

Solsim

SIMULERINGSPROGRAM FOR SOLVARMEANLÆG

JENS RAHBEK & SVEND SVENDSEN

MEDDELELSE 273, JANUAR 1995

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

Indholdsfortegnelse

FORORD	i
RESUMÉ	ii-iii
SUMMARY	iv-v
INDLEDNING	1
1. BRUGERVEJLEDNING	2-21
1.1 Installation	2
1.2 Sådan bruges Solsim	3
1.3 Fil	4-6
1.4 Komponenter	7-12
1.5 Simulering	13-14
1.6 Systemer	15-16
1.7 Resultater	17-21
2. NUMERISK BEREGNINGSMETODE	22-27
2.1 Beregning af temperaturer i komponenter m. termisk varmekapacitet	23-24
2.2 Beregning af temperaturer i komponenter u. termisk varmekapacitet	25
2.3 Beregningsgangen	25-26
Symboliste	27
3. SOLFANGER	28-35
3.1 Beregning af temperaturen i solfangeren	28-29
3.2 Korrektionsfaktorer	29-32
3.3 Vejrdata	32-33
Symboliste	34-35
4. RØR	36-38
4.1 Model 1	36
4.2 Model 2	37
Symboliste	38
5. LAGERTANK	39-70
5.1 Numerisk diffusion	40
5.2 Grundlæggende model	41-46
5.3 Energibalance	46-51
5.4 Varmetab	51-53
5.5 Tilpasning af model	54-56
5.6 Varmedledning	56-62
5.7 Validering af modellen	62-69
5.8 Vurdering af modellen	69
Symboliste	70

6.	VARMEVEKSLER	71-77
6.1	Ekstern modstrømsvarmeveksler	71-72
6.2	Intern spiralvarmeveksler	72-76
	Symbolliste	77
7.	RESULTATER	78-79
	REFERENCER	80

Forord

I dette projekt er der udviklet et program til simulering af aktive solvarmeanlæg. Programmet er udviklet i forbindelse med projektet "Udvikling af referenceprogram og sammenligning af solvarmeanlægstyper" med støtte fra Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi m.v.

Der er i programmet anvendt resultater og programkode udviklet i samarbejde med afgangspjektstuderende på Laboratoriet for Varmeisolering. Der rettes derfor en speciel tak til Jane Nielsen, Jerry M. Jensen, Alexander Schadow og Frank F. Jensen der gennem deres afgangspjekter har bidraget til udviklingen af Solsim.

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

Professor Svend Svendsen	(Projektleder)
Civilingeniør Jens Rahbek	(Projektansvarlig)

Resumé

Der er i dette projekt blev udviklet et edb-program til simulering af aktive solvarmeanlæg. Programmet kan i sin nuværende form simulere 8 solvarmeanlæg. Disse anlæg er udformet som foreslået af BPS-arbejdsgruppen for mellemstore solvarmeanlæg.

Der er overalt i programmet forsøgt at anvende præcise og detaljerede beregningsmetoder og modeller. Således er der benyttet nye og forbedrede metoder for beregning af :

1. Solfangerens effektivitet.

Der benyttes et nyt effektivitetsudtryk til beregning af solfangerens effektivitet. Dette udtryk bygger på flere korrektionsfaktorer, der bedre beskriver solfangerens effektivitet under almindelige driftsforhold. Modellen beskrives i kapitel 3.

2. Solstråling på solfangeren.

Den totale solstråling på solfangeren beregnes efter en algoritme udviklet af Perez /11/. Denne model giver en mere detaljeret beregning af solindstrålingen under anisotrope forhold, idet der tages hensyn til det cirkumsolare bidrag fra den diffuse stråling, samt bidraget af diffus stråling fra området ved horisonten.

Modellen har vist en bedre overensstemmelse med målte data /12/ end en isotrop model og en række andre anisotrope modeller.

3. Reference vejrdata.

I simuleringerne anvendes data fra det nye Design Reference Year (DRY), hvor både timeværdier for temperatur, vindhastighed, global stråling, diffus stråling og direkte, normal stråling, samt korttidsværdier (5. min.) for direkte normal stråling er tilgængelige. Det er således muligt at anvende 5 minutters værdier i stedet for timeværdier.

4. Lagertankes temperaturprofil.

Der benyttes en model, hvor temperaturprofilet op gennem lagertanken beskrives ved et sammenhængende temperaturprofil. Dette giver en mindre numeriske diffusion i tanken end med den almindelig anvendte model med fast lagtemperatur. Metoden er beskrevet i kapitel 5.

Til programmet er desuden lavet en brugerflade, der gør det lettere at bruge programmet. Denne brugerflade er grafisk opbygget således, at det anlæg der ønskes simuleret vises på skærmen, ligesom det under simuleringen er muligt at få udtegnet temperaturer på udvalgte steder i anlægget.

SUMMARY

For this project a computer program for simulation of active solar heating systems was developed. The present form of the program can be used for simulation of eight solar heating systems. These systems have all been made according to the proposals made by a BPS (Planning System for Construction) working group for medium-sized solar heating systems.

All through the program exact and detailed calculation methods and models have been used, and new and better methods have thus been used for calculation of:

1. The efficiency of the solar collector.

A new efficiency equation for calculation of the efficiency of the solar collector. This equation also includes several correction factors by means of which it is possible to give a better description of the efficiency of the solar collector under ordinary working conditions. The model is described in chapter 3.

2. Solar radiation on the solar collector.

The total solar radiation on the solar collector is calculated according to an algorithm developed by Perez /11/. When using this model you will have a more detailed calculation of the solar radiation under anisotropic conditions as also the circumsolar contribution from the diffuse radiation and the diffuse radiation from the horizon area are considered.

The model has given a better agreement with the measured data /12/ than an isotropic model and a number of other anisotropic models.

3. Reference weather data.

For the simulations data are used from the new Design Reference Year (DRY), from which you will have both hourly values for temperature, wind velocity, global radiation, diffuse radiation and direct normal radiation and short time

values (intervals of 5 minutes) for direct normal radiation. It is therefore possible to use 5 minute values instead hourly values.

4. Temperature profile of the storage tank.

A model, for which the temperature profile through the storage tank is described as a unbroken temperature profile, is used. This will give a smaller numeric diffusion in the storage tank than when using an ordinary model with fixed stratified temperatures. The method is described in chapter 5.

A user interface has also been made for the program that makes it easier to use. This user interface is graphically made to show the system to be simulated on the screen and during simulation to plot the temperatures of chosen places in the system.

Indledning

I denne meddelelse beskrives simuleringsprogrammet Solsim. Solsim er et program til simulering af aktive solvarmeanlæg. Programmet er udviklet til at kunne beregne forholdene i aktive solvarmeanlæg meget detaljeret og der er derfor forsøgt på, at anvende detaljerede og præcise beregningsudtryk til beskrivelse af de enkelte komponenter i anlæggene.

En følge af anvendelsen af de detaljerede beregningsudtryk er, at beregningstiden for en årssimulering af et anlæg er væsentligt længere end for tilsvarende programmer. Beregningstiden for en årssimulering med Solsim vil således typisk tage 1-2 timer på en 486 baseret computer.

Solsim er således tænkt som et program, der anvendes til forskning i og optimering af solvarmeanlæg og komponenter. Desuden kan programmet bruges som referenceprogram for andre programmer eller beregningsmetoder.

Det er i programmet muligt at vælge mellem en række forskellige anlægsudformninger og angive data for de enkelte komponenter i det valgte anlæg. Opbygning af nye typer anlæg er mulig men kræver indsigt i den programmæssige opbygning af Solsim. Hvorledes dette gøres vil ikke blive beskrevet i denne meddelelse.

Denne meddelelse beskriver brugen af programmet og teorien bag. I kapitel 1 findes en brugervejledning til programmet Solsim, der kort beskriver brugen af programmet og programmets inddata. Kapitlerne 2-6 beskriver teorien bag programmet mens kapitel 7 viser resultater fra simuleringer med programmet.

1 Brugervejledning

1.1 Installation

Programmet Solsim kan køre på alle IBM-kompatible pc'ere med harddisk og VGA-farveskærm. Da programmet er meget beregningskrævende anbefales som minimum en pc'er med 486-processor.

I det efterfølgende vil ord eller symboler skrevet med **fed** henviser til taster på tastaturet, ord skrevet med *fed+kursiv* henviser til ord på menuerne i Solsim, og ord skrevet med dobbelt understreg + kursiv henviser til filer, der bruges af Solsim.

Programmet installeres på harddisken ved at isætte installationsdisketten i diskettedrevet og starte filen INSTALL. Som standard installeres programmet fra A-drevet til C-drevet, hvor der oprettes et nyt bibliotek kaldet C:\SOLSIM. Hvis programmet skal installeres på eller fra et andet drev, kan dette gøres ved at rette i INSTALL filen med en tekst editor.

Installationsprogrammet opstarter Solsim efter installationen og der kan nu arbejdes med programmet.

Når programmet fremover skal startes, gøres dette ved at taste **solsim** fra biblioteket C:\SOLSIM.

Hvis resultaterne fra simuleringerne ønskes udskrevet på printer, kan det være nødvendigt at ændre den port hvortil udskriften dirigeres. Dette gøres ved at ændre i filen solsim.ini med en tekst editor. Som standard udskrives der til LPT3.

1.2 Sådan bruges Solsim

Når Solsim startes fremkommer nedenstående skærbillede :



Figur 1.1 : Skærbillede ved opstart af Solsim

Øverst ses en menubjælke, der indeholder programmets hovedmenupunkter.

Det er muligt at bevæge sig rundt i de forskellige menuer og menupunkter ved hjælp af pilene på tastaturet. Et menupunkt vælges ved at taste **return**, hvilket medfører, at der fremkommer en dialogbox til indtastning af data. Dialogboxe kan afsluttes ved at taste **return** eller **esc**. Ved brug af **return** gemmes eventuelle ændringer, hvilket ikke sker ved brug af **esc**. **Space** tasten bruges til sletning af tekst og tal.

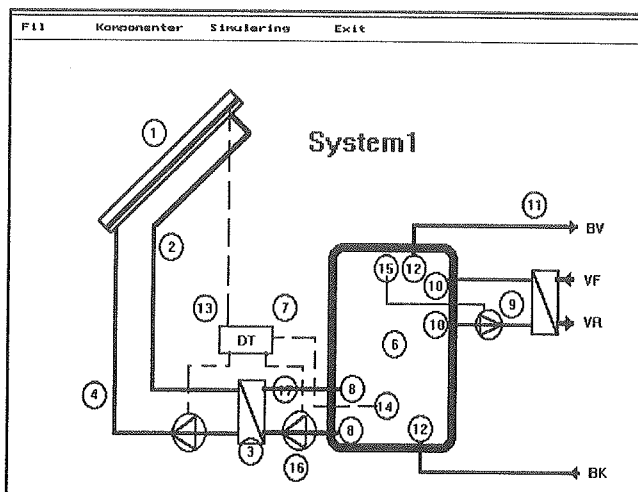
Det er ikke muligt at benytte en mus.

I det følgende vil de enkelte menupunkter under hver af hovedmenuerne blive beskrevet.

1.3 Fil

Anlægsdata

En simulering af et solvarmeanlæg startes med indlæsning af data for anlæget. Dette gøres ved at vælge *anlægsdata* under *fil* i hovedmenuen. Dernæst vælges den ønskede anlægsfil i dialogboxen ved brug af pilene og **return**, hvorefter et billede af det valgte anlæg fremkommer på skærmen.



Figur 1.2 : Skærbillede efter indlæsning af anlægsdata.

Vejrdata

Under *vejrdata* angives solfangerens hældning i grader, hvor 0° svarer til vandret, og 90° svarer til lodret. Solfangerens orientering angives ligeledes i grader i intervallet $[-180^\circ - +180^\circ]$, hvor 0° svarer til sydvendt solfanger og 90° til vestvendt osv. Det er muligt at anvende vilkårlige referencevejrdata, blot formatet af disse er som beskrevet i rapporten Solstrålingsdata /7/.

Med programmet følger filerne *cop.dat* og *cop_5min.dat* som indeholder henholdsvis timeværdier og 5 minutters værdier med vejrdata for København baseret på DRY.

Ved ændring af hældning, orientering eller referencefil beregnes der straks nye vejrdata for solfangeren. Dette tager ca. 2 min.

Vejrdata	
Solfangerhældning [°]:	45.00
Solfangerorientering [°]:	0.00
Reference vejrdata:	cop.dat

Figur 1.3 : Dialogbox til inddatering af solfangerplacering og reference vejrdata.

Forbrugsdata

Under *forbrugsdata* vælges en fil med et aftapningsprofil for varmt brugsvand for et døgn. Denne fil skal have samme tid mellem data som den valgte fil med reference vejrdato. Med programmet følger filerne forbrug.dat og forbrug 5min.dat, der indeholder aftapningsprofiler med henholdsvis time- og 5 minutters værdier. Filen forbrug.dat indeholder således følgende forbrugsmønstre:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.2	0	0	0	0	0	1.4	4.8	7.2	8.4	7.0	4.5
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3.6	5.0	2.7	2.3	2.1	3.8	6.8	11.6	9.6	6.9	4.6	5.5

Øverste linie er klokkeslæt, og nederste linie er procentdel af det totale døgnforbrug. Med ovenstående forbrugsmønster falder således 2,2 pct. af forbruget mellem kl. 24.00 og kl. 1.00. Forbruget regnes at være konstant mellem hvert hele timeslag.

Forbrugsfilen kan efter behov ændres med en tekst editor.

Resultatfil

Navnet på resultatfilen vælges under *resultatfil*. Resultatfilen placeres i biblioteket data under solsim. Resultatet af en simulering bliver automatisk gemt i denne fil efter simulering. Hvis der i forvejen eksisterer en fil med samme navn bliver denne således overskrevet.

Gem anlægsdata

Under *Gem anlægsdata* gemmes de indtastede data i en fil. Navnet på den fil, hvori disse data gemmes, skal have extension *sys*, for at disse data senere kan indlæses igen. Programmet gemmer ikke automatisk ændringer i data, hvorfor det er nødvendigt, selv at gemme anlægsdata på en fil inden afslutning af programmet eller indlæsning af nye anlægsdata.

Se resultatfil

Vælges ***Se resultatfil*** udskrives resultatfil på skærmen. Det er muligt at gennemse filen ved at trykke på **pil ned** tasten. For at vende tilbage til hovedmenuen trykkes på **esc**.

Print resultatfil

Vælges ***Print resultatfil*** udskrives resultatfilen til printer. For opsætning af printer se afsnit 2 om installation.

1.4 Komponenter

Efter at anlægsdata er indlæst, vil der under hovedmenupunktet *komponenter* være et menupunkt svarende til hver af anlæggets komponenter. Ud for hvert menupunkt findes et nummer svarende til det nummer komponenten har på tegningen (se figur 1.2).

For at redigere i data for en komponent vælges den pågældende komponent på menuen og en dialogbox til inddatering vil fremkomme.

Der er ikke indbygget nogen form for fejlcheck i SolSim, så det er op til brugeren selv at kontrollere, at inddata er korrekte. Hvis der således er fejl i inddata gives ingen fejlmeddelelse, men programmet vil regne forkert eller stoppe.

Solfanger

Inddatering af data for solfanger sker gennem nedenstående dialogbox.

1. Solfanger		
Solfangerareal [m ²]		50.00
Varmekapacitet [J/Km ²]		13730.00
Eta_0 for solfanger		0.750000
k0 for solfanger		4.850000
k1 for solfanger		0.016000
Temp. ved prøvning [°C]		26.00
Koefficienter til korrektion for:		
Væskestrøm, kf0	1=ingen	0.984670
Væskestrøm, kf1	0=ingen	0.739480
Hældning, ks0	1=ingen	1.111000
Hældning, ks1	0=ingen	-0.002500
Vind og stråling, Kvr01	1=ingen	1.002160
Vind og stråling, Kvr02	0=ingen	-0.002220
Vind og stråling, Kvr03	0=ingen	0.001100
Vind og stråling, Kvr1	1=ingen	0.898680
Vind og stråling, Kvr2	0=ingen	0.040880
Vind og stråling, Kvr3	0=ingen	-0.000360
Indfaldsvinkel, a	0=ingen	3.900000
Starttemp. af solfanger [°C]		0.000000
Temperaturplot (J/N)		J
Energi til fil (J/N)		J

Figur 1.4 : Dialogbox til angivelse af data for solfanger.

Ved beregning af solfangerens effektivitet er det muligt at benytte en række korrektionsfaktorer. Forklaring af disse korrektionsfaktorer findes i kapitel 3.

Hvis kun η_0 (Eta_0 i dialogboxen), k_0 og k_1 kendes for solfangeren angives disse, og for de øvrige korrektionsfaktorer indsættes 0 eller 1 som angivet i dialogboxen. Dette vil bevirke at solfangerens effektivitet kun beregnes ud fra η_0 , k_0 og k_1 .

Nederst i dialogboxen kan vælges om temperaturen i solfangeren skal vises under simuleringen, og om den summerede energi ud af solfanger skal udskrives på fil.

Lager

Indlæsning af data for lagertanken sker gennem nedenstående dialogbox:

6. Lagertank	
Volumen [m ³]	2.94
Diameter af beholder [m]	1.50
Højde af beholder [m]	1.94
Tykkelse af beholdervæg [mm]	7.00
Ledningsevne af beholdervæg [W/(K*m)]	50.00
Væskens massefylde [kg/m ³]	1000.00
Væskens varmekapacitet [J/kg*K]	4185.00
Væskens varmeledningsevne [W/(K*m)]	0.62
Varmetabskoefficient [W/(m ² *K)]	0.50
Antal lag i beholderen [1-15]	7
Starttemperatur [°C]	50.00
Omgivelsestemperatur [°C]	20.00
Temperaturplot (J/N)	J
Placering af føler [m over bund]	1.94

Figur 1.5 : Dialogbox til angivelse af data for lagertank.

Her angives først volumen af væsken og tankens indvendige dimensioner. Hvis tankens indvendige dimensioner ikke passer med det angivne volumen, anvendes det angivne volumen, mens tankens indvendige dimensioner automatisk korrigeres internt i programmet. Korrektionen sker på en måde, så størrelsen h/d^2 er ens før og efter korrektionen. De korrigerede værdier bliver ikke udskrevet, men hvis højden af tanken korrigeres med mere end 5%, kommer programmet med en advarsel.

Dernæst angives data for væske og beholdervæg. Varmetabskoefficienterne skal angives pr. arealenhed af beholderens indvendige areal.

Der kan frit vælges, hvor mange lag beholderen beregningsmæssigt skal inddeles i inden for intervallet [1-15]. Da beregningsmodellen for tanken laver et nyt lag for hvert rør ind i tanken, vil programmet dog inddele tanken i flere lag end angivet, hvis antallet af

rør er større end det indtastede antal lag.

Rørtilslutning til tank

Indlæsning af data for rørtilslutninger til lagertanken sker gennem nedenstående dialogbox:

8. Rørpar til varmeveksler	
Indløbshøjde [m over bund]	0.45
Udløbshøjde [m over bund]	0.05
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

Figur 1.6 : Dialogbox til angivelse af rørtilslutninger til tank.

Placeringen af ud- og indløb skal angives i forhold til bunden af lagertanken.

Rør

Indlæsning af data for rør sker gennem nedenstående dialogbox.

4. Rør til solfanger	
Længde af rør [m]	25.00
Varmekapacitet [J/mK]	1424.00
Varmetabskoefficient [W/mK]	0.2200
Starttemperatur [°C]	20.00
Placering ude (J/N)	N
Omgivelsestemperatur [°C]	20.00
Pumpeeffekt [W]	500
Andel af pumpeeffekt til væsken	0.50
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

Figur 1.7 : Dialogbox til angivelse af data for rør.

For røret angives længden, varmekapaciteten af røret pr. m. incl. væske, samt rørets varmetabskoefficient pr. m.

Hvis røret ikke er placeret ude angives en konstant temperatur for rørets omgivelser.

Hvis der på røret er indskudt en pumpe, angives pumpens nominelle effekt samt hvor stor en del af denne effekt, der afsættes i væsken.

Ekstern Varmeveksler

For eksterne varmevekslere kan der vælges enten konstant effektivitet eller konstant varmeoverføringskoefficient.

3. Varmeveksler i solkreds	
Konstant effektivitet ? (J/N)	J
Effektivitet [%]	50.00
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

Figur 1.8 : Dialogbox for varmeveksler med konstant effektivitet.

3. Varmveksler (Uarm)	
Konstant effektivitet ? (J/N)	N
Varmeoverføringskoeff. UA [W/K]	2000
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

Figur 1.9 : Dialogbox for varmeveksler med konstant varmeoverføringskoefficient.

Menuen skifter automatisk, når der skiftes mellem konstant effektivitet og konstant varmeoverføringskoefficient.

Væske flow

Indlæsning af data for væskeflow i solkredsen sker i nedenstående dialogbox:

7. Flow i sekundær solkreds	
Flow [l/s]	0.7700
Diff. temp for start [C]	6.00
Diff. temp for stop [C]	2.00
Solfanger temp for stop [C]	95.00

Figur 1.10 : Dialogbox for temperaturstyret flow.

Væskeflowet startes her når temperaturen i solfangeren er 6 °K højere end temperaturen af føleren i tanken, og stopper når differencen er nede på 2 °K. Når temperaturen ved solfangerens udløb overstiger 95 °C, stoppes flowet.

En anden styringsmulighed er tidsstyring af flowet, der benyttes for cirkulationsledninger. For denne styring fås nedenstående dialogbox:

20. Flow i cirkulationsledning	
Flow [l/s]	0.1000
Start time for flow [time]	6
Stop time for flow [time]	20

Figur 1.11 : Dialogbox for tidsstyret flow.

Her angives i hvilket tidsrum, der skal være flow. Hvis der ønskes flow hele døgnet, sættes start til 1 og stop til 24.

Forbrug

Indlæsning af data for forbrug sker i nedenstående dialogbox:

11. Forbrug	
Døgnforbrug [l]	3000.00
Brugsvandtemp. [°C]	45.00
Koldtvandtemp. [°C]	10.00
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

Figur 1.12 : Dialogbox for angivelse af forbrug.

Det angives her hvor mange liter der skal tappes pr. dag, og hvilken temperatur vandet skal tappes ved. Tappeprofilen er som angivet i forbrugsfilen (se afsnit 1.4).

Hvis vandet ved udløb er varmere end den ønskede temperatur, blandes der med koldt vand, og flowet fra tanken reduceres tilsvarende. Hvis vandet ved udløb er koldere, tappes den specificerede mængde ved den aktuelle temperatur.

Suppleringsenergi

Der findes i Solsim flere forskellige former for suppleringsenergi. Nedenstående dialogbox anvendes, hvor suppleringsenergien tilføres som et flow med konstant temperatur. Flowet styres af en temperaturføler.

19. Sup. energi	
Temp. af varmtvand [°C]	65.00
Temp for start [°C]	50.00
Flow [l/s]	0.10
Temperatur plot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

Figur 1.13 : Dialogbox for suppleringsenergi der tilføres som et flow med konstant temperatur.

Suppleringsenergi kan også tilføres ved at et givet flow opvarmes til en ønsket temperatur. I dette tilfælde fremkommer følgende dialogbox:

15. Sup. energi	
Temp. af varmtvand [°C]	50.00

Figur 1.14 : Dialogbox for suppleringsenergi der opvarmer til konstant temperatur.

Temperaturføler i tank

Placering af temperaturføler til styring af flow angives i nedenstående dialogbox:

14. Tempføler til solflow.	
Placering [m]	0.14
Temperatur plot (J/N)	J

Figur 1.15 : Dialogbox for temperaturføler.

Placeringen af føleren angives i forhold til bunden af tanken.

1.5 Simulering

Under hovedmenupunktet *simulering* findes de to undermenuer *drift parametre* og *start simulering*.

Simuleringsdata

Når punktet *Simuleringsdata* vælges, fremkommer nedenstående dialogbox:

Simuleringsdata	
Første dag:	1
Sidste dag:	365
Tid mellem resultater (t/d/m) :	m
Største tilladelige tidsskridt [s]	3600
Mindst tilladelige tidsskridt [s]	10
Max temp. ændring pr. tidsskridt [°C]	3.00

Figur 1.16 : Dialogbox til inddatering af data for simulering.

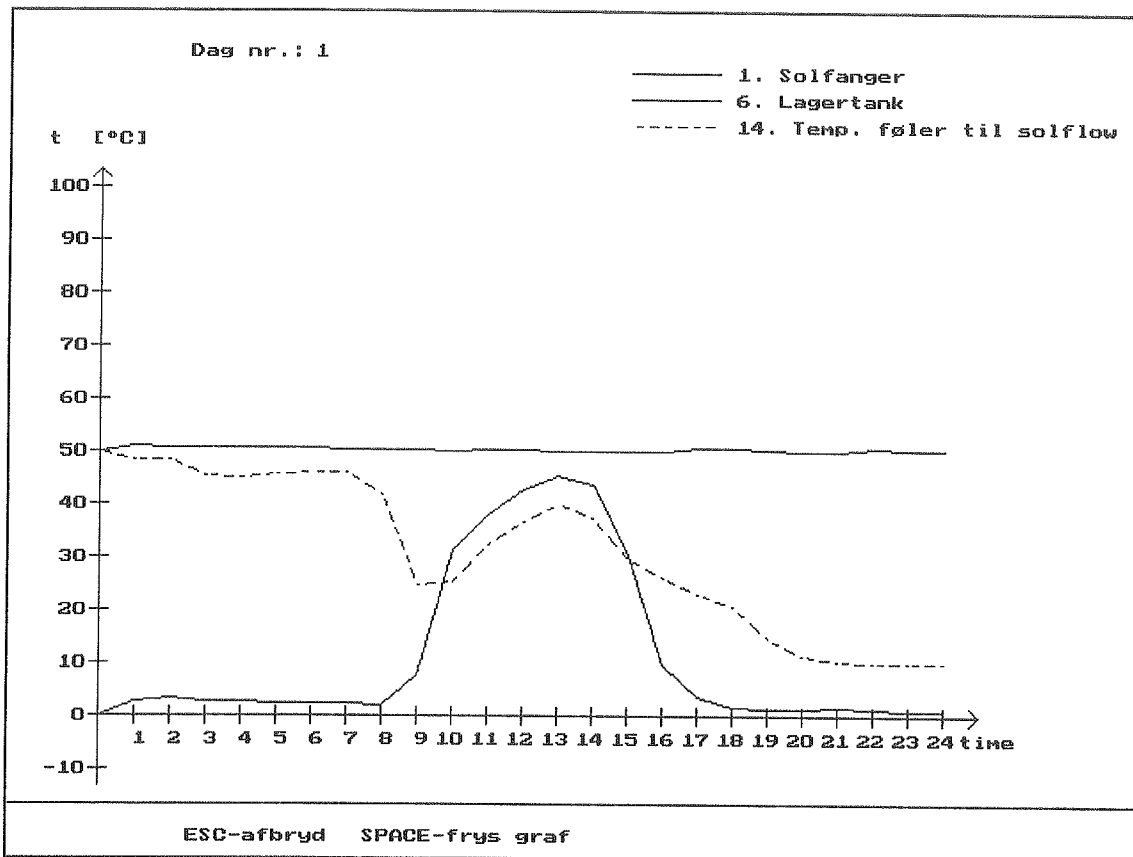
Det er her muligt at specificere den periode, der ønskes simuleret, ligesom det er muligt at specificere, hvor lang tid der skal være mellem udskrivning af summerede energier på fil.

Største og mindste beregningstidsskridt specificeres. Disse skal ligge i intervallet [0 - 3600] sekunder. Det mindst tilladelige tidsskridt bør ikke være for stort, da beregningerne derved kan divergere.

Desuden kan den maksimale temperaturændring i en komponent pr. beregningstidsskridt angives. Denne bør normalt ligge i intervallet [1-5] K. Programmet tilpasser ud fra dette løbende tidsskridtets længde, så dette kriterie overholdes.

Start simulering

Simuleringen startes ved at vælge *start simulering* og taste **return**. Nu vil simuleringen starte, og det er muligt at følge temperaturerne dag for dag i de udvalgte komponenter.



Figur 1.17 : Skærbillede ved simulering.

Simuleringen kan afbrydes ved at trykke på **esc**, hvorved resultatet af den simulerede periode udskrives til fil, og der vendes tilbage til hovedmenuen.

Simuleringen kan stoppes midlertidigt ved at trykke på mellemrumstasten. Her vil simuleringen stoppe ved dagens afslutning, og grafen af dagens temperaturer vil forblive på skærmen. Hvis programmet bliver kørt under Windows, kan skærbilledet nu kopieres til clipboardet ved at trykke på **Print Scrn**. Grafen kan da senere hentes ind i f.eks Paint Brush og udskrives. Simuleringen fortsættes ved at trykke på en vilkårlig tast.

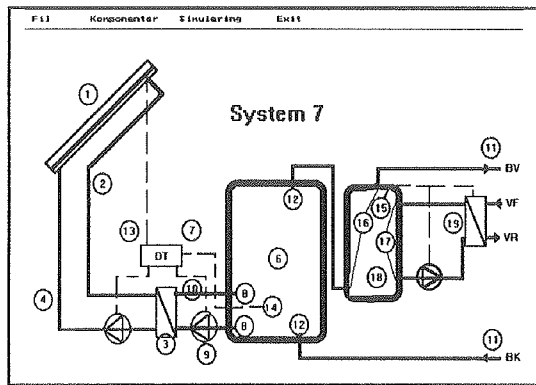
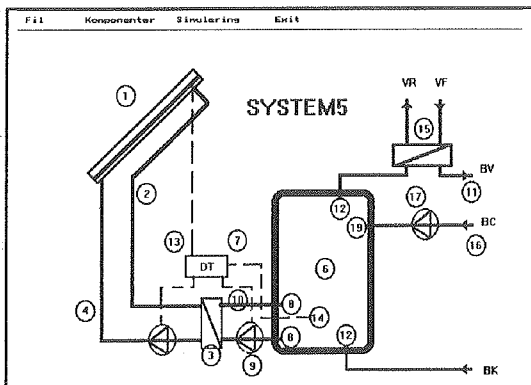
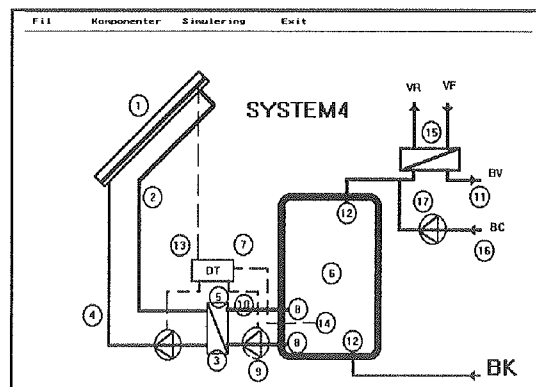
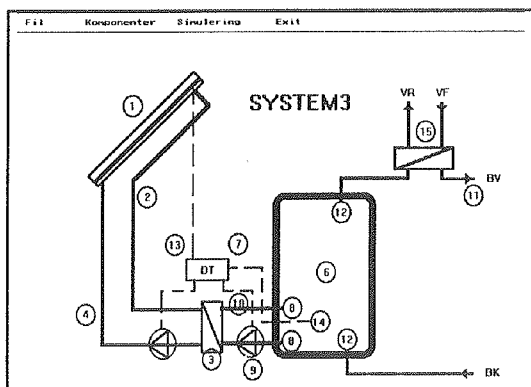
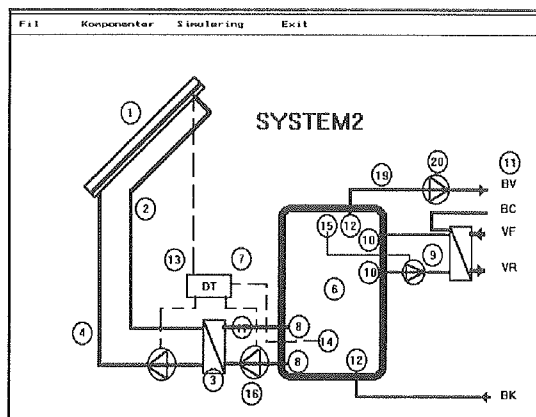
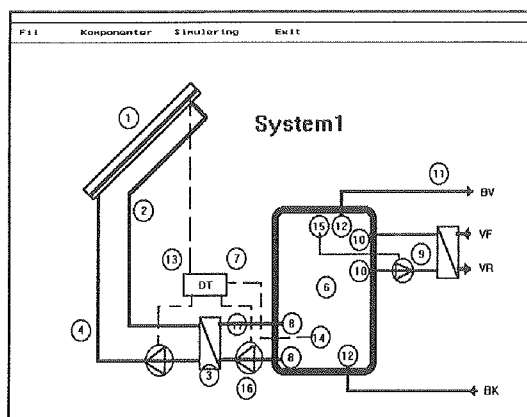
Hvis simuleringen ikke afbrydes, simuleres den ønskede periode. Resultat af simuleringen udskrives til fil, og der vendes tilbage til hovedmenuen.

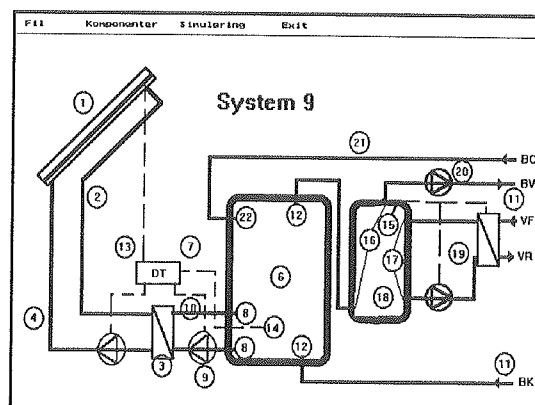
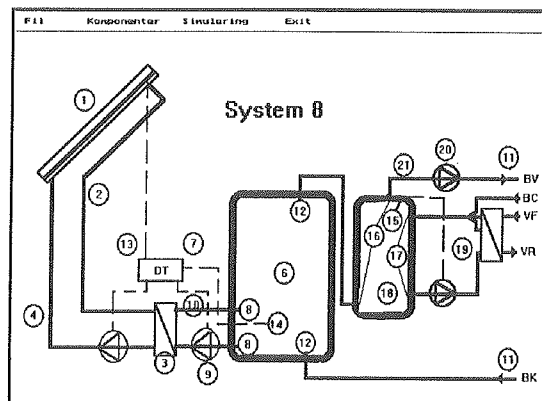
Resultater

Efter simuleringen kan resultatet ses i resultatfilen (se afsnit 1.4).

1.6 Systemer

I solsim findes der på nuværende tidspunkt følgende systemer:





1.7 Resultater

Efter simulering af et system dannes der en resultatfil som nedenstående. Denne fil kan enten vises på skærmen med **Se resultatfil**, udprintes med **Print resultatfil** eller hentes ind i et andet program.

```
*****
SYSTEM1.SYS
*****
*****
Simuleringsdata
*****
Første dag: 1
Sidste dag: 365
Tid mellem resultater (t/d/m) : m
Største tilladelige tidskridt [s] 3600
Mindst tilladelige tidskridt [s] 10
Max temp. ændring pr. tidskridt [°C] 3.00
```

Beregnete energier:

E1 = 1. Solfanger

E2 = 3. Varmeveksler i solkreds

E3 = 8. Rørpar til varmekvælsler

E4 = 9. Suppleringsenergi

E5 = 11. Forbrug

Beregnete energier angivet i kWh

Dag	Time	E1	E2	E3	E4	E5
31	24	412.33	-412.41	-422.66	3296.84	3787.85
59	24	998.57	-993.58	-1015.67	2436.83	3422.31
90	24	1259.04	-1256.49	-1286.79	2539.11	3787.08
120	24	2410.28	-2380.34	-2429.97	1337.31	3662.78
151	24	2878.13	-2839.71	-2895.24	937.31	3785.57
181	24	3242.34	-3168.68	-3226.13	563.45	3661.97
212	24	3054.83	-3010.24	-3071.75	736.45	3784.75
243	24	3102.75	-3053.85	-3112.82	762.68	3784.78
273	24	2367.45	-2347.09	-2397.17	1319.97	3663.48
304	24	1475.34	-1477.09	-1512.73	2291.26	3787.90
334	24	784.61	-792.23	-814.53	2877.13	3666.33
365	24	656.46	-661.18	-679.04	3141.34	3788.30

Total for den simulerede periode:

Dag	Time	E1	E2	E3	E4	E5
365	24	22642.13	-22392.89	-22864.50	22239.68	44583.10

Start tid : 30-12-1994 kl. 10.5

Stop tid : 30-12-1994 kl. 11.56

Komponent data

1. Solfanger

Solfangerareal [m2]	50.00
Varmekapacitet [J/Km2]	13730.00
Eta_0 for solfanger	0.750000
k0 for solfanger	4.850000
k1 for solfanger	0.016000
Temp. ved prøvning [°C]	26.00
Koefficienter til korrektion for:	
Væskestrøm, kf0	1=ingen 0.984670
Væskestrøm, kf1	0=ingen 0.739480
Hældning, ks0	1=ingen 1.111000
Hældning, ks1	0=ingen -0.002500
Vind og stråling, Kvr01	1=ingen 1.002160
Vind og stråling, Kvr02	0=ingen -0.002220
Vind og stråling, Kvr03	0=ingen 0.001100
Vind og stråling, Kvr1	1=ingen 0.898680
Vind og stråling, Kvr2	0=ingen 0.040880
Vind og stråling, Kvr3	0=ingen -0.000360
Indfaldsvinkel, a	0=ingen 3.900000
Starttemp. af solfanger [°C]	0.000000
Temperaturplot (J/N)	J
Energi til fil (J/N)	J

2. Rør fra solfanger

Længde af rør [m]	25.00
Varmekapacitet [J/mK]	1424.00
Varmetabskoefficient [W/mK]	0.2200
Starttemperatur [°C]	20.00
Placering ude (J/N)	N
Omgivelsestemperatur [°C]	20.00
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

3. Varmeveksler i solkreds

Konstant effektivitet ? (J/N)	N
Varmeoverføringskoeff. UA [W/K]	2000
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

4. Rør til solfanger

```
*****
Længde af rør [m]                                     25.00
Varmekapacitet [J/mK]                                 1424.00
Varmetabskoefficient [W/mK]                           0.2200
Starttemperatur [°C]                                   20.00
Placering ude (J/N)                                    N
Omgivelsestemperatur [°C]                             20.00
Pumpeeffekt [W]                                         500
Andel af pumpeeffekt til væsken                        0.50
Temperaturplot (J/N)                                   N
Energi til fil (J/N)                                   N
*****
```

6. Lagertank

```
*****
Volumen [m3]                                           2.94
Diameter af beholder [m]                             1.50
Højde af beholder [m]                                 1.94
Tykkelse af beholdervæg [mm]                         7.00
Ledningsevne af beholdervæg [W/(K*m)]                50.00
Væskens massefylde [kg/m3]                           1000.00
Væskens varmekapacitet [J/kg*K]                     4185.00
Væskens varmeledningsevne [W/(K*m)]                 0.62
Varmetabskoefficient [W/(m²K)]                      0.50
Antal lag i beholderen                               7
Starttemperatur [°C]                                  50.00
Omgivelsestemperatur [°C]                             20.00
Temperaturplot (J/N)                                  J
Placering af føler [m]                                1.94
*****
```

7. Flow i sekundær solkreds

```
*****
Flow [l/s]                                             0.7700
Diff. temp for start [C]                             6.00
Diff. temp for stop [C]                              2.00
Solfanger temp for stop [C]                          95.00
*****
```

8. Rørpar til varmeveksler

```
*****
Indløbshøjde [m]                                     0.45
Udløbshøjde [m]                                       0.05
Temperaturplot (J/N)                                  N
Energi til fil (J/N)                                  J
*****
```

9. Suppleringsenergi

```
*****
Temp. af varmtvand [°C]                              65.00
*****
```

Temp for start [°C]	50.00
Flow [l/s]	0.50
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

10. Rørpar til sup. energi

Indløbshøjde [m]	1.52
Udløbshøjde [m]	1.35
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

11. Forbrug

Døgnforbrug [l]	3000.00
Brugsvandstemp. [°C]	45.00
Koldtvandstemp. [°C]	10.00
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	J

12. Rørpar til tapning

Indløbshøjde [m]	0.05
Udløbshøjde [m]	1.94
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

13. Flow i primær solkreds

Flow [l/s]	0.7700
Specifikvarmekapacitet [J/(kg*K)]	3684.00
Massefylde [kg/m3]	1063.00

14. Temperaturføler til solflo

Placering [m]	0.14
Temperaturplot (J/N)	J

15. Temperaturføler til sup.

Placering [m]	1.55
Temperaturplot (J/N)	N

16. Rør fra beh. til v.veksler

Længde af rør [m]	3.00
Varmekapacitet [J/mK]	1424.00
Varmetabskoefficient [W/mK]	0.2200
Starttemperatur [°C]	20.00
Placering ude (J/N)	N
Omgivelsestemperatur [°C]	20.00
Pumpeeffekt [W]	500
Andel af pumpeeffekt til vasken	0.50
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

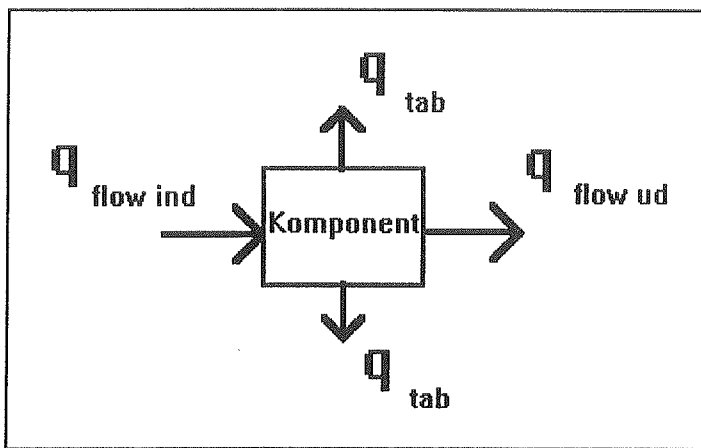
17. Rør fra v.veksler til beh.

Længde af rør [m]	3.00
Varmekapacitet [J/mK]	1424.00
Varmetabskoefficient [W/mK]	0.2200
Starttemperatur [°C]	20.00
Placering ude (J/N)	N
Omgivelsestemperatur [°C]	20.00
Temperaturplot (J/N)	N
Energi til fil (J/N)	N

2 Numerisk beregningsmetode

På grund af de transiente forhold i et solvarmesystem - bl.a. solstråling og det tid-safhængige forbrug - er det nødvendigt at opstille ligninger til beskrivelse af solvarmeanlægget i både tid og sted. I Solsim opstilles der således, for hver enkel komponent i systemet, ligninger til beskrivelse af temperatur i tid og sted.

For at forenkle beregningerne opdeles perioden, der ønskes simuleret i små beregningstidsskridt. Indenfor for hver af disse regnes påvirkningerne af den enkelte komponent konstante.



Figur 2.1 : Energiflow ud og ind af komponent.

De forskellige energiflow ind og ud af de enkelte komponenter regnes således konstante inden for et beregningstidsskridt.

Ud fra dette opstilles en energibalance for komponenten til beregning af komponentens temperatur.

$$\frac{\delta E_{indre}}{\delta t} = q_{flow\ ind} - q_{flow\ ud} - q_{tab} \quad (2.1)$$

↓

$$\frac{dT \cdot C}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ind} - T_{ud}) - q_{tab} \quad (2.2)$$

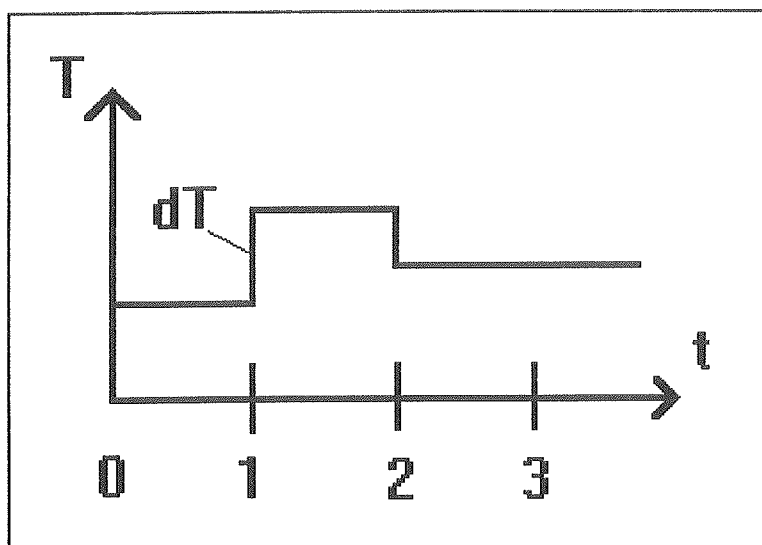
hvor q_{tab} er energiflowet forårsaget af ydre påvirkninger. Det bemærkes at q_{tab} kan have både negative og positive værdier afhængigt af omgivelsestemperaturer og evt. solstråling.

For at optimere beregningstiden opdeles anlæggets komponenter i to kategorier. Komponenter hvor komponentens varmekapacitet er stor sammenlignet med ændringerne af varmeindeholdet i komponenten, og komponenter hvor varmekapaciteten af komponenten vurderes at kunne negligeres. I hver strømningskreds skal der være mindst en komponent med termisk varmekapacitet, for at beregningerne kan startes.

Typisk medregnes varmekapaciteten for solfangere, lagertanke og lange rør, mens varmekapaciteten af varmevekslere og korte rør typisk negligeres.

2.1 Beregning af temperaturer i komponenter med termisk varmekapacitet

For komponenter hvor den termiske varmekapacitet medregnes regnes alle energiflow kendte i det betragtede tidsskridt. Dette betyder, at komponentens temperaturændring i tidsskridtet simpelt kan beregnes af formel 2.2.



Figur 2.2 : Temperaturændringer sker mellem beregningstids-skridtene.

Ændringen til tiden $t=1$ beregnes således på baggrund af forholdene i tiden $t=0$ til $t=1$. Den beregnede nye temperatur benyttes herefter i hele tidsskridtet fra $t=1$ til $t=2$. Ved benyttelse af denne metode er det nødvendigt med kontrol af længden af tidsskridtet, da beregningerne ellers kan divergere.

Kontrollen består i at begrænse længden af tidsskridtet, indtil den maksimale ændring af temperaturen i en komponent med termisk varmekapacitet er mindre end en fastsat størrelse. Størrelsen af denne temperaturændring ligger typisk i intervallet $[1-5]$ K.

2.2 Beregning af temperaturer i komponenter uden termisk varmekapacitet

For komponenter uden termisk varmekapacitet bliver venstresiden i formel 2.2 nul. Det svarer til, at der ikke kan oplagres energi i komponenten. Beregningsudtrykket bliver derfor:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ind} - T_{ud}) - q_{tab} = 0 \quad (2.3)$$

hvor T_{ud} i det betragtede tidsskridt kan beregnes under forudsætning af, at alle input til komponenten kendes i det betragtede beregningstidsskridt. Denne beregning svarer til, at der regnes med stationære forhold i komponenten.

2.3 Beregningsgangen

Beregningsgangen i programmet kan simpelt opdeles i syv hovedpunkter. Det forudsættes her, at der er indlæst data for et system, samt at der er beregnet vejrdata for systemets solfangere.

1. Indlæs vejrdata og data for forbrug fra fil.
2. Bestem væskeflow i de enkelte kredse i systemet.
3. Beregn temperaturer i alle anlæggets komponenter til tiden $t + \Delta t$.
4. Undersøg om præcisionskriteriet (se afsnit 2.1) er overholdt. Hvis præcisionskriteriet ikke er overholdt indsættes de gamle temperaturer igen, længden af beregningstidsskridtet, Δt halveres, og der går til punkt 3.
5. Beregn og summer energier i systemet. Disse værdi udgør resultatet af simuleringen.

6. Undersøg om beregningstidsskridtets længde, Δt kan fordobles, og gør det i så fald.
7. Undersøg om det er tid for indlæsning af nye vejrdato eller data for forbrug. I så fald gå til punkt 1 - ellers gå til punkt 2.

Punkt 1-7 gennemgås indtil den ønskede periode er simuleret. Løbende hermed udtegnes temperaturerne af udvalgte komponenter på skærmen, så brugeren kan kontrollere, om anlægget fungerer som ønsket.

Efter simuleringen udskrives de ønskede hovedtal for energiudvekslingerne i systemet (se afsnit 1.7)

Symbolliste

C	=	Komponentens effektive varmekapacitet incl. væske	[J/K]
c_p	=	Væskens specifikke varmekapacitet	[J/(kg ·K)]
E_{indre}	=	Den indre energi af komponent	[J]
$\dot{m}$	=	Masseflow	[kg/s]
t	=	Tiden	[s]
T	=	Temperatur	[°C]
T_{ind}	=	Indløbstemperatur af væske til komponenten	[°C]
T_{ud}	=	Udløbstemperatur af væske fra komponenten	[°C]
$q_{\text{flow,ind}}$	=	Varmekapacitetsstrøm ind i komponenten	[W]
$q_{\text{flow,ud}}$	=	Varmekapacitetsstrøm ud af komponenten	[W]
q_{tab}	=	Varmetabet fra komponenten	[W]

3 Solfanger

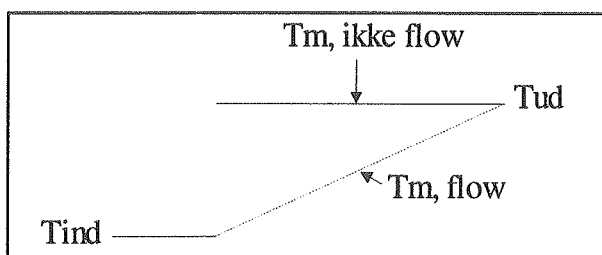
3.1 Beregning af temperaturen i solfangeren

Den ligning som beskriver solfangerens temperaturvariation med tiden er baseret på parametre fundet ved indendørs prøvninger.

$$C \cdot A \frac{dT}{dt} = A \cdot G \cdot \eta + \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ind} - T_{ud}) \quad (3.1)$$

Venstre side er ændringen i indre energi pr. tidsenhed, første led på højre side er tilført effekt fra solen og de tab, der er fra solfangeren. Andet led på højre side er energitransport som følge af væskestrømmen i solfangeren. Solfangerens effektive varmekapacitet, C , og udtrykket for effektiviteten, η , findes ved indendørs prøvninger.

Den temperatur der beregnes for komponenten svarer til udløbstemperaturen. Derfor er det nødvendigt at beregne den aritmetiske middeltemperatur til brug for effektivitetsudtrykket, når der er flow i solfangeren. Når der ikke er flow i solfangeren benyttes temperaturen, som beregnes med formel 3.1. direkte.



Figur 3.1: Middeltemperatur.

Alle vejrdata såsom udetemperatur, vind og total stråling, diffus stråling og solens indfaldsvinkel på dæklaget beregnes med programmet "SOLDATA", der er implementeret i SOLSIM. Dokumentation af SOLDATA findes i /7/.

Når temperaturen er beregnet, kan den effekt solfangeren leverer findes som:

$$E_{\text{solfanger}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T - T_{\text{ind}}) \quad (3.2)$$

Da solfangeren afprøves under standardforhold i prøvehallen, er det nødvendigt at korrigere effektivitetsudtrykket, således at det kan bruges under andre forhold. Nogle af disse korrektioner findes ud fra prøvninger af solfangeren, mens resten findes ved beregninger.

3.2 Korrektionsfaktorer

Følgende udtryk benyttes ved beregning af den transiente effektivitet:

$$\eta = K_f \cdot K_{id} \cdot K_{vr0} \cdot \eta_0 - \frac{K_f \cdot K_s \cdot K_{vr} \cdot k_0 \cdot (T_m - T_l)}{G} - \frac{K_f \cdot K_s \cdot K_{vr} \cdot k_1 \cdot (T_m - T_{lp}) \cdot (T_m - T_l)}{G} \quad (3.3)$$

hvor:

K_f	er korrektionsfaktor for masseflowet
K_{id}	er kombineret korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus solstråling
K_s	er korrektionsfaktor for solfangerhældning
K_{vr0}	er kombineret korrektionsfaktor for vindhastighed og himmeludstråling relateret til η_0
K_{vr}	er kombineret korrektionsfaktor for vindhastighed og varme-stråling til himmel og jord
η_0 , k_0 og k_1	er konstanterne i standardeffektivitetsudtrykket
T_{lp}	er lufttemperatur under effektivitetsprøvning [$^{\circ}\text{C}$]
T_l	er udelufttemperaturen [$^{\circ}\text{C}$]
G	er bestrålingsstyrken på solfangeren [W/m^2]

Korrektionsfaktorernes værdi findes for hver enkel solfanger ved prøvning eller beregning med programmet SolEff /2/.

Solfangerens middeltemperatur beregnes som:

$$T_m = \frac{(T_{ind} + T_{ud})}{2} \quad (3.4)$$

Korrektionsfaktor K_f for væskens masseflow

Som det ses af (3.3) bliver korrektionsfaktoren K_f for væskens masseflow anvendt på hele effektivitetsudtrykket. Følgende lineære korrektionsudtryk anvendes :

$$K_f = k_{f0} + k_{f1} \cdot \dot{m} \quad (3.5)$$

hvor $\dot{m}$ er det aktuelle flow.

Korrektionsfaktor K_{id} for solstrålingens indfaldsvinkel og diffus stråling

Den kombinerede korrektionsfaktor for den direkte solstrålings indfaldsvinkel og den diffuse solstråling, K_{id} , korrigeres for indfaldsvinklens afvigelse fra standard testbetingelser ($i=0^\circ$) og for den diffuse strålingsandel (p_d). Den påvirker kun den del af effektivitetsudtrykket, der omfatter solfangerens starteffektivitet, idet indfaldsvinklen selvsagt ikke påvirker varmetabet fra solfangeren. Den sammensatte korrektionsfaktor er givet ved

$$K_{id} = \frac{K_i G_{dir} + K_d G_{diff}}{G} \quad (3.6)$$

Tællerens første led angiver den direkte strålings bidrag og udtrykkes ved

$$K_i = 1 - \tan^a\left(\frac{i}{2}\right) \quad (3.7)$$

Konstanten, a bestemmes ved prøvning af solfangeren eller beregnes, hvis dæklaget er plant glas.

Det andet led i formel 3.6 's tæller er den diffuse andel af korrektionsfaktoren, der findes ved at indsætte en vinkel på 60° i formel 3.7.

$$K_d = K_i(60^\circ) \quad (3.8)$$

Idet den diffuse andel af den totale solindstråling betegnes p_d , er det sammensatte korrektionsudtryk for indfaldsvinkel og diffus solstråling givet ved

$$K_{id} = K_i(i) \cdot (1 - p_d) + K_i(60^\circ) \cdot p_d \quad (3.9)$$

Korrektionsfaktor $K_{vr(0)}$ for vindhastighed og himmeludstråling

Afvigelse af vindhastighed, himmelstrålingstemperatur i forhold til testbetingelserne nødvendiggør en korrektion af effektivitetsudtrykket (3.1). Dette gøres ved de to korrektionsfaktorer K_{vr0} og K_{vr} , hvor K_{vr0} korrigerer maksimaleffektiviteten og K_{vr} varmetabet.

Korrektionsfaktoren for maksimal-effektiviteten kan skrives som:

$$K_{vr0} = k_{vr01} - k_{vr02} \cdot v^{0,6} + k_{vr03} \cdot (T_{\text{himmel}} - T_l) \quad (3.10)$$

Tilsvarende findes korrektionsfaktoren relateret til varmetabet som:

$$K_{vr} = k_{vr1} + k_{vr2} \cdot v^{0,6} - k_{vr3} \cdot (T_{\text{himmel}} - T_l) \quad (3.11)$$

Korrektionsfaktor K_s for solfangerens hældning

Korrektionsfaktoren for solfangerens hældning, K_s , er udelukkende relateret til solfangerens varmetab og angivet ved forholdet mellem varmetabet ved den pågældende vinkel og varmetabet ved en vinkel på 45° .

Udtrykket for K_s korrektionsfaktor er givet ved:

$$K_s = k_{s0} - k_{s1} \cdot s \quad (3.12)$$

hvor k_{s0} og k_{s1} bestemmes ved prøvning af solfangeren.

3.3 Vejrdata

Udendørsparametre findes ud fra referenceår. Et referenceår med vejrdata indeholder en lang række tidsmæssigt sammenhørende værdier for udelufttemperatur, vindhastighed og solbestrålingsstyrken. Solstrålingen er angivet som global og diffus stråling på vandret og direkte normalstråling.

For beregning af solfangerens effektivitet er det nødvendigt at kende solbestrålingsstyrken på solfangeren. Der skal derfor foretages en omregning af solstrålingsdata til solfangerens orientering og hældning.

Den totale solstråling på solfangeren beregnes efter en algoritme udviklet af Perez [/11/, Ref. Solar Energy vol. 39, pp. 221-231]. Denne model giver en mere detaljeret beregning af bestrålingsstyrken under ikke isotrope forhold, idet der tages hensyn til det cirkumsolare bidrag fra den diffuse stråling, samt bidraget af diffus stråling fra området ved horisonten.

Modellen har vist en bedre overensstemmelse med målte data [/12/, Ref. Solar Energy, vol. 53, pp. 155-162] end en isotrop model og en række andre anisotrope modeller.

I simuleringerne anvendes data fra det nye Design Reference Year (DRY), hvor både timeværdier for temperatur, vindhastighed, global stråling, diffus stråling og direkte, normal stråling, samt korttidsværdier (5. min.) for direkte normal stråling er tilgængelige.

Beskrivelse af beregningsmodellen for solstråling samt dokumentation af beregningsrutinerne findes i rapporten "Solstrålingsdata" /7/.

Beregningsmodellen er indbygget i Solsim, og der er foretaget sammenligninger af de beregnede solbestrålingsstyrker med tilsvarende beregninger med programmet EMGP3 /1/. Her blev det danske referenceår benyttet, og der blev beregnet solstråling på en sydvendt flade med en hældning på 45° .

Sammenligningen viser at den beregnede totale solstråling på fladen over året er 4.5% større ved beregning med Solsim end med EMGP3 /1/. Den største afvigelse forekommer om sommeren, mens vintermånederne giver næsten identiske resultater.

Da Solsim benytter en nyere og mere detaljeret metode til beregning af solstråling på vilkårlige flader end EMGP3, vurderes de af Solsim beregnede solintensiteter at være de mest korrekte.

Symbolliste

η	=	Solfangerens øjeblikkelige effektivitet	
η_0	=	Maksimaleffektiviteten af solfangeren, målt når $T_1 = T_m$	
A	=	Areal	$[m^2]$
a	=	Konstant til beregning af korrektionsfaktor for indfaldsvinkel	
C	=	Solfangerens varmelagringskapacitet	$[J/m^2K]$
c_p	=	Væskens specifikke varmekapacitet	$[J/kgK]$
$E_{\text{solfanger}}$	=	Effekt fra solfanger til det øvrige system	$[W]$
G	=	Total solstråling	$[W/m^2]$
i	=	Solstrålingens indfaldsvinkel	$[^\circ]$
K_f	=	Korrektionsfaktor for masseflowet	
K_{id}	=	Kombineret korrektionsfaktor for indfaldsvinkel og diffus solstråling	
K_s	=	Korrektionsfaktor for solfangerhældning	
K_{vr0}	=	Kombineret korrektionsfaktor for vindhastighed og himmeludstråling relateret til η_0	
K_v	=	Kombineret korrektionsfaktor for vindhastighed og himmeludstråling relateret til varmetabet	
k_0	=	Første varmetabskoefficient	$[W/m^2K]$
k_1	=	Anden varmetabskoefficient	$[W/m^2K^2]$
k_{f0}	=	Første konstant til beregning af korrektionsfaktor for flow	$[]$
k_{f1}	=	Anden konstant til beregning af korrektionsfaktor for flow	$[s/kg]$
k_{s0}	=	Første konstant til beregning af korrektionsfaktor for hældning	
k_{s1}	=	Anden konstant til beregning af korrektionsfaktor for hældning	$[1/^\circ]$
k_{vr01-3}	=	Konstanter til beregning af korrektionsfaktor vindhastighed og himmelstråling	
k_{vr1-3}	=	Konstanter til beregning af korrektionsfaktor vindhastighed og himmelstråling	
K_d	=	Konstant til beregning korrektionsfaktor for indfaldsvinkel	
K_i	=	Konstant til beregning af korrektionsfaktor for indfaldsvinkel	
k_s	=	Korrektionsfaktor for solfangerens hældning	
$\dot{m}$	=	Massestrøm	$[kg/s]$

p_d	=	Andelen af diffus stråling	
s	=	Solfangerens hældning	[°]
t	=	Tiden	[s]
T	=	Solfangerens øjeblikkelige temperatur	[°C]
T_{ind}	=	Væskens indløbstemperatur	[°C]
T_l	=	Lufttemperaturen	[°C]
T_{lp}	=	Lufttemperaturen ved prøvning	[°C]
T_m	=	Solfangerens middeltemperatur	[°C]
T_{ud}	=	Væskens udløbstemperatur	[°C]

4 Rør

Som omtalt i kapitel 2 skal der i hver strømningskreds mindst være en komponent med termisk kapacitet for hvilken det gælder, at udløbstemperaturen i et tidsskridt er uafhængig af indløbstemperaturen i samme tidsskridt.

Da denne type komponenter er bestemmende for, hvor store beregningstidsskridt der kan anvendes, bør det tilstræbes at anvende så få af denne type komponenter som muligt og kun hvor den termiske kapacitet af komponenten er "stor" sammenlignet med ændringerne af varmeindeholdet i komponenten under simuleringerne.

På grundlag af dette anvendes der to modeller til beskrivelse af rør.

4.1 Model 1

Temperaturen i model 1 beregnes efter følgende formel:

$$c \cdot L \frac{dT}{dt} = -k \cdot L (T_m - T_{omg}) + \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ind} - T_{ud}) \quad (4.1)$$

Venstre side er rørets ændring i indre energi pr. tidsenhed, første led på højre side er varmetabet til omgivelserne, andet led er ændringen i energiindholdet i strømningsretningen.

Her beregnes T_m som for solfangeren (se afsnit 3.1).

Model 1 benyttes hvor den termiske kapacitet af røret er "stor" sammenlignet med det termiske flow gennem røret. (typisk lange rørstrækninger).

4.2 Model 2

I denne model beregnes udløbstemperaturen direkte, idet følgende energibetragtning anvendes :

$$Q_{ud} = Q_{ind} - Q_{tab} - \Delta E_{rør} \quad (4.2)$$

⇕

$$T_{ud} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot dt = T_{ind} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot dt - (T_{ud} - T_{omg}) \cdot k \cdot L \cdot dt - (T_{ud} - T_{old}) \cdot c \cdot L \quad (4.3)$$

⇕

$$T_{ud} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot dt \cdot T_{ind} + k \cdot L \cdot dt \cdot T_{omg} + c \cdot L \cdot T_{old}}{\dot{m} \cdot c_p \cdot dt + k \cdot L \cdot dt + c \cdot L} \quad (4.4)$$

Det bemærkes at i denne model skal indløbstemperaturen kendes i tidsskridtet, for at udløbstemperaturen kan beregnes.

Rørets varmetab beregnes ud fra rørets udløbstemperatur og omgivelsestemperatur.

Model 2 benyttes, hvor den termiske kapacitet af røret er "lille" sammenlignet med det termiske flow gennem røret. (typisk korte rør).

Symbolliste

c	=	Varmekapacitet pr. meter rør	[J/mK]
c_p	=	Varmekapacitet for væsken i røret	[J/kgK]
k	=	Varmetabskoefficient	[W/mK]
L	=	Rørlængde	[m]
$\dot{m}$	=	Massestrøm	[kg/s]
t	=	Tid	[s]
$E_{\text{rør}}$	=	Indre energi	[J]
Q_{ind}	=	Energi ind	[J]
Q_{tab}	=	Varmetab	[J]
Q_{ud}	=	Energi ud	[J]
T_{ind}	=	Indløbstemperatur til rør	[°C]
T_m	=	Rørets middeltemperatur	[°C]
T_{old}	=	Rørets udløbstemperatur i sidste tidsskridt	[°C]
T_{omg}	=	Omgivelsernes temperatur	[°C]
T_{ud}	=	Rørets udløbstemperatur	[°C]

5 Lagertank

Da de normalt anvendte modeller til simulering af lagertanke til solvarmeanlæg har tendens til at lave numerisk diffusion (temperaturudjævning i tanken, der ikke skyldes vandstrømninger eller varmeledning, men beregningsmetodens opdeling af tanken i lag og beregningstidsskridt), er det ønskeligt at lave en model som nedsætter eller fjerner dette problem.

I forvejen eksisterer der en model (plug-flow), som delvis undgår numerisk diffusion. Dette foregår ved, at hver gang der tappes en del af tanken, oprettes et lag af tilsvarende størrelse. Den numeriske diffusion fremkommer dermed kun ved sammenlægning af lag i tanken, når der er opstået for mange lag. Dette vil især forekomme ved store anlæg, hvor der benyttes eksterne varmevekslere.

Ved at tilpasse tidsskridtet så der tappes et helt antal lag pr. tidsskridt, kan den numeriske diffusion helt undgås. Afpasningen af tidsskridtet bliver dog et større regnskab, hvis der forekommer flere interne strømninger i tanken. Dette problem kan ikke umiddelbart løses i den normalt anvendte model med faste lag og lige store kontrolvoluminer.

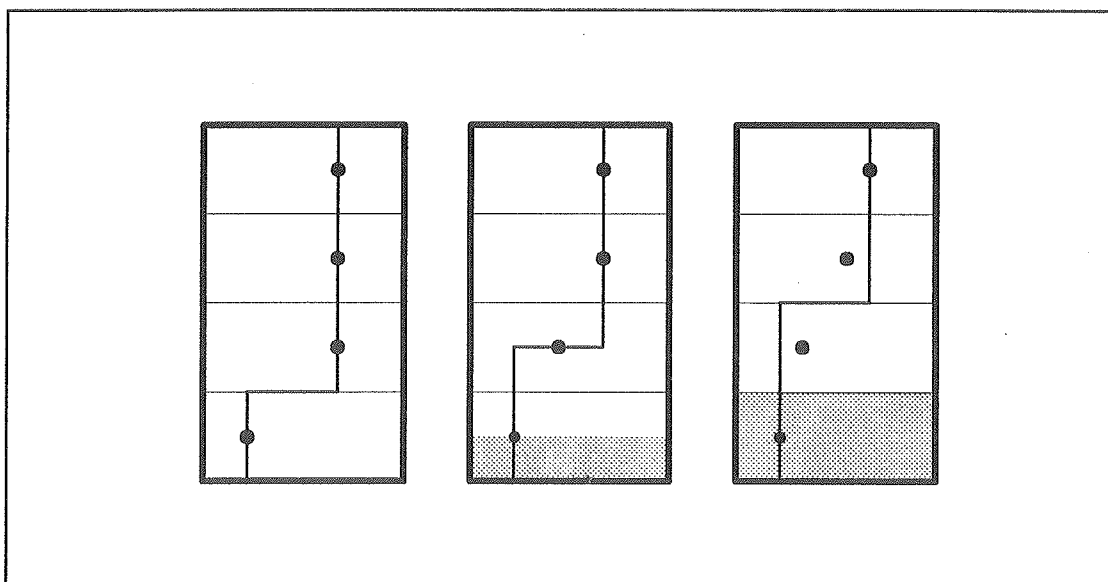
En anden model der giver mindre numerisk diffusion er en model, hvor temperaturene i lageret beskrives ved et sammenhængende temperaturprofil.

I Solsim benyttes en lagermodel, hvor temperaturprofilet beskrives ved sammenhængende rette liniestykker. Denne model nedbringer den numeriske diffusion væsentligt. Modellen er udviklet af Frank F. Jensen & Alexander Schadow efter ide af Prof. Svend Svendsen.

Modellen beskrives i det følgende.

5.1 Numerisk diffusion

Den normalt anvendte model til simulering af lagertanke til solvarmeanlæg benytter faste lag i tanken, hvor temperaturen i et lag repræsenteres af middeltemperaturen. Dette bevirker, at der rent numerisk foregår en opblanding i tanken, hvis der tappes en mængde, der ikke svarer til et helt lag i et tidsskridt. Et eksempel på dette fænomen ses i figur 5.1. Den fuldt optrukne linie viser hvordan temperaturprofilen ideelt vil flytte sig ved tapning af et halvt lag to gange. Tilsvarende ses middeltemperaturerne i lagene, som de vil udvikle sig i den normale model. Det ses, at den numeriske diffusion kan have stor betydning for temperaturprofilens udseende, og det er derfor ønskeligt at have en model, der minimerer dette problem. Det bør i denne anledning nævnes, at modellen, der repræsenterer temperaturen i hvert lag ved en middeltemperatur, bliver bedre m.h.t. numerisk diffusion, jo flere lag tanken inddeles i.



Figur 5.1: Numerisk diffusion i lagertank. Den fuldt optrukne linie viser det ideelle temperaturprofil. Punkterne viser temperaturudviklingen, hvis temperaturerne repræsenteres vha. middeltemperaturer.

5.2 Grundlæggende model

5.2.1 Forudsætninger

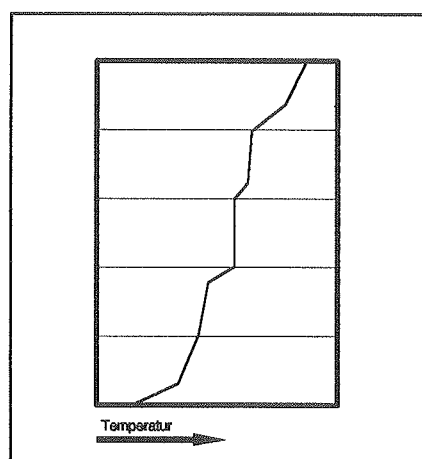
I modellen tages der ikke hensyn til vands varmeudvidelse, ligesom det kolde nedfald langs siderne af beholderen, forårsaget af væskens afkøling, negligeres. Vand udvider sig ca. 4 % fra 0-100°C, hvilket bl.a. bevirker at der ved opvarmning af en lagertank strømmer vand ud af denne. Hvis der samtidigt foregår en tapning vil væsken derimod strømme med udløbet, og der vil blive leveret et mindre volumen koldt vand til tanken, end det ville være tilfældet, hvis volumenet var konstant.

Det kolde nedfald langs siderne er meget svært at vurdere kvantitativt og simuleringsmæssigt vil det være næsten umuligt at efterligne, da fænomenet er afhængigt af både temperaturforholdene og dimensionerne af tanken.

Der regnes ikke med eventuelle rundinger i toppen og bunden, da alle tanke simuleret i denne model regnes som en opretstående cylinder med flad top og bund.

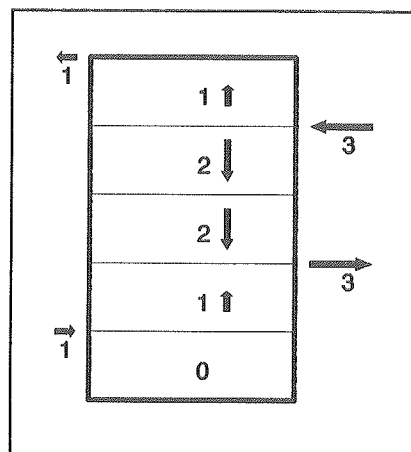
5.2.2 Model

Grundideen i modellen er, at temperaturen i tanken repræsenteres vha. rette liniestykker (fig 5.2). Dette giver et mere realistisk temperaturprofil end den normalt anvendte simuleringsmodel. Tanken inddeles i faste lag, der dog ikke behøver at have samme lagtykkelse. I hvert lag repræsenteres temperaturen vha. to liniestykker, idet temperaturerne i lagskellene antages at være faste, og et punkt inde i laget fastlægges, så energibalancen passer. Energiindholdet i tanken er hermed proportionalt med arealet til venstre for kurven, idet 0°C sættes til referencetemperatur for energien.



Figur 5.2: Lagertank med sammenhængende temperaturprofil.

Da modellen skal kunne klare flere interne strømninger, skal der placeres lagskel hvor der er ind- og udløb i tanken. Dette er nødvendigt for at holde styr på strømningerne, idet disse kan strømme i hver sin retning ved et indløb, eller vandet kan være stillestående på den ene side af ind/udløbet (figur 5.3).

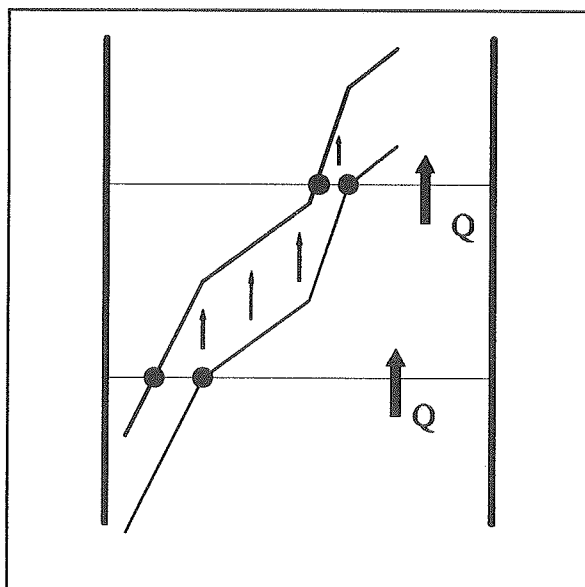


Figur 5.3: Strømningerne i tanken kan have forskellig størrelse og retning.

5.2.3 Tapning

Når der aftappes vand af tanken, strømmer der koldt vand ind i bunden. Hermed forskydes hele temperaturprofilet opad og skærer herefter lagskellene ved nye temperaturer (figur 5.4). Disse temperaturer antages nu at være faste, og det er da muligt, at placere et punkt i hvert lag, således at energibalancen m.h.t til de tilførte og afgivne effekter opfyldes.

Til placering af dette punkt ligger der en frihedsgrad, hvilket omtales senere. Samtidig med at temperaturprofilet flyttes opad, transporteres der også



Figur 5.4: Tapning. Temperaturprofilet flyttes opad i tanken og nye temperaturer fastlægges i lagskellene.

energi fra lag til lag. Denne energitransport afhænger dels af profilets hældning, samt af hvor stor en del af et lag der tappes i et tidsskridt.

I modellen kan der ikke tappes mere væske pr. tidsskridt, end der er i tankens tyndeste lag. Dette skyldes at et lags nye temperaturprofil bliver beregnet ud fra strømningerne og temperaturerne i lagene over og under.

5.2.4 Strømninger i tanken

I forbindelse med store lagertanke anvendes ofte eksterne varmevekslere. Dette er medvirkende til, at der foregår mange interne strømninger i tanken. Som følge af dette er der mange forskellige kombinationer af strømninger, der skal behandles.

Energiregnskabet foretages i lagskellene, da det er her ind- og udløb til tanken ligger. Problemet er opdelt i ni tilfælde, alt efter om strømmingen under lagskellet er opadgående, nedadgående eller står stille, kombineret med tilsvarende muligheder for strømmen i laget over lagskellet (tabel 5.1). Disse tilfælde behandles særskilt, idet teorien for de enkelte tilfælde dog er den samme.

Toppen og bunden behandles tilsvarende, idet disse svarer til lagskel hvor væsken er stillestående henholdsvis over og under lagskellet.

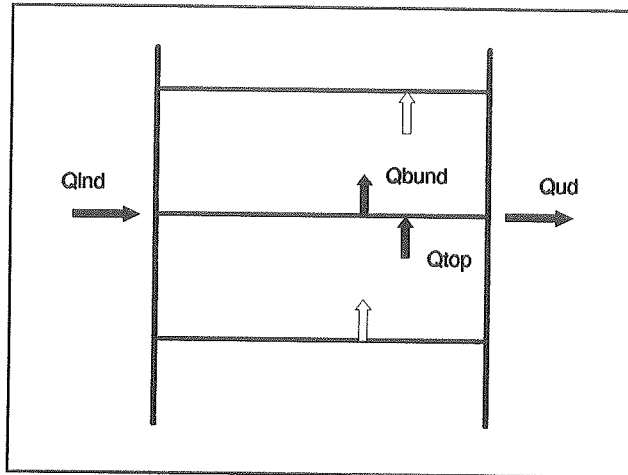
	Strømningsretning i tanken								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lag i	op	op	op	ned	ned	ned	ingen	ingen	ingen
Lag i-1	op	ned	ingen	op	ned	ingen	op	ned	ingen

Tabel 5.1: Strømningsretning i lagene over og under et lagskel.

Et indløb kan dog tilføres et lag, som i princippet er stillestående. Dette beskrives i afsnit 5.2.6.

Nedenfor beskrives tre af de ni tilfælde, som belyser modellens virkemåde. I det følgende er Q_{bund} den energimængde, der til-/fraføres i bunden af et lag i et tidsskridt og Q_{top} tilsvarende for toppen af et lag.

1. Hvis der ligger et indløb, hvor strømningerne i lagene både over og under dette er opadgående (tilfælde 1 i tabel 5.1), flyttes energiindholdet fra indløbet sammen med den energi, der strømmer til lagskellet nedefra op i toppen af laget over indløbet (figur 5.5). I toppen af laget over lagskellet strømmer samme mængde vand ud, men med et energiindhold der er bestemt af temperaturprofilets udseende i laget.



Figur 5.5: Strømningerne i tanken er opadgående og ind/udløb ligger i lagskellet.

Hvis der også er et udløb i samme lagskel, blandes væskestrømmen fra laget under med den fra indløbet. Derefter fordeles den samlede energimængde til udløbet og laget over lagskellet, idet de i tidsskridtet strømmende volumener benyttes til vægtning. Med fortegn svarende til figur 5.5 bliver energibalancen dermed beregnet af:

$$Q_{ind} + Q_{top} = Q_{ud} + Q_{bund} \quad (5.1)$$

Energien i udløbet beregnes af:

$$Q_{ud} = \frac{V_{ud}}{V_{ud} + V_{bund}} \cdot (Q_{ind} + Q_{top}) \quad (5.2)$$

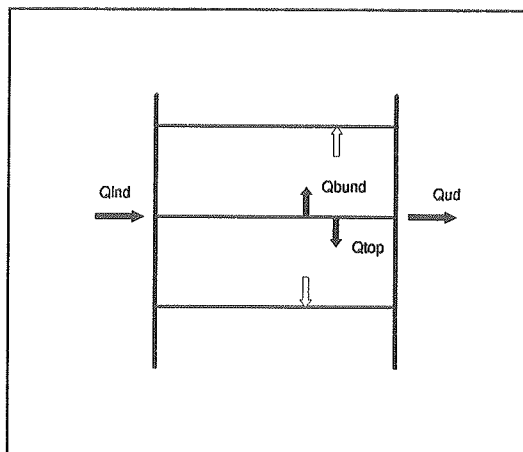
Hvor V_{ud} er det volumen, der strømmer ud af udløbet i tidsskridtet, og V_{bund} er det volumen, der strømmer ind i bunden af laget over lagskellet.

2. Hvis væsken i tanken strømmer væk fra ind/udløb både over og under disse (tilfælde 2), bliver energien fra indløbet vægtet mellem udløbet og lagene over og under lagskellet (figur 5.6). Her vil udløbstemperaturen blive lig indløbstemperaturen, hvilket er en kraftig tilnærmelse, men tilfældet vil sandsynligvis ikke forekomme i praksis. Med fortegn svarende til figuren bliver energibalancen:

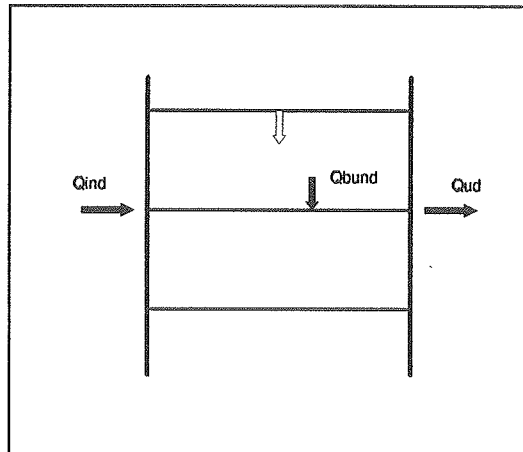
$$Q_{ind} = Q_{top} + Q_{bund} + Q_{ud} \quad (5.3)$$

3. Hvis væsken over ind og udløb strømmer nedad og laget under er stillestående (tilfælde 6), blandes energien oppefra med energien fra indløbet, og det hele strømmer ud (figur 5.4.6). Her vil der i virkeligheden også foregå blanding med laget under lagskellet, men dette sker kun i modellen, hvis indløbstemperaturen er lavere end middeltemperaturen i laget under lagskellet. Energibalancen fås af:

$$Q_{ind} = Q_{bund} + Q_{ud} \quad (5.4)$$



Figur 5.6: Strømninger i lagene omkring ind/udløb går i hver sin retning.



Figur 5.7: Nedadgående strømning over ind/udløb og stillestående lag under.

De øvrige kombinationer af strømninger behandles magen til de ovennævnte.

5.2.5 Opdrift

Det er et velkendt fænomen, at varmt vand er lettere end koldt, og som følge af dette vil det varme vand søge opad, hvis f.eks. et varmt indløb tilføres et sted hvor temperaturen ovenover er lavere. Effekten af dette er afhængigt af flowet i indløbet samt af temperaturdifferensen. I denne model blandes den indkomne væskemængde op i det ovenliggende lag, hvis dette lag er stillestående, og indløbstemperaturen er højere end lagets middeltemperatur. Tilsvarende blandes koldt vand nedad, hvis temperaturen er lavere end middeltemperaturen i laget under indløbet. Denne metode er rent eksperimentielt fundet god.

5.3 Energibalance

For at kunne fastlægge temperaturprofilen inde i laget så energibalancen bevares, opstilles først nogle begrænsninger, der skal sørge for, at der ikke opstår fysisk umulige situationer. Der antages til at starte med, at temperaturen i lagets top og bund er faste. Problemet er da at fastlægge det variable punkt i laget, så temperaturprofilen stemmer med energien i laget. Dette giver en frihedsgrad, men før denne beskrives, sættes først nogle rammer for punktets placering.

1. Det variable punkt må ikke have lavere temperatur end temperaturen i bunden af laget eller højere temperatur end i toppen.
2. Temperaturen i toppen af laget skal altid være større end eller lig med temperaturen i bunden af laget.
3. Det variable punkt skal ligge inden for lagets nedre og øvre begrænsningsflader.
4. Energibalancen skal bevares.

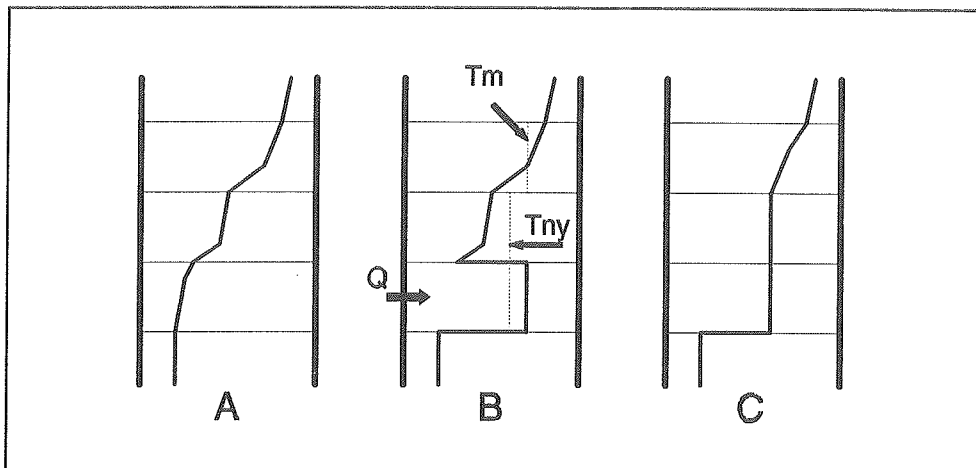
For at overholde de ovenfor nævnte krav til modellen, kan det være nødvendigt at blande op eller ned i tanken.

5.3.1 Opblanding

Det kan forekomme, at det variable punkt ikke kan fastlægges inden for de ovennævnte rammer, efter at der er strømmet vand ud og ind i tanken. Det bliver derfor nødvendigt at blande op eller ned i tanken, alt efter om middeltemperaturen i laget er større eller mindre end de fastlagte temperaturer i top og bund af laget. Ved opblanding flyttes de "faste" punkter i lagskellene, og der overføres energi til et eller flere lag ovenover.

Først findes der ud af, hvor mange lag der skal indgå i opblandingen. Den samlede middeltemperatur i disse T_{ny} må ikke overstige middeltemperaturen i laget over T_m , da dette vil bevirke, at profilet ikke kan fastlægges i laget ovenover. (Temperaturen i bunden af dette lag ville få en temperatur højere end middeltemperaturen i laget). Når de indgående lag er fundet, blandes der op ved at fordele energien i lagene og flytte de faste punkter, så de får den nye temperatur (se figur 5.7). Bemærk at temperaturprofilet i laget over de i opblandingen indgående lag ændrer form, idet temperaturen i bunden af dette lag er forhøjet.

Hvis det variable punkt ikke kan placeres pga. at middeltemperaturen i laget er lavere end den faste temperatur i bunden af laget, er det tilsvarende nødvendigt at blande nedad. Dette gøres som opblanding men i nedadgående retning.



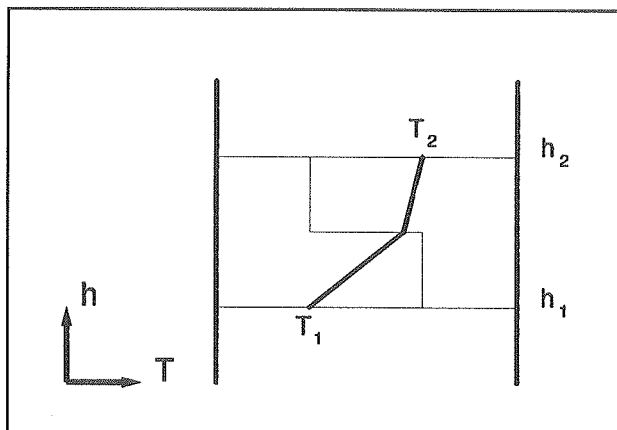
Figur 5.8: Opblanding i tanken. A: Oprindelig kurve. B: Der tilføres energi i et lag hvormed en opblanding er nødvendig. C: Kurve efter opblanding.

5.3.2 Fastlæggelse af det variable punkt

To mulige måder til at fastlægge det variable punkts placering har været vurderet. Ingen af disse har en direkte fysisk forklaring, og det er ikke til at vurdere, hvilken metode der bedst tilnærmer sig det, der sker i virkeligheden. Begge modeller har dog nogle egenskaber som indvirker på temperaturprofilens udseende.

Metode 1:

Her lægges det variable punkt midt i laget, hvis det er muligt. Ellers flyttes punktet opad eller nedad efter behov, idet temperaturen i punktet er lig den højeste eller lavest forekomne i laget. Hermed fastlægges det variable punkt efter en kurve svarende til figur 5.9.



Figur 5.9: Placering af det variable punkt midt i laget.

Energien i et lag beregnes ud fra temperaturprofilet i laget:

$$\frac{E}{A\rho c_p} = \frac{T+T_1}{2}(h-h_1) + \frac{T_2+T}{2}(h_2-h) \quad (5.5)$$

hvor T_1 og T_2 er temperaturerne i lagskellene under og over laget, h_1 og h_2 er de tilsvarende højder regnet fra bunden af tanken, og (T,h) beskriver det variable punkts beliggenhed.

Hvis det variable punkt skal ligge midt i laget fås højden af dette punkt af:

$$h = \frac{h_1+h_2}{2} \quad (5.6)$$

som indsat i (5.5) giver det variable punkts temperatur:

$$T = \frac{2E}{A\rho c_p(h_2-h_1)} - \frac{(T_1+T_2)}{2} \quad (5.7)$$

Hvis det variable punkt ikke kan fastlægges midt i laget, får det tildelt temperaturen T_1 eller T_2 , hvorefter energibalancen fastlægges med højden af punktet. Ved indsættelse af $T=T_1$ i energibalancen (5.5) fås højden af:

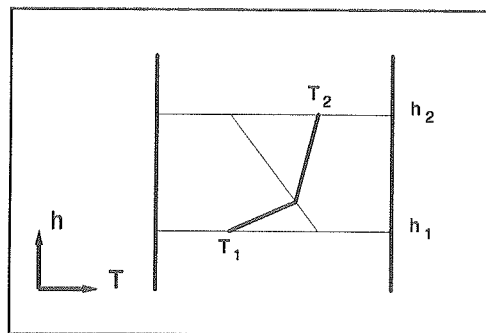
$$h = \frac{(T_1+T_2)h_2-2T_1h_1}{T_1-T_2} \quad (5.8)$$

Indsættes $T=T_2$ fås ligeledes:

$$h = \frac{(T_1+T_2)h_1-2T_2h_2}{T_2-T_1} \quad (5.9)$$

Metode 2:

Her lægges punktet langs en ret linie gennem laget gående fra lagets højeste til lagets laveste temperatur (figur 5.10).



Figur 5.10: Placering af det variable punkt på skrå linie.

Ligningen for denne kurve har formen:

$$h = \frac{h_2 - h_1}{T_1 - T_2}(T - T_1) + h_1 \quad (5.10)$$

som ved indsættelse i energibalancen (5.5) giver temperaturen

$$T = \frac{E}{A\rho c_p(h_2 - h_1)} \quad (5.11)$$

Dette svarer til, at det variable punkt får middeltemperaturen i laget.

Indsat i ligningen for kurven langs hvilken punktet placeres (5.10) fås højden:

$$h = \frac{\frac{E}{A\rho c_p} - T_1(h_2 - h_1)}{T_1 - T_2} + h_1 \quad (5.12)$$

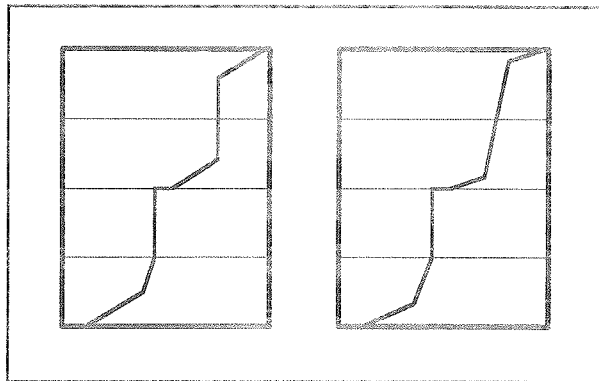
5.3.3 Valg af metode

Mht. den numeriske diffusion virker de to modeller nogenlunde ens. Den første løsning giver ved simuleringer tendenser til lodrette linier i lagene, hvilket svarer til, at en del af lageret har samme temperatur. Dette bevirker, at tanken har tendens til stepkurver, som kendes fra den normale model. I den anden model forekommer disse også, men i mindre grad. Modellen har hermed tendens til at lave blødere temperaturprofiler.

Figur 5.11 viser et eksempel på, hvordan de to modeller repræsenterer

temperaturprofilen, idet energiindholdet i de enkelte lag er ens.

Udløbstemperaturerne fra forsøg viser, at forskellen mellem de to metoder er betydeligt mindre end afvigelsen til de målte udløbstemperaturer.

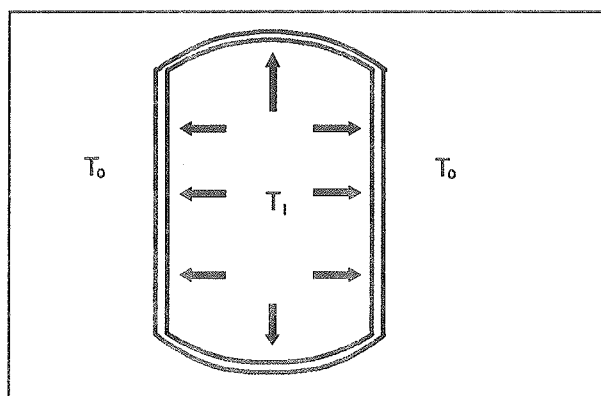


Figur 5.11: Eksempel på temperaturprofil vha. A: metode 1 og B: metode 2. Energiindholdet i de to tanke er ens.

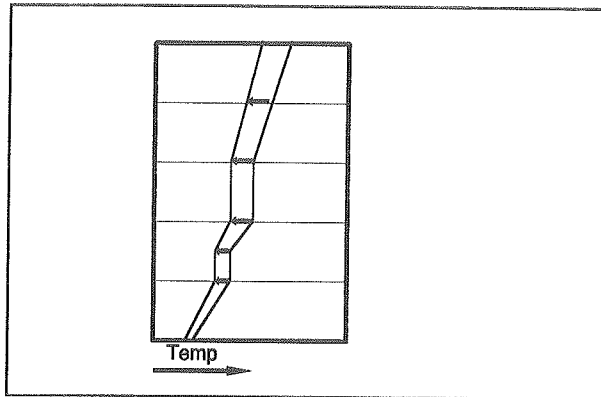
Ud fra disse resultater er metode 2 valgt til modellen, da denne er nemmere at benytte, idet det variable punkts temperatur svarer til middeltemperaturen i laget.

5.4 Varmetab

Idet der opstår en forskel imellem omgivelsernes og lagerbeholderens temperatur, vil der ske en varmetransport igennem beholderens isolering (fig.5.12). Dette vil medføre en ændring af temperaturfordelingen i tanken (fig.5.13).



Figur 5.12: Varmetab fra lagertank til omgivelserne.



Figur 5.13: Ændring af temperaturfordelingen som følge af varmetabet.

I det følgende vil der blive opstillet en metode til beregning af dette varmetab og den ændring af temperaturen, dette medfører.

Varmetabet kan udregnes efter formlen:

$$Q_{tab} = k \Delta t (T - T_{omg}) \quad [J] \quad (5.13)$$

her er k tankens varmetabskoefficient givet som $[W/K]$, Δt er ændring af tiden, T er lagertemperaturen og T_{omg} er temperaturen af den omgivende luft.

Da k som regel angives for hele tanken på databladene, er det nødvendigt at fordele varmetabskoefficienten ud på de enkelte lag. Ved denne fastlæggelse af varmetabskoefficienten, kan der anvendes forskellige metoder:

En metode er, at dele varmetabskoefficienten, k ud på arealet:

$$U = \frac{k}{A} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (5.14)$$

hvor A er overfladearealet af tanken. Denne metode tager ikke hensyn til, at der ofte er forskellig isoleringstykkel i top og bund. Den tager heller ikke hensyn til de

eventuelle kuldebroer, der kan være, f.eks i form af rørgennemføringer. Dette kan være en grov tilnærmelse, da der ofte ingen isolering er i bunden, og toppen samtidig tit er velisoleret.

En anden metode er at udregne varmetransmissionskoefficienten, U for top, side og bund, så den totale varmetabskoefficient bliver:

$$k_{total} = A_{top} U_{top} + A_{side} U_{side} + A_{bund} U_{bund} \quad \left[\frac{W}{K} \right] \quad (5.15)$$

Fra datablade får man oplysninger om den totale varmetabskoefficient, k i drift og i hvile. Disse kan bruges til at bestemme U efter den førstnævnte metode. Hvis man derimod ønsker at benytte den anden metode, er det nødvendigt at udregne koefficienterne teoretisk. Her er det nødvendigt at have kendskab til tankens isolering og dens tykkelse.

Energitransporten medfører en temperaturændring, der kan bestemmes ud fra formlen:

$$\Delta T = \frac{Q_{tab}}{c_p \rho V} \quad [K] \quad (5.16)$$

hvor c_p er den specifikke varmekapacitet, ρ er massefyllden og V er volumenet af tanken.

Ved at kombinere formel (5.13) og (5.16) kan man finde den nye temperatur ud fra formelen:

$$T_{ny} = T_{før} - \frac{k \Delta t (T_{før} - T_{omg})}{c_p \rho H \pi r^2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.17)$$

hvor H er højden af tanken, og r er tankens radius.

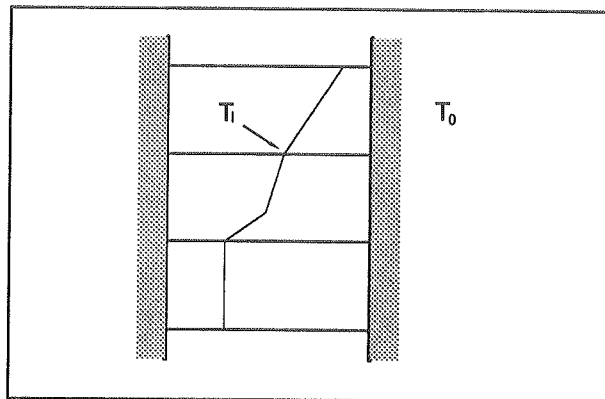
5.5 Tilpasning af model

I følge ovenstående formler er det nemt at beregne den nye temperatur i tanken. Men da modellen er opdelt i flere lag af forskellig højde, og temperaturen er repræsenteret ved sammenhængende profiler, er det lidt mere problematisk. Derfor udledes i det efterfølgende, udtryk der tager hensyn til dette.

5.5.1 Varmetab gennem siden

Varmetransmissionskoefficienten, U bestemmes udfra en af de ovenstående metoder.

Energitabet, fra et lag der ikke er et toplag eller bundlag (fig.5.14), og som har højden, Δh , medfører følgende ændring i temperaturen:



Figur 5.14: Varmetab fra et punkt i tanken der ikke ligger i toppen eller i bunden.

$$\Delta T = \frac{U A_1 \Delta t (T_{\text{før}} - T_{\text{omg}})}{c_p \rho V} \quad [\text{K}] \quad (5.18)$$

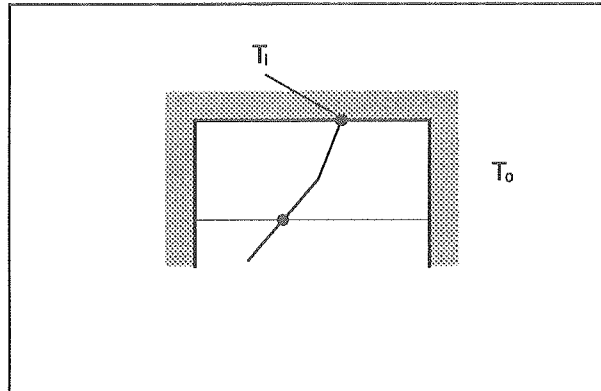
hvor $A_1 = 2 \pi r \Delta h$ og $V_1 = \pi r^2 \Delta h$. Det ses, at Δh kan forkortes ud, og derefter kan man finde den nye temperatur, som varmetabet har medført fra et vilkårligt valgt punkt udfra formlen:

$$T_{\text{ny}} = T_{\text{før}} - \frac{2 U (T_{\text{før}} - T_{\text{omg}}) \Delta t}{C_p \rho r} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.19)$$

5.5.2 Varmetab gennem top/bund

I toppen og bunden kan varmetabet blive større (fig. 5.15), da der skal tages hensyn til arealet af toppen/bunden.

For at kunne beregne varmetabet igennem top/bund benyttes igen, at $k=U A$ og varmetabet medfører en ændret temperatur på:



Figur 5.15: Varmetab gennem top eller bund.

$$\Delta T = \frac{U (T_{\text{før}} - T_{\text{omg}}) \Delta t}{\rho C_p \Delta h} \quad [\text{K}] \quad (5.20)$$

hvor Δh er højden af laget.

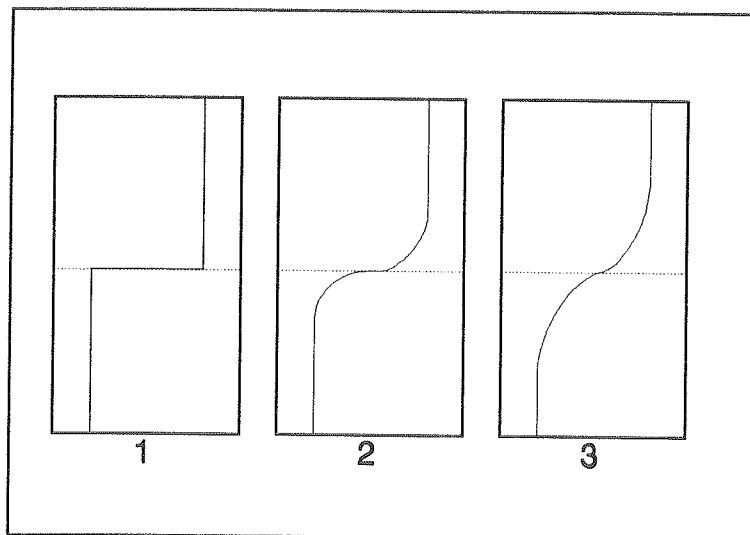
5.5.3 Implementeret model

I den ovenstående modelbeskrivelse af varmetabet er der set bort fra det kolde nedfald der opstår, når tanken står stille. Nedfaldet skyldes temperaturforskellene i tanken. Det kan være svært at vurdere, hvilke konsekvenser det vil få ikke at medtage denne effekt, men under normale omstændigheder og ved normale beholderkonstruktioner, har denne effekt ingen nævneværdig betydning for resultatet af en årssimulering. Der er derfor ikke taget hensyn til denne. Modellen kan anvende begge metoder til fastsættelse af varmeoverføringskoefficienten. Hvis man har et indgående kendskab til isoleringens dimensioner anbefales det, at metoden der deler varmetabet op på top, side og bund benyttes. Også selvom der ved den teoretiske bestemmelse af varmetabskoefficienterne ikke tages hensyn til kuldebroer. Ved mange lagerkonstruktioner vil dette ikke medføre nogen nævneværdig fejl, da eventuelle kuldebroer er godt isoleret eller placeret på en sådan måde, at varmetabet p.g.a. kuldebroen bliver minimalt (rør er ført ud igennem

bunden af beholderen). Der findes dog stadig en hel del fabrikater, der ikke har denne detalje med, og her kan kuldebroer have stor effekt på varmetabet. Det vil alt andet lige give en bedre beskrivelse af varmetabet, end hvis man benytter metoden, der deler varmetabskoefficienten ud på arealet. Kuldebroers påvirkning i top eller bund kan indregnes i varmetabskoefficienten, hvis man kender størrelsen heraf. På siderne er det derimod ikke muligt.

5.6 Varmeledning

Når der internt opstår en temperaturforskel i en tank, sker der en transport af energi fra det varme til det koldere område. Varmeledningen gør, at temperaturforskellene udjævnes med tiden (fig. 5.16).



Figur 5.16: Tank der er opvarmet i toppen og kold i bunden. Det ses hvordan udjævningen foregår over tiden.

Varmetransporten kan beskrives ved formelen:

$$dQ_{led} = \lambda A_t \frac{\partial T}{\partial x} dt \quad [J] \quad (5.21)$$

hvor ∂x er højden af det infinitesimale lag, ∂T er temperaturforskellen over laget, A_t er tværsnitsarealet, λ er varmeledningskoefficienten og dt er tidssteppet, i hvilket ledningen foregår. Denne ligning blev opstillet af Fourier og bygger på, at varmestrømme går vinkelret på isotermer. Den kaldes den almindelige varmeledningsligning /6/.

I den normalt anvendte model udregner man således Q_{led} udfra formelen:

$$Q_{led} = \lambda A_t \frac{(T_{i+1} - T_i)}{(h_i - h_{i-1})} \Delta t \quad [J] \quad (5.22)$$

hvor T_i og T_{i+1} henholdsvis er middeltemperaturen i lag nummer i og $i+1$, $(h_i - h_{i-1})$ er højden af lag nummer i .

I den normalt anvendte beregningsmodel sker ledningen fra hele laget over til hele det underliggende lag. En ulempe ved denne metode er, at den undervurderer varmeledningen ved et skarpt lagskel og er meget afhængig af antallet af lag.

5.6.1 Dynamisk indtrængsdybde

En anden og måske bedre model er, at se på hvor langt ind i et lag varmetransporten kan registreres. Varmeledningen udregnes derefter ud fra denne information. Derved kan man udnytte den temperaturinformation modellen med sammenhængende temperaturprofiler har, og der benyttes et udtryk for den dynamiske indtrængningsdybde, l_{dyn} . Den dynamiske indtrængningsdybde udtrykker, hvor langt ind i laget varmeledningen kan registreres i løbet af et tidsskridt. Denne størrelse, l_{dyn} , er udledt af den Gaussiske fejlfunktion /10/ og kan udtrykkes som:

$$l_{dyn} = \sqrt{\pi \alpha \Delta t} \quad [m] \quad (5.23)$$

hvor α er den termiske diffusivitet, der kan udregnes ud fra formelen:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (5.24)$$

For at kunne udregne varmeledningen i tilfældene vist på fig. 5.17 og 5.18, findes T_{2m} som middeltemperaturen af laget med højden l_{dyn} over det i'te lagskel, T_{1m} som middeltemperaturen af laget med højden l_{dyn} under det i'te lagskel. Middelværdien af disse er T_s .

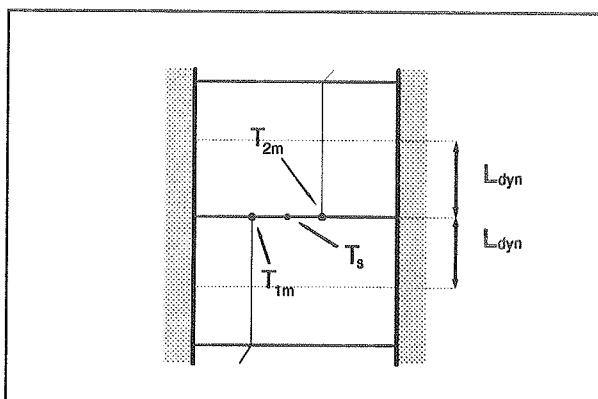
Det ses af fig. 5.18, at T_s ikke nødvendigvis antager lagskellets temperatur.

I modellen benyttes T_s som et udtryk for, i hvilken retning det faste temperaturpunkt vil bevæge sig (fig. 5.18). Det ses at jo større forskellen i kurvernes hældning er i forhold til lodret, jo mere flyttes det faste temperaturpunkt.

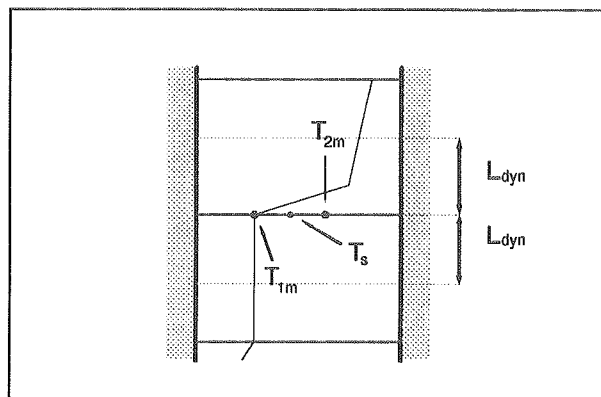
Ved at sammenholde (5.21) og (5.23) med T_{2m} og T_{1m} og med den antagelse, at der ingen strømning foregår, fås et udtryk for varmeledningen:

$$Q_{led} = L \frac{(T_{2m} - T_{1m})}{\sqrt{\pi \alpha \Delta t}} \Delta t \quad [J] \quad (5.25)$$

hvor $L = \lambda A_t$.



Figur 5.17: Middeltemperaturerne T_{1m} og T_{2m} , samt deres middeltemperatur T_s , når der er en skarp lagdeling.



Figur 5.18: T_{1m} , T_{2m} og T_s 's placering, når der ikke er en skarp lagdeling.

For at lette beregningerne af varmeledningen, opdeles varmeledningen således at:

$$Q_{led,total} = Q_{led,vand} + Q_{led,stål} \quad (5.26)$$

$Q_{led,vand}$ udregnes efter formel (5.25), mens $Q_{led,stål}$ kan udregnes efter to metoder:

- 1) Ved at finde en transmissionskoefficient, U , der kun tager hensyn til ståls varmeledningsevne eller
- 2) Ved at finde en U -værdi, der også tager højde for varmeovergangen fra vandet til stålveggen.

Det skal nævnes, at $Q_{led,stål}$ udregnes på baggrund af 1_{dyn} for stål.

5.6.2 Vurdering af ny model

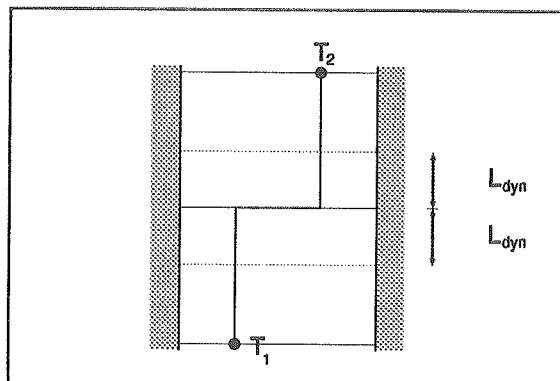
Når der er et skarpt lagskel, undervurderer den almindelige model varmeledningen. Den nye model tager derimod mere hensyn til den store temperaturgradient. I det efterfølgende vises sammenhængen/forskellen på de to modeller ved to meget forskellige temperaturfordelinger (fig. 5.19 og 5.20).

I det følgende er den dynamiske indtrængningsdybde:

$$L_{dyn} = \frac{1}{x} \Delta h \quad [m] \quad (5.27)$$

hvor Δh er højden af et lag.

5.6.3 Skarpt lagskel



Figur 5.19: Skarp lagskel. T_1 og T_2 er henholdsvis temperaturen i lagskellet under og over lagskellet, hvorover varmeledningen sker.

Almindelig model:

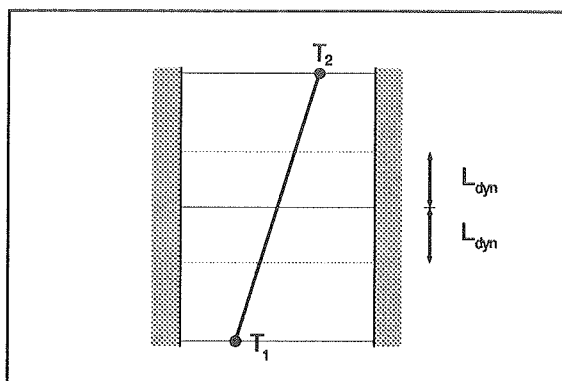
$$Q_{led} = L \frac{T_2 - T_1}{\Delta h} \Delta t \quad [J] \quad (5.28)$$

Nye model:

$$Q_{led} = L \frac{T_2 - T_1}{\frac{1}{x} \Delta h} \Delta t = L x \frac{T_2 - T_1}{\Delta h} \Delta t \quad [J] \quad (5.29)$$

Dvs når der er tale om et skarpt lagskel, bliver varmeledningen x gange større (typisk 3-4 gange) med den nye model i forhold til den almindelige.

5.6.4 Blidt lagskel



Figur 5.20: Blidt lagskel. T_1 og T_2 er henholdsvis temperaturen i lagskellet under og over lagskellet, hvorover varmeledningen sker.

Almindelig model:

$$Q_{led} = L \frac{T_2 - T_1}{\frac{2}{\Delta h}} \Delta t \quad [J] \quad (5.30)$$

Nye model:

$$Q_{led} = L \frac{T_2 - T_1}{\frac{2x}{\Delta h}} \Delta t = L \frac{T_2 - T_1}{\frac{2}{\Delta h}} \Delta t \quad [J] \quad (5.31)$$

Dvs når der er tale om en blid overgang mellem lagene, er varmeledningen den samme for den almindelige og den nye model.

5.6.5 Implementeret model

Som følge af ovenstående implementeres den nye model, hvor der tages hensyn til ståls varmeledningsevne, og hvor der ikke tages hensyn til varmeovergangsmodstanden fra vand til stål.

5.7 Validering af modellen

Modellerne er valideret vha. simuleringer, hvor målte værdier for flow og indløbstemperaturer er benyttet til inddata til modellen. Derefter er udløbstemperaturer, leverede energier samt temperaturudviklingen i tanken sammenlignet med tilsvarende målte værdier. Dette er udført for en stor lagertank med fire interne strømninger, for et almindeligt brugsvandsanlæg med interne varmevekslere samt for to kappebeholdere. I alle forsøg er der anvendt eksisterende måledata, og der er dermed ikke foretaget praktiske målinger i forbindelse med dette projekt.

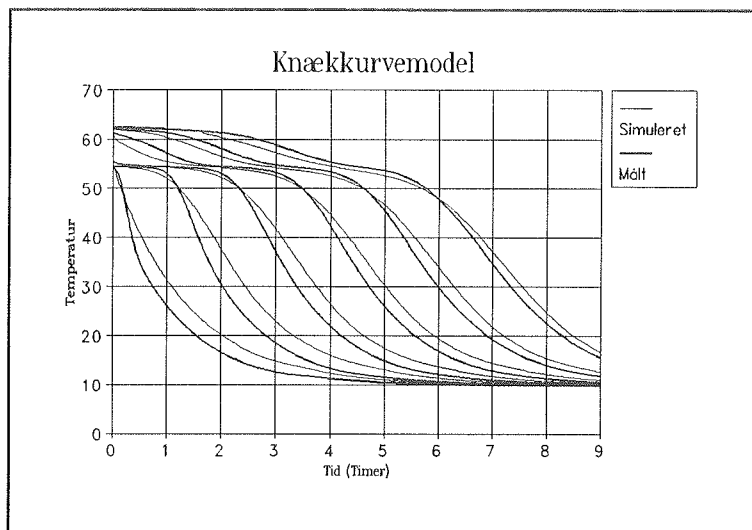
5.7.1 Numerisk diffusion

Da et af hovedformålene med en model med sammenhængende temperaturprofil er at mindske den numeriske diffusion, sammenlignes tanken først ved en tapning. Tanken er opvarmet og der tappes et volumen svarende til tankens. Målet er, at den numeriske diffusion ikke overstiger den opblanding, der foregår i virkeligheden.

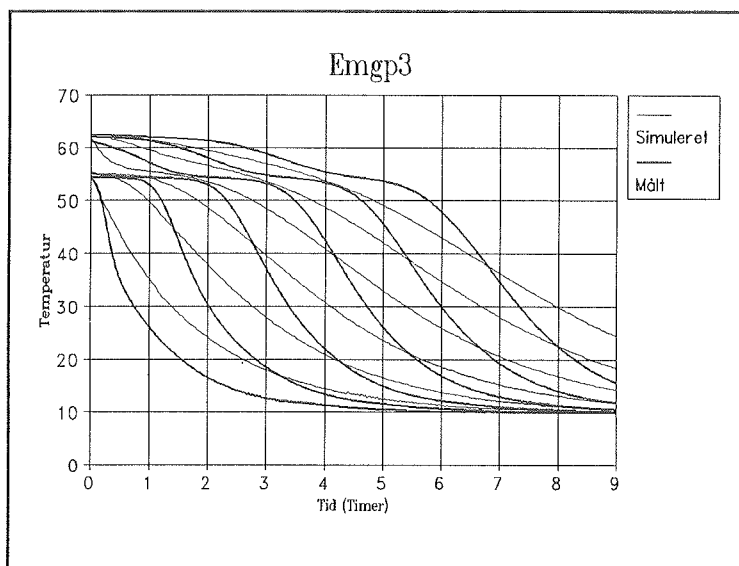
Tanken anvendt i forsøget er en stor lagertank på ca. 2000 liter beskrevet i bilag K1.

I dette forsøg har vi yderligere sammenlignet med tilsvarende forsøg simuleret i programmet EMGP3, da dette er et anerkendt simuleringsprogram til aktive solvarmeanlæg. Dette program anvender en model med fast lagdeling i tanken, hvor hvert lags temperatur repræsenteres af en middeltemperatur.

Figur 1 viser hvordan temperaturerne i forskellige højder af tanken udvikler sig i løbet af en tapning, idet der samlet er tappet et volumen svarende til tankens. Det ses, at den numeriske diffusion stadig er større end den opblanding, der sker i virkeligheden, idet kurverne er fladere ved det simulerede forsøg.



Figur 5.21: Målte og simulerede temperaturer i tanken under tapning.



Figur 5.22: Temperaturer i tanken målt og simuleret med programmet EMGP3.

Dog ses det ved sammenligning af figur 5.21 og 5.22, at modellen har reduceret problemet i forhold til simuleringsprogrammet EMGP3. Ligeledes ses det, at modellen udmærket genskaber svingningerne i starten, der skyldes en lille temperaturforskel i tanken.

I forbindelse med virkelig opblanding i en lagertank benyttes ofte lagereffektiviteten, der er defineret som:

$$\eta = 100 * \frac{Q_{1,0}}{Q_{tot}} \quad (5.32)$$

hvor Q_{tot} er den totale energi, der kan aftappes af tanken med en given indløbstemperatur, mens $Q_{1,0}$ er den energimængde, der leveres ved tapning af et volumen svarende til tankens. Hvis der ikke forekom opblanding ved tapning, ville denne faktor blive 1.

Der er lavet forsøg til beskrivelse af dette vha. modellen. Nedenstående skema viser lagereffektiviteten ved forskellige antal lag i tanken og forskellige tidsskridt. Simuleringen er kørt med en 250 liter tank .

Lagereffektiviteten		Antal lag	
		9	18
Tids- skridt	5 sek	95,6	97,4
	10 sek	95,7	97,5
	20 sek	95,9	97,4

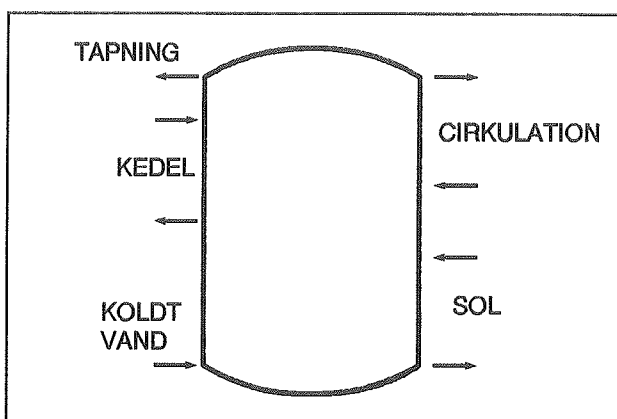
Tabel 5.2: Lagereffektiviteten for modellen ved forskellige tidsskridt og antal lag.

I sammenligning med disse resultater ses modellen at have større effektivitet, og den numeriske diffusion er dermed mindre end den virkeligt forekomne opblanding i tankene.

De to ovennævnte forsøg giver dermed modstridende resultater. Dette kan bl.a. skyldes forskellen i størrelsen af de til målingerne anvendte beholdere. Desuden varer forsøget for den store lagerbeholder ni timer, hvormed varmeledning og varmetab kan have stor indflydelse, mens tapningerne i forsøgene med de små beholdere er foretaget i løbet af ti minutter.

5.7.2 Forsøg med stor lagertank med flere interne strømninger

For at undersøge de interne strømninger i tanken, valideres imod målinger foretaget på en 2000 liter tank med eksterne varmevekslere på sol- og kedelkreds. Desuden foregår der almindelig tapning, og der er et cirkulationskredsløb (figur 5.23). Da de eksterne varmevekslere ikke er inkluderet i modellen, anvendes de sekundære kredses måledata som inddata i modellen.



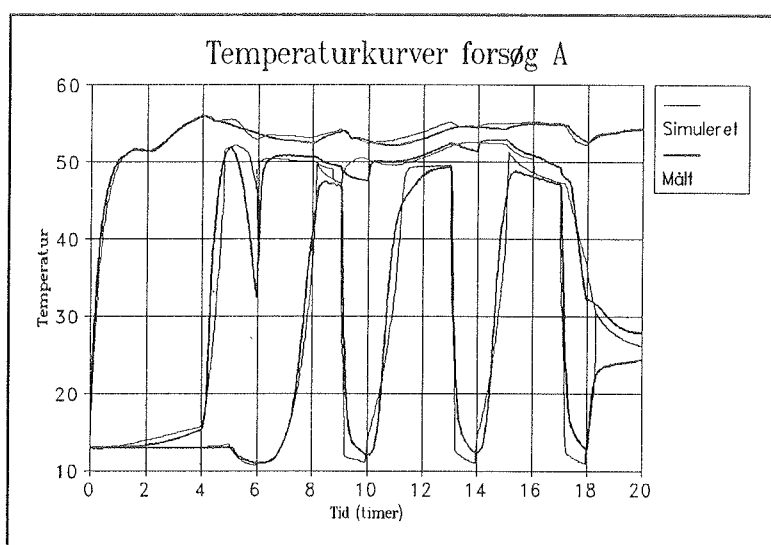
Figur 5.23: Lagertank med flere interne strømninger.

Simuleringerne er kørt med syv lag i tanken og tidsskridt på et minut.

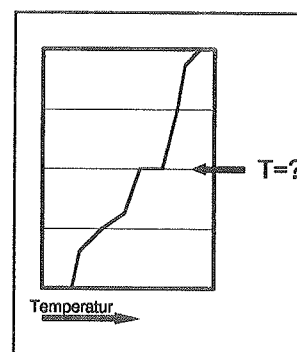
Forsøg A: Alle kredse

I dette forsøg kører alle kredsløbene i tanken, og det er her interessant, om modellen får leveret de rigtige energimængder til de forskellige kredsløb. For lidt energi leveret fra solfangerkredsløbet vil f.eks. bevirke, at temperaturen i tanken bliver lavere, som igen vil øge energimængden leveret fra kedelkredsen.

I figur 5.24 ses det, hvordan simuleringen beregner temperaturerne i tanken, hvor kurverne viser temperaturerne i forskellige højder af tanken. Det ses at disse grafer ikke helt følger de målte, men her må det tilføjes, at der kan forekomme vandrette liniestykker i simuleringsmodellen, hvorved det er svært nøjagtigt at sige, hvad temperaturen er det pågældende sted (figur 5.25). Derimod viser det sig ofte at temperaturerne, en centimeter over eller under lagskellene, bedre følger kurverne for de målte temperaturer. Ligeledes kan det være en ulempe, at temperaturfølerne i tanken er placeret i samme højde som indløbene. Herved kan temperaturen fra et indløb påvirke temperaturmålingen, før det bliver blandet op.



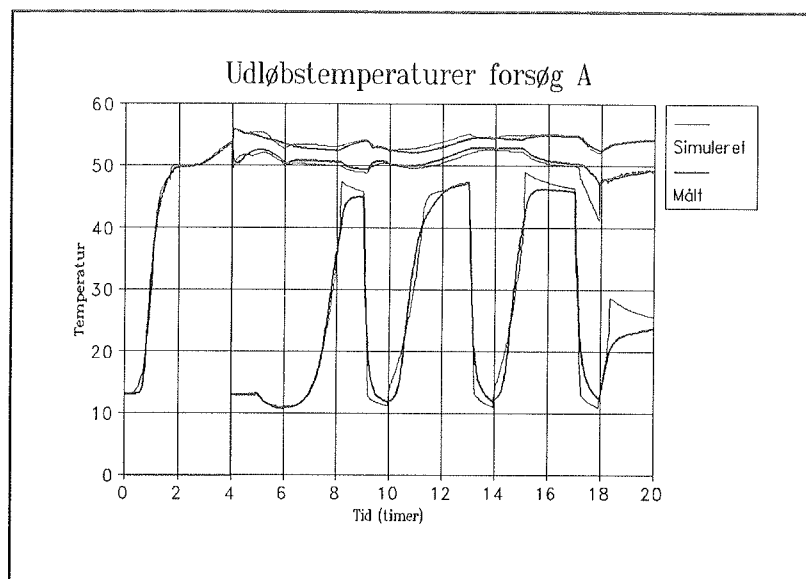
Figur 5.24: Målte og simulerede temperaturer i tre forskellige højder af tanken.



Figur 5.25: Usikkerhed ved temperaturbestemmelse.

Ved sammenligning af udløbstemperaturerne fra tanken til de forskellige kredse (figur 5.26) ses en fin overensstemmelse. Dog svinger solkredsen en anelse mere på de simulerede temperaturer. Dette skyldes dels slamlaget i bunden af beholderen som i simuleringerne kan være stillestående. I praksis vil der dog altid ske noget opblanding, når der er strømninger i ind- eller udløbet. Desuden ligger der et problem i, at koldvandsindløbet ligger i samme højde som udløbet til solkredsen, hvilket kan give anledning til, at det kolde vand strømmer delvist uopblandet til solkredsen.

I graferne for udløbstemperaturerne er tapningerne ikke medtaget, da disse foregår i løbet af korte tidsrum.



Figur 5.26: Målte og simulerede udløbstemperaturer for solkreds (nederst), kedelkreds (midt) og cirkulationskreds (øverst).

I nedenstående skema ses afvigelserne i energi leveret til tanken under forsøget.

	Tapning	Solkreds	Kedelkreds	Cirkulation
Målinger	361 MJ	455 MJ	380 MJ	266 MJ
Simuleret	362 MJ	443 MJ	406 MJ	281 MJ
Afvigelse	+0,4 %	-3 %	+7 %	+6 %

Tabel 5.3: Energier fra kørsel med stor lagertank med interne varmevekslere.

Det ses at modellen klarer simuleringen tilfredsstillende, idet den højeste afvigelse fra de målte data er på 7%. Den manglende energi er gået til varmetab samt ændring i tankens energiindhold.

Det ses at kedelen har leveret for meget energi til tanken i simuleringen, og tilsvarende har cirkulationskredsen tappet for meget energi fra tanken. Dette skyldes at de to kredse virker på omtrent det samme volumen af tanken og placeringen af ind-/udløb i simuleringerne for disse er af stor betydning for dette. I disse simuleringer er lagskellene placeret midt i indløbsrørene, hvor det rigtige måske er at placere det i rørets top eller bund afhængigt af strømningsretningen.

Forsøg B: Tre kredse

For at eliminere ovennævnte problem, er der også sammenlignet med en simulering, hvor cirkulationskredsen ikke er i drift. Temperaturkurverne og kurver over udløbstemperaturerne for dette forsøg ses i bilag K3. Af nedenstående skema ses, at den maksimale energiafgivelse nu ligger på 3%, hvilket er væsentligt bedre. Grunden til at afvigelserne på kedel og cirkulationskredsen generelt bliver højere end på sol- og tappekredsen er desuden, at temperaturforskellen mellem ind- og udløb på disse er noget mindre, hvormed disse kredse bliver mere følsomme overfor afvigende temperaturer i tanken. Dette ses også af /14/ hvor den relative ubestemthed af den overførte effekt er undersøgt for forskellige temperaturforskelle. Her ses det, at jo mindre forskel der er på frem- og returtemperaturen, jo større er den relative ubestemthed.

	Tapninger	Solkreds	Kedelkreds
Målt	376 MJ	284 MJ	297 MJ
Simuleret	378 MJ	281 MJ	289 MJ
Afvigelse	+0,5 %	-1 %	-3 %

Tabel 5.4: Energier fra forsøg med stor lagertank med interne strømninger.

Forsøg C: Tre dages forsøg.

Problemet ved ovennævnte forsøg er, at initialiseringen er af væsentlig betydning ved forsøg af så kort varighed. Derfor er validering også foretaget vha. et tredagesforsøg. Temperaturkurverne og udløbstemperaturerne ser også her ud til at følges ad (bilag K4), og af nedenstående skema fremgår de samlede afvigelser for forsøget.

	Tapninger	Solkreds	Kedelkreds	Cirkulation
Målt	1306 MJ	1512 MJ	1192 MJ	1145 MJ
Simuleret	1305 MJ	1512 MJ	1267 MJ	1200 MJ
Afvigelse	-0,1 %	-0,1 %	+6 %	+5 %

Tabel 5.5: *Energier fra tredages forsøg med stor lagertank.*

Igen ses det, at kedel- og cirkulationskredsen har de største afvigelser. Dette kan skyldes at der i disse kredse er et stort flow og små temperaturdifferencer, hvorved små usikkerheder i de målte temperaturer kan have stor betydning for beregning af energierne.

5.8 Vurdering af modellen

På baggrund af ovenstående sammenligninger mellem målinger og simuleringer vurderes modellen at være særdeles velegnet til brug i simuleringsprogrammer for aktive solvarmeanlæg.

Modellen reducerer numerisk diffusion i tanken og giver et temperaturprofil i tanken der ligger tæt på, hvad der kan måles. Dette bevirker, at modellen kan benyttes til præcist at forudsige, hvordan et solvarmeanlæg vil fungere under en given situation.

Symbolliste

α	=	Termisk diffusivitet	[m ² /s]
ρ	=	Massefylde	[kg/m ³]
λ	=	Varmeledningsevne	[W/m K]
A	=	Areal	[m ²]
c_p	=	Specifik varmekapacitet	[J/kg K]
E	=	Energien i et lag	[J]
H	=	Højde af tanken	[m]
h	=	Højde	[m]
k	=	Varmetabskoefficient	[W/K]
l_{dyn}	=	Dynamisk indtrængningsdybde	[m]
r	=	Radius	[m]
T	=	Temperatur	[°C]
T_m	=	Middeltemperatur af et lag	[°C]
T_{omg}	=	Omgivelsestemperatur	[°C]
t	=	Tid	[s]
U	=	Varmetransmissionskoefficient	[W/m ² K]
V_{bund}	=	Volumen af væske ind i bunden af et lag i tanken	[J]
V_{ud}	=	Volumen af væske ud af tanken	[J]
Q_{bund}	=	Energi ind i bunden af et lag i tanken	[J]
Q_{ind}	=	Energi ind i tanken	[J]
Q_{led}	=	Energi overført ved varmeledning	[J]
Q_{top}	=	Energi ud af toppen af et lag i tanken	[J]
Q_{ud}	=	Energi ud af tanken	[J]

6 Varmeveksler

Der er i programmet mulighed for at anvende ekstern modstrømsvarmeveksler eller intern spiralvarmeveksler.

6.1 Ekstern modstrømsvarmeveksler

I modellen for modstrømsvarmeveksleren ses der bort fra varmevekslerens varmekapacitet.

Udløbstemperaturerne af varmeveksleren beregnes som:

$$T_{p,ud} = T_{p,ind} - \eta \cdot \frac{C_{\min}}{C_p} (T_{p,ind} - T_{s,ud}) \quad (6.1)$$

$$T_{s,ud} = T_{s,ind} - \eta \cdot \frac{C_{\min}}{C_s} (T_{s,ind} - T_{p,ud}) \quad (6.2)$$

hvor indeks p og s refererer til henholdsvis primær og sekundærsiden af varmevekslere, og $C_{\min}$ betegner den mindste af de to kapacitetsstrømme.

Effektiviteten η af varmeveksleren kan vælges at holdes konstant eller beregnes af følgende formel for modstrømsvarmevekslere:

$$\eta = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - \alpha)}}{1 - \alpha \cdot e^{-NTU \cdot (1 - \alpha)}} \quad (6.3)$$

hvor :

$$\alpha = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (6.4)$$

Ovenstående metode betegnes NTU-metoden hvor faktoren, NTU beregnes af :

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (6.5)$$

Metoden er beskrevet i Danvakgrundbogen /6/.

6.2 Intern spiralvarmeveksler.

For den interne spiralvarmeveksler kan der anvendes en lineær model eller en udvidet model til beskrivelse af varmeoverføringskoefficienten.

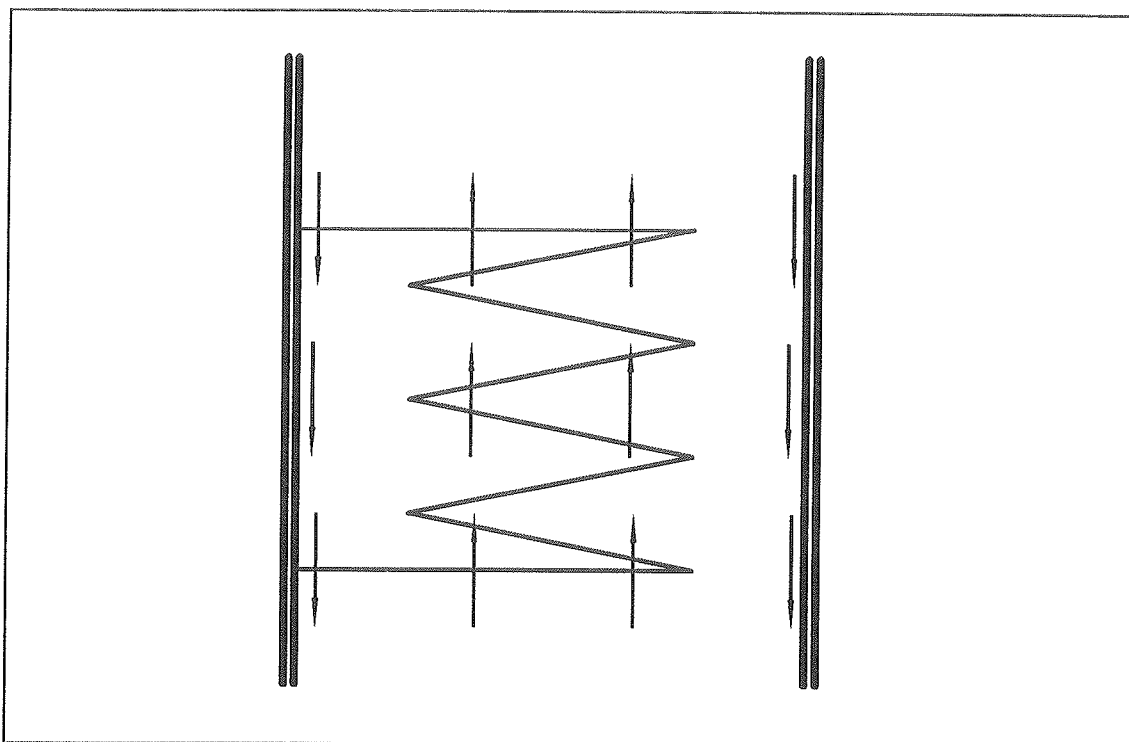
Lineær model

Denne model beskriver varmeoverføringskoefficienten, UA lineært ud fra formelen:

$$UA = k_1 + k_2 T_l \quad \left[\frac{W}{K} \right] \quad (6.6)$$

hvor k_1 og k_2 er konstanter, der bestemmes ud fra afprøvninger.

Grunden til at UA stiger med T_l skal findes ud fra den øgede konvektion, der opstår, når der sker en opadgående bevægelse af vand langs varmeveksleren og en nedadgående bevægelse langs tankens væg (fig.6.1).



Figur 6.1 : Cirkulation pga. forskel i massefylde. Medfører øget varmeoverføring.

Med kendskab til varmevekslerens indløbstemperatur, T_{ind} kan udløbstemperaturen, T_{ud} bestemmes ud fra formlen:

$$T_{ud} = T_{ind} - \left(1 - \exp\left(\frac{-UA}{\dot{m}}\right)\right)(T_{ind} - T_l) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.7)$$

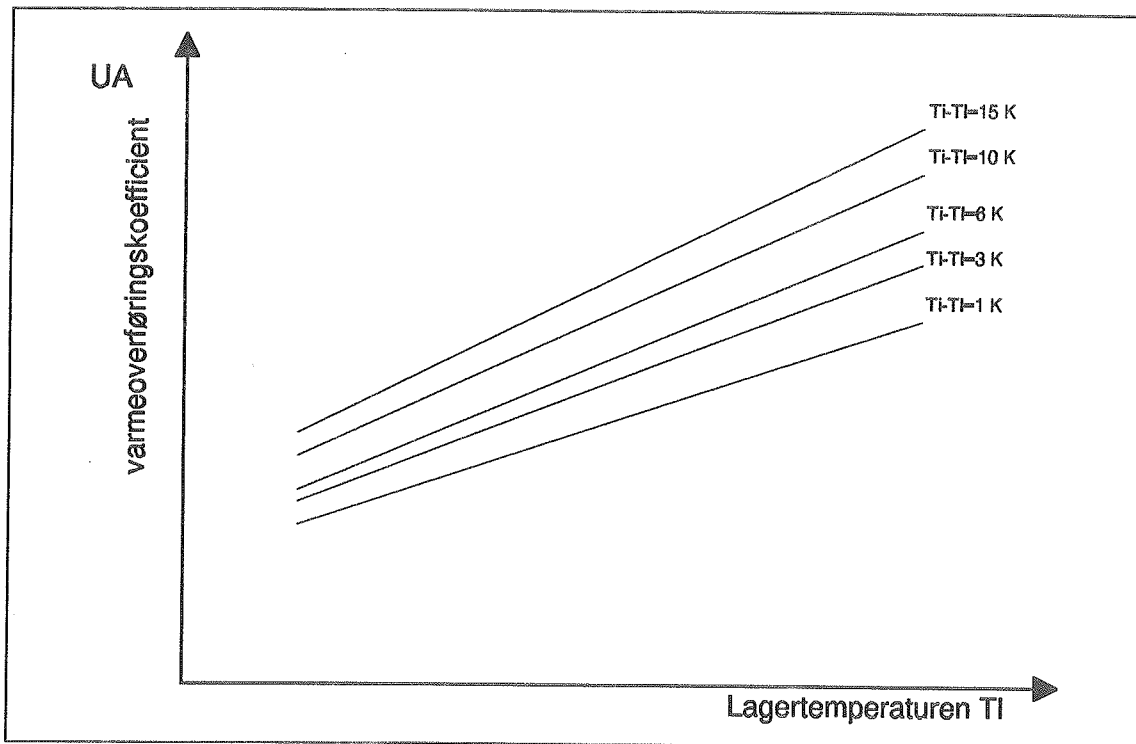
En væsentlig forudsætning for at modellen kan beskrives lineært, er at lageret omkring varmeveksleren har den samme temperatur overalt, hvilket sjældent vil være tilfældet. En anden begrænsning ved denne model er, at den ikke tager højde for flowet i spiralen eller forskellen imellem T_{ind} og T_l . At denne temperaturforskel har betydning ses af fig.6.2.

Den fejl der begås ved denne forudsætning skønnes at have minimal betydning for resultatet af en årssimulering og det kan nævnes, at andre simuleringsprogrammer bruger denne eller den mere simple model, hvor der regnes med en konstant varmeoverføring.

Udvidet model

For at tage hensyn til de ovenfor nævnte begrænsninger, kan der anvendes en udvidet model.

Hvis man afbilder UA som funktion af T_l , hvor UA's afhængighed af $(T_{ind}-T_l)$ ved konstant flow medtages (fig. 6.2), ses det klart, at UA ikke kun afhænger af T_l , som den lineære model antager. UA's afhængighed af $(T_{ind}-T_l)$ fremtræder tydeligt.



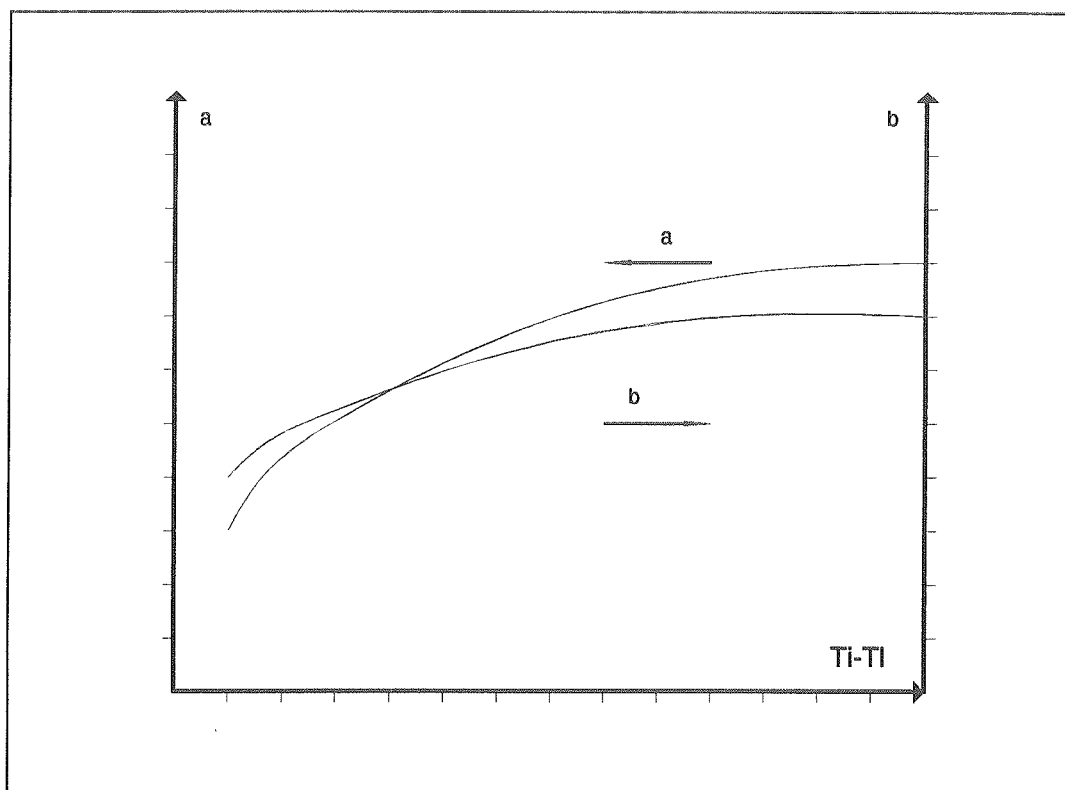
Figur 6.2 : UA's afhængighed af $(T_i - T_l)$.

UA beregnes nu af følgende formel.

$$UA = a + b T_l \quad (6.8)$$

hvor a og b er konstanter, der afhænger af $(T_{ind}-T_l)$.

Hvis disse afbildes som funktion af $(T_{ind}-T_l)$ ses en sammenhæng, der minder om en loga-ritmisk kurve (fig. 6.3).



Figur 6.3 : Konstanterne a og b som funktion af $(T_{ind}-T_l)$.

Ved at foretage en logaritmisk regression, findes a og b som en lineær funktion af $(T_{ind}-T_l)$:

$$a = a_1 + a_2 \ln(T_i - T_l) \quad \left[\frac{W}{K}\right] \quad (6.9)$$

$$b = b_1 + b_2 \ln(T_i - T_l) \quad \left[\frac{W}{K^2}\right] \quad (6.10)$$

De fire konstanter, a_1 , a_2 , b_1 og b_2 findes ved hjælp af et program, der p.t. foreligger både i Fortran og i Pascal. Dette er et program, der findes på LfV.

Når man har udtrykkene for a og b , kan UA beregnes, så længe flowet ikke ændrer sig fra det fastlagte flowprofil. Overensstemmelsen mellem beregnede og målte data er

endog ganske god.

Når varmeoverføringskoefficienten er fundet, kan T_{ud} derefter beregnes ud fra formel (6.7).

Fordelen ved den udvidede model er, at man kun skal gennemfører den tidskrævende proces en gang. Herefter har man et formelsæt, der giver et lige så godt billede af varmeoverføringen som den tidskrævende proces, den er bare væsentlig hurtigere at benytte.

Den udvidede model er klart den, der beskriver virkeligheden bedst, idet der tages hensyn til flowet i varmeveksleren, $(T_{ind} - T_l)$ og T_l . Den har dog den ulempe, at man skal have kendskab til spiralens dimensioner, spiralmaterialets varmeledningsevne, flowet og væskens sammensætning. Hvis man har adgang til disse størrelser, anbefales det stærkt, at køre det program der kan udregne de fire konstanter, som den simple model benytter. Programmet er i forbindelse med dette projekt omskrevet fra Fortran til Pascal, blevet gjort mere brugervenligt og nemmere at gå til.

Hvis man ikke umiddelbart er i besiddelse af de nødvendige oplysninger, kan man benytte de konstanter der findes fra databladene, man kan altså vælge at benytte den lineære model.

Varmeoverføringskoefficienten udregnet efter den lineære model kan afvige med op til 50 % i forhold til den udvidede model.

Det er valgt at medtage både den lineære og den udvidede model, da dette åbner mulighed for på en nem måde at undersøge forskellen i den leverede energi. Hvis man ikke har adgang til de oplysninger, der er nødvendige for at finde de fire konstanter, så er det altså stadig muligt at finde en værdi for varmeoverføringskoefficienten.

Symbolliste

α	=	Varmeovergangskoefficient	[W/m ² K]
η	=	Effektivitet	
A	=	Varmeoverførende areal	[m ²]
a, b	=	Varmevekslerkonstanter	
C	=	Varmekapacitetsstrøm	[W/K]
k_1	=	Varmeveksler konstanter 1	[W/K]
k_2	=	Varmeveksler konstanter 2	[W/K ²]
$\dot{m}$	=	Masseflow	[kg/s]
NTU	=	Relativ varmeoverføringskapacitet	
T_l	=	Temperatur af væske i lagertank	[°C]
$T_{p,ind}$	=	Indløbstemperatur på primærside	[°C]
$T_{p,us}$	=	Udløbstemperatur på primærside	[°C]
$T_{s,ind}$	=	Indløbstemperatur på sekundærside	[°C]
$T_{s,ud}$	=	Udløbstemperatur på sekundærside	[°C]
U	=	Varmetransmissionskoefficient	[W/m ² K]

7 Resultater

For at afprøve programmet er der foretaget en årssimulering med hvert af de 8 typer anlæg, der på nuværende tidspunkt er indbygget i programmet. Der er i simuleringerne brugt ens data - de komponenter der går igen i systemerne. Hvorledes systemerne er opbygget fremgår af nedenstående skema.

System	1	2	3	4	5	7	8	9
Eftervarmetank						X	X	X
Cirkulation til eftervarmetank							X	
Cirkulation til solvarmetank		X		X	X			X
Suppleringsenergi tilføres i tank	X	X				X	X	X
Suppleringsenergi til efter tank ved tapning.			X	X	X			

Skema 7.1 : *Beskrivelse af de simulerede anlæg.*

Figurer af anlæggene kan ses i afsnit 1.6. De anvendte data for de enkelte anlæg findes på installationsdisketten med programmet Solsim. Som referenceår er anvendt Try (Test Reference Year).

Resultaterne af simuleringerne fremgår af nedenstående skema. Desuden er der foretaget tilsvarende beregninger med programmet Prosol /9/. Dette program kan regne på de samme typer af anlæg. Programmet Prosol er ikke noget egentligt simuleringsprogram men beregner ydelserne på baggrund af tabelopslag i en stor database over beregnede anlæg. Ydelsene i denne database er beregnet med programmet Kviksol. De angivende ydelser fundet med programmet Prosol er derfor overslagsmæssige.

System	1	2	3	4	5	7	8	9
Solsim								
Energi fra solfangerkreds til solvarmetank	22.9	22.8	24.4	23.8	23.7	23.2	23.3	23.1
Tilført suppleringsenergi	22.2	25.5	20.2	24.0	24.4	21.8	25.5	25.4
Aftappet energi	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
Tab i cirkulationsledning	0	3.3	0	3.1	3.2	0	3.8	3.2
Nettoydelse af anlægget	22.3	22.2	24.3	23.7	23.3	22.8	22.9	22.7
Prosol								
Nettoydelse af anlægget	22.2	23.0	22.2	23.0	23.0	22.2	23.0	23.0

Skema 7.2 : Resultater fra årssimuleringer med de 8 systemer. Alle energier er angivet i MWh.

På trods af at programmet Prosol er et projekteringsværktøj til overslagsberegning af solvarmeanlægs ydelser og pris og derfor ikke regner detaljeret på anlæggene, er der en god overensstemmelse mellem de to programmers resultater ved beregning af ydelser.

Ved utraditionelle valg af komponenter og styringsmetoder for anlæggene, vil der sandsynligvis være større forskelle på beregninger af ydelser med Solsim og andre mindre detaljerede simuleringssystemer.

Reference

1. "Simulation of thermal systems, a modular program with an interactive preprocessor (EMGP3)". Willy L. Dutré. Kluwer Academic Publishers. 1991.
2. "SolEff - program til beregning af solfangeres effektivitet".
Per B. Rasmussen & Svend Svendsen. LfV, DTU. Februar 1995
3. "Solar Engineering of Thermal Processes", 2nd ed.
Duffie, John A. & Beckmann, William A. John Wiley & Sons. 1991.
4. "Simuleringsprogram for aktive solfangeranlæg, Teoretisk grundlag".
Jens Rahbek & Jane Nielsen. Eksamensprojekt ved LfV, DTU. Forår 1993.
5. "Validation of Models for Estimating Solar Radiation on Horizontal Surfaces -
Final Report, IEA TASK IX. Davies, J. A. m.fl.. Juni 1988.
6. "Danvak grundbogen". Varme- og Klimateknik, H. E. Hansen, P. Kjerulf-Jensen,
Ole B. Stampe m.fl.. Teknisk Forlag A/S. 1987.
7. "Solstrålingsdata - Dokumentation af programmet SolData".
Jerry Møller Jensen. Eksamensprojekt ved LfV, DTU. Forår 1993.
8. Simuleringsprogram vedrørende solvarmeanlæg: "Lagermodel med sammen-
hængende temperaturprofil". Frank F. Jensen & Alexander Schadow.
Eksamensprojekt ved LfV, DTU. Juni 1994.
9. "PROSOL - forslag".
BPS-centret, Cenergia ApS, COWiconsult A/S & DTI Energi. Forår 1994.

-
10. "Introduction to heat transfer". Frank P. Incropera & David P. De Witt.
2nd ed., John Wiley & Sons, inc. 1990.
 11. "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces". *Solar Energy* 39, 221-231.
R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart & D. Menicucci. 1987.
 12. "Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model". *Solar Energy Vol 53 No. 2*, 155-162.
M. P. Utrillas & J. A. Martinez-Lozano. 1994.
 13. "Prøvning og Beregning af Solfangeres Effektivitet - SolEff Programdokumentation". Per B. Rasmussen. Eksamensprojekt ved LfV, DTU. August 1994.

