

TEMPERATURLAGDELING
I FORSØGSVARMELAGER

KURT KIELSGAARD HANSEN
PREBEN NORDGAARD HANSEN
VAGN USSING

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

RAPPORT NR. 84-34

DECEMBER 1984

RESUMÉ OG KONKLUSION

I denne rapport omtales måle- og beregningsresultater fra temperaturlagdelt (stratificeret) drift af det 500 m³ store forsøgsvarmelager på DTH's forsøgsareal.

Der omtales måleopstillinger og -udstyr til registrering af den udførte opladning på 126 timer og den efterfølgende afladning på 261 timer. De foretagne registreringer omfatter fremløbstemperatur og volumenstrøm samt temperaturprofil ned gennem lageret i lagerets midte.

Den opstillede edb-model for forsøgsvarmelageret videreudvikles til stratificeret drift af lageret, og beregningsresultaterne for både op- og afladning sammenholdes med de tilsvarende måleresultater.

Der findes god overensstemmelse mellem måle- og beregningsresultater, og det kan derfor konkluderes, at det anvendte program kan anvendes til simulering af den termiske virkemåde for denne form for lagre.

INDHOLD

1.	INDLEDNING	1
2.	LAGDELING (stratificering)	2
3.	MÅLEOPSTILLINGER	3
3.1	Måleudstyr	5
4.	MÅLINGER	9
5.	BEREGNINGSPROGRAM OG VERIFICERING	15
5.1	EDB-program	15
5.2	Den konvektive flytning	15
5.3	Varmebalance	21
5.4	Inddata til programmet	23
5.5	Uddata fra programmet	23
5.6	Verificering af måleresultater	24
6.	REFERENCER	27

Appendix A Beskrivelse af "upstream-difference" tilnærmelse
for det konvektive bidrag hidrørende fra den ved
vandtilførsel forårsagede strømning.

Beregningsresultater.

1. INDLEDNING

I fortsættelse af det afsluttede EFP-82 projekt "Sæsonvarmelager" og det hertil knyttede og afsluttede EF-arbejde [1] og EFP-83 projektet "Fortsat måleprogram vedrørende sæsonvarmelager" er der som en indledende undersøgelse til EFP-84 projektet "Funktionsforbedringer for damvarmelagre" i perioden 17/9 - 3/10 1984 udført målinger under stratificeret drift af det 500 m³ store damvarmelager på DTH's forsøgsareal. I denne periode er lageret opladet en gang på 126 timer og umiddelbart derefter afladet igen på 261 timer.

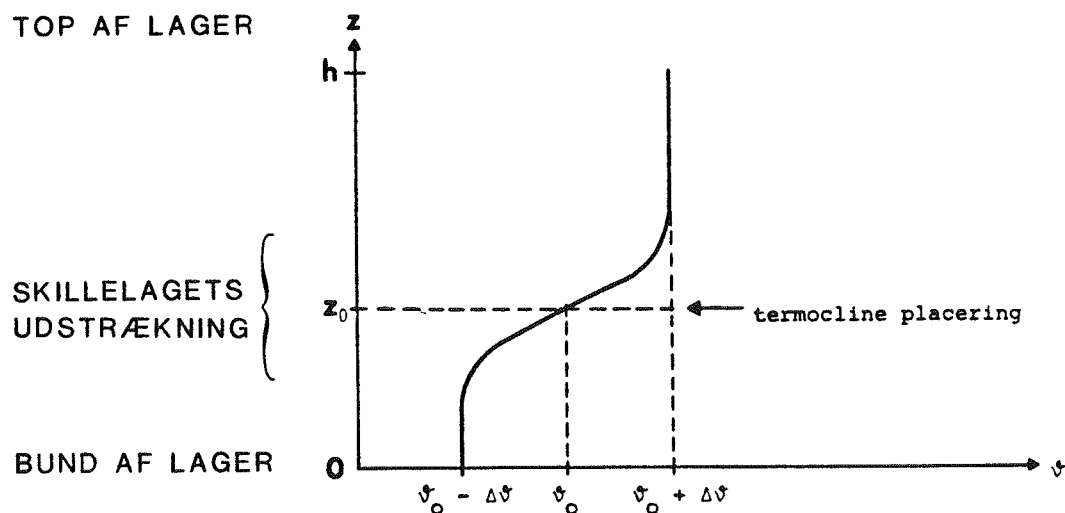
Den opstillede edb-model for damvarmelageret, der indtil nu har været baseret på fuld temperaturopblanding af lagervandet, er videreudviklet til stratificeret drift af lageret.

De ovenfor nævnte målinger for en oplade- og afladecyklus sammenholdes derefter med beregningsresultater fra edb-modellen.

2. LAGDELING (stratificering)

Under stratificeret drift oplades lageret principielt ved, at vand med temperaturer $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$ ledes ind i toppen af lageret, samtidig med at den samme mængde vand udtages ved bunden med temperaturen $\vartheta_0 - \Delta\vartheta$. Herved vandrer termoclinen fra toppen til bunden af lageret. Lageret tappes for varme ved at lede vand med temperatur $\vartheta_0 - \Delta\vartheta$ ind i bunden og samtidig udtage den samme mængde i toppen med temperaturen $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$. Herved vandrer termoclinen fra bund mod top igen.

Teoretiske overvejelser vedrørende stratificering er bl.a. omtalt i [2].



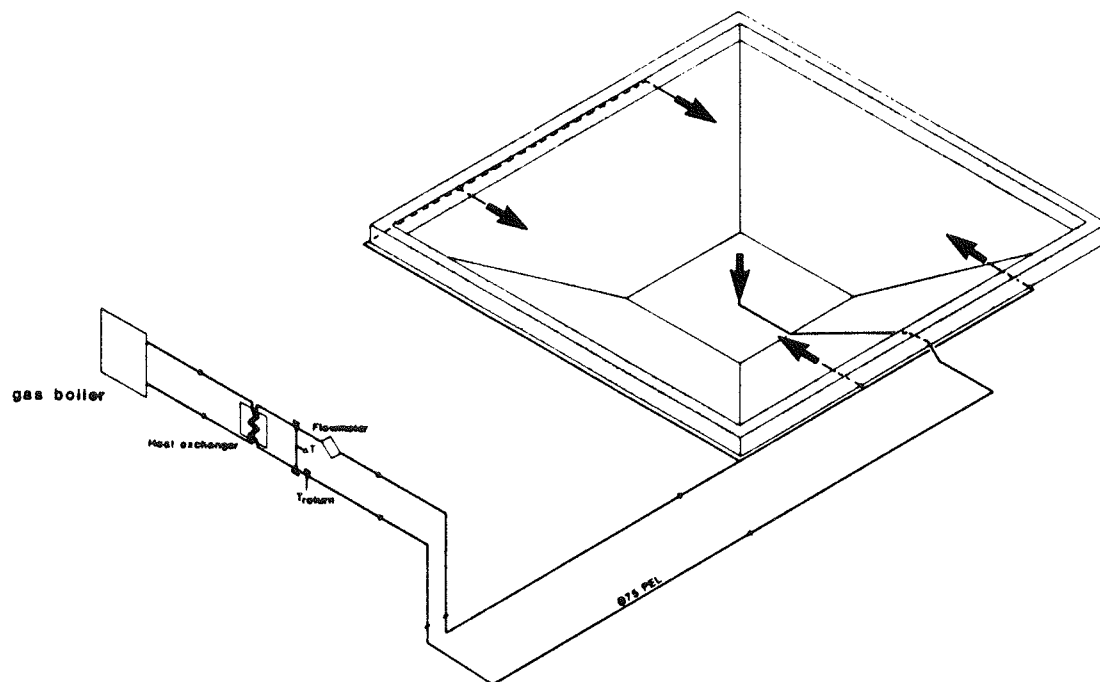
Figur 1. Temperaturprofil i stratificeret lager.

3. MÅLEOPSTILLINGER

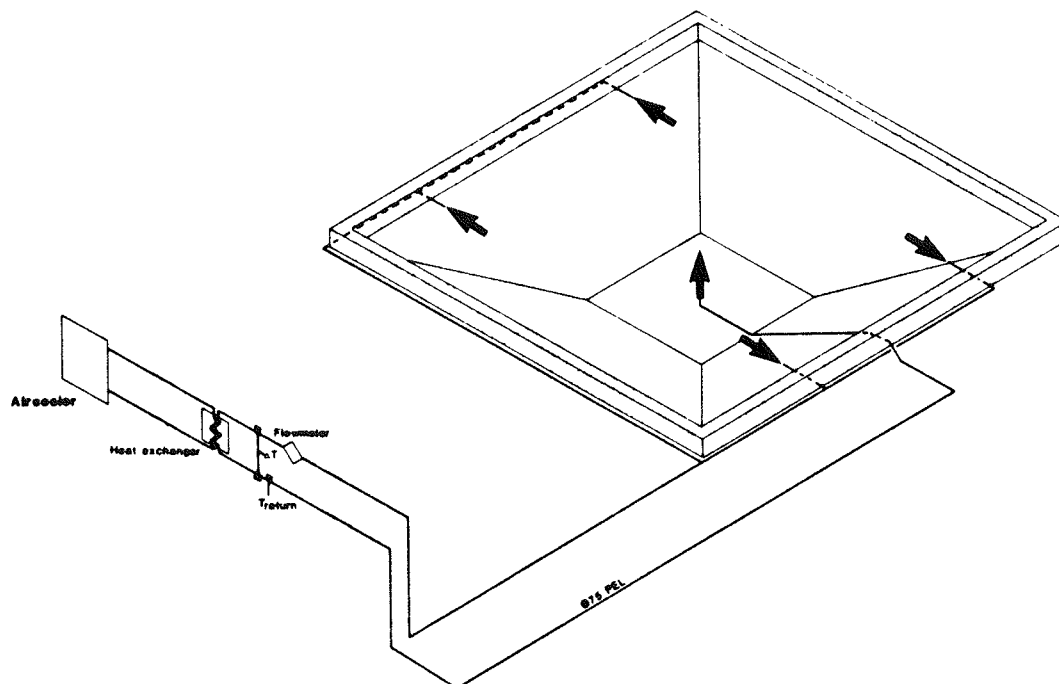
Figur 2 viser en principskitse af opstillingen til stratificeret opladning af damvarmelageret. Gaskedlerne kan via varmevekslerne maksimalt levere 52 kW, der med en bundtemperatur i lageret på 32°C og en volumenstrøm på 64 l/min giver en fremløbstemperatur til toppen af lageret på ca. 44°C.

Figur 3 viser opstillingen til stratificeret afladning af damvarmelageret. Luftkøleren kan via varmevekslerne maksimalt bortkøle 25 kW (lidt afhængig af udetemperaturen), der med en toptemperatur i lageret på 43,5°C og en volumenstrøm på 37 l/min giver en returløbstemperatur til bunden af lageret på ca. 34°C.

De øvrige komponenter i kedelrummet samt varmforsynings-systemet er vist i [1] og [3], og de vil derfor ikke blive omtalt yderligere i denne rapport.



Figur 2. Opladning (stratificeret).



Figur 3. Afladning (stratificeret).

3.1 Måleudstyr

Som antydnet på figur 1 har skillelaget en begrænset udstrækning. Dette gør, at den hidtil anvendte afstand på 750-900 mm mellem målepunkterne i vandet [1] bliver alt for stor til en rimelig registrering af skillelagets udstrækning.

Med ønsket om dels at beholde alle 51 termoelementer i jorden omkring lageret og dels i vandet at beholde mindst én eksisterende målekæde i midten af lageret (5 målepunkter) samt én eksisterende målekæde ved lagerets kant (3 målepunkter) blev resultatet, at en lodret flytbar målesonde blev udstyret med 14 termoelementer med en indbyrdes afstand på 100 mm, se figurerne 4 og 6. Målesonden har 4 positioner langs et lodret anbragt, galvaniseret jernrør, der står på bunden af lageret, og sonden må flyttes, efterhånden som termoclinen bevæger sig. Efter en flytning er der afhængig af positionen 4-5 termoelementer, der dækker målepositioner identiske med forrige placering af målepositioner.

Målesonden kommer ned i lageret gennem et $\varnothing 75$ mm rør i det flydende låg, figur 6. Røret var oprindeligt tænkt anvendt til varmetilførsel ned gennem låget (se p. 46 i [1]).

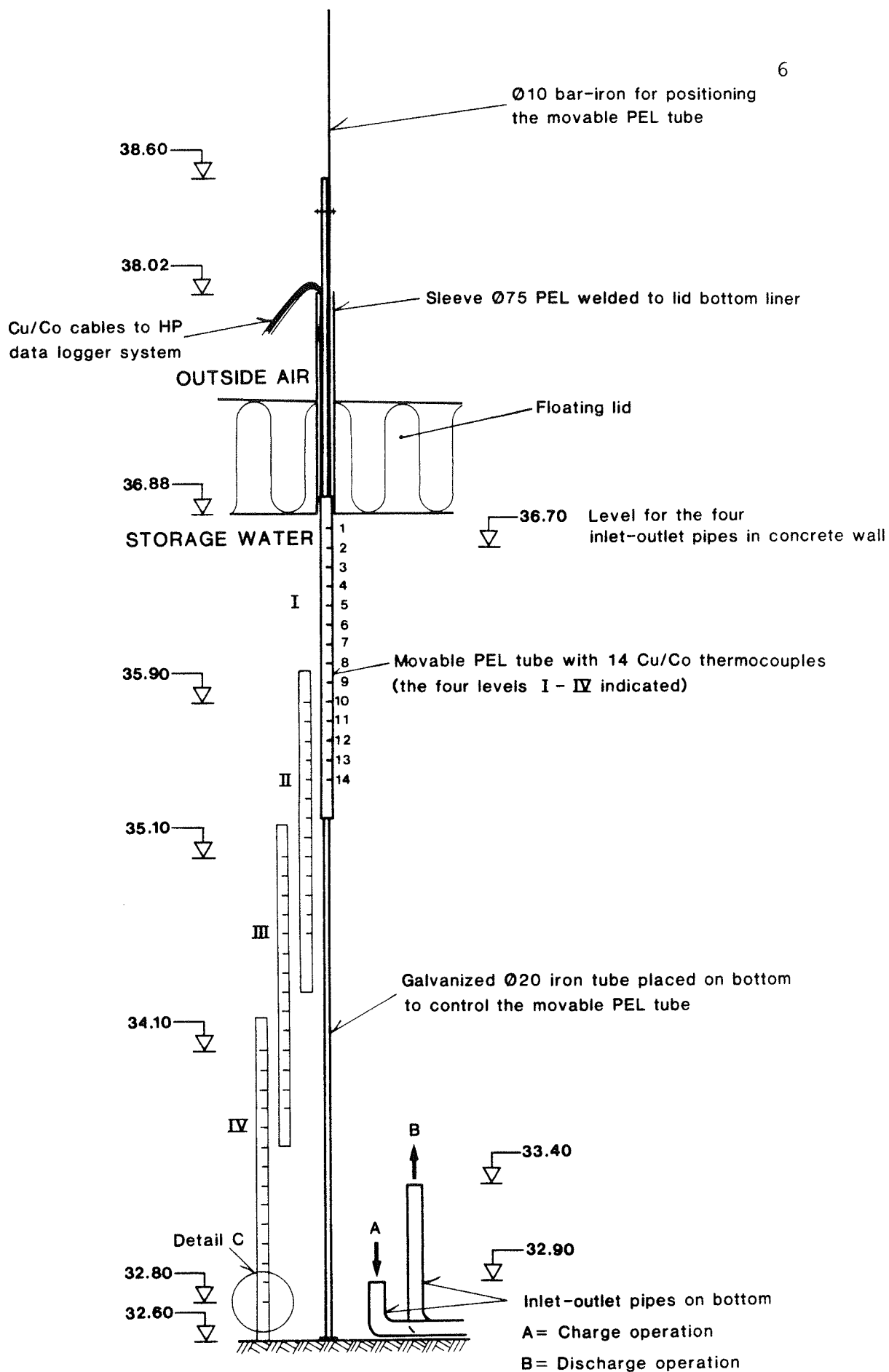


Figure 4. Measuring arrangement for study of temperature stratification during loading and unloading of underground topinsulated heat storage.

Figur 4. Måleopstilling til studie af temperaturlagdeling under op- og afladning af forsøgsvarmelageret.

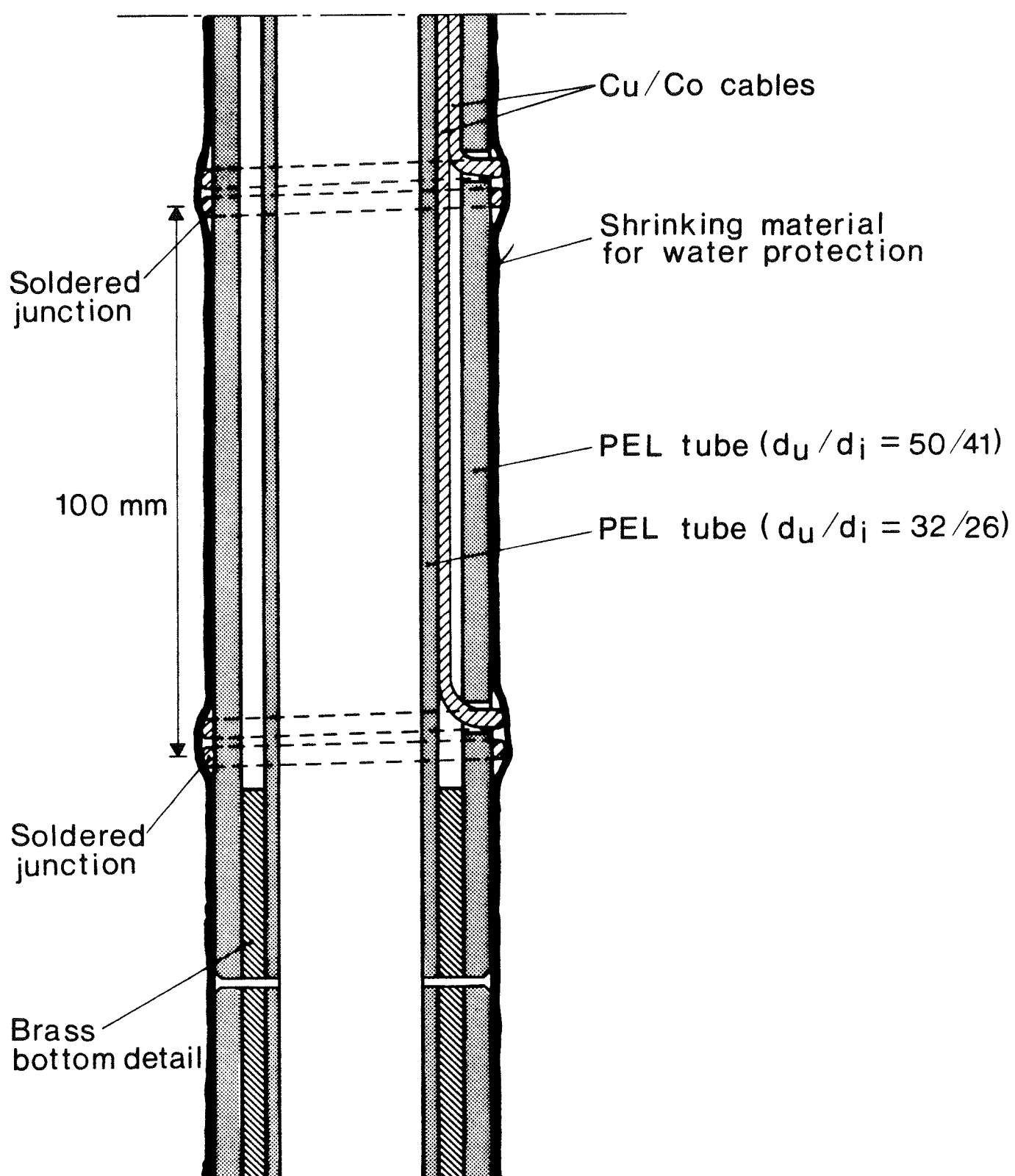
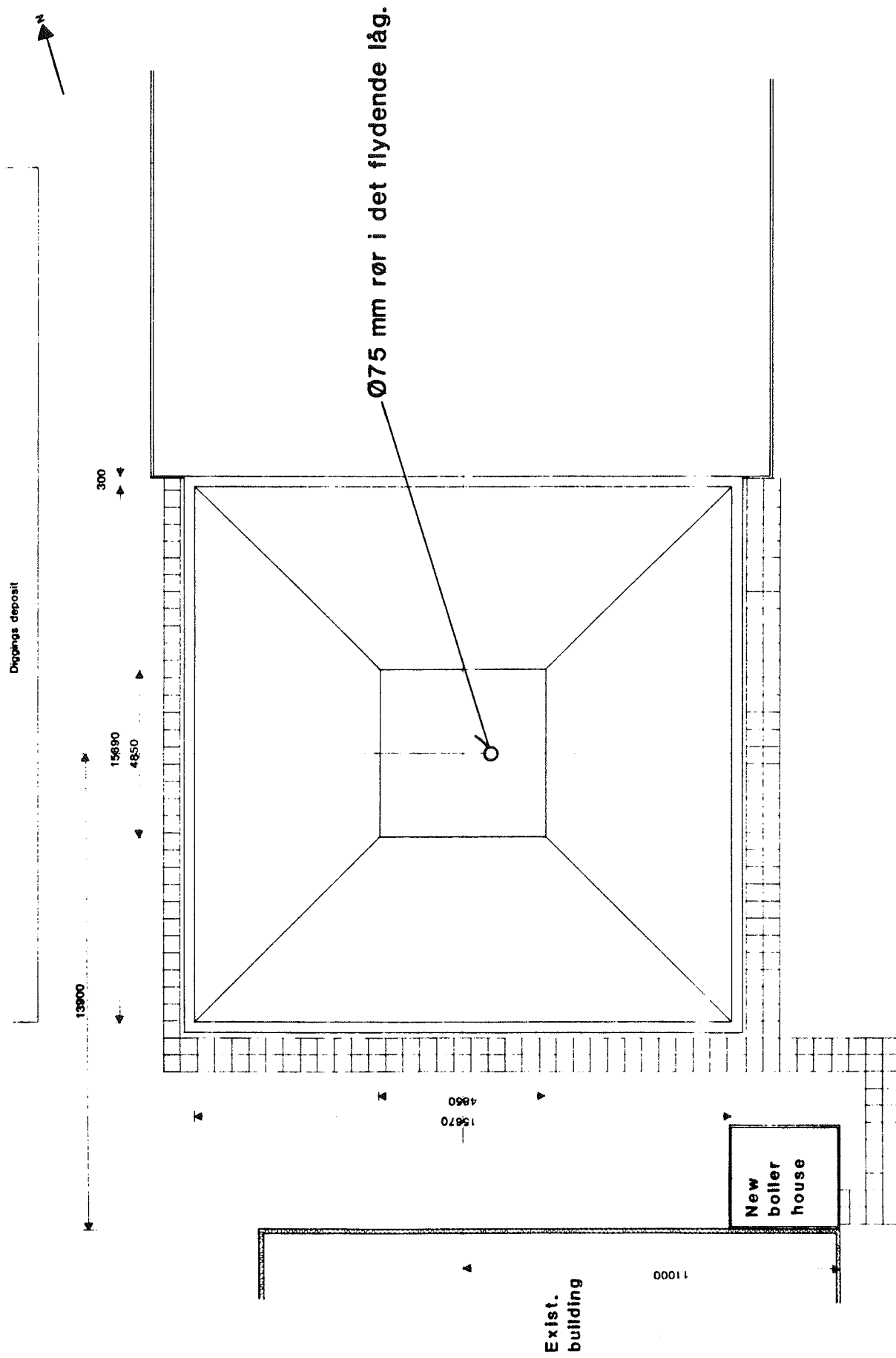


Figure 5. Detail C from figure 4.

Figur 5. Detalje C fra figur 4.



Figur 6. Plan af damvarmelager.

4. MÅLINGER

Alle termoelementer i både jord og vand scannes automatisk en gang i timen med Hewlett Packard 3054A datalogger systemet; de eneste temperaturer, som scannes hvert andet minut, er temperaturdifferencen over varmevekslerne (lagerkredsen) og fremløbstemperaturen til lageret. Hver time udskriver datalogger systemet alle jord- og vandtemperaturer samt midlet temperaturdifference og fremløbstemperatur på papir og på magnetbånd (for senere dataoverførsel til NEUCC). En time-udskrift kan ses på figur 7.

Figur 8 viser målte værdier for volumenstrøm og fremløbstemperatur til toppen af lageret under opladning, og figur 9 viser de tilhørende målte temperaturer i midten af lageret.

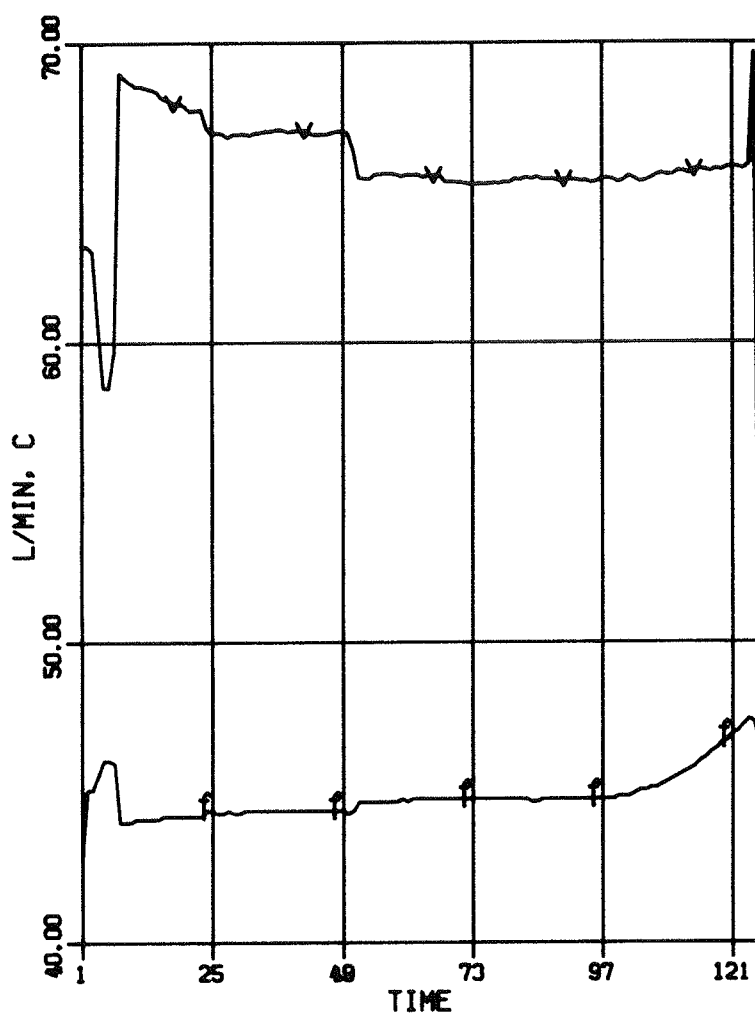
Figur 10 viser tilsvarende målte værdier for volumenstrøm og fremløbstemperatur til bunden af lageret under afladning, og figur 11 viser de tilhørende målte temperaturer i midten af lageret.

DATE: 09:17:08:05:09 TIME NR. 0

	1	2	3	4	5	6
	C	C	C	C	C	C
STAVNR: 1	32.9	32.8	32.5	31.3	29.5	-
STAVNR: 2	32.8	33.1	32.9	31.8	30.3	-
AVNR: 3	32.9	33	32.7	31.4	29.7	-
STAVNR: 4	32.9	33.1	33.1	32.4	31.1	-
STAVNR: 5	22.6	24.6	25.9	26.9	26.8	-
STAVNR: 6	10.5	20.6	22.4	21.1	19.2	17.2
STAVNR: 7	32.8	32.7	32.3	30.7	29.1	-
STAVNR: 8	32.1	31.8	31.5	29.9	28	-
STAVNR: 9	18.3	19.7	20.8	21.5	21.3	-
STAVNR: 10	12.5	14.5	15.5	17	17.4	-
STAVNR: 11	32.4	32.4	32.3	32.3	32.3	-
STAVNR: 12	32.3	32.3	32.2	32.3	32.2	-
STAVNR: 13	32.3	32.3	32.3	32.2	-	-
STAVNR: 14	32.2	32.2	32.3	32.3	32.3	-
STAVNR: 15	32.3	32.2	32.2	-	-	-
Tude=	9.7	0	0	0	Flow=0	1/min
Tfrem= 32 C	DeltaT= .134C	Qdag=0		kW	Qtot=	0.00MWh

Figur 7. Eksempel på en time-udskrift fra datalogger. De indcirklede temperaturer er fra målesonden.

v = VOLUMENSTRØM l/min f = FREMLØBSTEMPERATUR °C



Figur 8. Opladning. Målte værdier for volumenstrøm og fremløbs-temperatur til toppen af lageret.

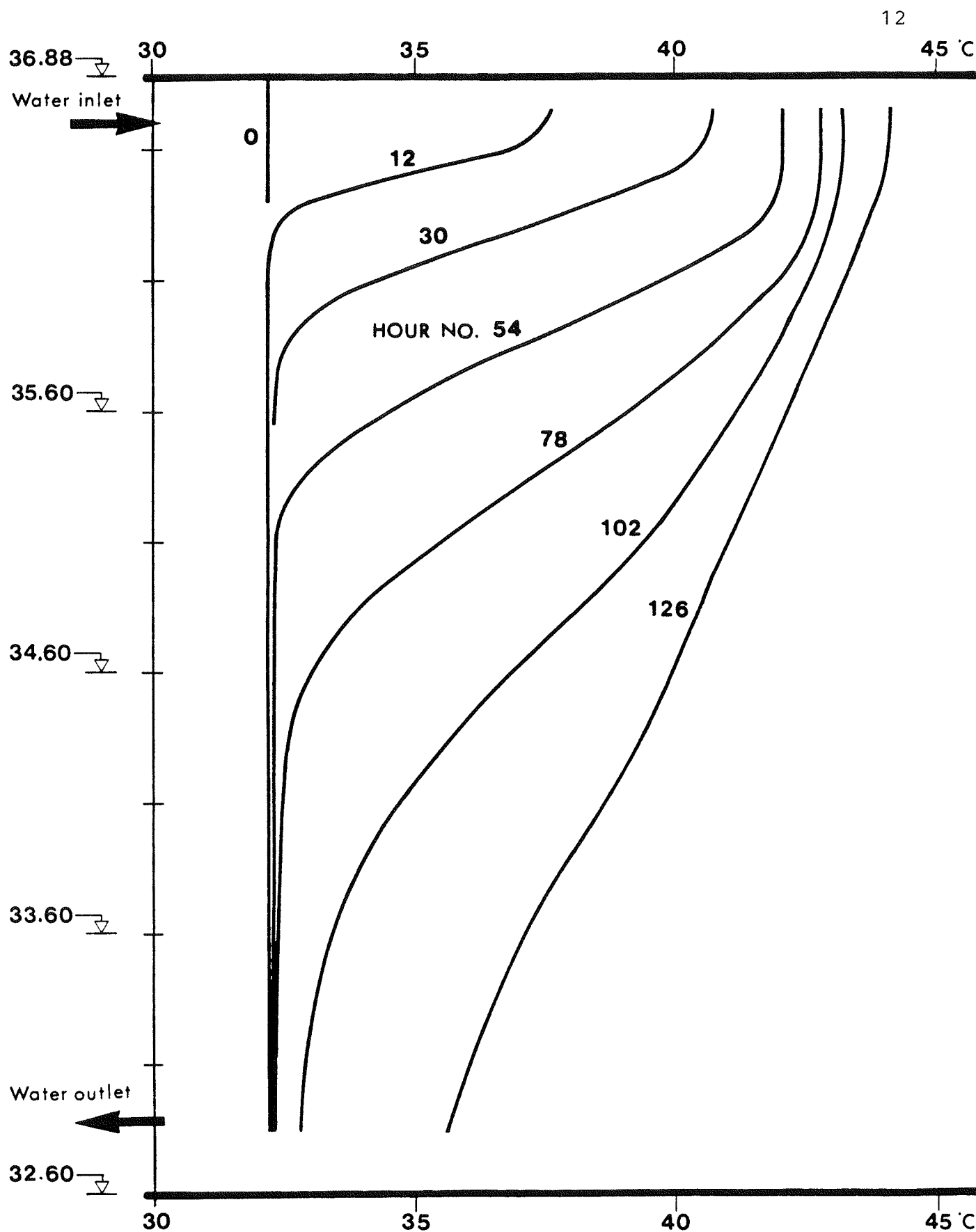
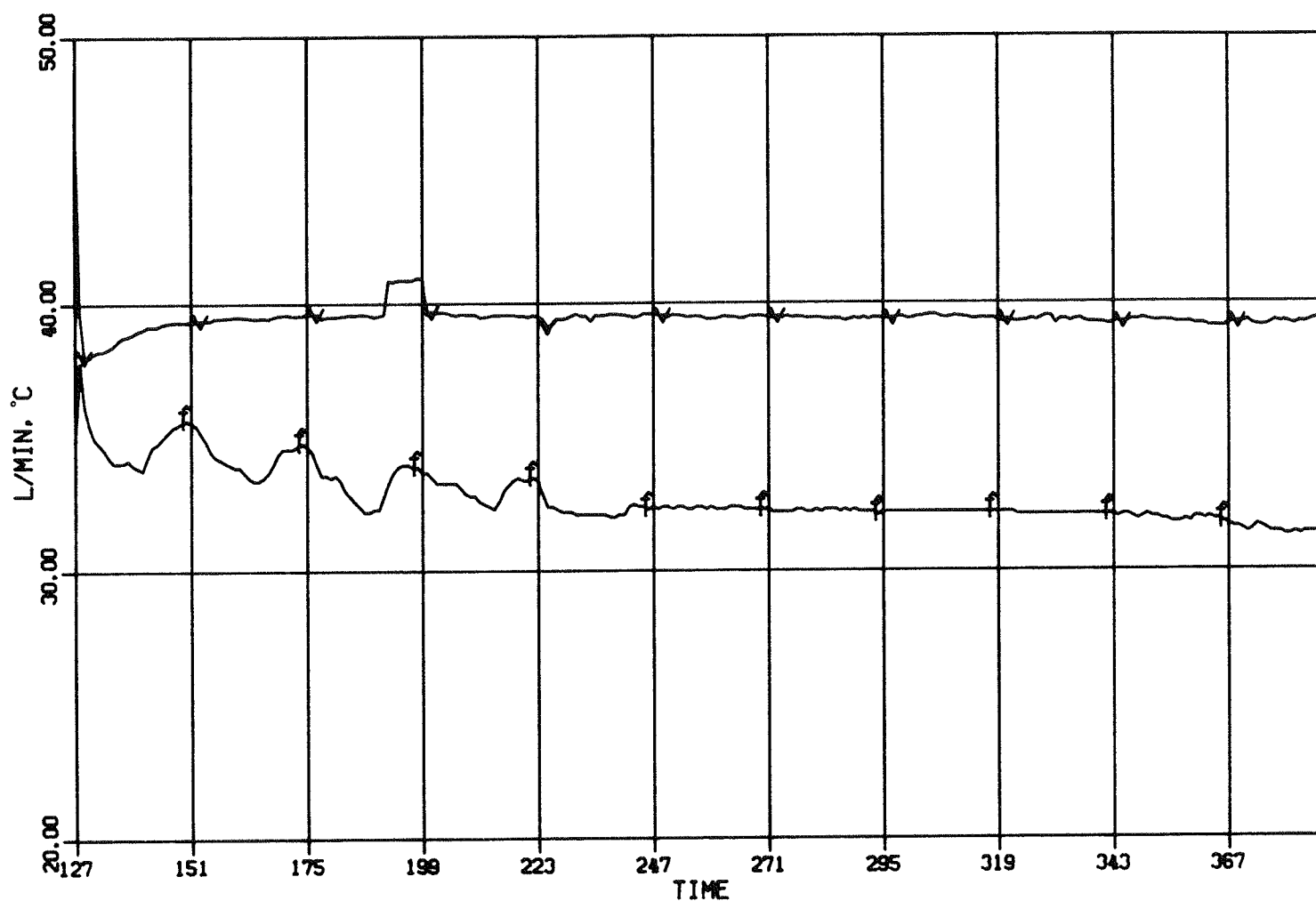


Figure 9. Charge operation. Measured temperatures.

Figur 9. Opladning. Målte temperaturer.

$v = \text{VOLUMENSTRØM l/min}$ $f = \text{FREMLØBSTEMPERATUR } ^\circ\text{C}$ 

Figur 10. Afladning. Målte værdier for volumenstrøm og fremløbstemperatur til bunden af lageret.

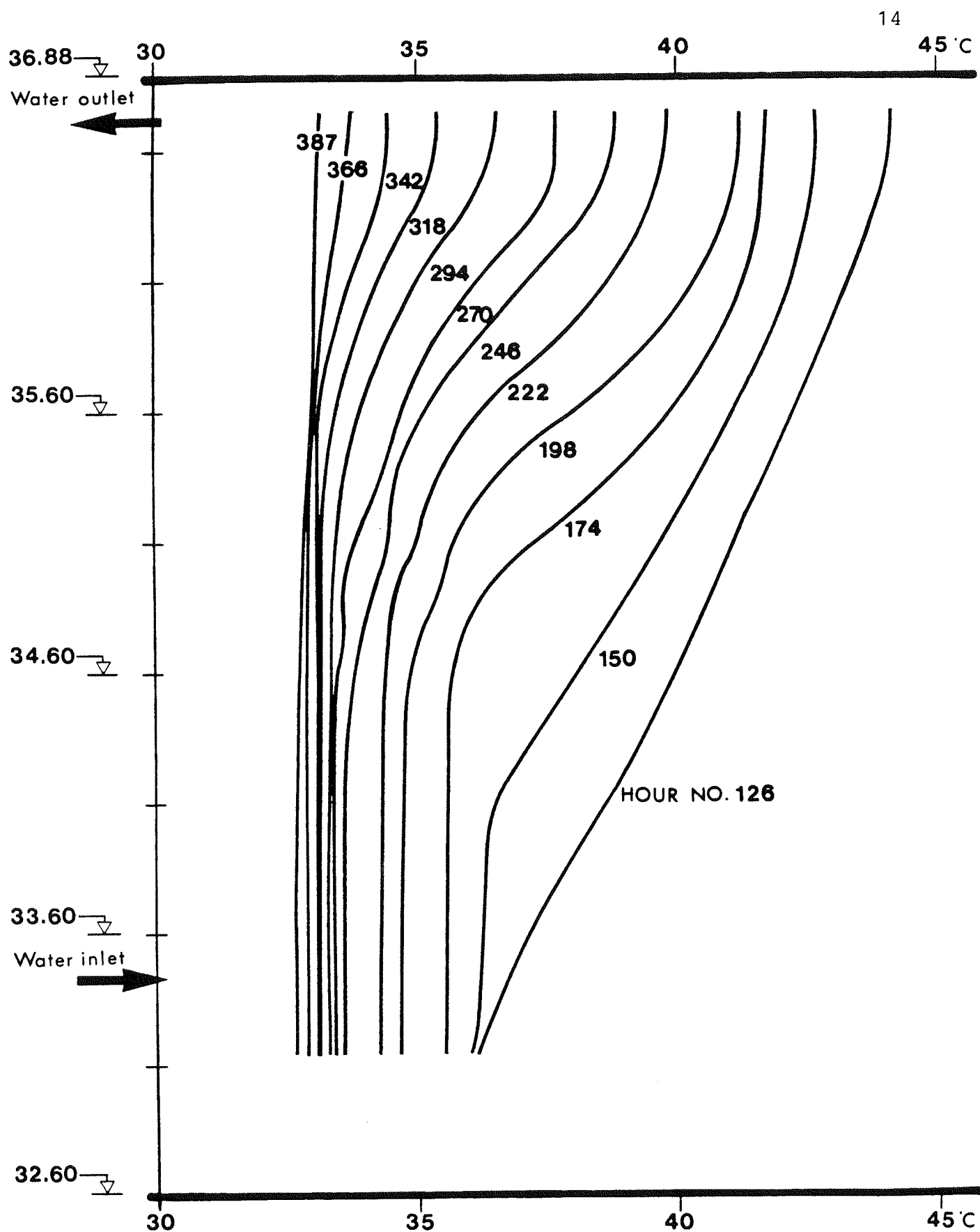


Figure 11. Discharge operation. Measured temperatures.

Figur 11. Afladning. Målte temperaturer.

5. BEREGNINGSPROGRAM OG VERIFICERING

5.1 EDB-program

Den tredimensionale model for 1/8 af lager (fuld opblanding) og omgivende jord er gennemgået i [4], og derfor vil kun stratificeringsberegningerne i vandvoluminet blive omtalt her.

I starten blev der arbejdet med "upstream-difference" tilnærmelse [5] for det konvektive bidrag hidrørende fra den ved vandtilførsel forårsagede strømning, men det blev klart, at denne metode kun er anvendelig med lodrette sider på lageret. I appendix A er vist resultater vha. denne metode.

Resultatet blev en løsning med anvendelse af superpositionsprincippet. Først beregnes temperaturen i vandelementerne (netpunkterne) efter den konvektive flytning hidrørende fra strømmingen i tidsskridtet Δt , og derefter korrigeres for varmemstrømme gennem elementernes begrænsningsflader (dvs. tab til jord og varmeledning i vand). Et oversigtsdiagram over programmet er vist på figur 12.

5.2 Den konvektive flytning

Med kendskab til strømmingens hastighed i s-aksens retning kan vandringen af vandelementernes temperatur i et tidskridt Δt beregnes.

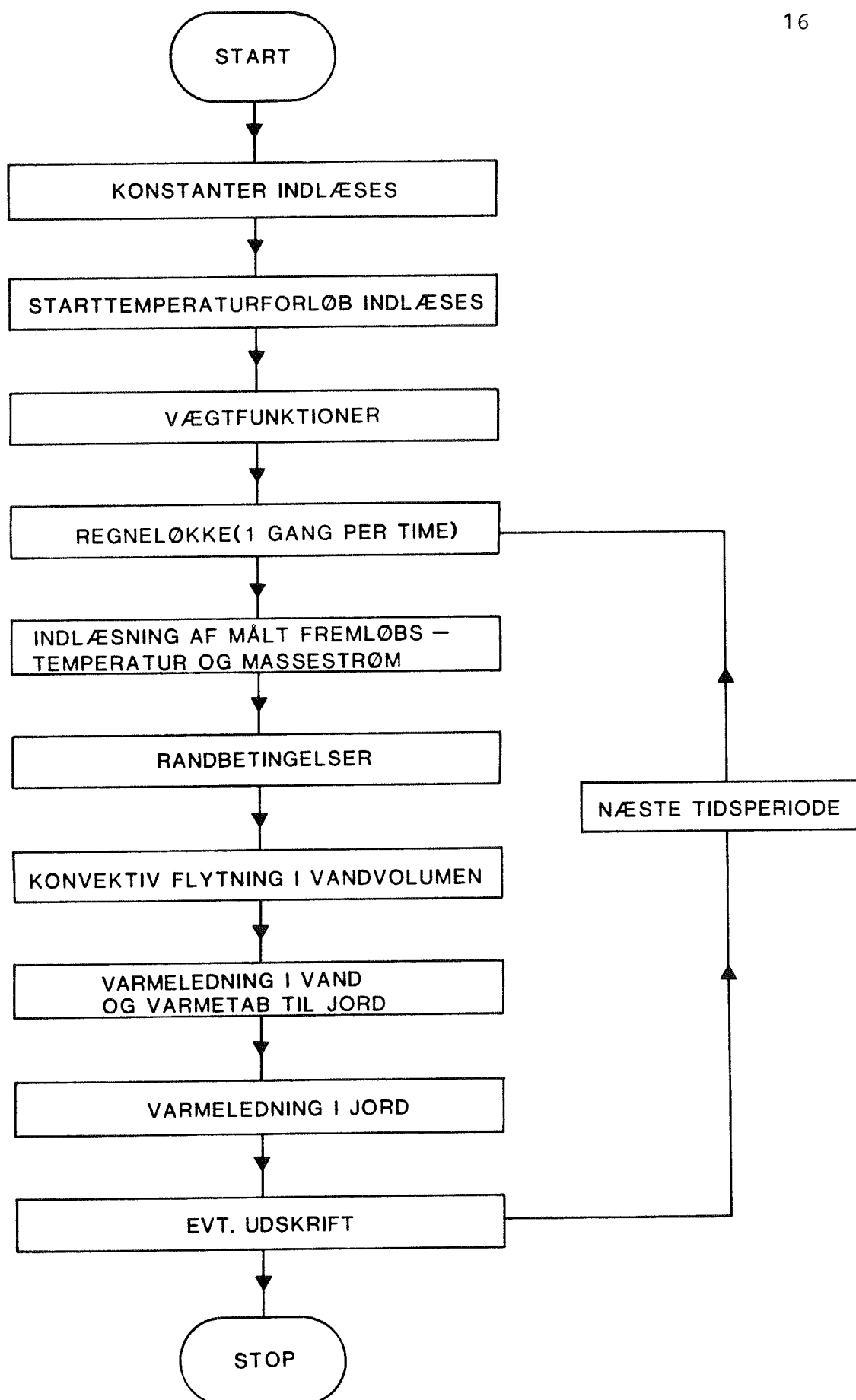
Først udtrykkes tværsnitsarealet med positionen s , fig. 13:

$$A = a \cdot s^2 \quad (1)$$

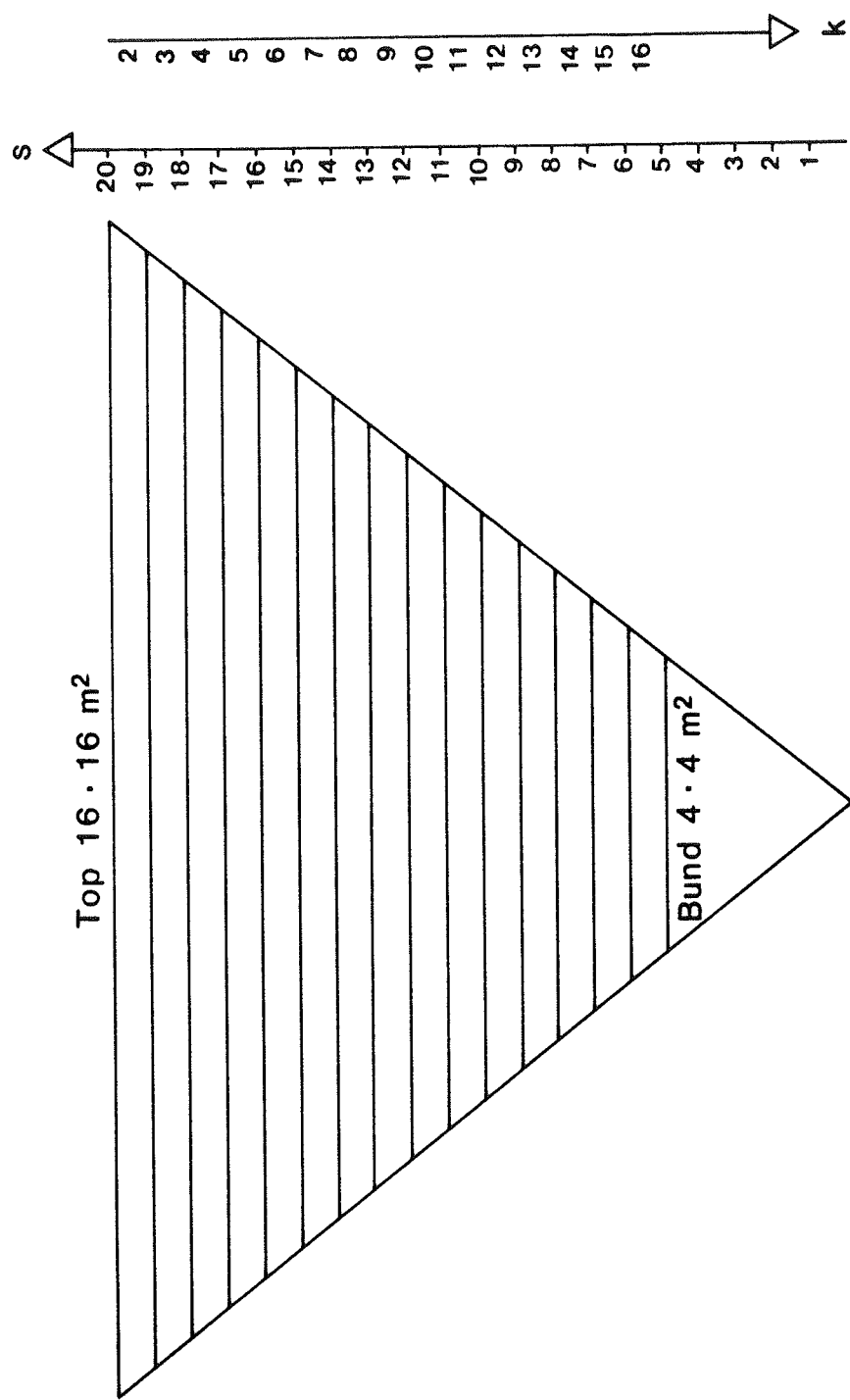
For $s = 5$ (bunden af lageret) gælder:

$$16 \text{ m}^2 = a \cdot 5^2 \quad \Rightarrow$$

$$a = \frac{16}{25}$$



Figur 12. Oversigtsdiagram over LfV's EDB-program til 500 m³ damvarmelager til stratifikationsberegninger.



Figur 13. Tværsnitsareal med positionen s (til anvendelse i den konvekative flytningsberegning). For at komme til vandlementernes centre (netpunkterne) benyttes s -værdien minus 0.5. k -aksen anvendes i figur 15.

der indsat i ligning (1) giver

$$A = \frac{16}{25} s^2 \quad (2)$$

Hastigheden i s-aksens retning er, når vandelementernes højde er 0,3 m:

$$\begin{aligned} u(s) &= 0,3 \frac{ds}{dt} \Rightarrow \\ 0,3 \int \frac{ds}{u(s)} &= \int dt \end{aligned} \quad (3)$$

For $u(s)$ benyttes

$$u(s) = \frac{\dot{v}}{A} = \frac{\dot{v}}{\frac{16}{25} s^2}$$

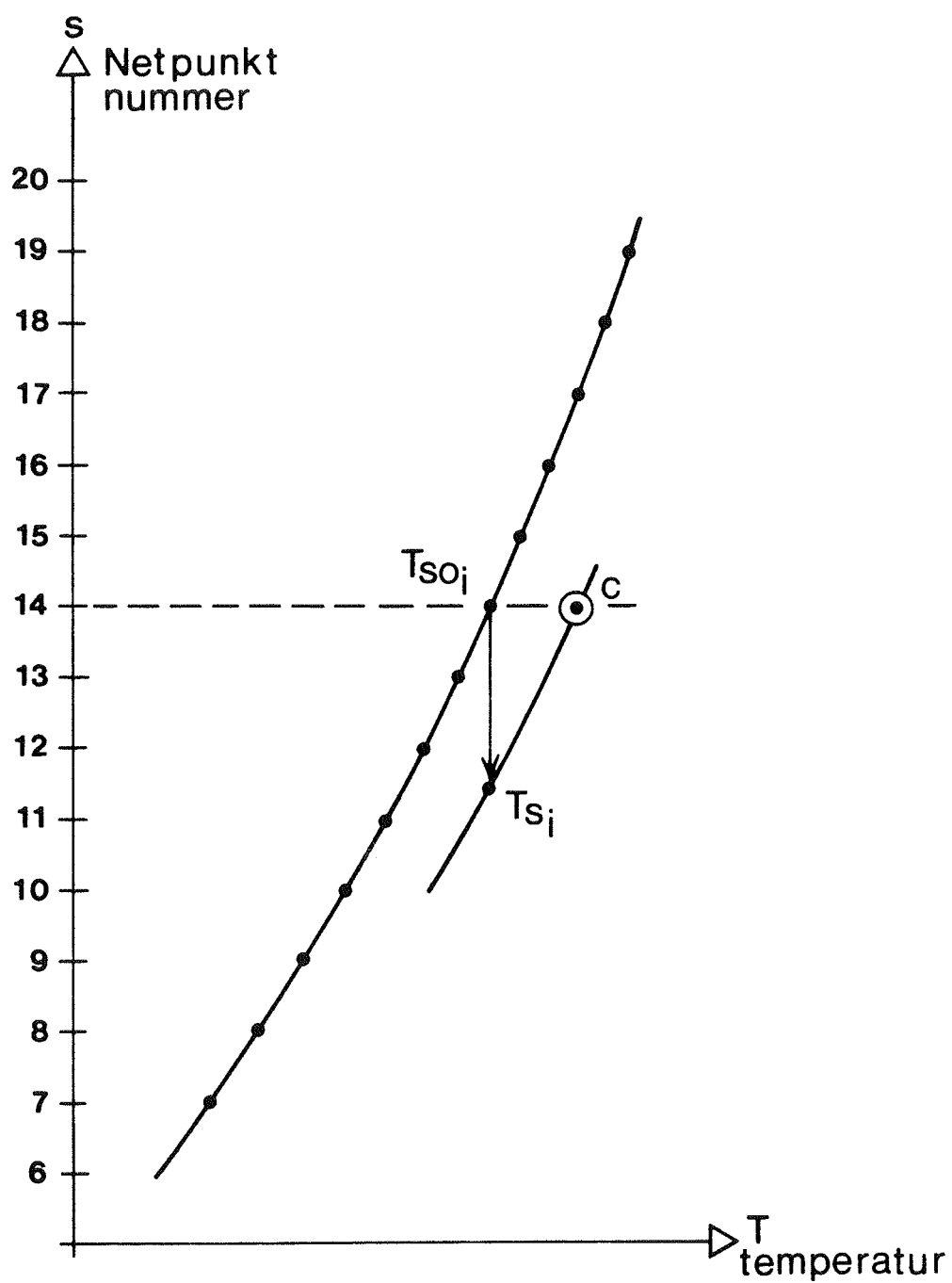
hvor $\dot{v}$ er volumenstrømmen (se figur 15), og A fås fra ligning (2).

Indsættes i (3), fås

$$\begin{aligned} 0,3 \int \frac{ds}{\frac{\dot{v}}{\frac{16}{25} s^2}} &= \int dt \Rightarrow \\ 0,3 \int \frac{\frac{16}{25} s^2}{\dot{v}} ds &= \int dt \end{aligned}$$

Enhver temperaturs vandring i et tidsskridt Δt kan nu beregnes, se figur 14.

$$\begin{aligned} 0,3 \int_{s_{0_i}}^{s_i} \frac{\frac{16}{25} s^2}{\dot{v}} ds &= \int_0^{\Delta t} dt \Rightarrow \\ 0,3 \frac{16}{25 \dot{v}} \frac{1}{3} (s_i^3 - s_{0_i}^3) &= \Delta t \Rightarrow \\ s_i^3 &= s_{0_i}^3 + \frac{\dot{v} \cdot \Delta t \cdot 3 \cdot 25}{0,3 \cdot 16} \Rightarrow \end{aligned}$$



Figur 14. Temperaturernes vandring i et tidsskridt.
Index s angiver ny placering efter tidsskridtet.

$$s_i^3 = s_{0i}^3 + B \quad \Rightarrow$$

$$s_i = \sqrt[3]{s_{0i}^3 + B}$$

Ved opladning er $\dot{v}$ negativ, og ved afladning er $\dot{v}$ positiv.

Det antages nu, at temperaturerne i tre ved hinanden liggende netpunkter kan beskrives af en parabel efter den konvektive flytning i tidsskridtet Δt :

$$T_s = a \cdot s + b \cdot s^2 + c$$

Indføres parametertransformationen $s = s - s_0$, fås

$$s_{i+1} = s_{i+1} - s_{0i}$$

$$s_i = s_i - s_{0i}$$

$$s_{i-1} = s_{i-1} - s_{0i}$$

og dermed

$$T_s = a \cdot s + b \cdot s^2 + c$$

Konstanten c vil da være temperaturen i punktet s_0 efter den konvektive flytning i tidsskridtet Δt :

$$T_{s_{i+1}} = a \cdot s_{i+1} + b(s_{i+1})^2 + c \quad (4)$$

$$T_{s_i} = a \cdot s_i + b(s_i)^2 + c \quad (5)$$

$$T_{s_{i-1}} = a \cdot s_{i-1} + b(s_{i-1})^2 + c \quad (6)$$

For at finde c anvendes substitutionsmetoden, og ligningerne (4) + (5) og (5) + (6) betragtes parvis. Via (4) + (5) kan a elimineres, og sammen med (5) + (6) kan b elimineres.

Sluttelig fås følgende ligning til bestemmelse af c :

$$\frac{s_{i-1} - s_i}{s_{i+1}} T_{s_{i+1}} - \frac{s_{i+1} - s_i}{s_{i-1}} T_{s_{i-1}} + \left(\frac{s_{i+1}}{s_i} - \frac{s_{i-1}}{s_i} \right) T_{s_i}$$

$$= c \left(\frac{s_{i-1}}{s_{i+1}} - \frac{s_{i-1}}{s_i} - \frac{s_i}{s_{i+1}} - \frac{s_{i+1}}{s_{i-1}} + \frac{s_{i+1}}{s_i} + \frac{s_i}{s_{i-1}} \right)$$

Dette gennemregnes for alle netpunkterne i hvert tidsskridt.

5.3 Varmebalance

Når således alle netpunkternes temperaturvandringer hidrørende fra strømmingen er fundet, beregnes igen alle netpunkternes temperaturændringer via en varmebalance.

Varmebalancen for k-te "vandelement", se figur 15:

$$V_k \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot \frac{dT}{dt} = \Sigma A \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{du}$$

Ligningen siger: Ændringen i et volumenelements temperatur pr. tidsenhed er lig med summen af varmestrømmen gennem elementets begrænsningsflader.

Princippet i programmeringen af ligningen bliver:

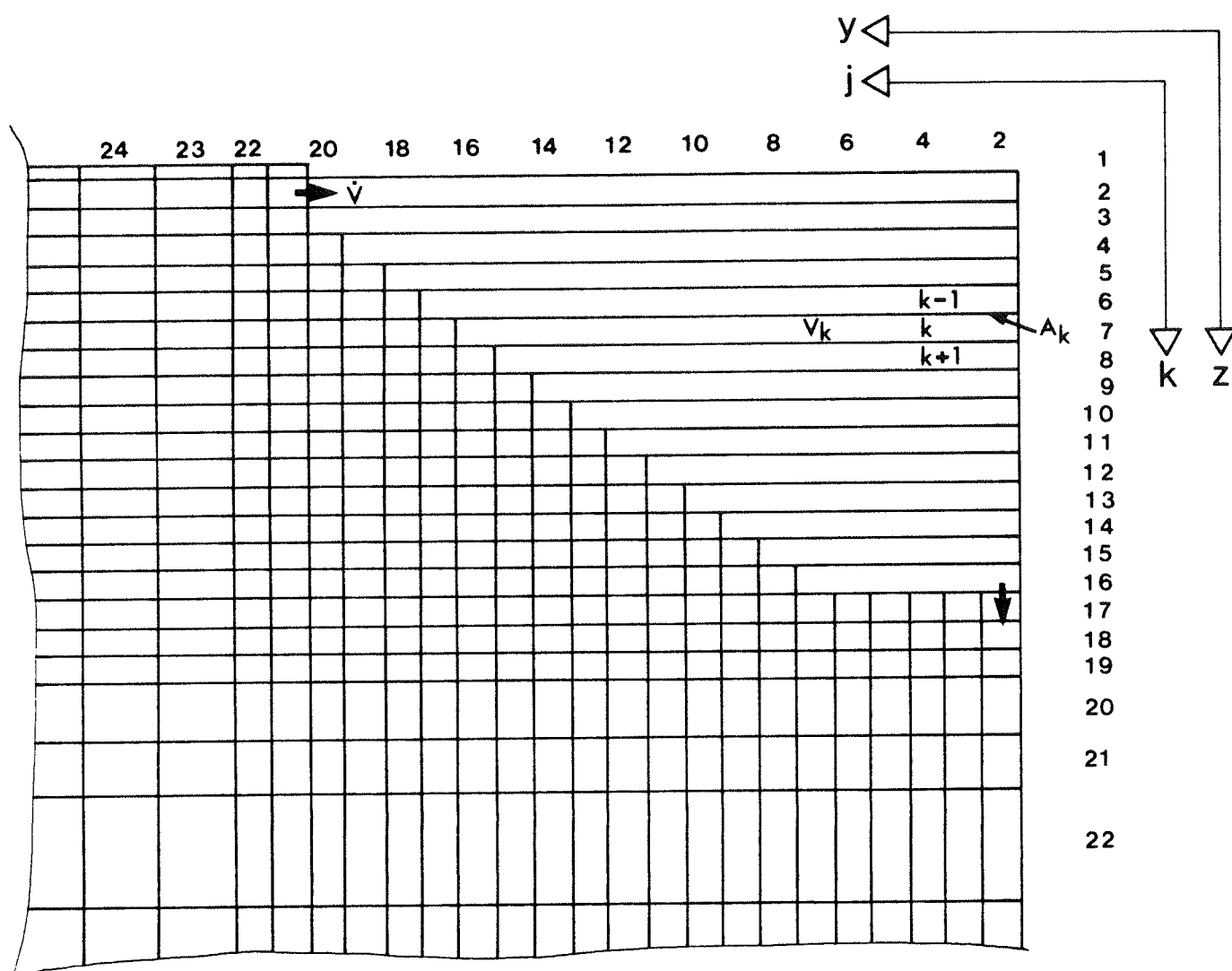
$$V_k \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot \frac{T_k^{t_1+\Delta t} - T_k^{t_1}}{\Delta t} = A_k \cdot \lambda_T \cdot \frac{T_{k-1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{\Delta z}$$

$$+ A_{k+1} \cdot \lambda_T \cdot \frac{T_{k+1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{\Delta z}$$

$$+ \Sigma \Delta x \cdot \Delta z \cdot \frac{T_{j1+1,k}^{t_1} - T_k^{t_1}}{M}$$

$$+ \Sigma \Delta x \cdot \Delta y \cdot \frac{T_{j1,k+1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{M}$$

De to første bidrag på højre side af lighedstegnet er varmeledning i vand, og de to næste bidrag er varmetab til jordelementer.



Figur 15. En del af netpunkterne (netpunkterne er centrum i de viste elementer). Opladning.

5.4 Inddata til programmet

En udskrift af inddata, der yderligere er nødvendig for simulering af temperaturforløbet med stratificeret vandvolumen, er vist på figur 16. Programmet regner som nævnt på 1/8 af lager og omgivende jord, og venstre søjle i figur 16 er 1/8 volumen for vandelementerne (svarende til V_k 'er på figur 15). Den højre søjle i figur 16 er de tilsvarende arealer (svarende til A_k 'er på figur 15).

V_k	A_k
8.664	28.88
8.664	28.88
8.664	28.88
7.776	25.92
6.936	23.12
6.144	20.48
5.400	18.00
4.704	15.68
4.056	13.52
3.456	11.52
2.904	9.68
2.400	8.00
1.944	6.48
1.536	5.12
1.176	3.92
0.864	2.88

Figur 16. Volumen og tilsvarende areal for vandelementerne.

5.5 Uddata fra programmet

Eksempel på uddata kan ses på figur 17.

```

VANDTEMPERATURER  1
MP EE
  2 32.76
  3 32.19
  4 32.20
  5 32.20
  6 32.20
  7 32.20
  8 32.20
  9 32.20
 10 32.20
 11 32.20
 12 32.20
 13 32.20
 14 32.20
 15 32.20
 16 32.21

```

Figur 17. Eksempel på uddata (time nr. 1).

5.6 Verificering af måleresultater

Figur 18 viser de målte og de beregnede temperaturer for de 126 timer i opladningsfasen, og figur 19 viser tilsvarende de målte og de beregnede temperaturer for de 261 timer i afladningsfasen. Det skal bemærkes, at beregningsresultaterne for både op- og afladning er fremkommet i én simulering.

På ovenstående grundlag kan det konkluderes, at det anvendte program kan anvendes til simulering af den termiske virkemåde for denne form for lagre.

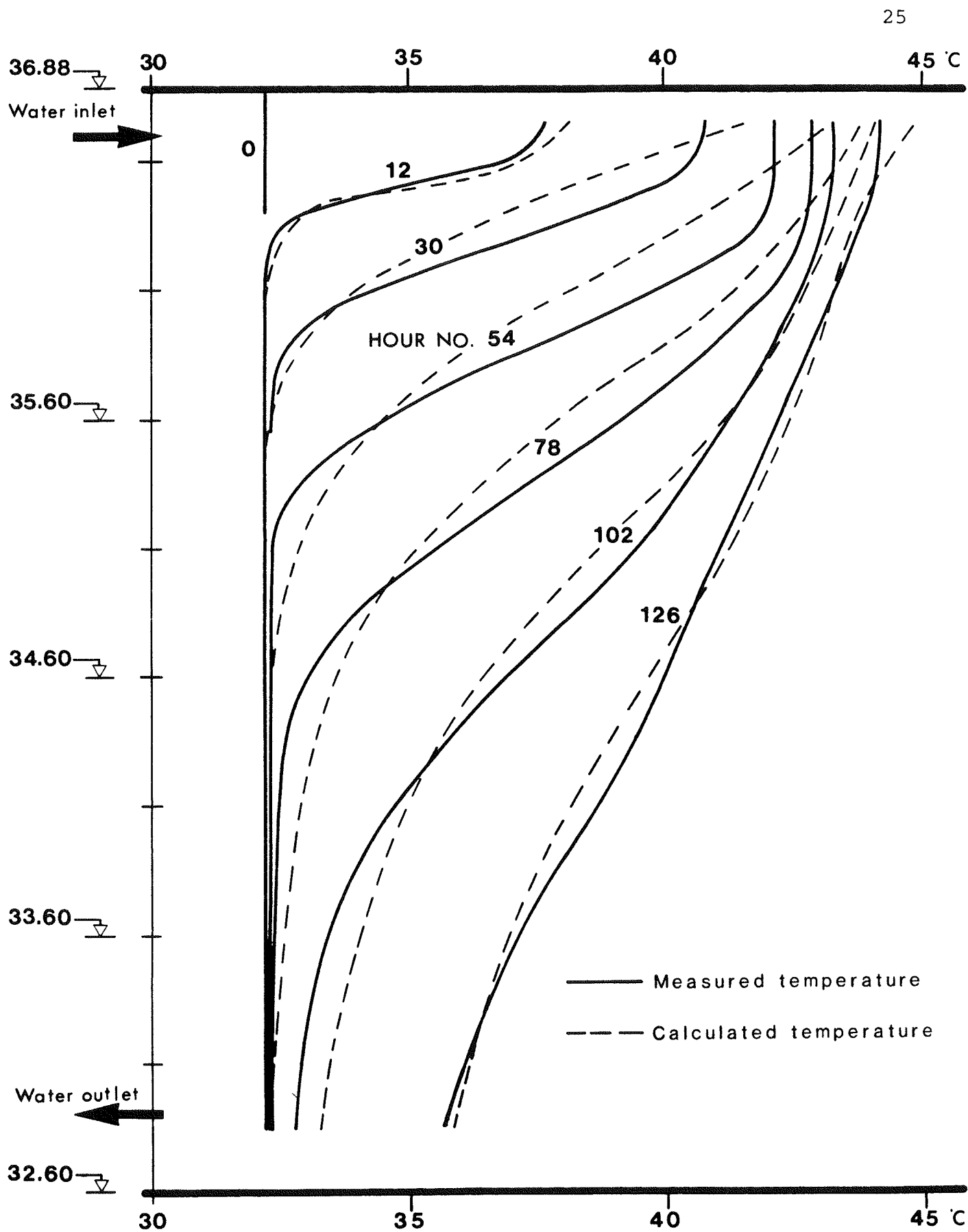


Figure 18. Charge operation. Comparison between measured and calculated temperatures.

Figur 18. Opladning. Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer.

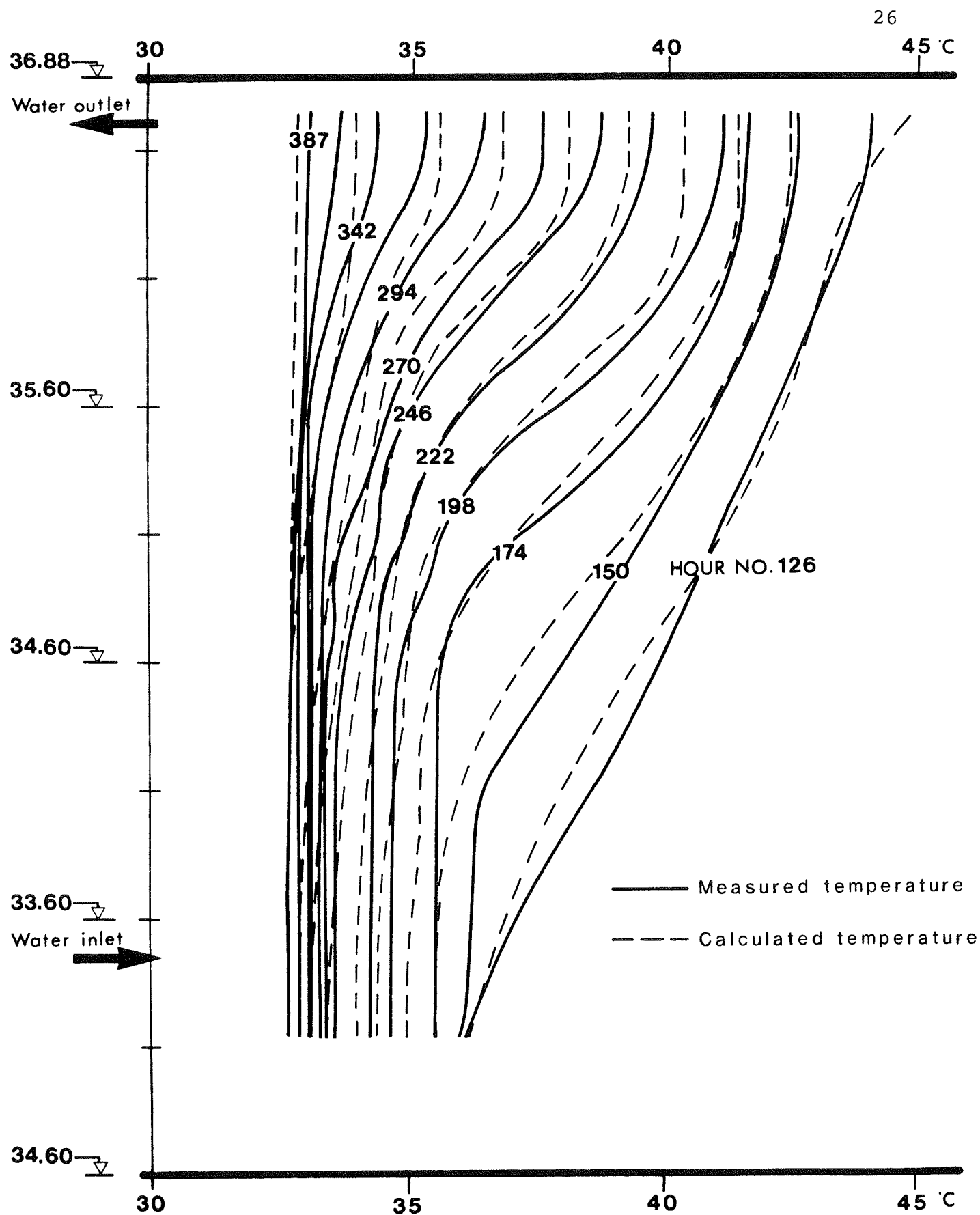


Figure 19. Discharge operation. Comparison between measured and calculated temperatures.

Figur 19. Afladning. Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer.

6. REFERENCER

- [1] Hansen, Kurt Kielsgaard, Hansen, Preben Nordgaard og Ussing, V.: Seasonal Heat Storage in Underground Warm Water Stores - Construction and Testing of a 500 m³ Store. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. Meddelelse nr.134, 1983.
- [2] Hansen, Preben Nordgaard: Varmetab fra store varmelagre. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Undervisningsnotat, 1979.
- [3] Hansen, Kurt Kielsgaard, Hansen, Preben Nordgaard og Ussing, Vagn: Fortsatte målinger på 500 m³ forsøgsvarmelager. Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport 85-2, 1985.
- [4] Hansen, K. Kielsgaard, Hansen, P. Nordgaard og Ussing, V.: Varmetab fra termiske sæsonvarmelagre. I proceedings fra Nordisk Ministerråds "Nordiskt seminarium kring säsonlagring av värme i jord, berg og vatten". 5-6 oktober 1983. Göteborg, Sverige.
- [5] Patankar, Suhas V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.

Appendix A Beskrivelse af "upstream-difference" tilnærmelse for det konvektive bidrag hidrørende fra den ved vandtilførsel forårsagede strømning.
Beregningsresultater.

Varmebalancen for k-te "vandelement", se figur 15:

$$V_k \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot \frac{dT}{dt} = \sum A \lambda \frac{dT}{du} + \dot{v} \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot \Delta T$$

Ligningen siger: Ændringen i et volumenelements temperatur pr. tidsenhed er lig med summen af varmestrømmen gennem elementets begrænsningsflader og det konvektive bidrag hidrørende fra den ved vandtilførsel forårsagede strømning ($\dot{v}$ er volumenstrøm).

Ved anvendelse af "upstream-difference" tilnærmelse [5] for strømningsleddet bliver princippet i programmeringen af ligningen for et vandelement k ved tilførsel af $\dot{v}$ i toppen af lageret:

$$\begin{aligned} V_k \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot \frac{T_k^{t_1+\Delta t} - T_k^{t_1}}{\Delta t} &= A_k \cdot \lambda_T \cdot \frac{T_{k-1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{\Delta z} \\ &+ A_{k+1} \cdot \lambda_T \cdot \frac{T_{k+1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{\Delta z} \\ &+ \sum \Delta x \cdot \Delta z \cdot \frac{T_{j1+1,k}^{t_1} - T_k^{t_1}}{M} \\ &+ \sum \Delta x \cdot \Delta y \cdot \frac{T_{j1,k+1}^{t_1} - T_k^{t_1}}{M} \\ &+ \dot{v} \cdot \rho \cdot c_{p,vand} \cdot (T_{k-1}^{t_1} - T_k^{t_1}) \end{aligned}$$

De to første bidrag på højre side af lighedstegnet er varmeledning i vand, de to næste bidrag er varmetab til jordelementer, og det sidste led er hidrørende fra strømmingen (ved tilførsel af vand i bunden af lageret skal i sidste led anvendes $T_{k+1}^{t_1} - T_k^{t_1}$).

Figur A1 viser de målte og de beregnede temperaturer for de 126 timer i opladningsfasen, og figur A2 viser de tilsvarende målte og beregnede temperaturer for de 261 timer i afladningsfasen. Det skal bemærkes, at beregningsresultaterne for både op- og afladning er fremkommet i samme simulering.

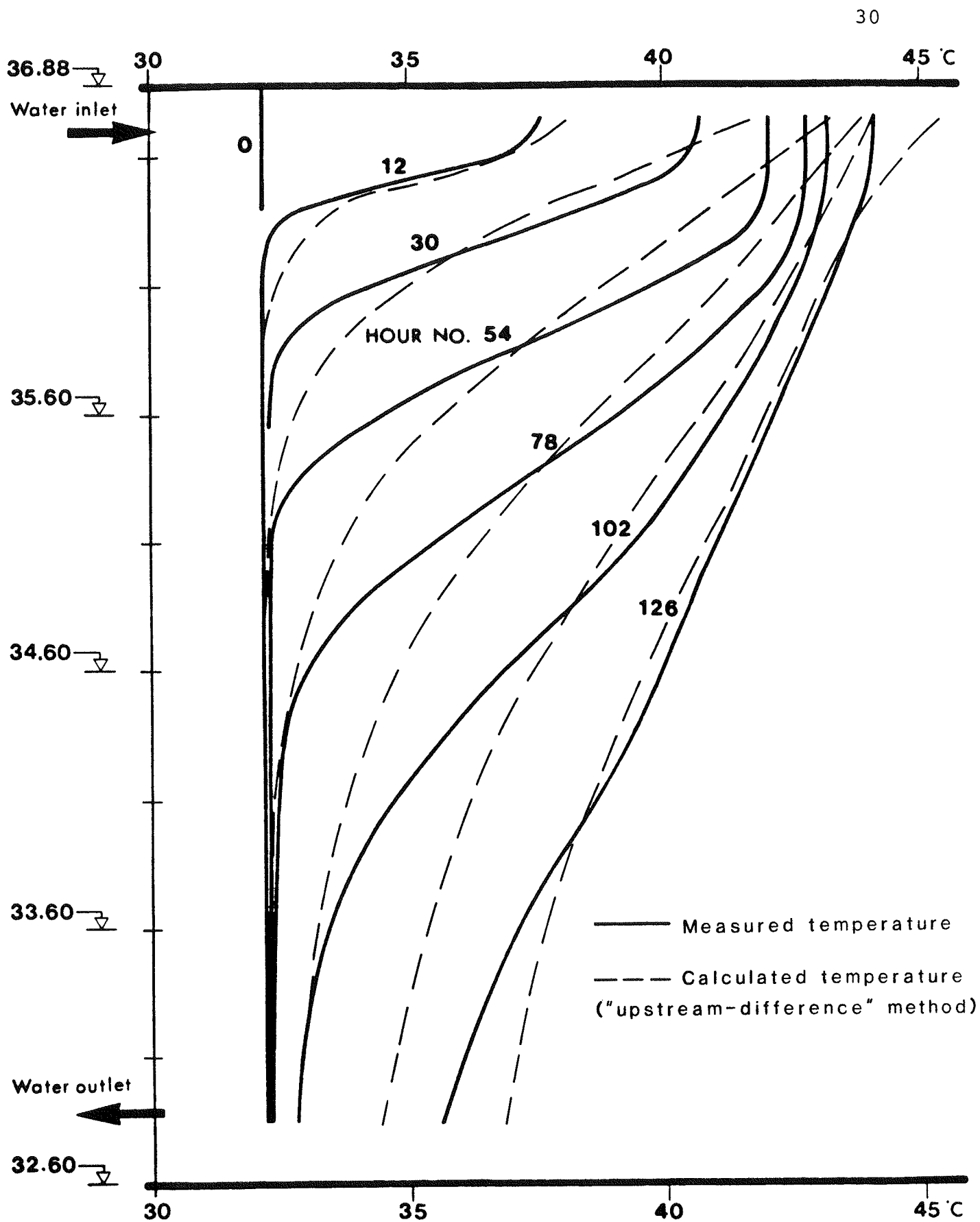


Figure A1. Charge operation. Comparison between measured and calculated temperatures.

Figur A1. Opladning. Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer.

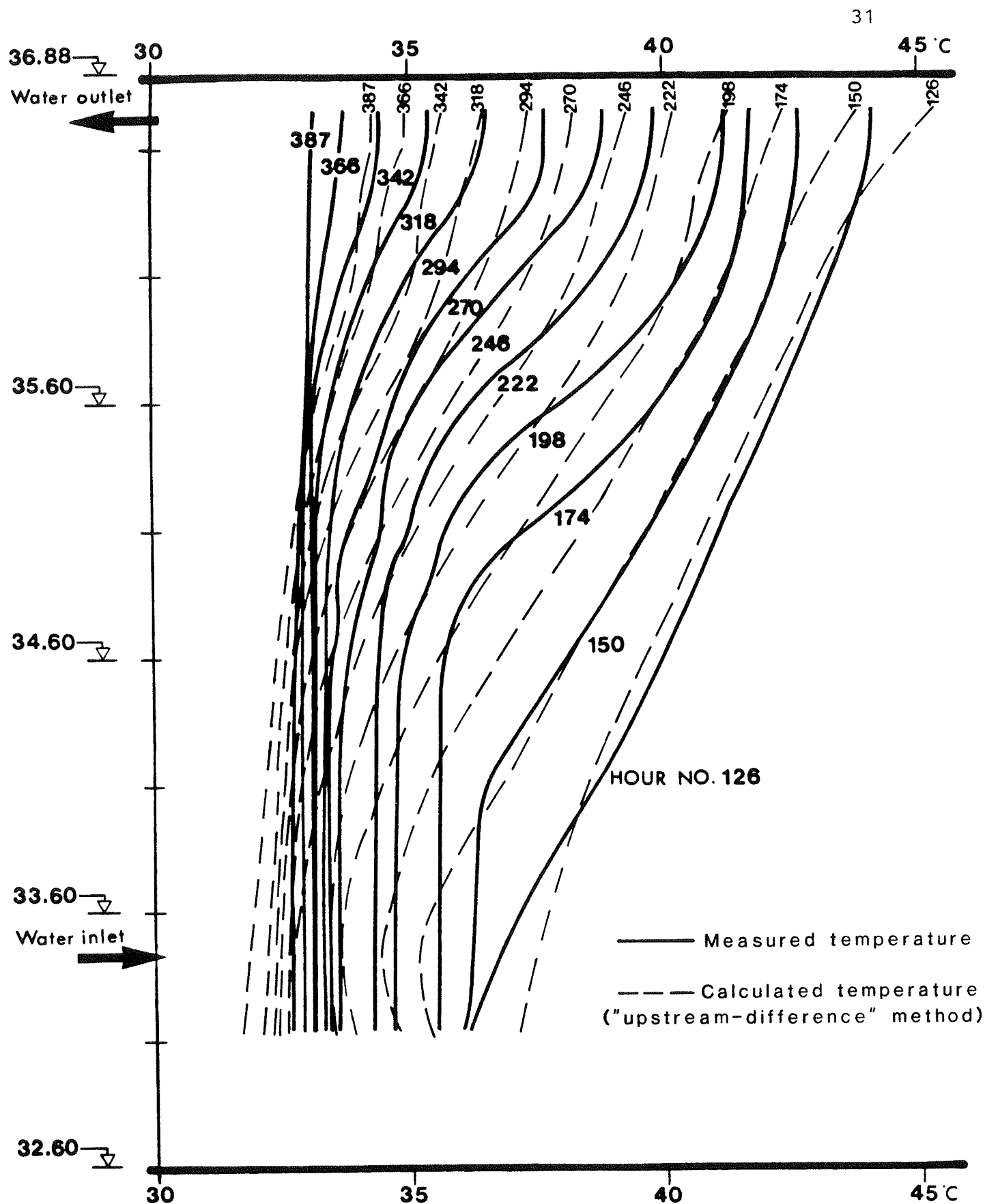


Figure A2. Discharge operation. Comparison between measured and calculated temperatures.

Figur A2. Afladning. Sammenligning mellem målte og beregnede temperaturer.