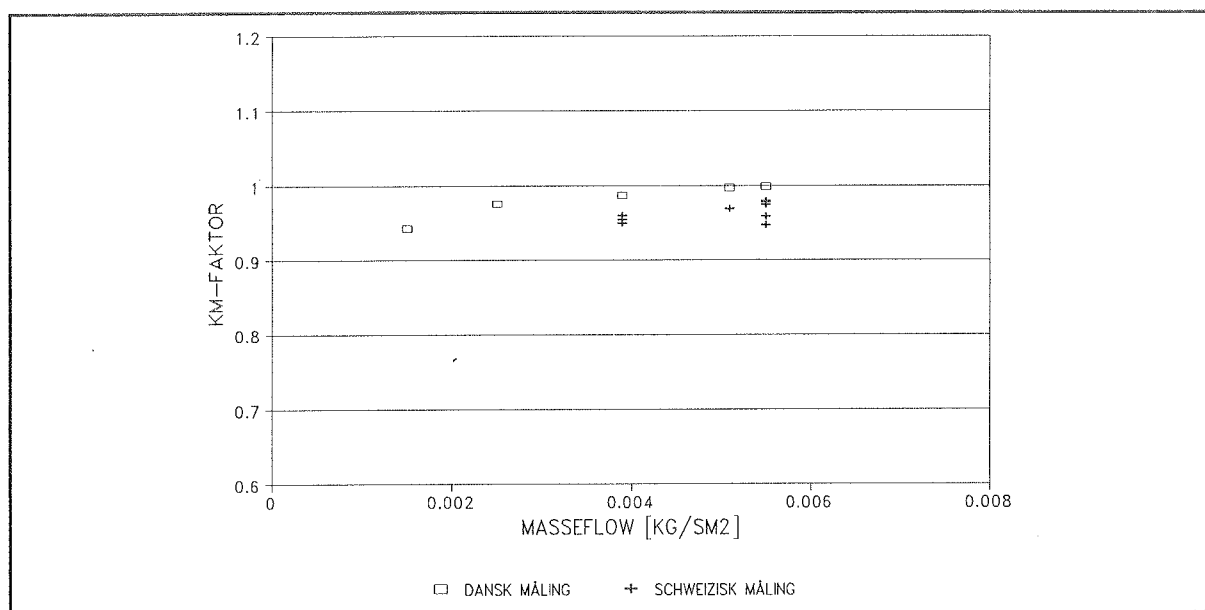
Standard effektivitetsudtrykket for Solfanger II er ved hældningen 67,5° fundet til:

$$\eta = 0,813 - 3,98 \frac{T_m - T_a}{G} - 0,01 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (58)$$

At K_M for flowet 0,099 kg/sm² i tabel 5 er større end 1 skyldes sandsynligvis den generelle måleusikkerhed i solsimulatoren på ca 1,5%.

4.6.3.1 Schweiziske low-flow målinger for Solfanger II

Som for Solfanger I er der for Solfanger II i Schweiz udført udendørs effektivitetsmålinger ved flg. flow: 0,0055 og 0,0039 kg/sm². De tilhørende K_M -værdier er beregnet og er sammen med de danske resultater vist på figur 11. De danske resultater for flow 0,0055 og 0,0039 kg/sm² er fundet ved lineær interpolation mellem måleresultaterne i tabel 5.



Figur 11. K_M som funktion af masseflow. Danske og schweiziske målinger for Solfanger II

Som ventet er tendensen den samme som for Solfanger I: Et mindre flow betyder en reduktion i solfangerydelsen. Reduktionen er dog relativ beskeden selv ved en reduktion af flowet til ca 10% af standard flowet på 0,02 kg/sm².

De danske og schweiziske målinger udviser samme tendens, idet de schweiziske målinger dog angiver en noget større reduktion i solfangerydelsen ved nedsat flow, end de danske, ligesom de schweiziske målinger udviser en ganske stor spredning. Årsagen til dette har ikke kunnet fastlægges éntydigt, men der er flere mulige forklaringer:

- Almindelig måleusikkerhed
- De schweiziske målinger er udført udendørs. Det giver risiko for varierende prøvningsforhold, specielt mht. vindhastighed og det er der ikke korrigeret for
- Ved de udendørs prøvninger i Schweiz korrigeres der normalt for sæsonmæssige variationer, dette har ikke været muligt for de udførte low-flow målinger. Korrektionen er normalt beskeden og angives til max 1%.

5. DANSKE MÅLINGER FORETAGET UDENDØRS

For at kontrollere de fundne korrektionsfaktorer - specielt mht. flow - er der foretaget udendørs ydelsesmålinger for Solfanger I. Målingerne er foretaget for såvel standard flow (0,02 kg/sm²) som low-flow (0,0025 kg/sm²).

Efter de udendørs målinger var gennemført blev resultaterne sammenlignet med beregninger af forventet solfangerydelse under hensyntagen til de fundne korrektionsfaktorer. Beregningerne blev udført vha. simuleringsprogrammet AKTIVSOL, se kapitel 6.

5.1 Udendørs opstilling

Solfanger I blev under de udendørs målinger placeret på en sydvendt tagflade med 45° hældning og forbundet til et væskekontrolsystem. Væskekontrolsystemet regulerer væskeflow og -temperatur i solfangerkredsen og indeholder desuden en flowmåler.

Målesystemet registrerede og lagrede såvel vejrparametre (solbestrålingsstyrke global og diffus, vindhastighed og lufttemperatur) som solfangerydelsen (masseflow, temperaturdifferens over solfangeren mv.).

Solbestrålingsstyrken måles med pyranometre, vindhastigheden med kop-anemometer, temperaturer med termoelementer, temperaturdifferens med termosøjle og masseflowet med en kalorimetrisk flowmåler.

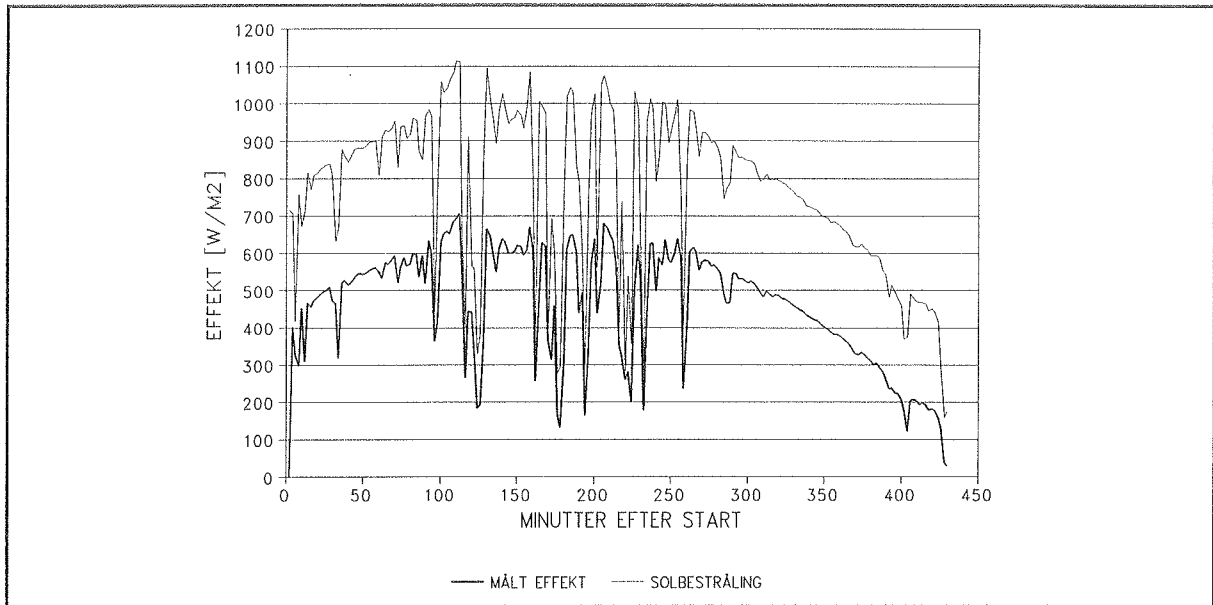
Da der ved de udendørs målinger foretages registrering af ikke-stationære forløb, er målefrekvensen relativ høj - der foretages målinger hvert 15. sekund og der foretages midling af 8 målinger, svarende til 2-minuts middelværdier.

Målesystemet er karakteriseret mht. nøjagtighed og det er fundet, at målenøjagtigheden for det udendørs målesystem er på niveau med nøjagtigheden for det målesystem, der anvendes ved de indendørs målinger, idet usikkerheden er fastsat til max $\pm 2\%$.

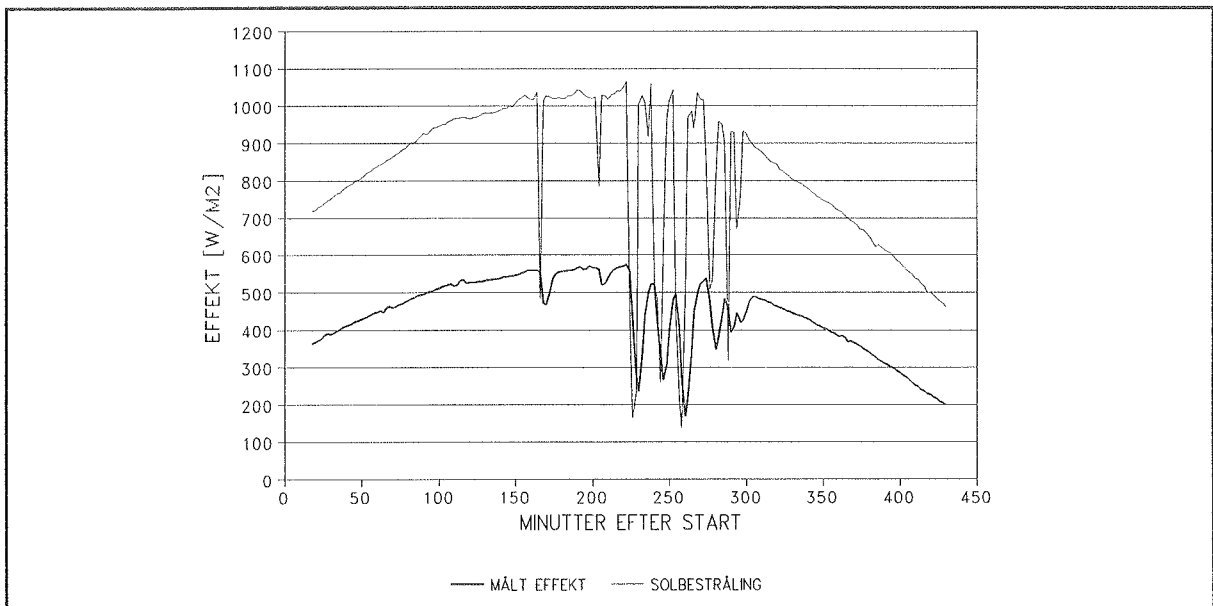
5.2 Resultat af udendørs målinger

Der er foretaget udendørs effektivitetsmålinger ved standard flow (0,02 kg/sm²) og low-flow (0,0025 kg/sm²). På figur 12 og 13 er vist resultaterne fra to effektivitetsmålinger ved hhv. standard og low-flow - på figurene er vist såvel solfanger-

ydelsen [W/m^2] som den totale solbestrålingsstyrke på solfangerplanet [W/m^2]. For standard flow målingen var lufttemperaturen T_a ca 19°C og væskens indløbstemperatur T_i ca 46°C . For low-flow målingen var T_a ca 19°C og T_i ca 37°C . Begge målinger har strakt sig over en hel dag og for begge målinger var vindhastigheden $<0,5$ m/s.



Figur 12. Målt solfangerydelse ved standard flow. $T_a = 19^\circ\text{C}$ og $T_i = 46^\circ\text{C}$



Figur 13. Målt solfangerydelse ved low-flow. $T_a = 19^\circ\text{C}$ og $T_i = 37^\circ\text{C}$

6. BEREGNINGSPROGRAM

For at foretage sammenligninger mellem målt og forventet solfangerydelse er der vha. simuleringssprogrammet AKTIVSOL [3] foretaget ydelsesberegninger for Solfanger I under drift- og vejrforhold svarende til de udendørs målinger omtalt i kapitel 4.

Ambitionen har været at foretage beregninger for såvel standard som low-flow med samme beregningsnøjagtighed i forhold til målingerne for herved at kontrollere gyldigheden af den foreslåede korrektionsfaktor for low-flow K_M .

6.1 Beskrivelse af AKTIVSOL

AKTIVSOL er et numerisk beregningsprogram, der til beskrivelse af solfangerydelsen tager udgangspunkt i:

$$C_s A \frac{dT_u}{dt} = AG\eta + MC_f(T_i - T_u) \quad (59)$$

hvor C_s = Solfangerens varmekapacitet [kJ/m²K]
 T_i = Væskens indløbstemperatur i solfangeren [°C].

Programmet beregner væskeudløbstemperaturen T_u fra solfangeren til tiden t ud fra kendskabet til T_u i forrige tidsskridt ($t-\Delta t$). Ved beregningens start kendes C_s , A , G , M , T_i og T_a (lufttemperaturen under målingen). Endvidere kendes η og C_f begge som funktion af T_m (4) og (56).

6.1.1 Beregninger for standard flow

Ud fra (4) beregnes den stationære effektivitet til tiden $t-\Delta t$ (her forudsættes, at $T_m = (T_i + T_u)/2$). Nu kan dT_u/dt (til tiden $t-\Delta t$) i (59) isoleres og udløbstemperaturen til tiden t ($T_{u(t)}$) bestemmes af:

$$T_{u(t)} = T_{u(t-\Delta t)} + \frac{dT_u}{dt} \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (60)$$

Når $T_{u(t)}$ nu er bestemt kan solfangerens ydelse Q_u til tiden t beregnes af:

$$Q_u = MC_f(T_u - T_i) \quad [\text{W}] \quad (61)$$

For at starte beregningerne skal der gættes på en væskeudløbstemperatur til tiden $t=0$.

6.1.2 Beregninger for low-flow

Ved low-flow er temperaturprofilen over solfangeren ikke retlinet og T_m kan ikke findes som middel af ind- og udløbstemperatur. For at bestemme η i (59) ud fra (4) må i stedet anvendes den integrerede middelvæsketemperatur. Denne findes ved iteration som følger:

1. Der laves et startgæt på $T_{m(t)}$ til tiden t .
2. Hældingskoefficienten for middelvæsketemperaturen mht. tiden findes af:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{T_{m(t)} - T_{m(t-\Delta t)}}{\Delta t} \quad (62)$$

3. En forventet stationær effektivitet til tiden t findes ud fra (4)
4. Solfangerens ydelse findes ved omskrivning af (59):

$$Q_u = MC_f(T_u - T_i) = AG\eta_{low(t)} - C_s A \frac{dT_m}{dt} \quad [\text{W}] \quad (63)$$

5. Ud fra den gættede T_m findes C_f af (56) og U_0 og F'' af:

$$U_0 = k_0 + k_1(T_{m(t)} - T_a) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (64)$$

$$F'' = \frac{MC_p}{AU_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_0}{\frac{M}{A} C_p}\right) \right] \quad [-] \quad (65)$$

6. Herefter kan en ny værdi for $T_{m(t)}$ beregnes efter: (se evt. kapitel 4.6)

$$T_{m(t),ny} = T_i + \frac{Q_u(1 - F'')}{A(F''U_0)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (66)$$

Proceduren gentages fra 1 med den netop fundne $T_{m(t),ny}$ indtil ændringen i de beregnede $T_{m(t),ny}$ bliver passende lille.

7. MÅLT OG BEREGNET YDELSE FOR SOLFANGER NR. I VED UDENDØRS DRIFT

7.1 Generelt om sammenligningen

Under de udendørs målinger er løbende registreret såvel drift- som vejrforholdene idet følgende måles og lagres:

- Væskens indløbstemperatur i solfangeren (T_i , konstant)
- Væskens masseflow \dot{m} gennem solfangeren
- Total og diffus solbestråling på solfangeren (hhv. G og G_d)
- Middellufttemperatur omkring solfangeren (T_a)
- Vindhastigheden over solfangerens dæklag (V)
- Ud fra dato og tid beregnes solstrålingens indfaldsvinkel på solfangeren.

De ovennævnte parametre bruges som inddata til simuleringsprogrammet AKTIVSOL, som på basis af parametrene beregner den forventede solfangerydelse.

For at basere sammenligningen mellem forventet og målt ydelse på forhold, der stiller store krav til beregningsmodellen, er udvalgt måledage, hvor solbestrålingsstyrken varierer en hel del. Herved bliver der foretaget undersøgelser under stærkt dynamiske forhold og for såvel store som små solbestrålingsstyrker. For hver måling er indløbstemperaturen holdt konstant.

Det skal bemærkes, at der ikke er taget hensyn til den strålingsmæssige effekt af forskellen mellem himmelstrålingstemperaturen udendørs og omgivelsestemperaturen i forsøgshallen. Dette skyldes, at det ikke har været muligt at foretage effektivitetsmålinger indendørs ved varierende omgivelsestemperatur med henblik på eksperimentelt at bestemme en korrektionsfaktor for solfangerydelsens afhængighed af himmel- og jordstrålingstemperaturen. I øvrigt har himmel- og jordstrålingstemperaturen kun lille betydning ved vurdering af solfangeres ydelse [2].

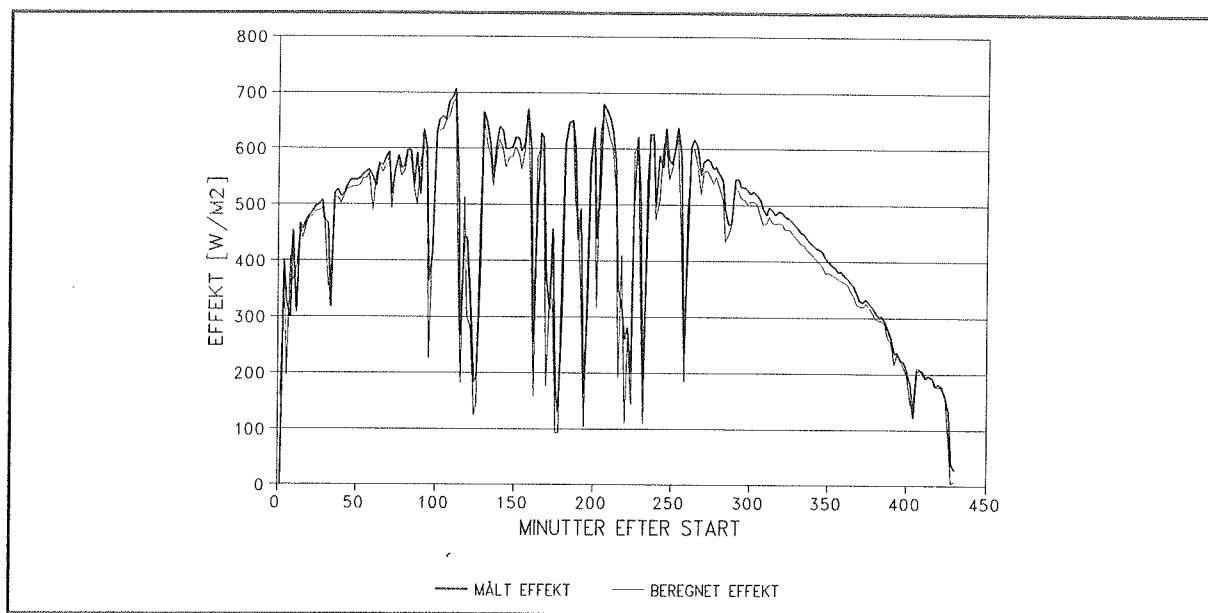
7.1.1 Sammenligning for standard flow

Den målte og forventede solfangerydelse for Solfanger I er for standard flow vist på figur 14. Den forventede ydelse er beregnet vha. AKTIVSOL med anvendelse af de korrektionsfaktorer for solfangerhældning, vindhastighed, indfaldsvinkel og diffus stråling, der blev fundet i kapitel 4.2 til 4.5.

stråling, der blev fundet i kapitel 4.2 til 4.5.

Som det ses, er der fin overensstemmelse mellem målt og beregnet solfangerydelse og den beregnede ydelse følger godt med til trods for de meget store og bratte udsving i solbestrålingsstyrke/solfangerydelse.

Den beregnede ydelse ligger generelt lidt lavere end den målte og den gennemsnitlige afvigelse mellem målt og beregnet solfangerydelse over hele måleperioden er 4,2%.



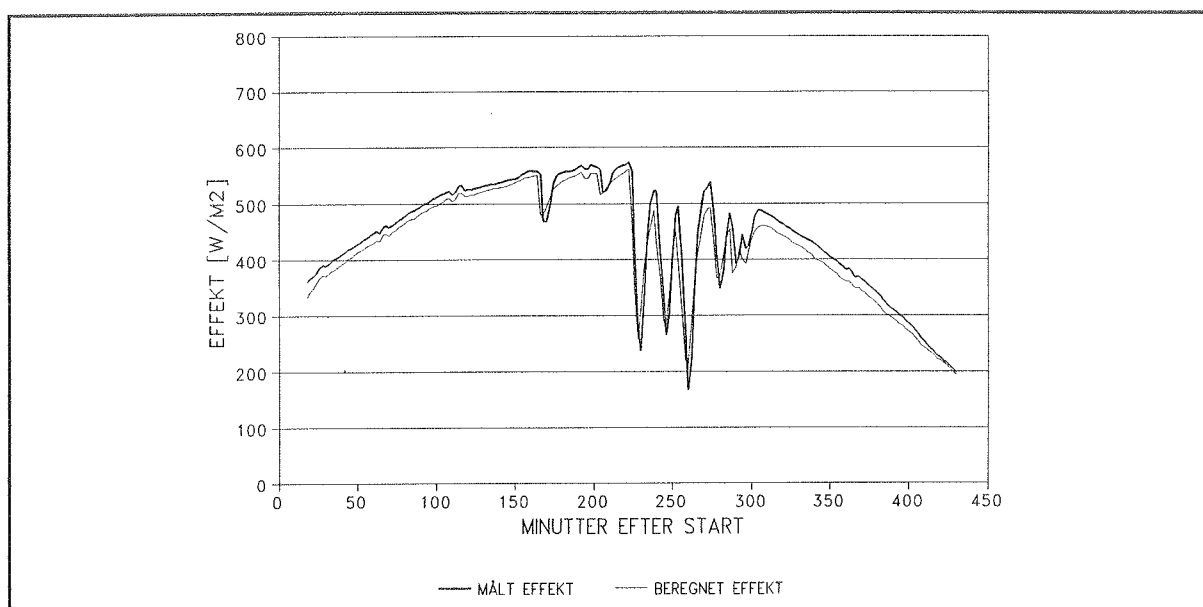
Figur 14. Målt og beregnet solfangerydelse for Solfanger I, standard flow

7.1.2 Sammenligning for low-flow

Den målte og forventede solfangerydelse for Solfanger I er for low-flow vist på figur 15. Den forventede ydelse er beregnet vha. AKTIVSOL med anvendelse af de korrektionsfaktorer for solfangerhældning, vindhastighed, indfaldsvinkel og diffus stråling samt flow, der blev fundet i kapitel 4.2 til 4.6.

Som det ses er der fin overensstemmelse mellem målt og beregnet solfangerydelse og den beregnede ydelse følger godt med til trods for de store og bratte udsving i solbestrålingsstyrke/solfangerydelse.

Igen ligger den beregnede solfangerydelse lidt under den målte og den gennemsnitlige afvigelse mellem målt og beregnet solfangerydelse over hele måleperioden er 3,7%.



Figur 15. Målt og beregnet solfangerydelse for Solfanger I, low-flow

7.2 Diskussion af sammenligninger mellem målt og beregnet solfangerydelse

Som tidligere nævnt er der i beregningerne ikke taget hensyn til variationer i udstråling fra solfangeren til himmel og øvrige omgivelser. Betydningen af dette er i denne forbindelse lille, da:

- Himmeltemperaturen har kun relativ lille betydning ved vurderingen af solfangeres ydelse [2]
- Sigtet med de gennemførte undersøgelser var at give en metode til at beskrive solfangeres ydelse under low-flow. Vejrforholdene mht. vindhastighed og såvel himmel- som jordtemperatur var næsten ens under både standard og low-flow målingerne. Det betyder, at der blev begået "samme fejl" ved begge målinger, og at fejlen ved sammenligning mellem standard og low-flow kan elimineres.

For såvel standard som low-flow ligger den beregnede solfangerydelse lidt under den målte, men forskellen er relativ lille og for begge de undersøgte flow-tilfælde er den gennemsnitlige forskel mellem målt og beregnet ydelse ca 4%. Selv ved stærkt svingende ydelser er modellen i stand til at give en god beskrivelse af den forventede solfangerydelse.

8. KONKLUSION

Sigtet med nærværende projekt var at gennemføre en detaljeret undersøgelse af solfangeres ydelse ved varierende masseflow med henblik på at udvikle en metode til at forudsige langtidsydelse for low-flow solfangere under realistiske drift- og vejrforhold. Undersøgelserne har fokuseret på solfangeren som komponent alene.

Der blev foretaget en række karakteriseringsmålinger for to forskellige serieproducerede solfangere (Solfanger I og II) ved såvel standard som low-flow. De fleste målinger skete i LfV's indendørs solsimulator, men der blev også foretaget effektivitetsmålinger ved standard og low-flow i en udendørs prøvestand i Schweiz på to solfangere magen til Solfanger I og II.

En simpel og anvendelig metode til karakterisering af solfangerydelse som funktion af flow blev beskrevet, idet det foreslås, at flowets indflydelse på ydelsen beskrives vha. en "korrektionsfaktor for flow" K_M , defineret som $K_M = \eta_{lowflow} / \eta_{standard}$.

På baggrund af de gennemførte karakteriseringsmålinger i Danmark og Schweiz opnåedes følgende resultater:

- Der blev fundet meget fin overensstemmelse mellem standard effektivitetsmålingerne foretaget indendørs i Danmark og udendørs i Schweiz
- Solfangernes ydelse som funktion af solfangerhældning, vindhastighed over dæklaget, indfaldsvinkel og diffus andel samt masseflow blev karakteriseret og der blev opstillet korrektionsfaktorer for hver af disse parametre
- Ved low-flow målingerne blev det som ventet konstateret, at solfangerydelsen kun påvirkes lidt ved variationer i flowet, idet der blev målt ydelsesreduktioner på max 6% ved en flowreduktion til under 10% af standard flowet på 0,02 kg/sm²
- Solfangernes varmetab var stort set uafhængigt af flowet, dog lå varmetabet ved low-flow en smule over varmetabet ved standard flow (max 3%).

Som opfølgning på de gennemførte karakteriseringsmålinger blev der foretaget udendørs ydelsesmålinger for Solfanger I ved såvel standard som low-flow. Formålet

var at kontrollere den fundne korrektionsfaktor for flow K_M under realistiske driftforhold. På basis af de gennemførte målinger af vejr- og driftforhold blev der foretaget beregninger af den forventede solfangerydelse ved både standard og low-flow. Beregningerne blev udført vha. et numerisk beregningsprogram under hensyntagen til de fundne korrektionsfaktorer. For såvel standard som low-flow blev der fundet en middel afvigelse mellem beregnet og målt ydelse på ca 4%. Den beregnede ydelse i tilfældet med low-flow under hensyntagen til K_M beskrev altså solfangerydelsen med samme nøjagtighed som i tilfældet med standard flow.

På denne baggrund konkluderes det, at solfangerydelsen som funktion af flowet med tilstrækkelig nøjagtighed kan karakteriseres ved en korrektionsfaktor for flow K_M , og at denne kan findes ved nogle få indendørs effektivitetsmålinger ved varierende flow i en solsimulator.

Den ydelsesreduktion for solfangeren som komponent, der i projektet er observeret ved low-flow drift bekræfter, at det er samspillet mellem solfangeren og lagertanken, der resulterer i, at low-flow solvarmeanlæg har højere ydelse end standard flow anlæg.

SYMBOLLISTE

A	Solfangerens transparente areal [m ²]
a, b	Regressionskonstanter
C_f	Solfangervæskens varmekapacitet [J/kgK]
C_s	Solfangerens varmekapacitet [J/m ² K]
D	Ydre diameter [m]
D_i	Indre diameter [m]
F	Finnfaktor
F'	Solfangerens effektivitetsfaktor
F''	Solfangerens flow faktor
F_R	Solfangerens heat removal factor
G	Solbestrålingsstyrke [W/m ²]
G_d	Diffus solbestråling [W/m ²]
h_{fi}	Varmeoverføringskoefficient mellem rør og væske [W/m ² K]
h_{ld}	Varmeoverføringskoefficient mellem luft og dæklag [W/m ² K]
i	Solbestrålingens indfaldsvinkel [°]
k_0	Varmetabskoefficientens startværdi [W/m ² °K]
k_1	Varmetabskoefficientens temperaturkoefficient [W/m ² °K ²]
k_l	Varmeledningsevnen for luft [W/mK]
K_d	Korrektionsfaktor for diffus stråling
K_G	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus andel i solbestråling
K_i	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel
K_M	Korrektionsfaktor for masseflow
K_S	Korrektionsfaktor for solfangerens hældning
K_V	Korrektionsfaktor for vindens hastighed over solfangerens dæklag.
l	Karakteristisk længde [m]
\dot{m}	Masseflow [kg/sm ²]
M	Masseflow [kg/s]
Nu	Nusselts tal
o	Solfangers omkreds [m]
o_i	Indvendig omkreds af kanal [m]
P_d	Diffus andel af solbestråling
Pr	Prandtls tal
Q_t	Varmetabet fra solfangerens dæklag [W]
Q_u	Solfangerydelse [W]
Re	Reynolds tal

S	sol-fangerhældningen [$^{\circ}$]
t	Tid [s]
Δt	Tidsskridt [s]
T_a	Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T_d	Temperatur af dæk-lagets yderside [$^{\circ}\text{C}$]
T_{diff}	Temperaturdifferens over sol-fangeren [K]
T_i	Væskens indløbstemperatur i sol-fangeren [$^{\circ}\text{C}$].
T_m	Middeltemperatur af sol-fangervæsken [$^{\circ}\text{C}$]
T_u	Væskens udløbstemperatur fra sol-fanger [$^{\circ}\text{C}$]
U	Varmetabskoefficient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
U_0	Varmetabskoefficienten fra væsken til omgivende luft [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
U_L	Varmetabskoefficienten fra absorber til omgivende luft [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
U_S	Varmetabskoefficient ved varierende hældning [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
U_v	Varmetabskoefficient ved varierende vindhastigheden [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
V	Vindhastighed over dæk-laget [m/s]
η	Sol-fangerens øjeblikkelige effektivitet
η_0	Sol-fangerens starteffektivitet
η_{korr}	Sol-fangerens korrigerede effektivitet
η_{low}	Sol-fangerens effektivitet ved low-flow drift
$\eta_{standard}$	Sol-fangerens effektivitet ved standard flow drift
ν	Kinematisk viskositet [m^2/s]
σ	Termisk diffusivitet [m^2/s]
$(\tau\alpha)_{e,i}$	Effektivt transmittans-absorptans produkt for sol-fangeren ved vilkårlig indfaldsvinkel i
$(\tau\alpha)_{e,i=0}$	Effektivt transmittans-absorptans produkt for sol-fangeren ved indfaldsvinkel $i = 0^{\circ}$

REFERENCER

- [1] Draft International Standard ISO/DIS 9806-1.2, 1992.
- [2] Solar Engineering of Thermal Processes, 2. udgave
John A. Duffie & William A. Beckmann, 1991.
- [3] Simuleringsprogram for Aktive Solvarmeanlæg, Eksamensprojekt
Jane Nielsen, Jens Rahbek
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1993.
- [4] Kurvetilpasning, Hæfte 53
Per Christian Hansen
Numerisk Institut, DTU.
- [5] ISPRA 1982
Workshop on Solar Simulators
Proceedings.
- [6] Anvendelse af forskellige væsker i solvarmeanlæg, Eksamensprojekt
Henrik Nielsen
Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1980.
- [7] Formler til varmetransmission
H. Saustrup Kristensen
Instituttet for Fluid Mekanik, 1990.
- [8] Danvak
Varme- og klimateknik
Grundbog
H. E. Hansen, P. Kjerulf-Jensen, Ole B. Stampe, 1987.
- [9] Low flow test procedures and results
Svend Svendsen
Laboratoriet for Varmeisolering
Rapport 92-22, 1992.

- [10] Conversion of indoor measurements to outdoor long term performances for low flow solar collectors
Karsten Duer and Svend Svendsen
ISES 1993, Budapest, Proceedings.

BILAG A USIKKERHEDSBEREGNING FOR EFFEKTIVITETSMÅLINGER I SOLSIMULATOR

Udarbejdet af Ole Holck, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Universitet.

Følgende er et eksempel på udregning af usikkerheden på en effektivitetsmåling for en konkret solfanger svarende til Solfanger I.

Effektiviteten udtrykkes ved udtrykket $f(x_i)$:

$$\eta = f(x_i) = \frac{M \cdot C_f \cdot T_{diff}}{A \cdot G} \quad (1)$$

hvor M = Masseflow [kg/s]
 C_f = Solfangervæskens varmekapacitet [J/kgK]
 T_{diff} = Temperaturdifferens over solfangeren [K]
 A = Solfangerens transparente areal [m²]
 G = Middel solbestrålingsstyrke på solfangerplanet [W/m²]

M , C_f , T_{diff} , A og G er indgangsdata x_i , og er alle kilder til usikkerhed.

Ved de følgende beregninger anvendes væskedata for 50% propylenglykol, medens der i nærværende projekt er anvendt 33% ethylenglykol. Det er dog uden videre betydning, da det er usikkerheden på fastlæggelse af glykolindholdet og regressionsudtrykket for C_f , der har interesse, varmekapaciteten for de to væsker er stort set ens.

Værdierne til indgangsdata svarer til standardprøvning således at:

M = 0,05 kg/s
 C_f = 3780 J/kg K
 T_{diff} = 5 °C
 A = 2,53 m²
 G = 800 W/m²

På Laboratoriet for Varmeisolering er afvigelser på målingen af M fundet ved sammenligning med målinger af M ved vejningsforsøg. Den maximale afvigelse blev fundet til 0,6 %.

Hvis forskellen mellem grænseværdierne er $2 \cdot 0,6$, er den estimerede varians:

$$S_M^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{0,05 \cdot 0,6}{100} \right)^2 = 3 \cdot 10^{-8} \quad (2)$$

Dette svarer til rektangulær fordeling af influensstørrelserne mellem de givne grænser.

Det benyttede udtryk for C_f er et regressionsudtryk med afvigelser fra oprindeligt fundne værdier på maksimalt $\pm 2\%$. Variansen på C_f , på grund af regressionsudtrykket er:

$$S_{C_f}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{3780}{100} \cdot 2 \right)^2 = 1905 \quad (3)$$

C_f afhænger af glykolindholdet givet ved følgende udtryk ved 20°C hvor x er glykolprocenten.

$$C_f = 4227,6 - 7,93x - 0,095x^2 \quad (4)$$

For 50% glykol blanding fås:

$$\frac{\delta C_f}{\delta x} = -7,93 - 2 \cdot 0,095 \cdot 50 = -17,5 \quad (5)$$

Afvigelsen i glykolprocenten ved opblanding af afvejede mængder er 1%. Variansen på grund af glykolprocenten er:

$$S_{C_{f_2}}^2 = -17,5^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1^2 = 102 \quad (6)$$

Sammensat fås for variansen på C_f :

$$S_{C_f}^2 = S_{C_{f_1}}^2 + S_{C_{f_2}}^2 \quad (7)$$

$$S_{C_f}^2 = 1905 + 102 = 2007 \quad (8)$$

For T_{diff} er der fundet afvigelser på $\pm 0,5\%$, den estimerede varians er derfor:

$$S_{T_d}^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{50,5}{100} \right)^2 = 2,08 \cdot 10^{-4} \quad (9)$$

Det transparente areal er sammensat af et længde mål 2,2 m og et breddemål 1,15 m

og for hver af disse antages afvigelser på 2 mm. Den estimerede varians er derfor:

$$S_A^2 = \frac{1}{3} \cdot 0,002^2 (2,20^2 + 1,15^2) = 8,22 \cdot 10^{-6} \quad (10)$$

G måles med en usikkerhed på 1,5%. Afvigelser i solbestrålingsstyrker er opgjort til 1%. Den estimerede varians er derfor:

$$S_G^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{800 \cdot 1,5}{100} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{800 \cdot 1}{100} \right)^2 = 69 \quad (11)$$

Sammensat fås variansen for effektiviteten til:

$$S_\eta^2 = \sum \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 \cdot S_{x_i}^2 \quad (12)$$

Her er $\delta f / \delta x_i$ den partielleafledede af funktionen f med hensyn til x_i .

$$\frac{\delta f}{\delta M} = \frac{C_f \cdot T_{diff}}{A \cdot G} \quad (13)$$

$$\frac{\delta f}{\delta C_f} = \frac{M \cdot T_{diff}}{A \cdot G} \quad (14)$$

$$\frac{\delta f}{\delta T_d} = \frac{M \cdot C_f}{A \cdot G} \quad (15)$$

$$\frac{\delta f}{\delta A} = - \frac{M \cdot C_f \cdot T_{diff}}{A^2 \cdot G} \quad (16)$$

$$\frac{\delta f}{\delta G} = - \frac{M \cdot C_f \cdot T_{diff}}{A \cdot G^2} \quad (17)$$

Disse størrelser udregnes svarende til standardprøvningsbetingelserne.

$$S_\eta^2 = \left(\frac{3750 \cdot 5}{2,53 \cdot 800} \right)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-8} + \left(\frac{0,05 \cdot 5}{2,53 \cdot 800} \right)^2 \cdot 2007 + \left(\frac{0,05 \cdot 3780}{2,53 \cdot 800} \right)^2 \cdot 2,08 \cdot 10^{-4} + \left(\frac{0,05 \cdot 3780 \cdot 5}{2,53^2 \cdot 800} \right)^2 \cdot 8,2 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{0,05 \cdot 3780 \cdot 5}{2,53 \cdot 800^2} \right)^2 \cdot 69 = 5,9 \cdot 10^{-5} \quad (18)$$

Den positive kvadratrods af variansen S_η^2 , er standardafvigelsen:

$$S_{\eta} = 0,0077 \quad (19)$$

Standardafvigelsen er et mål for den kombinerede usikkerhed af udgangs størrelsen η . Den samlede måleusikkerhed for målingen anføres som $\pm u$. Denne opnås ved at multiplicerer standardafvigelsen S_{η} med en faktor k :

$$u = k \cdot S_{\eta} \quad (20)$$

hvor $k = 2$ i følge WECC doc. 19-1990: Retningslinier for angivelse af måleusikkerhed ved kalibreringer. I tilfælde af Gauss-fordelingen betyder faktoren $k = 2$, at grænserne for den samlede usikkerhed gælder for et konfidensniveau på ca. 95%.

Det endelige resultat af målingen er således:

$$\eta \pm 0,015 \quad (21)$$

ved $T_{\text{diff}} = 5^{\circ}\text{C}$.

BILAG B UNDERSØGELSE AF STARTEFFEKTIVITETENS AFHÆNGIGHED AF VINDHASTIGHEDEN

Starteffektiviteten η_0 er produktet af $(\tau\alpha)_e$ -produktet og F' . $(\tau\alpha)_e$ -produktet beskriver solfangerens optiske egenskaber og er en konstant for hver solfanger. $(\tau\alpha)_e$ -produktet er derfor ikke afhængig af vindhastigheden.

F' beskriver forholdet mellem den aktuelle solfangerydelse og den ydelse solfangeren ville have, hvis solfangervæsken havde samme temperatur som solfangerens absorber. F' skal undersøges for de enkelte solfangergeometrier. F' beregnes af: [2]

$$F' = \frac{U_L^{-1}}{W ((U_L (D + (W - D) F))^{-1} + C_b^{-1} + (\pi \cdot D_i \cdot h_{fi})^{-1})} \quad (1)$$

- hvor
- W = Centerafstand mellem absorberrør [m]
 - D = Ydre diameter af absorberrør [m]
 - F = Finnefaktor
 - C_b = ledningsevne mellem absorberrør og absorberplade [W/mK]
 - D_i = Indvendig diameter af absorberrør [m]
 - h_{fi} = Varmeovergangskoefficient mellem inderside absorberrør og solfangervæsken [W/m²K]

Første led i nævneren er varmeoverføringsmodstanden fra absorberrør og finner til omgivende luft.

Andet led er varmeoverføringsmodstanden mellem finner og absorberrør.

Sidste led er varmeoverføringsmodstanden mellem absorberrør og væske.

Finnefaktoren F beregnes af (2): [2]

$$F = \frac{\tanh (0,5 \cdot M' (W - D))}{0,5 \cdot M' (W - D)} \quad (2)$$

C_b bestemmes af (3): [2]

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} \quad (3)$$

hvor k_b = Varmeledningsevne mellem absorber og rør [W/mK]
 b = Lodningsbredde [m]
 γ = Middel lodningstykkelse [m]

$$M' = \left[\frac{U_L}{k \cdot \delta} \right]^{1/2} \quad (4)$$

hvor k = Varmeledningsevnen for absorbermateriale [W/mK]
 δ = Absorberpladens tykkelse [m]

Ved varmetabsforsøgene er det ikke U_L , som bestemmes men U_0 . U_0 er varmetabskoefficienten fra væsken til luften. Da U_0 er lettere at bestemme end U_L , vil F' i første omfang blive beregnet som funktion af U_0 , derefter kan U_L bestemmes ud fra:

$$U_L = \frac{U_0}{F'} \quad (5)$$

Derefter vil F' igen blive bestemt.

Det ses af (5), at F' afhænger af U_L , som er en funktion af vindhastigheden. Denne afhængighed undersøges for både Solfanger I og II.

Solfanger I

Absorberen består af Sunstrips. Det antages, at ledningsevnen C_b mellem finne og absorberør er meget stor, hvorfor $1/C_b$ kan sættes lig 0. (1) reduceres nu til:

$$F' = \frac{U_L^{-1}}{W \left((U_L (D + (W - D) F))^{-1} + (\pi \cdot D_i \cdot h_f)^{-1} \right)} \quad (6)$$

D bestemmes som bredden af absorberkanalerne og idet strømning forudsættes turbulent bestemmes h_f af:

$$h_f = \frac{Nu \cdot k_f}{D_h} \quad (7)$$

D_h er den hydrauliske diameter [m].

Nu -tallet bestemmes ved: [7]

$$Nu = 0,023 \cdot Pr_f^{0,4} \cdot Re_{md}^{0,8} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,06} \quad (8)$$

hvor Re_{md} = Re-tal ved middelvæsketemperatur

Pr_w = Prandtl-tal ved vægtemperatur

Pr_f = Prandtl-tal ved væsketemperatur

For at bestemme Re-tallet skal temperaturniveauer for solfangervæsken og rørvæggen estimeres: Rørvæggen sættes til 45°C og væsken til 40°C.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{o_i \cdot \nu} \quad (9)$$

hvor o_i er absorberens indvendige omkreds

$$Pr = \frac{\nu}{\sigma} \quad (10)$$

Stofværdier for 33% ethylenglykol ifølge [6]:

$$\nu(40^\circ\text{C}) = 1,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu(45^\circ\text{C}) = 1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$C_f(40^\circ\text{C}) = 3682 \text{ J/kgK}$$

$$C_f(45^\circ\text{C}) = 3694 \text{ J/kgK}$$

$$k(40^\circ\text{C}) = 0,47 \text{ W/mK}$$

$$k(45^\circ\text{C}) = 0,48 \text{ W/mK}$$

Idet flowet i Solfanger I er 0,02 x 2,52 kg/s og o_i for Sunstrips er 0,028 m fås af (9) for en væsketemperatur på 42,5°C: $Re = 4300$. Da der er tale om en rørstrækning med mange bøjninger, kan antagelsen om turbulent strømning anses for opfyldt.

Af (10) findes $Pr_f = 14,1$ og $Pr_w = 13,5$

Ud fra (8) findes $Nu = 54$ og fra (7) findes $h_{fi} = 3700 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ud fra (2) og (4) bestemmes F som funktion af U_L , idet $W=0,143 \text{ m}$; $D=0,012 \text{ m}$; $k=237 \text{ W/mK}$; $\delta=0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$:

$$F = \frac{\tanh(0,190 \cdot U_L^{1/2})}{(0,190 \cdot U_L^{1/2})} \quad (11)$$

F' bestemmes af (6) for vindhastighederne 0,8 og 2,6 m/s, hvor U_o er målt til hhv. 3,20 og 3,44 W/m²K. Afvigelsen mellem de beregnede F' bestemmes til:

$$\text{Afvigelse} = \frac{F'(2,6 \text{ m/s}) - F'(0,8 \text{ m/s})}{F'(2,6 \text{ m/s})} \cdot 100\% = 0,2\% \quad (12)$$

Det ses, at vindhastighedens indflydelse på F' og dermed på η_o er meget lille.

Solfanger II

Solfanger II's absorber består af to plader, hvor væsken løber imellem. I udtrykket for F' vil der således ikke være noget bidrag fra ledningen mellem rørene og absorberpladen. Da $W = D$, reduceres (1) til:

$$F' = \frac{U_L^{-1}}{W \left((U_L \cdot W)^{-1} + (\pi \cdot D_i \cdot h_f)^{-1} \right)} \quad (13)$$

Det sidste led i nævneren udtrykker varmeovergangen mellem væsken og absorberpladen og kan beskrives ved $(2 \times h_f \times W)^{-1}$. Ved at benytte dette udtryk forudsættes det, at underpladen virker 100%, men da der ikke er perfekt termisk forbindelse mellem de to plader, regnes kun med halvdelen af den underste plade. Udtrykket for F' ser nu således ud:

$$F' = \frac{U_L^{-1}}{(U_L^{-1} + (1,5 \cdot h_f)^{-1})} \quad (14)$$

hvor

$$h_{fi} = \frac{Nu \cdot k_f}{l} \quad (15)$$

Nu kan under antagelse af laminart flow overslagsmæssigt findes af [8] til: $Nu = 7,54$ for længde \gg bredde. k_f bestemmes ved 40°C til $0,47 \text{ W/mK}$.

Der estimeres en middelfast l mellem absorberpladerne ved at benytte solfangerens væskeindhold og overfladeareal: $l = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}$

Af (15) findes nu: $h_{fi} = 1450 \text{ W/m}^2\text{K}$.

F' bliver bestemt for vindhastigheder på $0,9$ og $2,4 \text{ m/s}$, hvor U_0 er målt til hhv. $3,94$ og $4,29 \text{ W/mK}$. Afvigelsen mellem de beregnede F' bestemmes til:

$$\text{Afvigelse} = \frac{F'(2,4 \text{ m/s}) - F'(0,9 \text{ m/s})}{F'(2,4 \text{ m/s})} \cdot 100\% = 0,02\% \quad (16)$$

Ved beregningerne blev det antaget, at flowet var laminart. Hvis det tænkes, at Re -tallet bliver større, vil det resultere i et større Nu -tal. Dette vil igen betyde en større h_{fi} . En større h_{fi} vil betyde, at F' bliver mindre følsom overfor ændringer i U_L og dermed mindre følsom overfor ændringer i vindhastigheden.

For begge de undersøgte solfangere ses det, at vindhastighedens indflydelse på F' og dermed på η_0 er væsentlig mindre end usikkerheden på målingerne og vindhastighedens indflydelse på η_0 kan med god tilnærmelse negligeres.

