

# Elektrisk opvarmning ved vinterstøbning af beton

---

Electric Heating by Winter-Concreting

*Danish Text with an English Summary*

ALICE KJÆR



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
SBI-RAPPORT 61 · KØBENHAVN 1969  
I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG

# Elektrisk opvarmning ved vinterstøbning af beton

---

**Electric Heating by Winter-Concreting**

*Danish Text with an English Summary*

**ALICE KJÆR**



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
SBI-RAPPORT 61 · KØBENHAVN 1969  
I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG

# Indhold

	side		side
INDLEDNING .....	4	Forsøg 2: Kældergulv, Fredericiagade .....	12
MATEMATISKE UDREDNINGER .....	5	Anvendt beton .....	12
Betonens temperaturforløb .....	5	Isolering .....	12
Betonens begyndelsestemperatur $\Theta_B$ .....	5	Data for støbning .....	12
Betonens cementindhold C .....	5	Temperaturkurver .....	13
$c_b R_b$ .....	5	Afkølingstal .....	14
Varmetilførsel .....	5	Varmeberegninger .....	14
Afkølingstal .....	6	Betragtninger efter forsøg .....	14
Beregning af temperaturforløb .....	6	Forsøg 3: Forbrændingsanstalt, Roskilde .....	14
Hærdningsforløb .....	6	Anvendt beton .....	15
Bestemmelse af varmeudvikling .....	6	Isolering .....	15
Relation mellem tilført effekt og		Elektriske data .....	15
temperatur for sluthærdning .....	7	Temperaturkurver .....	15
ERFARINGER UD FRA UDFØRTE FORSØG ...	8	Afkølingstal .....	15
Forsøg 1: Vejbro ved Lyngby .....	8	Varmeberegninger .....	16
Temperaturkurver .....	8	Betragtninger efter forsøg .....	18
Afkølingstal .....	9	Forsøg 4: Tag til maskinhal, Asnæsværket .....	18
Betonens sammensætning .....	10	Givne oplysninger .....	19
Bestemmelse af elektrisk varmetilførsel .....	10	Beregninger inden støbning .....	19
Teoretisk beregnet varmetilførsel .....	10	Støbning .....	21
Varmetilførsel beregnet efter		Betragtninger efter forsøg .....	21
temperaturkurver .....	10	KONKLUSION .....	22
Beregning af temperaturkurver .....	10	SUMMARY .....	22
Forudsætninger for beregninger .....	10	TABELLER .....	23
Udregning af temperaturkurver .....	11		
Betragtninger efter forsøg .....	11		

## Indledning

Interessen for elektrisk opvarmning af beton her i landet begyndte i 1964, da arbejdsministeriet med henblik på at øge vinteraktiviteten inden for anlægsområdet oprettede en vinterkonsulenttjeneste. Det var dennes daværende leder, civilingeniør Johan Larsen, der tog initiativet til at igangsætte forsøg med el-opvarmning af betonkonstruktioner.

Før man styrter sig ud i et projekt med el-opvarmning, må man gøre sig klart, hvad man ønsker at opnå ved at opvarme nystøbte betonkonstruktioner med elektricitet, og om man kan opnå dette på andre og måske billigere og mere simple måder.

I SBI-anvisning 17\* er der foretaget en analyse af betonens hærtningsforløb, der jo er nøje afhængig af temperaturudviklingen. Anvisningen beskriver, hvad det betyder at bruge 1) opvarmet vand til betonblandingen, 2) opvarmede materialer i det hele taget samt 3) færdigblandet varm beton. Det understreges også, hvor vigtigt det er, at betonen udstøbes og tildækkes så hurtigt som muligt, da den varme beton hurtigt afkøles i kold luft. Varmetabet anslås pr. time at være 15% af temperaturforskellen mellem betonen og den omgivende luft. Ved en udetemperatur på  $-10^{\circ}\text{C}$  vil en nyblandet beton, der er  $20^{\circ}$  varm, efter en times forløb være  $15,5^{\circ}$  varm, medens den stadig utildækket efter 2 timer vil være  $11,6^{\circ}\text{C}$ .

Ved vinterbyggeri i vort klima kan man som regel med varm beton fremstillet af hurtighærdende cement og hurtig tildækning med en god isolering opnå, at betonen er frostsikker, inden den er blevet afkølet til frysepunktet.

Ønsker man af en eller anden grund en hurtigere hærtningsproces, end man umiddelbart kan opnå ved ovenstående foranstaltninger, f.eks. hvis en konstruktion skal være færdig til en bestemt tid, eller hvis kostbart formmateriale skal udnyttes rationelt, kan yderligere 3 metoder til accelerering af hærtningsprocessen overvejes.

- 1) Brug af større mængder cement end sædvanligvis påkrævet, eventuelt brug af superrapidcement
- 2) Brug af hærtningsaccelererende tilsætningsmidler
- 3) Varmetilførsel til den udstøbte beton

Hvert af disse punkter kan være værd at overveje, inden man bestemmer sig til, hvad man vil gøre; især er spørgsmålet om tilsætningsmidlerne et helt kapitel for sig selv, men dette skal ikke omtales nærmere her.

Metode 3 kan deles op i flere punkter, f.eks.

- 3.1 Varmetilførsel ved damp
- 3.2 Varmetilførsel ved varmt vand gennem varmeslanger
- 3.3 Varmetilførsel ved elektricitet.

Her i rapporten skal kun omtales elektrisk opvarmning, men også denne form for opvarmning af beton kan foretages efter forskellige principper, f.eks. ved at anbringe elektroder uden på betonen eller på formmaterialet. I USSR anvendes bl.a. en metode, hvor betonblandingen opvarmes elektrisk i store beholdere med indbyggede elektroder. I løbet af 5-10 minutter er betonblandingen opvarmet til  $70-80^{\circ}\text{C}$ . Derpå udstøbes betonen hurtigt og vibreres, inden der er gået 15 minutter.

I de foreliggende SBI-forsøg er hærtningsprocessen foregået ved hjælp af elektriske modstandstråde indstøbt i betonen. Der blev brugt PVT-isoleret ledning,  $2,5\text{ mm}^2$  flertrådet (NKT). Trådene blev fæstet til armeringsjernene. Strømkredsene blev udlagt som stjerneforbindelser og forbundet til en trefaset 220/42 V-transformer, der igen tilsluttedes en benzindrevet generator.

Forsøgene er udført af SBI i samarbejde med Byggecentrum og de pågældende entreprenørvirksomheder, der opførte de enkelte bygværker. Det var SBI's opgave at registrere temperaturforløbet under støbningen og hærtningsprocessen af betonen.

## Matematiske udredninger

### Betonens temperaturforløb

Temperaturudviklingen under hærtningsproces kan udtrykkes ved en ligning, der angiver, at den udviklede varmemængde er lig summen af den optagne og den afgivne varme:

$$\Delta Q_t \cdot C \cdot V = \Sigma k \cdot F (\theta - \theta_u) \cdot \Delta t + V \cdot c_b \cdot R_b \cdot \Delta \theta \quad (1)$$

Hvis der tillige opvarmes elektrisk, bliver ligningen:

$$\Delta Q_W \cdot C \cdot V + \Delta Q_t \cdot C \cdot V = \Sigma k \cdot F (\theta - \theta_u) \cdot \Delta t + V \cdot c_b \cdot R_b \cdot \Delta \theta \quad (1)$$

hvor

$\Delta Q_W$  er den i tiden  $\Delta t$  tilførte varme pr. kg cement i kcal/kg cement

$$\Delta Q_W = W \cdot \Delta t$$

$\Delta Q_t$  er den i tiden  $\Delta t$  udviklede hærtningsvarme pr. kg cement i kcal/kg cement

W er den elektriske effekt i kcal/time kg cement

C er betonens cementindhold i  $\text{kg}/\text{m}^3$

V er betonens rumfang i  $\text{m}^3$

k er de enkelte isolationslags transmissionstal i  $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{time}$

F er disse lags areal i  $\text{m}^2$

$\theta$  er betonens middeltemperatur i tidsrummet  $\Delta t$  i  $^{\circ}\text{C}$

$\theta_u$  er den omgivende lufts middeltemperatur over et vist tidsrum i  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta \theta$  er temperaturstigningen i tiden  $\Delta t$  i  $^{\circ}\text{C}$

$c_b$  er betonens varmekapacitet i  $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$R_b$  er betonens rumvægt i  $\text{kg}/\text{m}^3$

Ved at dividere ligning (1) på begge sider af lighedstegnet med

$V \cdot c_b \cdot R_b \cdot \Delta t$ , indføre  $\Delta Q_W = W \cdot \Delta t$  og indsætte afkølingstallet

$$a = \frac{\Sigma k \cdot F}{V \cdot c_b \cdot R_b} \quad \text{fås ligningen}$$

$$\frac{W \cdot C}{c_b \cdot R_b} + \frac{C}{c_b \cdot R_b} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = a (\theta - \theta_u) + \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (2)$$

I anvisning 17 er der ud fra denne grundligning udledt en ligning til beregning af de til tiden t svarende temperaturer  $\theta$

$$\theta = \theta_B + \frac{C}{c_b \cdot R_b} (Q - Q_0) - \frac{t}{\theta} a (\theta - \theta_u) \quad (3)$$

De i ligningen indgående størrelser omtales nærmere i det følgende.

### Betonens begyndelsestemperatur $\theta_B$

Begyndelsestemperaturen kan enten måles eller udregnes efter følgende ligning, idet der regnes med, at varmetabet fra blandingen til tildækningsøjeblikket er ca. 15% af temperaturforskellen mellem betonens temperatur  $\theta_m$  og den omgivende lufts temperatur:

$$\theta_B = \theta_m - 0,15 (\theta_m - \theta_u) \cdot t \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Det er af stor betydning, som det også fremgår af ligning (3), for hele temperaturforløbet og dermed for hele hærtningsprocessen, at  $\theta_B$  ikke er for lav, altså at betonen ikke opbevares for længe utildækket.

### Betonens cementindhold C

Betonens cementindhold angives i  $\text{kg}/\text{m}^3$  og er enten direkte kendt, eller kan udregnes ud fra de opgivne blandingsforhold.

Det fremgår af ligning (3), at den totale mængde varme, der udvikles i et givet betonrumfang, er ligefrem proportional med C.

### $c_b \cdot R_b$

Produktet af betonens varmekapacitet og rumvægt, den såkaldte vandværdi, har ved forsøg på Danmarks tekniske Højskole og i udlandet vist sig at være tilnærmelsesvis konstant, nemlig  $600\text{ kcal}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

### Varmetilførsel

Der tilføres varme fra såvel cementens hærtningsvarme  $Q_t$ , som fra varmetrådene  $Q_W$ . Q er den samlede tilførte varmemængde og består af summen af den til tiden t udviklede hærtningsvarme  $Q_t$  og den til samme tidspunkt tilførte elektriske varmemængde  $Q_W$ .

\*) Betonstøbning om vinteren, 1958; i det følgende benævnt anv. 17.

$Q_t$  aflæses af en tabel over hærdningsvarmen af den pågældende cementsort som funktion af  $t_0$ .  $t_0$  angiver, at hærdningen er så langt fremskreden, som om den var blevet hærdet  $t_0$  timer ved  $0^\circ\text{C}$ .

Hvis en proces ved en bestemt temperatur  $\theta_a$  varer tiden  $t_a$ , varer den ved en anden konstant temperatur  $\theta_t$ , hvor

$$\theta_t = (\theta_a + n \cdot 10)^\circ\text{C}, \text{ tiden} \quad (5)$$

$$t = \frac{1}{2^n} \cdot t_a$$

Ved at eliminere  $n$  fås tidstemperaturfunktionen

$$t_a = 2^{\frac{\theta_t - \theta_a}{10}} \cdot t \quad (6)$$

Er temperaturen, hvorunder hærdningsprocessen foregår, ikke konstant, må processen opdeles i passende intervaller af størrelsen  $\Delta t$ , hvori processen kan anses for konstant. Den samlede længde af hærdningstiden kan findes ved integration eller eventuelt summation

$$t_a = \sum_0^t 2^{\frac{\theta_t - \theta_a}{10}} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\text{Heraf er } t_0 \text{ bestemt: } t_0 = \sum_0^t 2^{\frac{\theta_t}{10}} \cdot \Delta t \quad (8)$$

$Q_w$  er den elektriske varmetilførsel omregnet til det antal kcal, der pr. kg cement er tilført til tiden  $t$ , dvs.  $Q_w = t \cdot W$

$Q_0$  er den til tiden  $t = 0$  allerede udviklede varmemængde.

### Afkølingstal

Dette måles i enheden pr. time og er som allerede nævnt

$$a = \frac{\Sigma kF}{V \cdot c_b \cdot R_b}$$

Kendes en betonkonstruktions form og dimensioner samt isoleringens beskaffenhed, kan afkølingstallet bestemmes ved hjælp af tabeller, se anv. 17, side 48-49.

Det kan imidlertid også bestemmes eksperimentelt ved måling af temperaturer i betonkonstruktionen under afkølingen, når der ikke mere tilføres varme.

Idet  $c_b \cdot R_b$  antages konstant =  $600 \text{ kcal/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ , og  $\theta_u$  regnes konstant i passende lange tidsrum, og idet man lader intervallet  $\Delta t$  gå mod 0, fås af ligning (2) differentilligningen:

$$\frac{W \cdot C}{600} + \frac{C}{600} \frac{dQ_t}{dt} = a (\theta - \theta_u) + \frac{d(\theta - \theta_u)}{dt}$$

Når hærdningsvarmen er opbrugt, er  $\frac{dQ_t}{dt} = 0$ ,

$$a (\theta - \theta_u) + \frac{d(\theta - \theta_u)}{dt} = \frac{W \cdot C}{600} \quad (9)$$

og når den elektriske varmetilførsel er standset, er  $W = 0$ . Ligningen får da følgende form:

$$a (\theta - \theta_u) + \frac{d(\theta - \theta_u)}{dt} = 0 \quad (10)$$

Afbrydes elektriciteten til tidspunktet  $t = 0$ , og betegnes betonens temperatur  $\theta$  på dette tidspunkt  $\theta_B$ , er løsningen til ligningen:

$$\theta - \theta_u = (\theta_B - \theta_u) e^{-at} \quad (11)$$

Af ligning (11) findes at:

$$e^{-at} = \frac{\theta - \theta_u}{\theta_B - \theta_u}$$

$$a = \frac{\ln(\theta_B - \theta_u) - \ln(\theta - \theta_u)}{t} \quad (12)$$

### Beregning af temperaturforløb

Temperaturforløbet udregnes ud fra ligning (3) samt tidstemperaturfunktionen givet i ligning (8). Temperaturerne beregnes successivt for så lange tidsrum, som betonens temperatur tilnærmelsesvis kan siges at være konstant. Dette er i begyndelsen af processen ca. 1 time, men stiger gradvist med processens udvikling.

Er begyndelsesbetingelserne  $\theta_B$  og  $Q_0$  kendte, vil middeltemperaturen i det første tidsrum  $\Delta t_1$  og i det følgende tidsrum  $\Delta t_2$  være henholdsvis

$$\theta_1 = \theta_B + \frac{C}{600} (Q_1 - Q_0) - a(\theta_B - \theta_u) \Delta t_1 \text{ og} \quad (13)$$

$$\theta_2 = \theta_B + \frac{C}{600} (Q_2 - Q_0) - a(\theta_B - \theta_u) \Delta t_1 - a(\theta_1 - \theta_u) \Delta t_2$$

osv.

### Hærdningsforløb

Hærdningsprocessens hastighed er som før omtalt afhængig af hærdningstemperaturen, idet den fordobles ved en stigning af temperaturen på  $10^\circ\text{C}$ .

Som et mål for, hvor langt hærdningsprocessen er forløbet, benyttes begrebet hærdningsgraden defineret som mængden af ikke fordampeligt vand  $w_n$  til et givet tidspunkt i forhold til mængden af ikke fordampeligt vand ved fuldstændig hærdning  $w_{n\infty}$ . Hærdningsgraden for en given cementtype er en funktion af det oprindelige  $v/c$ -forhold, hærdningstid og hærdningstemperatur.

### Bestemmelse af varmeudvikling

Det er påvist, at der findes en nøje korrelation mellem hærdningsgraden  $w_n$  og betonens hærdningsvarme  $Q_t$ . Hærdningsgraden kan således måles ved at bestemme den udviklede hærdningsvarme.

Den hastighed, hvormed hærdningsvarmen udvikles, er bl.a. afhængig af betontemperaturen  $\theta$ . Cementfabrikkerne har udarbejdet tabeller over 3 danske cementtyper (Portlandcement, Rapidcement og Superrapidcement), der viser sammenhængen mellem den udviklede varmemængde  $Q_t$  og hærdningsgraden (omregnet til antal timers hærdning ved  $0^\circ\text{C}$  temp.), dvs.  $t_0$ .

Ved udregningen af temperaturforløbet er det praktisk ved hvert spring i tiden samtidig at opsummere  $t_0$ .

Denne, der er bestemt ved tidstemperaturfunktionen (7), findes inden aflæsningen af  $Q_t$  af tabellen (se side 6).

Diagrammerne i anv. 17 (side 50-55) viser, ved hvilke  $t_0$  betonen er henholdsvis frostsikker og af-formningsklar samt relationen mellem  $t_0$  og betonens styrke i forhold til 28 døgnsstyrken.

Når hærdningsvarmen er opbrugt ( $\frac{dQ_t}{dt} = 0$ ), vil

opvarmet betons temperatur afkøles til udetemperaturens niveau. Som det fremgår af ligning (12), aftager temperaturen logaritmisk som funktion af tiden afhængig af det aktuelle afkølingstal.

### Relation mellem tilført effekt og temperatur for sluthærdning

Den tilførte varmemængde fremskynder hærdningen ved at forhøje betonens temperatur og dermed til-lige på grund af tidstemperaturfunktionen at acce-lerere udviklingen af hærdningsvarmen.

Når hærdningsvarmen er opbrugt, og der stadig tilføres varme andetsteds fra (som her elektrisk), vil betontemperaturen nærme sig asymptotisk til en bestemt værdi,  $\theta_k$ , afhængigt af den tilførte varme og af afkølingstallet og udetemperaturen. For tem-peraturforløbet herunder er på side 7 udledt ligning (9).

$$a (\theta - \theta_u) + \frac{d(\theta - \theta_u)}{dt} = \frac{W \cdot C}{600} \quad (14)$$

Nu regnes som nævnt med konstant gennemsnitlig udetemperatur  $\theta_u$ , og da  $\theta$  nærmer sig  $\theta_k$ , kan

$\frac{d(\theta - \theta_u)}{dt}$  sættes lig med 0, dvs. (14) antager formen

$$a \cdot (\theta_k - \theta_u) = \frac{W \cdot C}{600} \text{ og} \quad (15)$$

$$\theta_k = \theta_u + \frac{W \cdot C}{a \cdot 600} \quad (16)$$

Hvis en sluthærdning ønskes ved en bestemt tempe-ratur  $\theta_k$ , kan det omvendt udregnes, hvor stor en elektrisk effekt det er nødvendigt at tilføre; denne udregnes af (16) til:

$$W = \frac{600 \cdot a (\theta_k - \theta_u)}{C} \quad (17)$$

## Erfaringer ud fra udførte forsøg

SBI har deltaget i ialt 4 forsøg i tiden marts 1965 til februar 1966.

Disse omfatter

- 1) et betondæk på en vejbro ved Lyngø
- 2) et kældergulv i Fredericiagade
- 3) en væg på en forbrændingsanstalt i Roskilde
- 4) et tag til en maskinhal, Kalundborg.

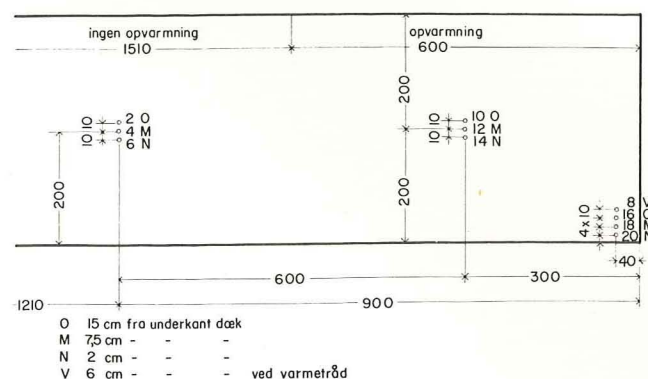
Forholdene ved de forskellige støbninger har varieret meget, f.eks. har der for 2, 3 og 4's vedkommende været strengt frostvejr, medens 1 er støbt i gennemsnitsvintervejr. Også kvaliteten af isoleringen varierede. Ved forsøg 2 var den meget dårlig, men ved forsøg 4 meget effektiv. I det følgende skal gennemgås, hvilke faktorer, der særlig blev lagt vægt på og hvilke konklusioner, der kunne drages derudfra.

Før betonen blev støbt, blev termistorer anbragt i de punkter, hvori man ønskede at følge temperaturen, det gjaldt både i den beton, der skulle opvarmes elektrisk og for kontrollens skyld i beton, der ikke blev elektrisk opvarmet. Der blev anbragt målepunkter forskellige steder i betonen. I hvert af de områder, der ønskedes undersøgt, anbragtes almindeligvis 3 målepunkter

- 1) ved varmetråd
- 2) i overfladen af betonen
- 3) midt i betonlaget.

### Forsøg 1: Vejbro ved Lyngø

Som forsøgsobjekt valgtes et dæk, der skulle støbes over nogle i forvejen støbte vægge. Dækket havde dimensionerne 21 m x 4 m x 0,3 m. Der skulle elektrisk opvarmes 6 løbende meter af dækket. Der anbragtes temperaturfølere forskellige steder i den del af dækket, der skulle opvarmes samt i de næste 6 løbende meter af dækket, således at man kunne sammenligne temperaturudviklingen i opvarmede og uopvarmede dele af samme konstruktion. En skitse



Figur 1. Placering af målepunkter i dæk. Plan af dæk.

af dækket og af de anvendte målepunkter er vist på fig. 1. Der anvendtes i alt 10 målepunkter. Disse anbragtes med 7 i den opvarmede del, fordelt i 2 grupper, en i midten og en i et hjørne af dækket. De sidste 3 anbragtes i den uopvarmede del.

### Temperaturkurver

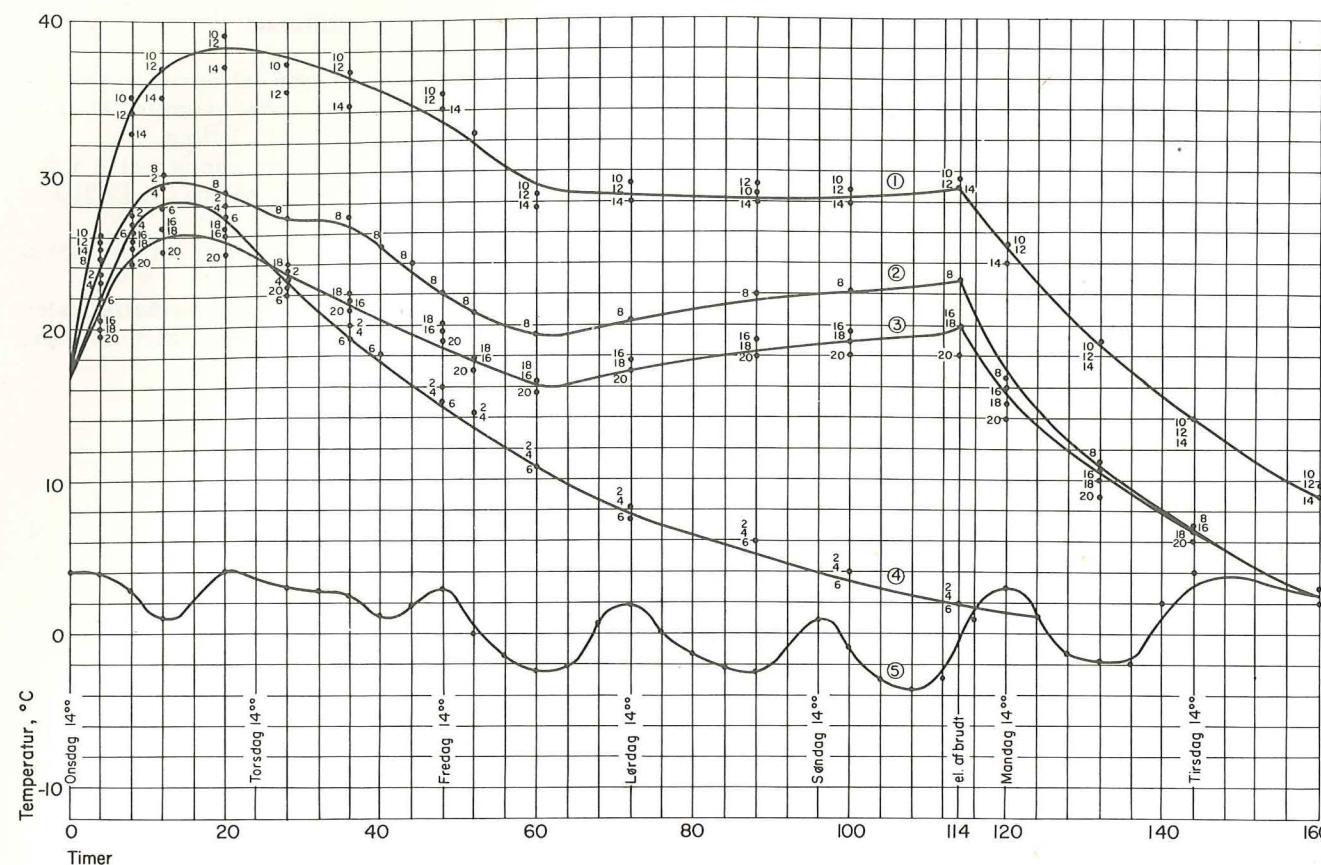
På fig 2, der angiver temperaturkurver for såvel opvarmet som uopvarmet beton, vises foruden lufttemperaturen, temperaturforløbene for de enkelte målepunkter i dækket. Da dækket er støbt med samme færdigblandede beton, er begyndelsestemperaturen praktisk talt den samme i alle målepunkter.

Temperaturen forløber, som det fremgår af kurven for de enkelte punkter i de forskellige grupper, således at man for gruppen af målepunkter midt i den opvarmede del kan tegne en fælles kurve (1). For gruppen af målepunkter i den uopvarmede del kan ligeledes tegnes en fælles kurve (4). For gruppen af målepunkter i dækkets hjørne tegnes en kurve for temperaturen målt lige ved varmetråden (2) samt en fælles for de øvrige målepunkter i den gruppe.

Af kurve 1 ses, at temperaturen stiger til et maksimum på ca. 38°C efter ca. 20 timer, hvorefter den jævnt falder og efter 60 timers forløb er ca. 29°C. Derefter holder temperaturen sig konstant, hvilket vil sige, at der er balance mellem den varmemængde, der tilføres elektrisk - idet hærdningsvarmen på det tidspunkt er opbrugt - og den, der forsvinder ved afkølingen. Efter 114 timers forløb, hvor varmetilførslen ophører, falder temperaturen i løbet af 2-3 døgn til udetemperaturens niveau.

Kurverne 2 og 3 forløber praktisk talt parallelt, idet temperaturen ved varmetråden hele tiden er ca. 3-4°C højere end temperaturen for gruppens øvrige punkter. For kurve 3 gælder det, at den når sit maksimum efter ca. 15 timer ved ca. 26°C. Den falder da jævnt, indtil den ved 60 timer har nået et minimum på 16°C; derefter stiger den jævnt til 20°C efter 114 timer, på hvilket tidspunkt strømmen blev afbrudt.

Kurve 4 for gruppen i den uopvarmede del af betonen viser, at det i dette tilfælde tilsyneladende ikke spiller nogen rolle, om målepunkterne er anbragt i overfladen eller midt i betonlaget. Kurvens form er den klassiske for varmeudvikling i nystøbt beton (anv. 17). Kurven når sit maximum efter ca. 14 timer og er 28°C, hvilket er 3° højere end for kurve 3. Da der kun tilføres varme fra hærdningsprocessen, når kurven udetemperaturen efter ca. 5 døgn forløb.



Figur 2. Temperaturkurver for opvarmet beton (1), (2) og (3), uopvarmet beton (4) samt udetemperatur (5).

Af kurverne ses i øvrigt, at svingningerne i udetemperaturen ikke har nogen synlig indflydelse på temperaturforløbet i betonen. Derfor kan man også for længere tidsrum over flere døgn regne udetemperaturen konstant lig et middeltal af de observerede værdier. På fig. 2 er middeltallet i de første 48 timer 2°C, derefter 0°C.

### Afkølingstal

Af fig. 2 ses, at da den elektriske strøm efter 114 timers forløb blev afbrudt, afkøledes betonen hurtigt. Al cementens hærdningsvarme var på dette tidspunkt opbrugt.

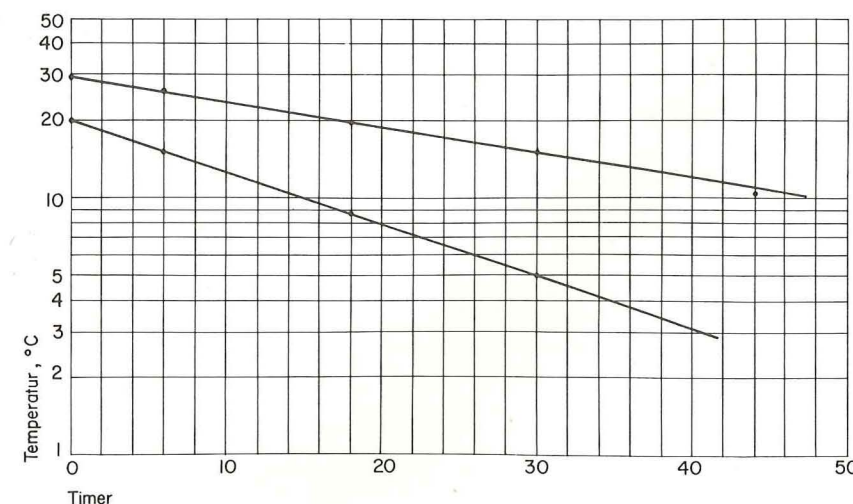
Afkølingstallene kan da beregnes ud fra det uledede udtryk (12) på side 6

$$a = \frac{\ln(\theta_B - \theta_u) - \ln(\theta - \theta_u)}{t}$$

For af det empirisk fundne at eftervise, at  $(\theta - \theta_u)$  virkelig varierer logaritmisk med tiden, afbildes på logaritmisk papir den del af kurverne 1 og 3 på fig. 2, der forløber efter tidspunktet for elektricitets afbrydelse.

$\theta_u$  regnes gennemsnitlig for 0 efter el-afbrydelsen.

Den logaritmiske afhængighed er vist på fig. 3, hvoraf fremgår, at  $\ln(\theta - \theta_u)$  varierer retlinet med tiden.



Figur 3. Afkølingens logaritmiske afhængighed af tiden.

De virkelige afkølingstal kan da udregnes.  
For den øverste kurve fås

$$a = \frac{\ln 29,4 - \ln 9}{46} = 0,026$$

og for den nederste kurve fås

$$a = \frac{\ln 20 - \ln 6}{30} = 0,040$$

Man kan da regne med, at inde i midten af konstruktionen er afkølingstallet 0,026, medens man for de mere udsatte steder i konstruktionen må regne med et afkølingstal på 0,040.

## Betonens sammensætning

Det er praktisk at addere den tilførte elektriske varmemængde pr. kg cement til den hærdningsvarme, dette kvantum udvirker. For at gøre dette må man kende betonens nøjagtige sammensætning. Denne er følgende:

Til lidt over 1 m<sup>3</sup> er brugt  
285 kg rapidcement  
745 kg grus  
1140 kg sten  
126 l vand  
5% luft er indblandet  
sand indeholder ca. 5% vand  
sten indeholder ca. 1% vand.

Sammensætningen af 1 m<sup>3</sup> beton fremgår da af nedenstående skema:

Materiale		Kornvægtfylde	Volumen liter/m <sup>3</sup> beton
art	mængde kg/m <sup>3</sup>		
Rapidcement	280	3,15	89
Grus	695	2,62	265
Vand i grus	35	1,00	35
Sten	1115	2,62	425
Vand i sten	11	1,00	11
Tilsat vand	125	1,00	125
Luft	-	-	50
Sum	2261		1000

## Bestemmelse af elektrisk varmetilførsel

Der oplystes følgende data:  
De anvendte kabler er 3 stk. 100 m (NKT, PVT 2,5)  
Sekundære spændinger 3 x 35 volt  
Sekundær strøm 3 x (46-42 A)  
Varmetilførsel påbegyndt onsdag den 17. 3. kl. 14  
Varmetilførsel afbrudt mandag den 22. 3. kl. 8  
Sandsynligt stop i varmetilførsel onsdag den 17. 3. kl. 18-24.  
Gennemsnitlig effektforbrug ca. 4,5 kW  
Der regnes med et tab på 15% i tilførselsledningerne  
100 Watt = 85,7 kcal/time.

## Teoretisk beregnet varmetilførsel

Af beregningsmæssige grunde udregnes varmetilførslen i den mest praktiske enhed, nemlig det antal kcal, der pr. kg cement tilføres i 1 time.

Hele det opvarmede dæk har rumfanget 4 x 6 x 0,3 m<sup>3</sup> = 7,2 m<sup>3</sup> og indeholder således 7,2 x 280 kg cement = 2016 kg cement.

4,5 kW = 4500 Watt = 45 x 85,7 kcal/t = 3856,5 kcal/t.

Idet der regnes med 15% tab, er varmetilførslen 3856,5 kcal/t - 578,5 kcal/t = 3278 kcal/t, dvs. pr. kg cement tilføres pr. time

$$\frac{3278}{2016} \text{ kcal} = 1,626 \text{ kcal/time pr. kg cement.}$$

## Varmetilførsel beregnet efter temperaturkurver

Af udtryk (15) på side 7

$$\frac{WC}{600} = a (\theta_k - \theta_u) \text{ udregnes } W$$

$$C = 280 \text{ kg/m}^3$$

$$\theta_u = 0^\circ\text{C}$$

$\theta_k$  findes af fig. 2 for punkterne 10, 12 og 14  $\theta_k = 29^\circ\text{C}$ , hvoraf fås

$$\frac{W \cdot 280}{600} = 0,026 \cdot 29, \text{ altså}$$

$$W = 1,62 \text{ kcal/time.}$$

Af kurve 3 på fig. 2 fås tilsvarende - med  $\theta_k = 19^\circ\text{C}$  - for punkterne 16, 18 og 20.

$$\frac{W \cdot 280}{600} = 0,040 \cdot 19,$$

$$W = 1,63 \text{ kcal/time.}$$

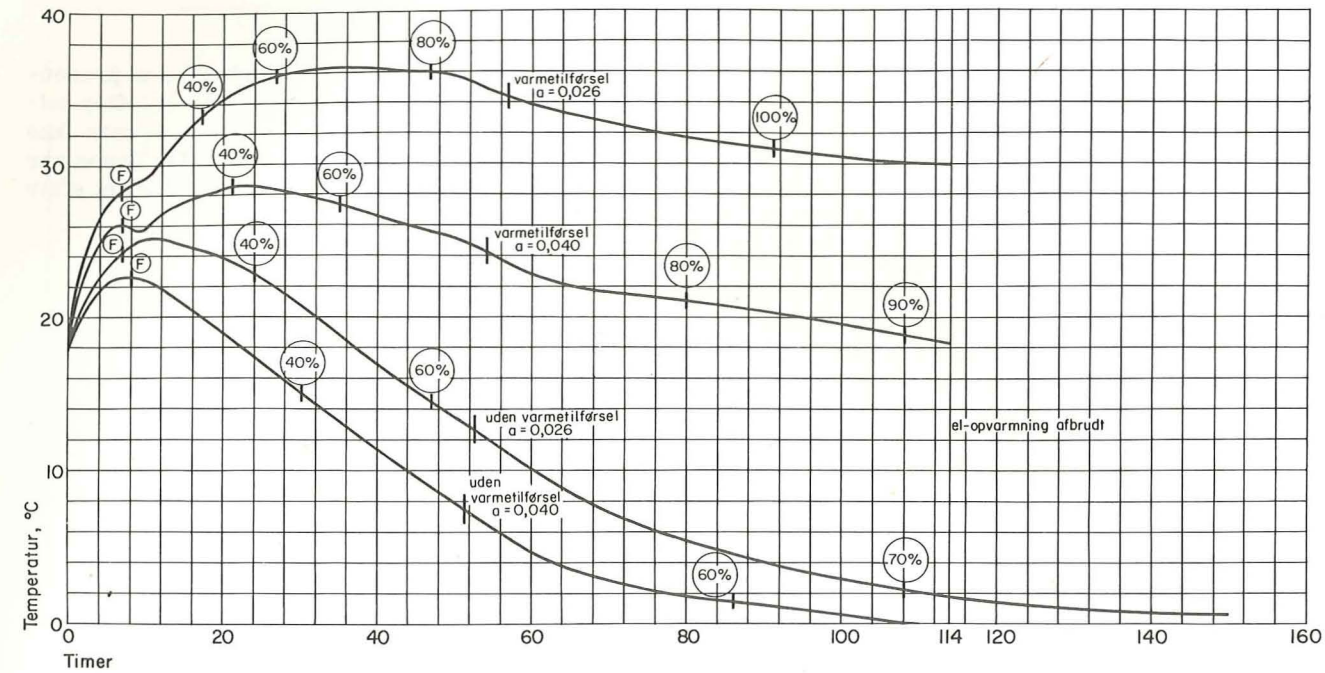
Som gennemsnit regnes med 1,625 kcal pr. kg cement pr. time, hvilket stemmer overens med det teoretisk beregnede.

## Beregning af temperaturkurver

Der er foretaget teoretiske beregninger af 4 forskellige temperaturforløb i dækket - 2 for den opvarmede del, den ene i midten af dækket, den anden i hjørnet - samt tilsvarende for den uopvarmede del.

### Forudsætninger for beregninger

- 1) Betonens sammensætning er givet og er som vist i tabellen
- 2) Den tilførte elektriske varmemængde er pr. kg cement 1,625 kcal i timen, således som fundet i forrige afsnit
- 3) Den elektriske varmetilførsel har været afbrudt i 6 timer, nemlig fra t = 4 timer til t = 10 timer
- 4) Begyndelsestemperaturen er 17°C



Figur 4. Beregnede temperaturkurver som funktion af hærdningstid. F Frostsikkerhed. % angiver styrken i procent af  $\sigma_{28}$ .

- 5) Til det tidspunkt, hvor den elektriske varmetilførsel påbegyndes, er der gået mellem 4 og 5 timer, siden betonen blev blandet. Dette svarer til et  $t_0$  (hærdning ved 0°C) på 18 timer og til en allerede udviklet hærdningsvarme  $Q_0$  på 9 kcal pr. kg cement
- 6) Afkølingstallene regnes i midten af dækket for 0,026 og i hjørnet for 0,040 (iflg. tidligere afsnit).

## Udregning af temperaturkurver

Til beregningerne benyttes ligning (3) på side 5, idet den metode, der er angivet i udledning (13), benyttes.

Beregningerne er detaljeret gengivet i tabellerne 1 til 4 (side 24-27), og kurverne, der viser temperaturudviklingen som funktion af hærdningstiden, er optegnede på fig. 4.

På kurverne er angivet, hvornår frostsikkerhed er opnået (F), samt hvornår forskellige styrkegrader er udviklede (%) markerede ved tal i cirkler som procent af 28-døgns trykstyrken. De samme resultater er gengivet i nedenstående tabel over sammenhørende tidspunkter og styrkegrader.

% af $\sigma_{28}$	$t_0$ timer	Med varmetilførsel timer		Uden varmetilførsel timer	
		a = 0,026	a = 0,040	a = 0,026	a = 0,040
F	48	6,5	6,5	7	8
40	140	17	21	24	30
60	240	27	35	47	86
80	480	47	80	230	290
90	600	57	108	350	416
100	960	95	173	710	776

Sammenligner man de målte temperaturer på fig. 2 med de beregnede på fig. 4 findes en ret god overensstemmelse.

## Betragtninger efter forsøg

Forsøget har vist, at til trods for visse praktiske vanskeligheder, specielt med hensyn til montering af elektriske kabler har den forsøgte opvarmningsmetode en mulig fremtid for sig; man kan ved elektrisk opvarmning holde en konstant temperatur så længe det er påkrævet, eventuelt helt til det tidspunkt, hvor bygværket har nået styrken  $\sigma_{28}$ .

Det er vigtigt at begynde opvarmningen så tidligt som muligt, idet den høje temperatur, der nås i begyndelsen, hvor hærdningsvarmeudviklingen er størst, yderligere fremskynder hærdningsudviklingen, eftersom denne er eksponentielt afhængig af temperaturen.

Hvis det kun drejer sig om at opnå frostsikkerhed, er elektrisk opvarmning unødvendig, da frostsikkerheden ment kan opnås ved billigere og mere enkle fremgangsmåder, når det drejer sig om massive konstruktioner som de foreliggende og ved moderate kuldegrader.

Det har tillige vist sig, at afkølingstallet ikke er det samme for en hel bygningsdel, selv om der er anvendt samme tykkelse af isoleringsmateriale over hele konstruktionen. Afkølingen er større på udsatte steder - nær jord og i kanter og hjørner - så det er vigtigt netop at have en ekstra god isolering af sådanne udsatte dele af konstruktionen.

Der har vist sig at være god overensstemmelse mellem teori og praksis. For en beton med C kg cement pr. m<sup>3</sup> gælder det - når man kender konstruktionens afkølingstal a og har en given gennemsnitsudetemperatur  $\theta_u$  - at denne kan slut-

hærdes ved en ønsket temperatur  $\theta_k$ , når der opvarmes med en effekt af størrelsen

$$W = \frac{600 \cdot a \cdot (\theta_k - \theta_u)}{C}$$

At stoppet på de angivne 6 timer i praksis ikke har berørt temperaturforløbet kan skyldes, enten at det i virkeligheden ikke har været så langt som meddelt, eller at betonen reagerer lidt "forsinket" i forhold til, hvad der almindeligvis antages.

Det forhold, at de eksperimentelt fundne temperaturer i alle målepunkter af dækkets opvarmede del når et uventet minimum ved 60 timer for senere igen at stige, kunne tyde på nogen uregelmæssighed i tilførslen af elektrisk varme i perioden mellem  $t = 20$  timer og  $t = 60$  timer.

## Forsøg 2: Kældergulv, Fredericiagade

Det næste forsøgsobjekt var et kældergulv i Fredericiagade, hvor Københavns Realkreditfond opførte en ejendom. Kældergulvet, der var ca. 600 m<sup>2</sup>, blev støbt i 3 tempi. Der anvendtes elektrisk opvarmning til hvert afsnit. Da de 3 støbninger forløb næsten ens, skal kun den første omtales her. Denne har tillige størst interesse, idet støbningen er foregået i en periode med ret streng frost. Dette areal var 194 m<sup>2</sup> med en tykkelse på 10 cm. Af skitsen af kældergulvet på fig. 5 ses, hvor arealet var placeret, og hvor temperaturfølerne var placeret. Kældergulvet blev støbt oven på et 30 cm singelslag med en 0,1 mm plastfolie mellem.

## Anvendt beton

Der blev anvendt varm færdigblandet beton. Ved ankomsten var betonen ca. 15°C. Cementtypen var rapidcement. Fabrikken angav, at der til lidt over 1 m<sup>3</sup> er brugt:

254 kg rapidcement  
670 kg sand  
272 kg ærtesten  
1060 kg nøddesten  
170 kg vand  
4% luft

sand indeholder ca. 5% vand  
sten indeholder ca. 1% vand.

Sammensætningen af 1 m<sup>3</sup> beton fremgår af nedenstående skema:

Materiale		Kornvægtfylde	Volumen liter/m <sup>3</sup> beton
art	mængde kg/m <sup>3</sup>		
Rapidcement	234	3,15	74
Sand	587	2,62	224
Vand i sand	29	1,00	29
Sten	1214	2,62	464
Vand i sten	12	1,00	12
Tilsat vand	157	1,00	157
Luft	-	-	40
Sum	2233		1000

## Isolering

Isoleringen af den nystøbte beton bestod af presenninger. Tildækningen skete ca. 6 timer efter udstøbningen. Dette blev begrundet med, at man ikke ønskede, at der blev gået på betonen, før denne var tilstrækkelig stiv. Presenningerne blev fjernet efter knapt 3 døgn forløb.

## Data for støbning

20.11 kl. 12.10 er støbning afsluttet  
20.11 kl. 14.00 opvarmning påbegyndes  
20.11 kl. 17.30 tildækkes med presenninger  
23.11 kl. 7.00 tildækning fjernes  
24.11 kl. 8.00 reduceres varmetilførsel  
25.11 kl. 8.00 afbrydes varmetilførsel

total tilført elektrisk energi	11,230 kW	} -5%
reduceret energi	8,600 kW	

Den anvendte modstandstråd til betonens opvarmning er fra Nordiske Kabel- og Trådfabriker; den er PVT-isoleret og har et tværsnit på 2,5 mm<sup>2</sup>. Gennem en transformer blev spændingen nedsat til ca. 35 volt, der kan anvendes på arbejdspladser.

Der opvarmedes i alt i 5 døgn, hvoraf de 4 første med fuld energi og det sidste med reduceret varmetilførsel. Energiforbruget ved støbningen fremgår af nedenstående tabel. Der regnes med 5% tab i tilledninger, og 100 Watt regnes for 85,7 kcal/t.

	Målt energiforbrug Watt	Effektiv energi Watt	Varmetilførsel kcal/t		
			i alt	pr. m <sup>2</sup> gulv	pr. kg cement
støbning fuld varme	11 230	10 668	9142	47,12	2,01
støbning red. varme	8 600	8 170	7002	36,09	1,54

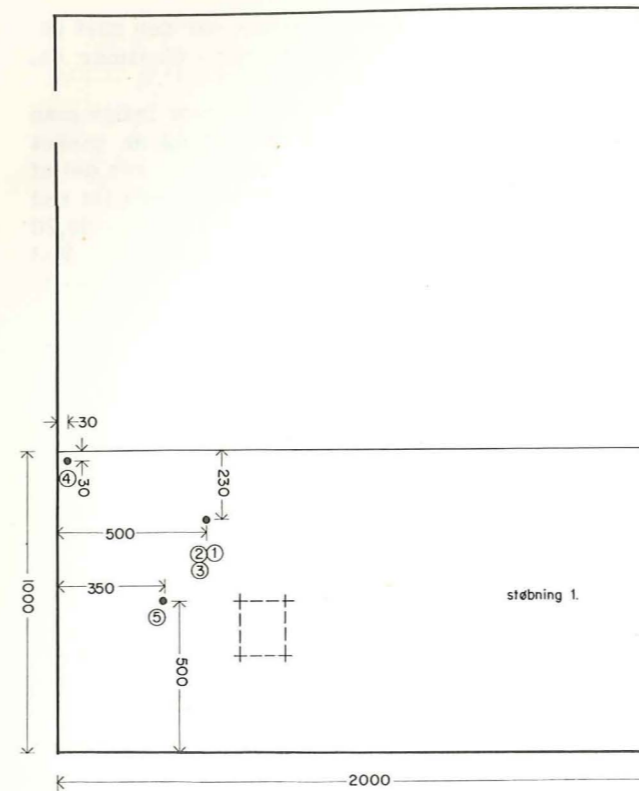
Der blev anbragt 3 temperaturfølere i dækket. Derudover blev der anbragt 1 føler i det underliggende skærvelag samt 1 føler til registrering af lufttemperaturen. Følerne blev koblet til en 24 punkts Honeywell-skriver, som registrerede temperaturen kontinuerligt, medens forsøget stod på. Følerne, hvis placering er vist i fig. 5, er anbragt efter følgende skema:

- punkt nr. 1: Ved varmetråd i betonen  
" " 2: 5 cm under betonens overflade  
" " 3: I skærvelaget ca. 10 cm under dettes overflade  
" " 4: 5 cm under betonens overflade i et hjørne af det udstøbte areal  
" " 5: I luften.

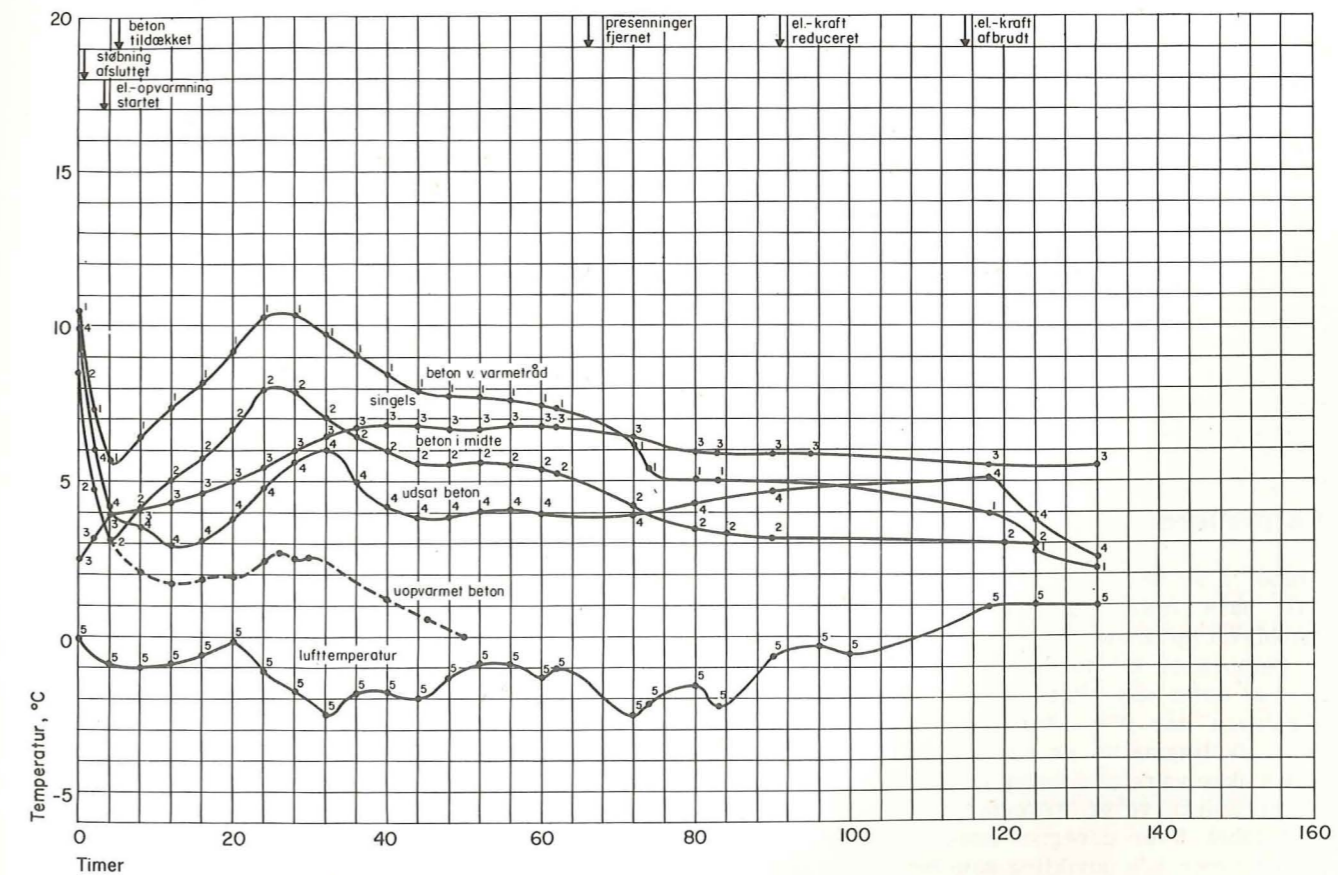
## Temperaturkurver

I hvert målepunkt registreredes temperaturen lige fra udstøbningen er færdig, til 2 døgn efter den elektriske opvarmning er afsluttet. På fig. 6 vises temperaturkurver for opvarmet beton i de forskellige målepunkter, i singels samt udetemperatur. Inden betonen er blevet tildækket, er temperaturen faldet fra ca. 10°C til mellem 3 og 5,5°C i de forskellige målepunkter. Temperaturen når sit maksimum i betonen ved varmetråden ved 10,5°C ca. 24 timer efter udstøbningen. For betonen 5 cm under overfladen nås maximaltemperaturen 8°C ligeledes 24 timer efter udstøbningen. På det klimatiske mere udsatte sted også 5 cm under overfladen nås maksimum først 32 timer efter udstøbningen og er kun ca. 6°C.

Temperaturen i singelslaget stiger jævnt, mens den elektriske opvarmning foregår, til ca. 7°C, hvorefter den efter afbrydelsen af strømmen falder ca. 1°C. Efter at hærdevarmen er opbrugt, fås ved stadig elektrisk opvarmning nogenlunde konstante temperaturer i de forskellige målepunkter i betonen på 7,5-5,5 samt en enkelt på 4°C. At disse temperaturer trods den elektriske opvarmning er så lave, viser, at der har fundet en meget stærk afkøling sted, dels forårsaget af det sene tildæknings-tidspunkt, dels af den meget utilstrækkelige isolering; kun en presenning lagt løst over betonoverfladen.



Figur 5. Placering af temperaturfølere i kældergulv i Fredericiagade.



Figur 6. Temperaturkurver for opvarmet beton (1), (2) og (4), singels (3), uopvarmet beton samt udetemperatur (5). Fredericiagade.



Efter presenningerne er fjernet, får vind og lokale forhold så stor indvirkning på afkølingen, at kurverne ikke mere løber parallelt.

Lufttemperaturen, der blev målt i luften lige over kældergulvet, er i opvarmningsperioden mellem 0 og -2,5°C. Kældergulvet ligger noget beskyttet i forhold til gaden, hvor temperaturen i samme tidsrum har været nede på -7°C.

## Afkølingstal

Afkølingstallet kan beregnes teoretisk ud fra den givne betonkonstruktion og de givne isolationsforhold. k-værdien for en presenning kan sættes til ca. 5. Et 30 cm skærvelag giver en k-værdi på ca. 1,4. Heraf udregnes afkølingstallet

$$a = \frac{\Sigma k \cdot F}{V \cdot c_b \cdot R_b} = \frac{(5 + 1,4) \cdot 10}{600}, \text{ idet } \frac{F}{V} = 10$$

$$a = 0,11$$

Det er vist, at der findes en afhængighed mellem den tilførte elektriske energimængde W, det aktuelle afkølingstal a og temperaturforskellen  $\theta_k - \theta_u$ , hvor  $\theta_k$  var den konstante temperatur, der blev opnået, efter hærtningsvarmen var opbrugt, og  $\theta_u$  var den gennemsnitlige lufttemperatur i samme interval (side 7, udtryk 15).

Dette kan skrives således:

$$a = \frac{C \cdot W}{600 \cdot (\theta_k - \theta_u)} \text{ og da}$$

$$C = 234 \text{ kg cement/m}^3, \frac{C}{600} = 0,39 \text{ og } W = 2,01 \text{ kcal/t}$$

fås afkølingstallet midt i betonen:

$$a_1 = \frac{0,39 \cdot 2,01}{5,5 - (-1,15)} = 0,11$$

For et mere udsat sted fås:

$$a_2 = \frac{0,39 \cdot 2,01}{4 - (-1,15)} = 0,14$$

Det vil være rimeligt at antage, at afkølingstallet for kældergulvet kan sættes til 0,11, men kan for de mest udsatte steder og under ugunstige forhold stige til 0,14.

## Varmeberegninger

I tabel 5 er udregnet temperaturforløbet, som det ville have været under støbningen, hvis der ikke var blevet opvarmet.

Betonen er frostsikker ved  $t_0 = 48$ . Af tabellen ses, at dette nås efter 42 timer, og altså før temperaturen når 0°C. For de mest udsatte steder, hvor afkølingstallet er sat til 0,14, vil frostsikkerheden ikke være nået inden frysning. Den beregnede temperaturkurve er indtegnet (punkteret) på fig. 6.

I tabel 6 er udregnet hærtningstiden ved 0°C. Denne viser  $t_0$ 's udvikling som funktion af tiden beregnet for de temperaturer, der er registreret i målepunktet midt i betonlaget. Sammenholdes tabel 6 med anv. 17, side 55, ses, at betonen er frostsik-

ker efter 32 timer. Efter 44 timer har den nået ca. 20% af 28 døgns-trykstyrken, efter 60 timer ca. 30%.

Vil man regne videre for at se, hvor længe man skal fortsætte opvarmningen for at nå en ønsket styrke, f.eks. 60% af 28 døgns-styrken, ses det af diagrammet fig. 22 i anv. 17, at denne er nået ved  $t_0 = 240$  timer. Der skal i alt hærdes i 240 - 89,20 timer = 150,80 timer ved konstant temperatur. Ved fortsat el-opvarmning opnås pr. time en hærtningsforøgelse på 1,46  $t_0$ .

Der skal altså fortsat opvarmes i  $\frac{150,80}{1,46} = 103$  timer.

## Betragtninger efter forsøg

Forsøget viste tydeligt, at vil man opnå en effektiv virkning af en elektrisk opvarmning, må man være omhyggelig med at undgå unødvendig afkøling. Betonens varmetab fra ankomsttidspunktet og til tildækningsøjeblikket kan skønnes til 15% pr. time af temperaturforskellen mellem betonen og den omgivende luft. Ved forsøgene her er temperaturen af den varme beton fra ankomsten og til tildækning faldet 10° - 15°C i tidsrummene fra 4 op til 10 timer.

Ved en fornuftig planlægning af støbning og tildækning kunne man have opnået en begyndelsestemperatur for betonen på 13°C.

Var der i stedet for presenninger anvendt en halmmåtte indsyet i sisalkraftpapir, var afkølingstallet blevet

$$a = \frac{\Sigma k \cdot F}{600 \cdot V} = \frac{(1,6 + 1,4) \cdot 10}{1 \cdot 600} = 0,05$$

Ved dette afkølingstal og uden elektrisk opvarmning var der opnået en virkning lige så effektiv som den, der blev opnået ved elektrisk opvarmning under de foreliggende omstændigheder (anv. 17, side 55, samt tabel 6). Et sådant arrangement havde været mere økonomisk.

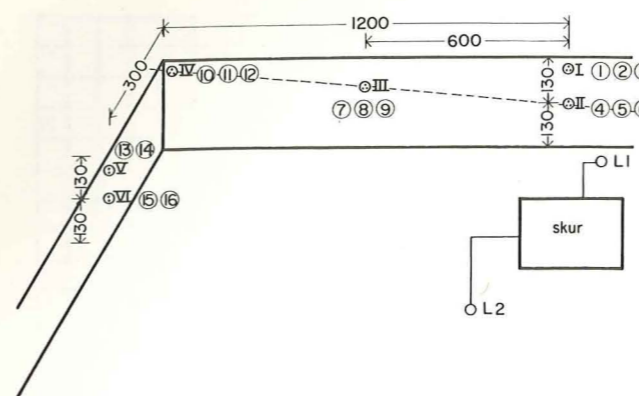
## Forsøg 3: Forbrændingsanstalt, Roskilde

Forsøgsobjektet var her en betonmur i ca. 12 m højde. Dens dimensioner var 24 m x 2,60 m x 0,15 m.

Elektriske varmekabler var fastgjort til armeringen i det yderste sæt armeringsjern og anbragt parallelt med ca. 30 cm indbyrdes afstand. En mur vinkelret på forsøgsmuren blev støbt samtidig, men uden opvarmning. Der blev foretaget temperaturmålinger på begge vægge.

På figur 7, der viser en skitse af forsøgsmuren, er angivet, hvorledes termofølerne blev anbragt.

I hver gruppe i den opvarmede del blev anbragt 3 termofølere, således at føleren med lavest nummer blev anbragt lige ved varmetråden, dernæst blev en føler anbragt midt i betonen (7,5 cm), og føleren med det højeste nummer i gruppen blev anbragt i overfladen (1,2 cm) i siden modsat varmetråden. I den uopvarmede væg var der kun 2 følere i hver



Figur 7. Placering af varmekabler i opvarmet og uopvarmet mur.

gruppe, den ene i midten af betonlaget og den anden i overfladen. Gruppernes placering er ligeledes vist på fig. 7.

## Anvendt beton

Der blev anvendt varm færdigblandet beton, hvis sammensætning for lidt over 1 m<sup>3</sup> er angivet som følgende:

285 kg rapidcement  
900 kg sand  
1140 kg sten  
120 l vand  
4% luft er tilblandet  
sand indeholder ca. 5% vand  
sten indeholder ca. 1% vand.

Sammensætningen af 1 m<sup>3</sup> fremgår af nedenstående skema:

Materiale		Kornvægtfylde	Volumen liter/m <sup>3</sup> beton
art	mængde kg/m <sup>3</sup>		
Rapidcement	268	3,15	85,1
Sand	805	2,62	307,3
Vand i sand	40	1,00	40,0
Sten	1060	2,62	404,6
Vand i sten	10	1,00	10,0
Tilsat vand	113	1,00	113,0
Luft	-	-	40,0
Sum	2296	-	1000

## Isolering

Isoleringen er bestemt ved støbformen, der er 1½" våd støbform, og hvis k-værdi er beregnet til 3,0. Den frie flade opadtil blev dækket med vintermåtter. Isoleringen blev ikke fjernet, mens forsøget stod på.

## Elektriske data

Der blev anvendt samme elektriske modstandstråd som ved forsøget i Fredericiagade. Den anvendte

transformator havde 2 strømkredse og en maximal effekt på 10355 Watt. Der regnedes med et tab i tilledninger m.m. på ca. 15%. Der blev kun anvendt den ene strømkreds svarende til en effektiv effekt

$$\text{på } \frac{12000 \text{ Watt}}{2} - 15\% = 5100 \text{ Watt, og idet } 100 \text{ Watt}$$

$$= 85,7 \text{ kcal/t er der i alt anvendt } 51 \cdot 85,7 \text{ kcal/t} = 4370,7 \text{ kcal/t.}$$

Der blev i alt støbt 24 · 2,60 · 0,15 m<sup>3</sup> = 9,36 m<sup>3</sup> beton. Denne indeholder 9,36 · 268 kg = 2508,5 kg rapidcement. Varmemængden, der ved elektrisk opvarmning tilføres cementen, er pr. time:

$$\frac{4370,7}{2508,5} = 1,75 \text{ kcal.}$$

## Temperaturkurver

Temperaturkurverne, der er optegnet på fig. 8, viser registrering af temperaturen i samtlige målepunkter lige fra støbningens afslutning og hele den tid, hvori der er opvarmet elektrisk, nemlig i 93 timer, samt 20 timer efter at strømmen er afbrudt.

Som man kunne vente, er temperaturen ved varmetråden den højeste temperatur i hver gruppe, men temperaturforskellene inden for hver gruppe er højst 4½°C og størst for de grupper, hvor temperaturen er størst. I gruppe 2, der er væggen geometriske midtpunkt, fås de højeste temperaturer, maximum fra 15½ - 21°C, dernæst kommer gruppe 1, hvor maximumtemperaturerne ligger mellem 17 og 12½°C. I gruppe 3 er maximumtemperaturerne mellem 15 og 12°C. For gruppe 4, der ligger på et udsat sted, nemlig hjørnet af den opvarmede væg, er der kun lidt forskel på maximumtemperaturerne, der ligger mellem 9½ og 10°C. For den uopvarmede væg fås i midten af væggen maximumtemperaturer på ca. 6½°C for både målepunktet midt i væggen og i yderkanten. For gruppe 5, der ligger øverst i væggen, fås for det udsatte punkt en maximumtemperatur på 4° og for punktet midt i væggen 5½°C.

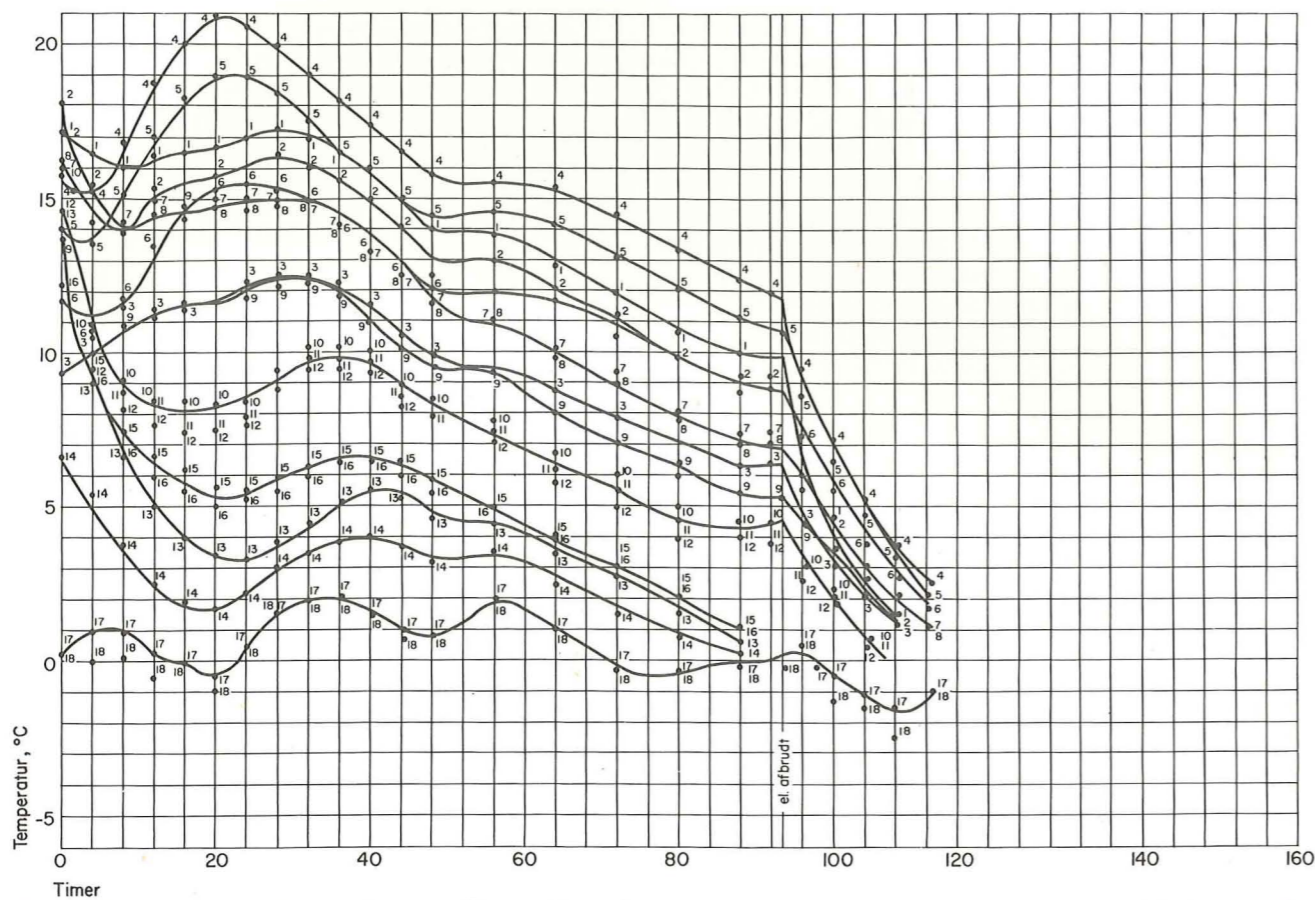
Efter at hærtningsvarmen er opbrugt, falder temperaturen jævnt. Den når dog i nogle punkter at blive næsten konstant i de sidste 4 timer, inden opvarmningen sluttes. Disse temperaturer ligger fra 4°C til 11,5°C. Temperaturen for den uopvarmede væg er allerede 4 timer, før opvarmningen sluttes, nede mellem 0 og 1°C, således at punkterne ligger næsten oven i hinanden og ikke kan registreres videre frem. Efter strømmens afbrydelse falder temperaturen som bekendt eksponentialt med tiden og er efter 24 timer så langt nede, at den ikke mere kan registreres. Efter 20 timer ligger temperaturerne mellem 0 og 2,3°C.

## Afkølingstal

En teoretisk beregning af afkølingstallet giver

$$a = \frac{\Sigma k \cdot F}{V \cdot c_b \cdot R_b}$$

$$a = \frac{(3,0 + 3,0) \cdot 1}{0,15 \cdot 600} = 0,067 \sim 0,07$$



Figur 8. Temperaturkurver for samtlige målepunkter omfattende opvarmet beton, uopvarmet beton og ude-temperatur (Roskilde).

I praksis kan afkølingstallet for de enkelte punkter, hvori man har registreret temperaturen, udregnes fra de temperaturværdier, man finder, efter at strømmen er afbrudt. Fra dette tidspunkt aftager temperaturdifferensen ( $\theta_t - \theta_u$ ) nemlig eksponentielt med tiden (se side 7).

Af fig. 8 aflæses  $\theta$ -værdien for de respektive punkter, da strømmen blev afbrudt efter 93 timer samt værdierne for tidspunkterne  $2\frac{1}{2}$ ,  $6\frac{1}{2}$ ,  $10\frac{1}{2}$ , og  $14\frac{1}{2}$  time derefter.

Da gennemsnitsudetemperaturen i disse første  $14\frac{1}{2}$  time efter strømmens afbrydelse var ca.  $0,5^\circ\text{C}$ , fås ( $\theta_t - \theta_u$ )-værdierne ved at lægge  $0,5^\circ\text{C}$  til de aflæste værdier på fig. 8. Den eksponentielle afhængighed mellem ( $\theta_t - \theta_u$ ) og  $t$  er optegnet på fig. 9. Afkølingstallet i de enkelte punkter er bestemt af liniernes hældningskoefficient. Som det ses af figuren, fås samme afkølingstal for de målepunkter, der i det logaritmiske koordinatsystem fremstilles som parallelle linier. Dette gælder for målepunkterne 4, 5, 6, 7, 8 og 9, dvs. grupperne II og III.

Endvidere fås næsten samme hældningskoefficient for punkterne i gruppe I, nemlig punkterne 1, 2 og 3.

For gruppe IV's punkter 10, 11 og 12 fås en tredje hældningskoefficient. ( $\theta_t - \theta_u$ ) aflæses af fig. 9 og indsættes i udtrykket for  $a$  (12) side 6. For gruppe II og III fås (udregnet efter punkt 4-5)

$$a = \frac{\ln 12,1 - \ln 4,2}{14,5} = \frac{2,49 - 1,44}{14,5} = \frac{1,05}{14,5} = 0,072 \sim 0,07$$

For gruppe I fås for punkt 1-2

$$a = \frac{\ln 9,4 - \ln 2,0}{14,5} = \frac{2,24 - 0,69}{14,5} = \frac{1,55}{14,5} = 0,107 \quad \text{og}$$

for punkt 3

$$a = \frac{\ln 6,8 - \ln 1,7}{14,5} = \frac{1,92 - 0,53}{14,5} = \frac{1,39}{14,5} = 0,096$$

Gennemsnit for gruppe I er 0,10.

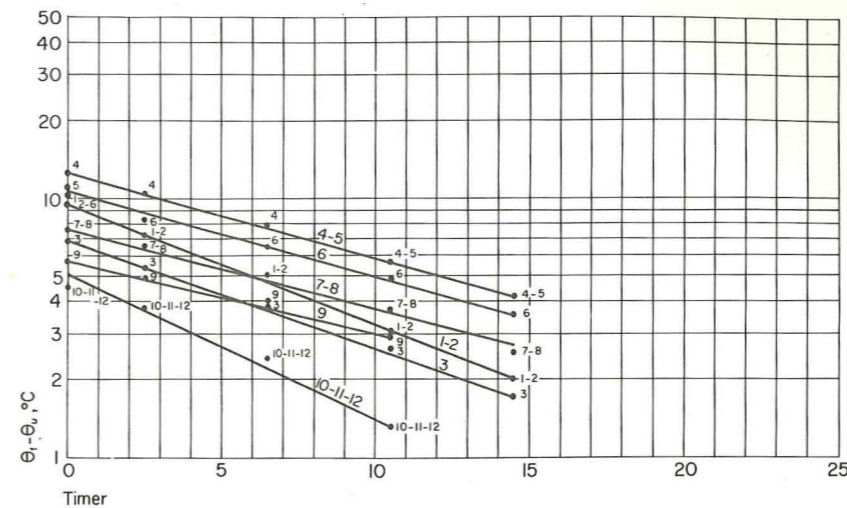
For gruppe IV fås for punkterne 10, 11 og 12

$$a = \frac{\ln 5 - \ln 1,3}{10,5} = \frac{1,61 - 0,26}{10,5} = \frac{1,35}{10,5} = 0,129 \sim 0,13$$

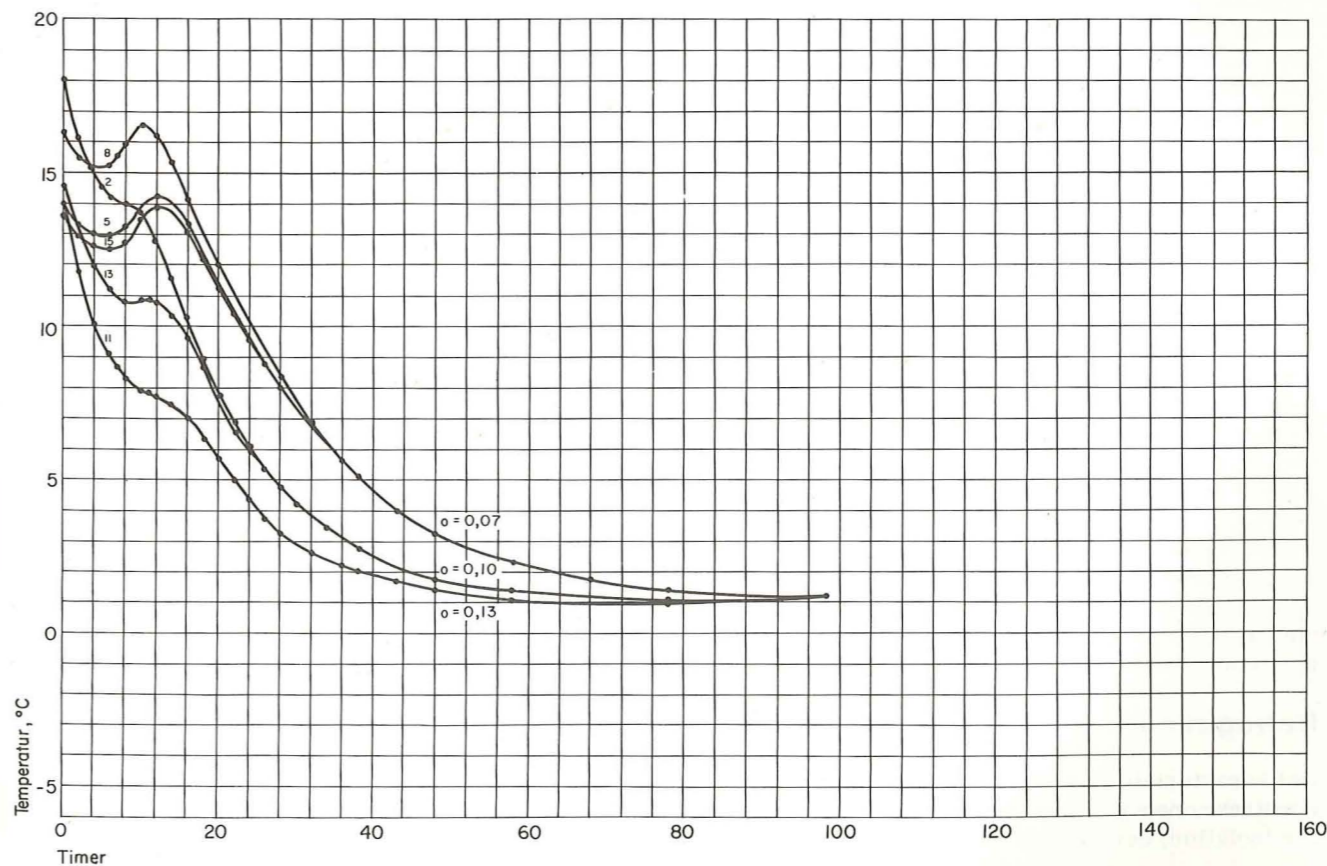
dvs. at man kan regne med, at afkølingstallet midt i muren er 0,07, for et punkt i overkanten af muren 0,10, og for et punkt ude i et hjørne 0,13.

### Varmeberegninger

Figur 8 viser temperaturforløbene for alle målepunkter. For nogle udvalgte punkter – et i hver gruppe beliggende i betonlagets midte – udregnes hærtningsforløbene. Dette gælder punkterne 2, 5, 8, 11, 13 og 15. Ligesom ved forsøget i Fredericia-gade, sml. tabel 6, udregnes hærtningsstidens  $t_0$ 's udvikling som funktion af tiden samt den tilhørende udviklede hydreringsvarme  $Q_t$  kalorier. Disse udregninger er vist i tabellerne 7 til 12. Til sammen-



Figur 9. Afkølingens afhængighed af tiden (Roskilde).



Figur 10. Teoretisk beregnede temperaturkurver som funktion af hærtningsstid i 6 forskellige punkter (Roskilde).

ligning med disse er der på elektronregnemaskine udregnet de teoretiske hærtningsforløb, hvis betonen ikke var blevet opvarmet. Disse er vist i tabellerne 13-18 og temperaturerne er grafisk afbildet som funktion af hærtningsstid på fig. 10. Forløbet af kurverne gennem de enkelte punkter på henholdsvis

fig. 8 og fig. 10 viser temperaturudviklingen henholdsvis med opvarmning (praktisk fundne resultater) og uden opvarmning (teoretisk beregnede). Kurverne gennem punkterne 13 og 15 viser dog henholdsvis de fundne og teoretisk beregnede punkter for uopvarmede dele i konstruktionen.

Punkt nr.	a	t timer	Hærdningstid i t <sub>0</sub> timer		
			med opv. I	uden opv. II	uden opv. teoretisk III
5 og 15	0,07	8	24,8	20,2	23,7
2 og 13	0,10	8	27,1	19,2	25,2
11	0,13	8	20,8		21,1
5 og 15	0,07	93,5	269	138	150
2 og 13	0,10	93,5	242	130	137
11	0,13	93,5	163		124
5 og 15	0,07	16	50,5	43,8	44,3
2 og 13	0,10	16	49,8	39,6	43,3
11	0,13	16	35,0		34,7

Oversigt over hærdningsforløbet efter henholdsvis 8, 16 og 93,5 timer.

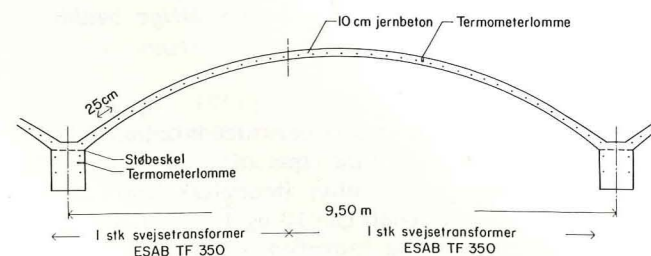
I ovenstående tabel er der angivet, hvor langt hærdningen er fremskredet (målt i t<sub>0</sub> timer) efter henholdsvis 8, 16 og 93,5 timer i de forskellige undersøgte målepunkter. I kolonne I er angivet hærdningstiden med opvarmning, i kolonne II hærdningstiden uden opvarmning, og i kolonne III er angivet de teoretisk beregnede hærdningstider for ikke opvarmet beton; disse er beregnet ud fra begyndelsesbetingelserne i de pågældende punkter.

Det fremgår af tabellen, at efter ca. 8-16 timers forløb giver opvarmningen en hærdningsgrad, der er ca. 25% større end for tilsvarende beton, der ikke opvarmes, mens der, når opvarmningen slutter efter 93,5 timer, er opnået en hærdning af den opvarmede beton dobbelt så stor som den uopvarmede betons hærdning.

Ser man på frostsikkerheden, er den opnået ved t<sub>0</sub> = 48 timer. Denne er for punkterne med afkølingstallene 0,07 og 0,10 nået efter ca. 16 timer. Uden opvarmning opnås denne ved ca. 20 timer. De værdier, man har fundet for hærdningsforløb for ikke opvarmet beton, og de, man teoretisk har udregnet, viser for de første timer, mindre god overensstemmelse, men god overensstemmelse over længere tid (93,5 timer). Dette viser også, at hærdningsforløbet i begyndelsen af processen er meget følsomt for ydre påvirkninger. En stærkere vindstyrke kan i starten have forøget afkølingstallene temporært.

### Betragtninger efter forsøg

Det karakteristiske ved forsøgene i Roskilde var, at konstruktionen var ret tynd (15 cm), og at den eneste isolation, der fandtes, var forskallingen.



Figur 11. Snit i buetag.

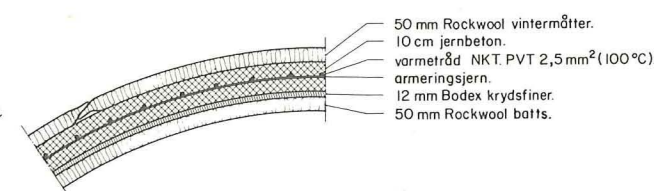
Der har ikke på noget tidspunkt været fare for, at konstruktionen skulle fryse, inden frostsikkerhed var nået, selv om opvarmningen var udeladt.

Efter knapt 4 døgns opvarmning er der gennemsnitlig nået en hærdningsgrad svarende til t<sub>0</sub> = 11 døgn mod et t<sub>0</sub> på 5,5 døgn, hvis der ikke var blevet opvarmet. Disse hærdningsgrader modsvarer en styrke på henholdsvis 65% og 40% af 28 døgns trykstyrken.

### Forsøg 4: Tag til maskinhal, Asnæsværket

På Asnæsværket ved Kalundborg skulle udføres et tag til en maskinhal på ca. 30 m x 50 m. Det skulle støbes i tiden 14.1. - 1.4., således at taget skulle være afforskallet og helt færdigt inden 1.4. Taget skulle bestå af 5 10 cm tykke buer, der hver spændte over 10 meter og hvilede på 5 dragere, der samtidig skulle støbes. Man ønskede elektrisk opvarmning ved støbningen af dragere og buer, således at man kunne afforskalle ca. 10 døgn efter støbningen. På fig. 11 er vist et snit i buetaget. Isolationen var på oversiden 50 mm Rockwool-vintermåtte, på undersiden - foruden krydsfiner-støbeformen - 50 mm Rockwool-batts som vist på fig. 12. Betonen skulle indeholde 350 kg rapidcement pr. m<sup>3</sup>. Vandcementtalet skulle være ca. 0,5, og man regnede med en luftindblanding på ca. 3%.

Varmekabler skulle bindes fast til armeringen, og man påregnede at leje så mange transformere, at hele arealet kunne holdes opvarmet, så længe det var ønsket. Tillige påregnede man, at en effekt på



Figur 12. Isolering af buetag.

10 kW skulle kunne opvarme ca. 30 m<sup>3</sup> beton. Man ønskede et overslag over, hvorledes varmeudviklingen i den nystøbte beton ville være med og uden elektrisk opvarmning. Der ønskedes besked om hærdningsgraden, hvis man standsede opvarmningen efter 2 døgns forløb, og hvis man fortsatte. Ligeledes ønskede man, at betonens slutstyrke skulle svare til, at den var hærdnet i 15 døgn om sommeren (gennemsnitstemperatur 15°C).

### Givne oplysninger

Betonen blev fremstillet på pladsen, og den indeholdt 350 kg rapidcement pr. m<sup>3</sup>. Betonens temperatur påregnede ved udstøbningen at være 15°C.

Det skønnedes, at de 30 m<sup>3</sup> beton kunne opvarmes med en effekt på 10 kW. Dette svarer til, at der pr. kg cement pr. time tilføres W kcal. Idet 100 Watt = 85,7 kcal/t, er:

$$W = \frac{100 \cdot 85,7}{30 \cdot 350} = 0,82 \text{ kcal/t.}$$

Det skønnes, at udetemperaturen i værste fald kan blive -5°C i gennemsnit i det nævnte tidsrum, hvorfor dette tal lægges til grund for beregningerne.

### Beregninger inden støbning

På grundlag af disse skøn udregnes temperaturudviklingen som funktion af tiden for henholdsvis uopvarmet og elektrisk opvarmet beton. Beregningerne fremgår af tabel 19 og 20. På fig. 15 der viser temperaturforløbet for de enkelte støbninger, er disse tabeller tillige tegnet op som kurver til sammenligning med de temperaturer, der virkelig blev registreret, medens støbningen fandt sted.

Af tabel 19 fremgår, at betonen når 0°C efter 118 timer, når den har en hærdningsgrad svarende til t<sub>0</sub> = 393 timer = 16½ døgns hærdning ved 0°C, svarende til ca. 75% af 28 døgns trykstyrken. Efter

dette tidspunkt ville hærdningen kun skride meget langsomt frem, og når betonen blev -5°C, helt gå i stå.

Da der ønskedes en styrke svarende til 15 døgn ved 15°C (t<sub>0</sub> = 1015), og da denne er større end 28 døgns trykstyrken, bestemte man sig for elektrisk opvarmning. Af tabel 20 ses, at med fortsat opvarmning er hærdningsvarmen opbrugt efter 2 døgns forløb. Der udregnedes, hvor langt hærdningen er fremskredet, inden temperaturen når 0°C, hvis den elektriske strøm afbrydes efter 48 timers forløb.

Dette udregnedes således: Da afkølingen foregår logaritmisk, har vi som udtryk for tiden t, fra vi afbryder strømmen ved temperaturer  $\theta = 32^\circ\text{C}$  til 0°C nås (udetemperatur - 5,0 og a = 0,022)

$$t = \frac{\ln(32,6 + 5,0) - \ln 5,0}{0,022} = 91 \text{ timer.}$$

På fig. 13, der viser teoretisk beregnede afkølingsforløb i logaritmisk skala, indtegnes temperaturkurven på logaritmisk papir; den er betegnet ved I. Det er en ret linie og fås af de 2 yderpunkter.

$$\text{For } t = 0 \text{ er } \theta_D = \theta_t + 5^\circ = 37,6 \text{ og for } t = 91 \text{ timer er } \theta_D = 0 + 5 = 5^\circ\text{C}$$

Temperaturen  $\theta_D = \theta_t + 5$  for de mellemliggende tidspunkter kan aflæses af diagrammet, og i tabel 21 a er hærdningstidens udvikling udregnet i 91 timer, efter strømmen er blevet afbrudt. Efter samlet 139 timer (5,8 døgn) er der nået en hærdning svarende til t<sub>0</sub> = 794,5 timer.

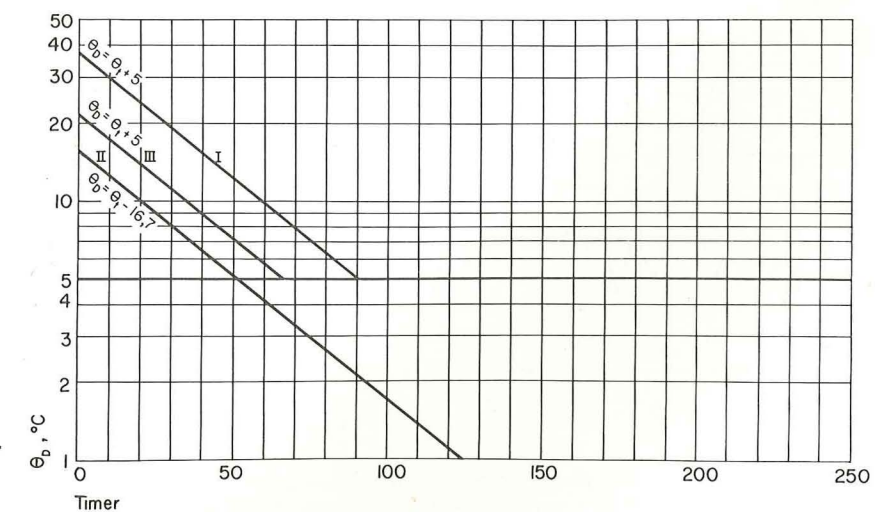
Det næste spørgsmål var: Hvorledes fortsætter hærdningsudviklingen, når hærdningsvarmen er opbrugt, men under fortsat varmetilførsel?

Ved fortsat opvarmning nås en konstant temperatur, der er en funktion af udetemperaturen  $\theta_u$ , afkølingstallet a, den anvendte betons cementindhold C og den elektriske effekt W (se side 7, udtryk (16))

$$\theta_k - \theta_u = \frac{C \cdot W}{600 \cdot a}$$

I dette tilfælde fås

$$\theta_k - (-5) = \frac{0,82 \cdot 350}{600 \cdot 0,022} = 21,7 \quad \theta_k = 16,7$$



Figur 13. Teoretisk beregnede afkølingsforløb i logaritmisk skala. (Asnæsværket).

Temperaturen i betonen vil, forudsat konstant ude-temperatur  $-5^{\circ}\text{C}$ , aftage logaritmisk og nærme sig asymptotisk til de  $16,7^{\circ}\text{C}$ .

Man kan f.eks. regne ud, hvor længe det vil vare, inden temperaturen er  $1^{\circ}\text{C}$  over den nedre temperaturgrænse ( $16,7^{\circ}\text{C}$ ), altså  $17,7^{\circ}\text{C}$ .

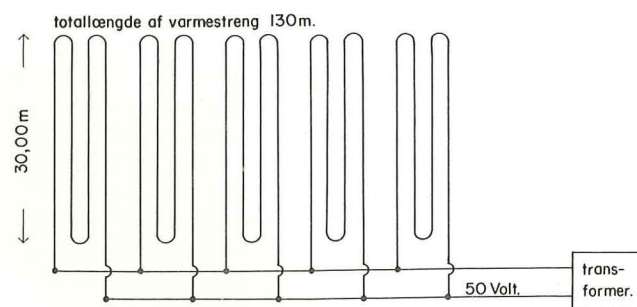
$$t = \frac{\ln(32,6 - 16,7) - \ln 1}{0,022}$$

$$t = \frac{\ln 15,9}{0,022} = 125 \text{ timer}$$

I diagrammet fig. 13 indtegnes temperaturforløbet II analogt med I, idet der til tiden  $t = 0$  svarer et  $\theta_D = \theta_t - 16,7$ , dvs.  $\theta_D = 32,6 - 16,7$ ;  $\theta_D = 15,9$  og til tiden 125 timer svarer et  $\theta_D = 17,7 - 16,7$ , dvs.  $\theta_D = 1$ .

I tabel 21 b er angivet hærkningstidens udvikling i de 125 timer, der følger efter de første 48. Betonen har efter i alt 173 timers elektrisk opvarmning nået en hærkningsgrad svarende til  $t_0 = 1143,2$  timer  $\sim 46,5$  døgn ved  $0^{\circ}\text{C}$ . Efter 137 timer = 5,8 døgn er den ønskede hærkningsgrad, svarende til  $t_0 = 1015$  timer, nået.

Endelig ønskede man at vide, hvor stort et tilskud til hærkningen, der blev opnået i den tid, der gik, fra man afbrød varmetilførslen, og indtil betonen var  $0^{\circ}\text{C}$ . Det antoges, at varmetilførslen afbrydes ved betontemperaturerne  $\theta_k = 16,7^{\circ}\text{C}$ .



Figur 14. Varmestreng.

Den aktuelle tid udregnes som ved det foregående

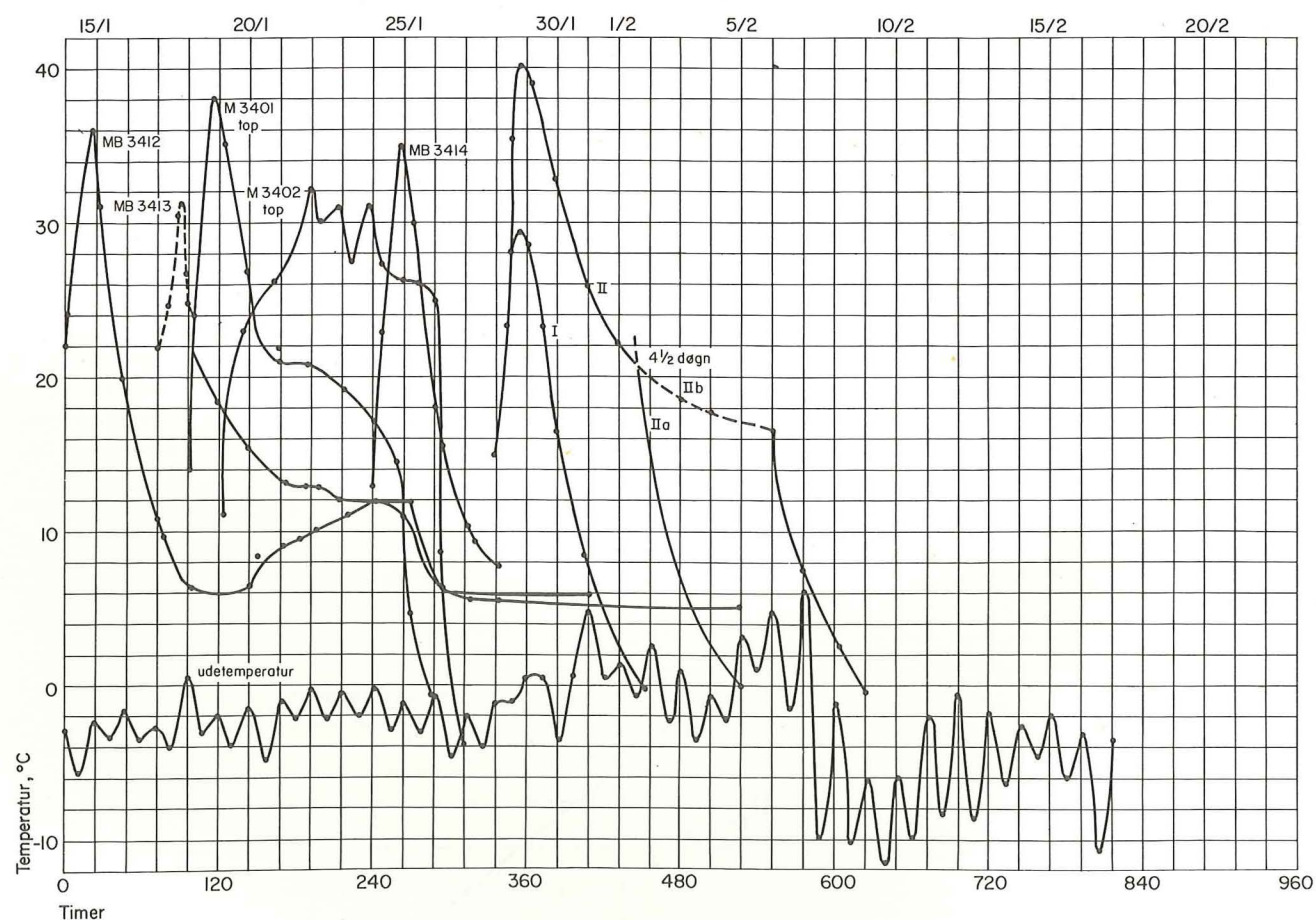
$$t = \frac{\ln(16,7 + 5) - \ln 5}{0,022} = 66 \text{ timer.}$$

I diagrammet fig. 13 viser kurve III temperaturforløbet som funktion af tiden.

I tabel 21 c er hærkningsforløbet beregnet.

I de 66 timer, der er gået, siden varmetilførslen ophørte, er opnået en ekstra hærkning svarende til  $t_0 = 107,2$  timer.

Vil man opnå en total hærkning på  $t_0 = 1015$  timer, skal strømmen afbrydes (tabel 21 b), når en hærkning på  $t_0 = 1015 - 107 \sim 908$  er opnået, dvs. efter ca.  $4\frac{1}{2}$  døgn opvarmning.



Figur 15. Temperaturforløb for de enkelte støbninger optegnet efter tabel 22, samt teoretisk beregnede temperaturforløb uden opvarmning (I), og med opvarmning (II), optegnet efter tabellerne 20 og 21a, b og c.

## Støbning

Støbningen blev udført som planlagt. Der blev lejet 10 svejsetransformere, og buer og dragere blev opvarmet fra transformerne, som det fremgår af fig. 11. Hveranden transformer sørger for en opvarmning af  $\frac{2}{3}$  bue, og de andre for opvarmning af 1 drager +  $\frac{1}{3}$  bue, dvs. henholdsvis  $20 \text{ m}^3$  og  $25 \text{ m}^3$  beton. På fig. 12 er vist buen og den omgivne isolering, og på fig. 14 er vist varmetrådets placering i buefaget.

Første støbning blev påbegyndt den 14. januar og sidste støbning den 4. februar. Den elektriske opvarmning påbegyndtes samtidig med støbningen og vedblev indtil 17. februar, hvor elektriciteten blev afbrudt for alle strømkredsene.

Det skal dog bemærkes, at de anvendte varmeisolerende mineraluldsmåtter normalt er fjernet efter ca. 5 - 7 døgn forløb, da de skulle bruges andetsteds, og efter dette tidspunkt var nytten af den elektriske opvarmning meget tvivlsom.

Temperaturmålingerne er foretaget 1 à 2 gange daglig af byggepladsens folk; disse målinger fremgår af tabel 22. M B refererer til buestykke, M er afsnittet med dragere.

På fig. 15 er kurverne for de enkelte støbninger optegnet efter tabel 22.

Udetemperaturen er optegnet efter Meteorologisk Instituts opgivelser af maximum- og minimumdagtemperaturer for det aktuelle område. Det ses, at indtil den 5. februar havs en middel-døgntemperatur på ca.  $-2,5^{\circ}\text{C}$ , og efter 5. februar en middel-døgntemperatur på ca.  $-6^{\circ}\text{C}$ .

Kurve I på figur 15 viser temperaturudviklingen i et buefag, der ikke opvarmes, medens kurve II viser temperaturudviklingen ved elektrisk opvarmning. II - IIa er ved  $4\frac{1}{2}$  døgn opvarmning og II - IIb ved i alt 9 døgn opvarmning.

## Betragtninger efter forsøg

Forsøget på Asnæsværket var ikke noget forsøg i ordets egentlige forstand, men et eksempel på en praktisk løsning ved opførelse af en konstruktion, hvor man valgte at benytte elektrisk opvarmning. Denne løsning må i det foreliggende tilfælde anses for den mest formålstjenlige og tillige den lettest gennemførlige, når de bestemte krav, der var stillet til den pågældende konstruktion, skulle opfyldes.

Kontrollen af betontemperaturen og af det elektriske udstyr var overladt til det entreprenørfirma, der udførte bygningsværket.

Temperaturerne er ikke som i de øvrige refererede forsøg registreret kontinuerligt, men målt på et termometer 1 à 2 gange dagligt. Dette bevirker, at sandsynligheden for at måle de maksimale temperaturer er ringe, og man må antage, at de virkelige maxima er noget højere end angivet på kurverne på fig. 15.

Betonens hærkningstilstand kan også beskrives ved dens "modenhed". Denne er defineret som produktsummen af temperatur og tid summeret over hele den tid, i hvilken hærkningen har fundet sted.

På fig. 15 kan modenheden aflæses som arealet under kurverne.

Skønsmæssigt er arealet under kurven II - II a, der angiver den modenhed af betonen, der er ønsket, af nogenlunde samme størrelse som arealet under de øvrige 5 kurver for støbte buefag.

Eksemplet her har vist, at det er gennemførligt at forudsige hærkningsforløb, temperaturforløb og at planlægge den elektriske opvarmning rationelt med hensyn til opvarmningstid, størrelse af effekt samt nødvendig varmeisolering.

## Konklusion

Forsøgene har vist, at elektrisk opvarmning af beton er en metode, der ved siden af andre vinterbyggeforanstaltninger har sin berettigelse. Den kan anvendes, når man ønsker sikkerhed mod frostska-der, men den er især anvendelig, når man af en eller anden grund ønsker en hurtigere hærkning.

Det er vigtigt at sørge for en god varmeisolering af betonen; varmen kan ikke udnyttes effektivt ved en dårlig isolering.

Det er ikke almindelig benyttet at varmeisolere støbeforme, men det er værd at overveje, hvilke fordele en forbedret varmeisolering af støbeformen kan give enten som supplement til eller som erstatning for en påtænkt elektrisk opvarmning.

Det maksimale udbytte af den elektriske opvarmning fås,

- 1) når varm beton anvendes
- 2) når støbningen tilrettelægges, således at tiden inden tildækning bliver så kort som mulig
- 3) når en effektiv varmeisolering af bygværket anvendes.

Hvis man har besluttet sig til at anvende elektrisk

opvarmning ved betonstøbning, må den projektansvarlige overveje, hvilke forholdsregler der skal tages.

Der må anlægges et skøn over vejrforhold, og der må overvejes, hvilken styrke der forlanges af betonen til bestemte tidspunkter.

Ud fra de retningslinier, der er angivet i denne rapport samt de faciliteter, den enkelte har til rådighed, skulle det være muligt at fastlægge energiforbrug, opvarmningstid, varmeisolering m.m.

Prisen må kalkuleres efter de tekniske beregninger; denne omfatter:

- 1) leje af elektrisk materiel
- 2) modstandstråd
- 3) kW-timeforbrug
- 4) varmeisolering
- 5) arbejds løn for
  - a. påmontering af tråde
  - b. tilsyn med el-installationer.

Fremtidige undersøgelser bør følge anvendelsen af elektrisk opvarmning i praksis og derfra udtrække priskalkulationer vedrørende denne.

## Summary

In 1965 SBI was requested by the Ministry of Labour to cooperate in some experiments with electric heating in winter at the concrete casting of a road bridge at Lyngø, a basement floor in Fredericia-gade in Copenhagen, a refuse disposal plant at Roskilde and a roof for a machine hall at the Asnæs Power Plant by Kalundborg.

The experiments were carried out in the following way: Insulated resistance wires were fixed to the reinforcement of the concrete structures, and then the concrete was poured. Immediately after pouring the current was switched on, so that the structure was heated. Then it was insulated. The temperatures were recorded at different places and were compared with temperature recordings from corresponding non-heated zones.

It was ascertained that the cooling factor of the structure varied in the different points, even if the structure was heat insulated in the same way all over. It was found for the cooling factor that

$$a = \frac{\ln(\theta_B - \theta_u) - \ln(\theta - \theta_u)}{t}$$

where  $\theta_B$  is the initial temperature of the concrete expressed in °C.

$\theta_u$  is the average temperature of the ambient air expressed in °C.

$\theta$  is the average temperature of the concrete expressed in °C.

$t$  is the time expressed in hours.

Moreover it was found that if final hardening was to occur at a certain temperature  $\theta_k$ , the necessary

electric effect could be calculated according to the following equation:

$$W = \frac{600 a (\theta_k - \theta_u)}{C}$$

where  $C$  is the cement content of the concrete expressed in kg/m<sup>3</sup>.

On the basis of the found temperatures and known thermodynamic functions for the cement the development of hardening of different concrete structures has been examined, dependent on concrete composition, insulation, cooling factor and degree of electric heating.

The conclusion of the experiments was that electric heating of concrete is a method that has its justification beside other winter building measures. It can be used when the aim is to safeguard against frost injuries, but in particular it is applicable where for some reason a quicker hardening is desired.

Maximum gain from electric heating is obtained when

- 1) warm concrete is used,
- 2) the time before covering up is made as short as possible,
- 3) an effective insulation is applied.

It has turned out to be feasible to predict development of hardening and course of temperature and to plan the electric heating rationally with respect to heating time, magnitude of effect and heat insulation.

## Tabeller

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o = (2) \cdot (4)$	$t = \Sigma(5)$	$Q_t$	$Q_w$	$\Sigma Q - 9 (7) + (8) - 9$	$k \cdot \Sigma Q - 9 0,467 \cdot (9)$	(10)+17	$\theta_t - \theta_u$	$0,026 \cdot (12) \cdot \Delta t$	$\Sigma(13)$	(11)-(14)	$\theta_u$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	
0					18,00	9,00								17,00	
1	1	17,00	3,27	3,27	21,27	11,27	1,625	3,90	1,82	18,82	13,00	0,34	0,34	18,48	4
2	1	18,48	3,62	3,62	24,89	15,11	3,25	9,36	4,37	21,37	14,48	0,38	0,72	20,65	4
3	1	20,65	4,18	4,18	29,07	19,84	4,875	15,72	7,34	24,34	16,65	0,43	1,15	23,19	4
4	1	23,19	5,00	5,00	34,07	24,55	6,50	22,05	10,30	27,30	19,19	0,50	1,65	25,65	4
5	1	25,65	5,92	5,92	39,99	28,49	6,50	25,99	12,14	29,14	22,15	0,58	2,23	26,91	3,5
6	1	26,91	6,45	6,45	46,44	31,43	6,50	28,93	13,51	30,51	23,91	0,62	2,85	27,66	3
7	1	27,66	6,80	6,80	53,24	33,47	6,50	30,97	14,46	31,46	24,66	0,64	3,49	27,97	3
8	1	27,97	6,95	6,95	60,19	36,05	6,50	33,55	15,67	32,67	25,47	0,66	4,15	28,52	2,5
9	1	28,52	7,20	7,20	67,39	37,85	6,50	35,35	16,51	33,51	26,52	0,69	4,84	28,67	2
10	1	28,67	7,30	7,30	74,69	39,67	6,50	37,17	17,36	34,36	26,67	0,69	5,53	28,83	2
11							8,125								1,5
12	2	28,83	7,40	14,80	89,49	42,42	9,75	43,17	20,16	37,16	27,83	1,44	6,97	30,19	1
13							11,375								1,5
14	2	30,19	8,10	16,20	105,69	45,14	13,00	49,14	22,95	39,95	28,19	1,47	8,44	31,51	2
15															2
16	2	31,51	8,90	17,80	123,49	47,35	16,25	54,60	25,50	42,50	30,01	1,56	10,00	32,50	1,5
20	4	32,50	9,50	38,00	161,49	51,07	22,75	64,82	30,27	47,27	28,50	2,96	12,96	34,31	4
24	4	34,31	10,80	43,20	204,69	53,19	29,25	73,44	34,30	51,30	30,31	3,15	16,11	35,19	4
28	4	35,19	11,40	45,60	250,29	55,01	35,75	81,76	38,18	55,18	32,19	3,35	19,46	35,72	3
32	4	35,72	11,90	47,60	297,89	56,92	42,25	90,17	42,11	59,11	32,72	3,40	22,86	36,25	3
36	4	36,25	12,35	49,40	347,29	57,95	48,75	97,70	45,63	62,63	33,75	3,51	26,37	36,26	2,5
40	4	36,26	12,35	49,40	396,69	58,93	55,25	105,18	49,12	66,12	35,26	3,67	30,04	36,08	1
44	4	36,08	12,20	48,80	445,49	59,91	61,75	112,66	52,61	69,61	34,58	3,60	33,64	35,97	1,5
48	4	35,97	12,15	48,60	494,09	60,88	68,25	120,13	56,10	73,10	32,97	3,43	37,07	36,03	3
52	4	36,03	12,15	48,60	542,69	61,00	74,75	126,75	59,19	76,19	36,03	3,75	40,82	35,37	0
56	4	35,37	11,60	46,40	589,09	61,00	81,25	133,25	62,23	79,23	36,87	3,83	44,65	34,58	-1,5
60	4	34,58	10,95	43,80	632,89	61,00	87,75	139,75	65,26	82,26	37,08	3,86	48,51	33,75	-2,5
70	10	33,75	10,40	104,00	736,89	61,00	104,00	156,00	72,8	89,8	33,75	8,78	57,29	32,5	
80	10	32,5	8,50	85,00	821,89	61,00	120,25	172,25	80,44	97,44	32,5	8,42	65,61	31,8	
90	10	31,8	9,10	91,00	912,89	61,00	136,50	188,50	88,03	105,03	31,8	8,28	73,89	31,1	
100	10	31,1	-	-	-	61,00	152,75	204,75	95,62	112,62	31,1	8,07	81,96	30,7	
114	14	30,7	-	-	-	61,00	175,5	227,5	106,2	123,2	30,7	11,2	93,2	30,0	
		26,60	-	-							26,60	69,16			

Tabel 1. Temperatur som funktion af hærningstid med elektrisk varmetilførsel og afkølingstal = 0,026.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o = (2) \cdot (4)$	$t_o = \Sigma(5)$	$Q_t$	$Q_w$	$\Sigma Q - 9 (7) + (8) - 9$	$k \cdot \Sigma Q - 9 0,467 \cdot (9)$	(10)+17	$\theta_t - \theta_u$	$0,040 \cdot (12) \cdot \Delta t$	$\Sigma(13)$	(11)-(14)	$\theta_u$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	
0					18,00	9,00								17,00	
1	1	17,00	3,27	3,27	21,27	11,27	1,625	3,90	1,82	18,82	13,00	0,52	0,52	18,30	4
2	1	18,30	3,55	3,55	24,82	15,03	3,25	9,28	4,33	21,33	14,30	0,57	1,09	20,24	4
3	1	20,24	4,15	4,15	28,97	19,71	4,875	15,59	7,28	24,28	16,24	0,65	1,74	22,54	4
4	1	22,54	4,77	4,77	33,74	24,24	6,50	21,74	10,15	27,15	18,54	0,74	2,48	24,67	4
5	1	24,67	5,52	5,52	39,26	27,95	6,50	25,45	11,89	28,89	21,17	0,85	3,33	25,56	3,5
6	1	25,56	5,85	5,85	45,11	31,03	6,50	28,53	13,32	30,32	22,56	0,90	4,23	26,09	3
7	1	26,09	6,08	6,08	51,19	32,86	6,50	30,36	14,18	31,18	23,09	0,92	5,15	26,03	3
8	1	26,03	6,05	6,05	57,24	34,90	6,50	32,40	15,13	32,13	23,53	0,94	6,09	26,04	2,5
9	1	26,04	6,05	6,05	63,29	36,82	6,50	34,32	16,03	33,03	24,04	0,96	7,05	25,98	2
10	1	25,98	6,04	6,04	69,33	38,33	6,50	35,83	16,73	33,73	23,98	0,96	8,01	25,72	2
11															1,5
12	2	25,72	5,93	11,86	81,19	41,18	9,75	41,93	19,58	36,58	24,72	1,98	9,99	26,59	1
13															1,5
14	2	26,59	6,30	12,60	93,79	43,07	13,00	47,07	21,98	38,98	24,59	1,97	11,96	27,02	2
15															2
16	2	27,02	6,50	13,00	106,79	45,36	16,25	52,61	24,57	41,57	25,52	2,04	14,00	27,57	1,5
20	4	27,57	6,78	27,12	133,91	48,34	22,75	62,09	29,00	46,00	23,57	3,77	17,77	28,23	4
24	4	28,23	7,05	28,20	162,11	51,11	29,25	71,36	33,33	50,33	24,23	3,88	21,65	28,68	4
28	4	28,68	7,30	29,20	191,31	52,57	35,75	79,32	37,04	54,04	25,68	4,11	25,76	28,28	3
32	4	28,28	7,10	28,40	219,71	53,79	42,25	87,04	40,65	57,65	25,28	4,04	29,80	27,85	3
36	4	27,85	6,90	27,60	247,31	54,89	48,75	94,64	44,20	61,20	25,35	4,06	33,86	27,34	2,5
40	4	27,34	6,65	26,60	273,91	55,96	55,25	102,21	47,73	64,73	26,34	4,21	38,07	26,66	1
44	4	26,66	6,35	25,40	299,31	56,97	61,75	109,72	51,24	68,24	25,16	4,03	42,10	26,14	1,5
48	4	26,14	6,12	24,48	323,79	57,48	68,25	116,73	54,51	71,51	23,14	3,70	45,80	25,71	3
52	4	25,71	5,98	23,72	347,51	57,95	74,75	123,70	57,77	74,77	25,71	4,11	49,91	24,86	0
56	4	24,86	5,60	22,40	369,91	58,40	81,25	130,65	61,01	78,01	26,36	4,22	54,13	23,88	-1,5
60	4	23,88	5,23	20,92	390,83	58,82	87,75	137,57	64,25	81,25	26,38	4,22	58,35	22,90	-2,5
64	4	22,90	4,90	19,60	410,43	59,21	94,25	144,46	67,46	84,46	24,90	3,98	62,33	22,13	-2
68	4	22,13	4,65	18,60	429,03	59,58	100,75	151,33	70,67	87,67	21,13	3,38	65,71	21,96	1
80	12	21,96	4,57	54,84	483,87	60,68	120,25	171,93	80,29	97,29	21,96	10,54	76,25	21,04	
100	20	21,04	4,30	86,00	569,87	61,00	152,75	204,75	95,62	112,62	21,04	16,83	93,08	19,54	
114	14	19,54	3,90	54,6	624,5	61,00	175,5	227,5	106,2	123,2	19,5	10,95	104,03	19,2	

Tabel 2. Temperatur som funktion af hærningstid med elektrisk varmetilførsel og afkølingstal 0,040.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_{0.0} = (2) \cdot (4)$	$t_{0.0} = \Sigma(5)$	$Q_t$	(7)-9	$0,467 \cdot (9)$	(10)+17	$\theta_t - \theta_u$	$0,026 \cdot (12) \cdot \Delta t$	$\Sigma(13)$	(11)-(14)	$\theta_u$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
0					18,00	9,00							17,00	
1	1	17,00	3,27	3,27	21,27	11,27		2,27	1,06	18,06	13,00	0,34	17,72	4
2	1	17,72	3,50	3,50	24,77	14,96		5,96	2,78	19,78	13,72	0,36	19,08	4
3	1	19,08	3,77	3,77	28,54	19,18		10,18	4,75	21,75	15,08	0,39	20,66	4
4	1	20,66	4,22	4,22	32,76	23,26		14,26	6,66	23,66	16,66	0,43	22,14	4
5	1	22,14	4,65	4,65	37,41	26,71		17,71	8,27	25,27	18,64	0,48	23,27	3,5
6	1	23,27	5,05	5,05	42,46	29,73		20,73	9,68	26,68	20,27	0,53	24,15	3
7	2	24,15	5,32	10,64	53,10	33,44		24,44	11,41	28,41	21,40	1,11	24,77	3
8														2,5
9														2
10	4	24,77	5,58	22,32	75,42	39,86		30,86	14,41	31,41	23,27	2,42	25,35	2
12	4	25,35	5,80	23,20	98,62	43,79		34,79	16,25	33,25	23,85	2,48	24,71	1,5
16	4	24,71	5,57	22,28	120,90	47,09		38,09	17,79	34,79	20,71	2,15	24,10	2
20	10	24,10	5,30	53,00	173,90	51,70		42,70	19,94	36,94	20,10	5,23	21,02	4
30	10	21,02	4,30	43,00	216,90	53,68		44,68	20,87	37,87	19,02	4,95	17,00	2
40	10	17,00	3,25	32,50	249,40	54,98		45,95	21,47	38,47	15,00	3,90	13,70	2
50	10	13,70	2,60	26,00	275,40	56,02		47,02	21,96	38,96	15,70	4,08	10,11	-2
60	10	10,11	2,03	20,30	295,70	56,83		47,83	22,34	39,34	12,11	3,15	7,34	-2
70	10	7,34	1,66	16,60	312,30	57,25		48,25	22,53	39,53	6,34	1,65	5,88	1
80	10	5,88	1,50	15,00	327,30	57,55		48,55	22,67	39,67	7,88	2,05	3,97	-2
90	24	3,97	1,32	31,68	358,98	58,2		49,2	22,95	39,95	3,97	2,48	1,8	
114	36	1,8	1,13	40,68	399,66	59,0		50,0	23,35	40,35	1,8	1,68	0,5	
150	50	0,5	1,03	51,50	451,16	60,0		51,0	23,82	40,82	0,5	0,65	0,3	
200	50	0,3	1,02	51,00	502,16	61,00		52,0	24,2	41,2	0,3	0,39	0,3	

Tabel 3. Temperatur som funktion af hærningstid uden elektrisk varmetilførsel og afkølingstallet 0,026.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_{0.0} = (2) \cdot (4)$	$t_{0.0} = \Sigma(5)$	$Q_t$	(7)-9	$0,467 \cdot (9)$	(10)+17	$\theta_t - \theta_u$	$0,040 \cdot (12) \cdot \Delta t$	$\Sigma(13)$	(11)-(14)	$\theta_u$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
0					18,00	9,00							17,00	
1	1	17,00	3,27	3,27	21,27	11,27		2,27	1,06	18,06	13,00	0,52	17,54	4
2	1	17,54	3,40	3,40	24,67	14,84		5,84	2,73	19,73	13,54	0,54	18,67	4
3	1	18,67	3,65	3,65	28,32	18,90		9,90	4,62	21,62	14,67	0,59	19,97	4
4	1	19,97	4,00	4,00	32,32	22,82		13,82	6,45	23,45	15,97	0,64	21,16	4
5	1	21,16	4,35	4,35	36,67	26,34		17,34	8,10	25,10	17,66	0,71	22,10	3,5
6	1	22,10	4,62	4,62	41,29	29,15		20,15	9,41	26,41	19,10	0,76	22,65	3
7	2	22,65	4,32	9,64	50,93	32,78		23,78	11,11	28,11	20,15	1,61	22,74	3
8														2,5
9														2
10	4	22,74	4,85	19,40	70,33	38,58		29,58	13,81	30,81	21,24	3,40	22,04	2
12	4	22,04	4,61	18,44	88,77	42,32		33,32	15,56	32,56	20,04	3,21	20,58	1,5
16	4	20,58	4,15	16,60	105,37	45,07		36,07	16,84	33,84	16,58	2,65	19,21	2
20	4	19,21	3,80	15,20	120,57	47,06		38,06	17,77	34,77	15,21	2,43	17,71	4
24	4	17,71	3,43	13,72	134,29	48,43		39,43	18,41	35,41	14,71	2,35	16,00	4
28	4	16,00	3,06	12,24	146,53	49,65		40,65	18,98	35,98	13,00	2,08	14,49	3
32	4	14,49	2,75	11,00	157,53	50,75		41,75	19,50	36,50	11,99	1,92	13,09	2,5
36	4	13,09	2,48	9,92	167,45	51,37		42,37	19,79	36,79	12,09	1,93	11,45	1
40	10	11,45	2,23	22,30	189,75	52,49		43,49	20,31	37,31	9,45	3,78	8,19	2
50	10	8,19	1,76	17,60	206,75	53,27		44,27	20,67	37,67	9,69	3,88	4,67	-1,5
60	20	4,67	1,38	27,6	233,4	54,34		45,34	21,15	38,15	4,67	3,75	1,4	0
80	34	1,4	1,10	37,4	270,8	55,8		46,8	21,9	38,9	1,4	2,00	0,1	
114	36	0,4	1,03	37,1							0,4	0,58		

Tabel 4. Temperaturer som funktion af hærningstid uden elektrisk varmetilførsel og afkølingstal 0,040.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o$ (2)·(4)	$t_o = \Sigma(5)$	$Q_t$	$k \cdot Q_t$ $0,39 \cdot Q_t$	$k \cdot Q_t + \theta_o$ $+3,15$	$\theta_{t+1,30}$	$a \cdot \Delta t \cdot$ $(\theta_t - Q_o) =$ $0,11 \cdot \Delta t \cdot$ (10)	$\Sigma(11)$	$\theta_{(t+\Delta t)}$ 9-12
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
4					4,0						0	3,15
5	1	3,15	1,24	1,24	5,24	0,62	0,24	3,39	4,45	0,49	0,49	2,90
6	1	2,90	1,22	1,22	6,46	1,23	0,48	3,63	4,20	0,46	0,95	2,68
7	1	2,68	1,20	1,20	7,66	1,88	0,73	3,88	3,98	0,44	1,39	2,49
8	1	2,49	1,18	1,18	8,84	2,42	0,94	4,09	3,79	0,42	1,81	2,10
9	1	2,18	1,16	1,16	10,00	3,00	1,17	4,32	3,48	0,38	2,19	2,13
10	1	2,13	1,16	1,16	11,16	3,58	1,40	4,55	3,43	0,38	2,57	1,98
11	1	1,98	1,14	1,14	12,30	4,21	1,64	4,79	3,28	0,37	2,94	1,85
12	1	1,85	1,13	1,13	13,43	5,03	1,96	5,11	3,26	0,36	3,30	1,81
13	1	1,81	1,13	1,13	14,56	5,78	2,25	5,40	3,11	0,34	3,64	1,76
14	1	1,76	1,12	1,12	15,68	6,68	2,61	5,76	3,06	0,34	3,98	1,78
15	1	1,78	1,12	1,12	16,80	7,80	3,04	6,19	3,08	0,34	4,32	1,87
16	1	1,87	1,13	1,13	17,93	8,93	3,48	6,63	3,17	0,34	4,66	1,97
17	1	1,97	1,14	1,14	19,07	9,53	3,72	6,87	3,27	0,36	5,02	1,85
18	1	1,85	1,13	1,13	20,20	10,20	4,11	7,26	3,15	0,34	5,36	1,90
20	2	1,90	1,13	2,26	22,46	12,46	4,86	8,01	3,20	0,70	6,06	1,95
22	2	1,95	1,14	2,28	24,74	14,93	5,82	8,97	3,25	0,72	6,78	2,19
24	2	2,19	1,16	2,32	27,06	17,56	6,85	10,00	3,49	0,75	7,53	2,47
26	2	2,47	1,18	2,36	29,42	20,28	7,91	11,06	3,77	0,83	8,36	2,70
28	2	2,70	1,20	2,40	31,84	22,38	8,73	11,88	4,00	0,88	9,24	2,64
30	2	2,64	1,20	2,40	34,24	24,68	9,63	12,78	3,94	0,87	10,11	2,68
35	5	2,68	1,20	6,00	40,24	28,62	11,16	14,31	3,98	2,19	12,30	2,01
40	5	2,01	1,14	5,70	45,94	31,28	12,20	15,35	3,31	1,82	14,12	1,23
45	5	1,23	1,08	5,40	51,34	32,90	12,85	16,00	2,53	1,40	15,52	0,48
50	5	0,48	1,03	5,15	56,49	34,30	13,38	16,53	1,78	0,98	16,50	0,03

Tabel 5. Temperaturen som funktion af hærningstiden uden elektrisk varmetilførsel (Fredericiagade)

a = 0,11  
 begyndelsestemperatur = 3,15°C  
 udetemperatur = -1,30°C  
 rapidcement = 234 kg/m³

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o$	$t_o$	t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o$	$t_o$	Q
4					4,00	0					4,00	
8	4	3,7	1,30	5,20	9,20	2	2	17,0	3,25	6,50	10,50	3,2
12	4	4,7	1,40	5,60	14,80	4	2	15,2	2,86	5,72	16,22	7,2
16	4	5,5	1,46	5,84	20,64	8	4	14,5	2,73	10,92	27,14	17,6
20	4	6,5	1,56	6,24	26,88	12	4	14,5	2,73	10,92	38,06	27,0
24	4	7,6	1,68	6,72	33,60	20	8	15,5	2,92	23,36	61,42	36,2
28	4	8,0	1,74	6,96	40,56	28	8	16,1	3,05	24,40	85,82	41,9
32	4	7,5	1,68	6,72	47,28	36	8	16,0	3,03	24,24	110,06	46,0
36	4	6,8	1,60	6,40	53,68	40	4	15,3	2,88	11,52	121,58	47,2
40	4	6,3	1,54	6,16	59,84	44	4	14,5	2,73	10,92	132,50	48,3
44	4	5,8	1,50	6,00	65,84	48	4	13,5	2,55	10,20	142,70	49,3
60	16	5,5	1,46	23,36	89,20	56	8	13,0	2,46	19,68	162,38	51,1
						64	8	12,6	2,40	19,20	181,58	52,1
						72	8	11,5	2,23	17,84	199,42	53,0
						80	8	10,5	2,08	16,64	216,06	53,6
						88	8	9,4	1,92	15,36	231,42	54,3
						93,5	5,5	9,0	1,86	10,23	241,65	54,7
						96	2,5	7,4	1,66	4,15	245,80	54,9
						100	4	4,5	1,38	5,52	251,32	55,1
						104	4	3,1	1,24	4,96	256,38	55,3
						108	4	2,0	1,15	4,60	260,88	55,4

Tabel 6. Hærningstiden ved 0°C (t<sub>o</sub>'s) udvikling med tiden for støbning nr. 1 i punkt 2.

Tabel 7. Hærningstiden ved 0°C (t<sub>o</sub>'s) udvikling med tiden for punkt nr. 2.



t	$\Delta t$	$\theta_t$	$2 \frac{\theta_t}{10}$	$\Delta t_0$	$t_0$	Q
0	4	13,2	2,50	10,00	4,00	0
4	4	14,4	2,71	10,81	14,00	5,5
8	4	16,0	3,03	12,12	24,81	16,0
12	4	17,6	3,39	13,56	36,93	26,5
16	4	18,7	3,65	14,60	50,49	32,6
20	4	19,0	3,74	14,96	65,09	37,3
24	4	18,7	3,65	14,60	80,05	41,0
28	4	17,8	3,43	13,72	94,65	43,2
32	4	17,0	3,25	13,00	108,37	45,6
36	4	16,2	3,07	12,28	121,37	47,1
40	4	15,4	2,90	11,60	133,65	48,4
44	4	14,6	2,75	11,00	145,25	49,5
48	12	14,5	2,73	32,76	156,25	50,6
60	4	14,3	2,69	10,76	189,01	52,5
64	8	13,7	2,58	20,64	199,77	53,0
72	8	12,7	2,40	19,20	220,41	53,8
80	8	11,6	2,23	17,84	239,61	54,6
88	5,5	10,8	2,11	11,61	257,45	55,3
93,5	2,5	9,7	1,96	4,90	269,06	55,8
96	4	7,6	1,68	6,72	273,96	56,0
100	4	5,7	1,48	5,92	280,68	56,2
104	4	4,1	1,32	5,28	286,60	56,5
108	4	3,0	1,23	4,92	291,88	56,7
112					296,80	56,9

Tabel 8. Hærdningstiden ved 0°C ( $t_0$ 's) udvikling med tiden for punkt nr. 5.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$2 \frac{\theta_t}{10}$	$\Delta t_0$	$t_0$	Q
0	2	15,5	2,92	5,84	4,00	0
2	2	14,7	2,77	5,54	9,84	2,7
4	4	14,1	2,65	10,60	15,38	6,4
8	8	14,4	2,71	21,68	25,98	16,5
16	8	14,6	2,75	22,00	47,66	31,8
24	8	14,7	2,77	22,16	69,66	38,4
32	8	14,1	2,65	21,20	91,82	42,8
40	8	12,5	2,37	18,96	113,02	46,3
48	8	11,2	2,17	17,36	131,98	48,2
56	8	10,5	2,06	16,48	149,34	49,9
64	8	9,4	1,92	15,36	165,82	51,3
72	8	8,4	1,79	14,32	181,18	52,1
80	8	7,5	1,68	13,44	195,50	52,8
88	5,5	7,0	1,62	8,91	208,94	53,4
93,5					217,85	53,7

Tabel 9. Hærdningstiden ved 0°C ( $t_0$ 's) udvikling med tiden for punkt nr. 8.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$2 \frac{\theta_t}{10}$	$\Delta t_0$	$t_0$	Q
0	2	12,5	2,37	4,74	4,00	0
2	2	11,0	2,14	4,28	8,74	2,4
4	4	9,6	1,94	7,76	13,02	4,5
8	4	8,6	1,81	7,24	20,78	10,8
12	4	8,6	1,74	6,96	28,02	15,8
16	8	7,6	1,69	13,52	34,98	25,2
24	4	8,6	1,81	7,24	48,5	32,0
28	4	9,5	1,93	7,72	55,74	34,2
32	4	9,9	1,98	7,92	63,46	36,9
36	4	9,8	1,97	7,88	71,38	38,7
40	4	9,1	1,88	7,52	72,26	40,9
44	4	8,4	1,78	7,12	86,78	42,0
48	8	8,0	1,74	13,92	93,90	43,1
56	8	7,0	1,62	12,96	107,82	45,6
64	8	6,1	1,52	12,16	120,78	47,8
72	8	5,3	1,46	11,68	132,94	48,3
80	8	4,3	1,34	10,72	144,62	49,5
88	5,5	4,0	1,32	7,26	155,34	50,5
93,5	2,5	3,3	1,25	3,13	162,60	51,1
96	4	2,3	1,17	4,68	165,73	51,3
100	4	1,2	1,08	4,32	170,41	51,5
104					174,73	51,7

Tabel 10. Hærdningstiden ved 0°C ( $t_0$ 's) udvikling med tiden for punkt nr. 11.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$2 \frac{\theta_t}{10}$	$\Delta t_0$	$t_0$	Q
0	2	12,0	2,30	4,60	4,00	0
2	2	9,5	1,93	3,86	8,60	2,3
4	4	7,5	1,68	6,72	12,48	4,3
8	4	5,8	1,49	5,96	19,18	9,6
12	4	4,5	1,38	5,52	25,14	14,2
16	4	3,8	1,30	5,20	30,66	21,4
20	4	3,4	1,26	5,04	35,86	25,8
24	8	4,0	1,32	10,56	40,90	28,7
32	8	5,2	1,43	11,44	51,46	32,9
40	8	5,3	1,44	11,52	62,90	36,7
48	8	4,6	1,39	11,12	74,42	39,2
56	8	4,0	1,32	10,56	85,54	41,8
64	8	3,1	1,24	9,92	96,10	43,4
72	8	2,2	1,16	9,28	106,02	45,2
80	8	1,1	1,08	8,64	115,30	46,5
88	5,5	0,5	1,03	5,66	123,94	47,4
93,5					129,60	48,0

Tabel 11. Hærdningstiden ved 0°C ( $t_0$ 's) udvikling med tiden for punkt nr. 13.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{1^{\circ}}}$	$\Delta t_0$	$t_0$	Q
0					4,00	0
2	2	12,6	2,40	4,80	8,80	2,9
4	2	10,7	2,10	4,20	13,00	7,0
8	4	8,5	1,80	7,20	20,20	13,2
12	4	7,0	1,62	6,48	26,68	17,2
16	4	6,5	1,56	6,24	32,92	23,5
20	4	6,0	1,51	6,04	38,96	27,7
24	4	5,6	1,47	5,88	44,84	31,0
32	8	6,0	1,51	12,08	56,92	34,8
40	8	6,5	1,56	12,48	69,40	38,4
48	8	6,5	1,56	12,48	81,88	41,3
56	8	5,5	1,46	11,68	93,56	43,0
64	8	4,6	1,39	11,12	104,68	45,0
72	8	3,6	1,28	10,24	114,28	46,4
80	8	2,6	1,20	9,60	123,88	47,4
88	8	1,6	1,11	8,88	132,76	48,3
93,5	5,5	0,5	1,03	5,66	138,42	48,8

Tabel 12. Hærdningstiden ved 0°C ( $t_0$ 's) udvikling med tiden for punkt nr. 15.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 18,0°C  
 Afkølingstal = 0,10  
 Udetemperatur = 0,5°C.

t timer	$t_0$	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
0	4,00	18,00	1,74
1	7,48	17,02	3,36
2	10,73	16,10	5,33
3	13,79	15,41	7,70
4	16,70	14,98	9,76
5	19,52	14,45	12,25
6	22,25	14,17	15,15
7	24,92	14,10	18,08
8	27,58	14,04	21,17
9	30,22	14,07	23,38
10	32,88	13,70	25,60
11	35,46	13,37	26,99
12	37,99	12,71	28,70
13	40,40	12,25	29,87
14	42,74	11,59	30,98
15	44,97	10,98	31,63
16	47,12	10,22	32,24
17	49,15	9,52	32,82
18	51,08	8,88	33,93
20	54,79	7,70	35,28
22	58,20	6,86	36,35
24	61,42	6,07	37,11
26	64,46	5,29	37,83
28	67,35	4,65	38,52
30	70,11	4,13	39,19
32	72,78	3,70	39,84
34	75,36	3,35	40,47
36	77,89	3,06	41,05
38	80,36	2,81	41,96
43	86,44	2,06	42,83
48	92,20	1,66	43,67
53	97,82	1,46	44,67
58	103,35	1,42	45,77
63	108,87	1,45	46,44
68	114,40	1,27	46,98
73	119,86	1,13	47,52
78	125,27	1,05	48,06
83	130,65	1,01	48,60
88	136,02	0,99	49,13
93	141,37	0,98	49,67

Tabel 13. Temperatur som funktion af hærdningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 2.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 14,0°C  
 Afkølingstal = 0,07  
 Udetemperatur = 0,5°C.

t timer	$t_0$	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
0	4,00	14,00	1,31
1	6,63	13,64	2,60
2	9,21	13,29	3,86
3	11,72	12,96	5,59
4	14,18	12,86	7,62
5	16,62	12,90	9,53
6	19,06	12,89	11,51
7	21,51	12,90	13,95
8	23,95	13,13	16,94
9	26,44	13,58	19,76
10	29,00	13,92	22,22
11	31,63	14,08	24,71
12	34,28	14,24	26,48
13	36,97	14,07	28,21
14	39,62	13,89	29,62
15	42,24	13,58	30,90
16	44,80	13,24	31,69
17	47,31	12,70	32,41
18	49,72	12,17	33,81
20	54,37	11,16	35,48
22	58,71	10,41	36,70
24	62,82	9,57	37,67
26	66,71	8,73	38,59
28	70,37	7,99	39,46
30	73,85	7,33	40,29
32	77,18	6,74	41,05
34	80,37	6,21	41,51
36	83,45	5,61	41,96
38	86,40	5,10	43,02
43	93,52	3,96	44,02
48	100,10	3,19	45,26
53	106,34	2,81	46,24
58	112,42	2,43	46,83
63	118,34	2,02	47,40
68	124,09	1,74	47,97
73	129,73	1,56	48,53
78	135,31	1,43	49,08
83	140,83	1,35	49,63
88	146,32	1,30	50,18
93	151,80	1,26	50,72

Tabel 14. Temperatur som funktion af hærdningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 5.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 16,3°C  
 Afkølingstal = 0,07  
 Udetemperatur = 0,5°C.

t timer	$t_0$	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
0	4,00	16,30	1,54
1	7,09	15,88	3,05
2	10,10	15,47	4,72
3	13,02	15,17	6,89
4	15,89	15,11	9,37
5	18,74	15,20	11,61
6	21,61	15,17	14,59
7	24,47	15,47	17,89
8	27,39	15,90	21,30
9	30,40	16,35	24,01
10	33,51	16,45	26,32
11	36,64	16,36	28,31
12	39,75	16,14	29,90
13	42,81	15,76	31,23
14	45,79	15,28	32,10
15	48,68	14,63	32,93
16	51,43	14,01	33,72
17	54,08	13,42	34,64
18	56,61	12,93	36,38
20	61,52	11,96	37,52
22	66,10	10,87	38,58
24	70,35	9,89	39,58
26	74,32	9,02	40,51
28	78,06	8,24	41,24
30	81,60	7,48	41,74
32	84,96	6,73	42,22
34	88,15	6,07	42,68
36	91,20	5,49	43,11
38	94,13	4,99	44,24
43	101,20	3,92	45,55
48	107,76	3,31	46,40
53	114,05	2,70	47,00
58	120,08	2,20	47,59
63	125,91	1,86	48,16
68	131,60	1,64	48,72
73	137,20	1,49	49,27
78	142,74	1,39	49,82
83	148,25	1,32	50,37
88	153,73	1,28	50,92
93	159,20	1,25	51,23

Tabel 15. Temperatur som funktion af hærdningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 8.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 14,0°C  
 Afkølingstal = 0,13  
 Udetemperatur = 0,5°C.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 14,5°C  
 Afkølingstal = 0,10  
 Udetemperatur = 0,5°C.

t timer	t <sub>0</sub>	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement	t timer	t <sub>0</sub>	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
0	4,00	14,00	1,31	0	4,00	14,50	1,36
1	6,63	12,83	2,53	1	6,73	13,71	2,65
2	9,07	11,77	3,66	2	9,31	12,96	3,88
3	11,33	10,81	5,06	3	11,77	12,26	5,55
4	13,45	10,09	6,46	4	14,11	11,83	7,38
5	15,46	9,47	8,39	5	16,38	11,52	9,30
6	17,39	9,16	9,64	6	18,61	11,27	10,79
7	19,28	8,59	11,09	7	20,79	10,86	12,91
8	21,09	8,19	12,86	8	22,91	10,77	15,28
9	22,86	7,98	14,75	9	25,02	10,80	17,64
10	24,60	7,85	16,82	10	27,14	10,82	20,07
11	26,32	7,82	18,55	11	29,26	10,88	22,04
12	28,04	7,64	20,67	12	31,38	10,72	23,99
13	29,74	7,66	22,08	13	33,49	10,56	25,67
14	31,44	7,36	23,61	14	35,57	10,31	26,80
15	33,11	7,15	25,06	15	37,61	9,83	28,19
16	34,75	6,93	26,18	16	39,59	9,52	29,26
17	36,36	6,60	26,97	17	41,52	9,10	30,20
18	37,94	6,16	29,00	18	43,40	8,66	31,61
20	41,01	5,59	30,48	20	47,05	7,65	32,63
22	43,96	4,92	31,53	22	50,45	6,68	33,58
24	46,77	4,24	32,33	24	53,63	5,87	34,65
26	49,46	3,63	33,11	26	56,63	5,27	35,80
28	52,03	3,16	33,85	28	59,51	4,83	36,57
30	54,52	2,80	34,78	30	62,31	4,31	37,25
32	56,95	2,61	35,74	32	65,01	3,85	37,90
34	59,35	2,49	36,43	34	67,62	3,47	38,54
36	61,72	2,28	37,01	36	70,16	3,16	39,16
38	64,07	2,08	38,46	38	72,65	2,90	40,69
43	69,84	1,69	39,86	43	78,77	2,38	41,70
48	75,47	1,54	41,15	48	84,67	1,89	42,55
53	81,04	1,44	41,98	53	90,37	1,57	43,39
58	86,56	1,19	42,80	58	95,95	1,41	44,29
63	92,00	1,10	43,60	63	101,46	1,35	45,39
68	97,39	1,07	44,55	68	106,96	1,42	46,24
73	102,78	1,12	45,63	73	112,47	1,34	46,79
78	108,19	1,20	46,36	78	117,96	1,16	47,33
83	113,62	1,06	46,90	83	123,38	1,07	47,87
88	119,01	0,93	47,43	88	128,77	1,02	48,41
93	124,34	0,89	47,96	93	134,14	1,00	48,95

Tabel 16. Temperatur som funktion af hærningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 11.

Tabel 17. Temperatur som funktion af hærningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 13.

Rapidcement 268 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 13,6°C  
 Afkølingstal = 0,07  
 Udetemperatur 0,5°C.

t timer	t <sub>0</sub>	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
0	4,00	13,60	1,28
1	6,56	13,25	2,53
2	9,07	12,92	3,76
3	11,52	12,60	5,43
4	13,91	12,50	7,29
5	16,29	12,49	9,33
6	18,67	12,56	11,06
7	21,06	12,49	13,43
8	23,43	12,71	16,31
9	25,85	13,14	18,92
10	28,33	13,42	21,65
11	30,87	13,73	23,96
12	33,46	13,84	26,03
13	36,07	13,83	27,51
14	38,68	13,56	29,12
15	41,24	13,36	30,38
16	43,77	13,02	31,37
17	46,23	12,59	32,08
18	48,63	12,06	33,47
20	53,24	11,06	35,02
22	57,55	10,27	36,40
24	61,63	9,52	37,37
26	65,50	8,69	38,28
28	69,15	7,95	39,15
30	72,63	7,30	39,98
32	75,94	6,71	40,78
34	79,13	6,20	41,33
36	82,20	5,65	41,77
38	85,16	5,12	42,84
43	92,30	3,98	43,83
48	98,89	3,20	45,02
53	105,13	2,79	46,12
58	111,20	2,47	46,71
63	117,14	2,05	47,29
68	122,90	1,76	47,85
73	128,55	1,57	48,41
78	134,13	1,44	48,96
83	139,66	1,36	49,51
88	145,15	1,30	50,06
93	150,63	1,26	50,60

Tabel 18. Temperatur som funktion af hærningstid uden elektrisk opvarmning for punkt nr. 15.

Rapidcement 350 kg pr. m<sup>3</sup>  
 Begyndelsestemperatur = 15,0°C  
 Afkølingstal = 0,022  
 Udetemperatur = -5,0°C.

t timer	t <sub>0</sub>	Temperatur °C	Q <sub>t</sub> Kal/kg cement
2	4,00	15,00	1,41
3	6,82	15,38	2,86
4	9,73	15,78	4,50
5	12,71	16,28	6,81
6	15,81	17,15	9,54
7	19,09	18,26	12,64
8	22,64	19,56	17,02
9	26,52	21,57	21,73
10	30,98	23,74	26,08
11	36,17	25,64	29,54
12	42,08	26,98	32,07
13	48,57	27,76	34,17
14	55,42	28,26	36,63
15	62,52	28,96	38,49
16	69,96	29,30	40,39
17	77,59	29,66	41,81
18	85,40	29,72	42,98
19	93,25	29,64	44,21
20	101,06	29,59	46,66
22	116,62	29,50	48,20
24	132,08	28,88	49,68
26	146,89	28,26	51,05
28	161,08	27,59	51,73
30	174,62	26,55	52,36
32	187,22	25,53	52,94
34	198,96	24,53	53,39
36	209,92	23,49	53,80
38	220,11	22,47	54,18
40	229,61	21,49	55,07
45	251,79	19,09	55,82
50	270,57	16,88	56,46
55	286,69	14,85	57,01
60	300,69	12,98	57,25
65	312,99	11,15	57,47
70	323,82	9,50	57,66
75	333,48	8,01	57,84
80	342,20	6,68	58,00
85	350,14	5,49	58,14
90	357,46	4,42	58,28
95	364,26	3,46	58,41
100	370,62	2,61	58,65
110	382,60	1,07	58,86
120	393,38	0,13	59,06

Tabel 19. Temperatur som funktion af hærningstid uden elektrisk opvarmning (Asnæs).

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o = (2) \cdot (4)$	$t_o = \Sigma(5)$	$Q_t$	$Q_w$	$\Sigma Q = (7)+(8)$	$k \cdot \Sigma Q = 0,583 \cdot (9)$	$\frac{(10)+\theta_B}{(10)+15}$	$\frac{\theta_t - \theta_u}{\theta_t + 5}$	$0,022 \cdot (12) \cdot \Delta t$	$\Sigma 13$	$\theta_{(t+\Delta t)} - (11) - (14)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	15,00	2,82	2,82	4,00	0	0	0			20,00	0,44	0	15,00
2	1	15,85	3,00	3,00	6,82	1,41	0,82	2,23	1,29	16,29	20,85	0,46	0,44	15,85
3	1	16,74	3,20	3,20	9,82	2,91	1,64	4,55	2,64	17,64	21,74	0,48	0,90	16,74
4	1	17,67	3,40	3,40	13,02	4,52	2,46	6,98	4,05	19,05	22,67	0,50	1,38	17,67
5	1	19,32	3,80	3,80	16,42	7,42	3,28	10,70	6,20	21,20	24,32	0,53	1,88	19,32
6	1	21,45	4,42	4,42	20,22	10,22	4,10	15,32	8,89	23,89			2,41	21,45
7	1	23,45	4,90	4,90	24,64	14,80	4,92	19,72	11,44	26,44			2,99	23,45
8	1	26,68	6,36	6,36	29,54	20,65	5,74	26,39	15,30	30,30	28,45	0,63	3,62	26,68
9	1	29,52	7,70	7,70	35,90	25,92	6,56	32,48	18,84	33,84	31,68	0,70	4,32	29,52
10	1	31,35	8,80	8,80	43,60	29,58	7,38	36,96	21,43	36,43	34,52	0,76	5,08	31,35
11	1	33,14	10,00	10,00	52,40	33,22	8,20	41,42	24,02	39,02	36,35	0,80	5,88	33,14
12	1	34,60	11,00	11,00	62,40	36,36	9,02	45,38	26,32	41,32	38,14	0,84	6,72	34,60
13	1	35,74	11,95	11,95	73,40	39,01	9,84	48,85	28,33	43,33	39,60	0,87	7,59	35,74
14	1	36,96	12,95	12,95	85,35	41,80	10,66	52,46	30,42	45,42	40,74	0,90	8,49	36,96
15	1	37,78	13,70	13,70	98,30	43,74	11,48	55,22	32,19	47,19	41,93	0,92	9,41	37,78
16	2	38,75	14,60	29,20	112,00	46,20	12,30	58,50	34,10	49,10	42,78	0,94	10,35	38,75
18	2	39,48	15,40	30,80	141,20	49,12	13,94	63,06	36,76	51,76	43,75	1,93	12,28	39,48
20	2	39,88	15,80	31,60	172,00	51,60	15,58	67,18	39,16	54,16	44,48	1,96	14,24	39,88
22	4	39,80	15,70	62,80	203,60	53,14	17,22	70,36	41,02	56,02	44,88	1,98	16,22	39,80
26	4	39,13	14,90	59,60	266,40	55,65	20,50	76,15	44,40	59,40	44,80	3,95	20,17	39,13
30	4	38,35	14,25	57,00	326,00	57,52	23,78	81,30	47,40	62,40	44,13	3,88	24,05	38,35
34	4	37,11	13,10	52,40	383,00	58,66	27,06	85,72	49,97	64,97	43,35	3,81	27,86	37,11
38	5	35,68	11,90	59,50	435,40	59,71	30,34	90,05	52,50	67,50	42,11	3,71	31,57	35,68
43	5	34,53	10,92	54,60	494,90	60,90	34,44	95,34	55,58	70,58	40,68	4,48	36,05	34,53
48	12	32,64	9,60	115,2	549,50	61,00	38,54	99,54	58,03	73,03	39,53	4,34	40,39	32,64
60					664,7									

Tabel 20. Temperatur som funktion af hærningstid med elektrisk varmetilførsel. Rapidcement 350 kg/m<sup>3</sup>. Begyndelsestemperatur 15,0°C. Udetemperatur -5,0°C. Afkølingstal 0,022.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o$	$t_o$
48					549,5
58	10	29,5	7,70	77,0	626,5
68	10	21,5	4,42	44,2	670,7
78	10	16,5	3,14	31,4	702,1
88	10	12,0	2,30	23,0	725,1
98	10	8,8	1,84	18,4	743,5
108	10	6,0	1,51	15,1	758,6
118	10	3,8	1,30	13,0	771,6
128	10	2,0	1,15	11,5	783,1
139	11	0,6	1,04	11,4	794,5

Tabel 21a. Hærningsforløbets videre udvikling, når der efter 48 timers forløb afbrydes for den elektriske strøm.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$t_o$	$\Delta t_o$
48					549,5
58	10	30,7	8,40	84,0	633,5
68	10	28,0	6,95	69,5	703,0
78	10	25,1	5,70	57,0	760,0
88	10	24,0	5,28	52,8	812,5
98	10	22,6	4,77	47,7	860,2
108	10	21,4	4,40	44,0	904,2
118	10	20,5	4,12	41,2	945,4
128	10	19,7	3,90	39,0	982,9
138	10	19,1	3,75	37,5	1020,4
148	10	18,6	3,63	36,3	1056,7
158	10	18,25	3,55	35,5	1091,4
168	10	17,95	3,47	34,7	1126,1
173	5	17,75	3,42	17,1	1143,2

Tabel 21b. Hærningsforløbets videre udvikling med fortsat elektrisk opvarmning, indtil betonens temperatur er 17,7°C.

t	$\Delta t$	$\theta_t$	$\frac{\theta_t}{2^{10}}$	$\Delta t_o$	$t_o$
0					0
10	10	14,0	2,63	26,3	26,3
20	10	10,3	2,04	20,4	46,7
30	10	7,3	1,66	16,6	63,3
40	10	4,9	1,40	14,0	77,3
50	10	3,0	1,23	12,3	89,6
60	10	1,4	1,10	11,4	101,0
66	6	0,4	1,03	6,2	107,2

Tabel 21c. Hærningsforløbets udvikling, når den elektriske opvarmning afbrydes efter at  $\theta_k = 16,7^\circ\text{C}$ .

Dato	Kl.	M 3401 top	M 3402 top	M 3402 side	M 3403 top	M 3404 top	M 3405 top	MB 3412	MB 3413	MB 3414	MB 3415	MB 3416	Temp. ved udst.	Luft- temp.	Bem.
14/1	13 <sup>00</sup>							t.isat					*22°	-4°	*taget ved bl.
14/1	16 <sup>00</sup>							24°						-3°	
15/1	12 <sup>00</sup>							36°						-1,5°	
15/1	17 <sup>30</sup>							31°						-1,5°	
16/1	10 <sup>00</sup>							20°						-2°	
17/1	12 <sup>00</sup>							11°						-1,5°	
17/1	17 <sup>30</sup>							10°						-2°	
17/1	15 <sup>00</sup>								t.isat						
18/1	12 <sup>00</sup>							6,5°	25°					+2°	
18/1	20 <sup>00</sup>							6,5°	24,5°					+1°	
18/1	15 <sup>30</sup>	t.isat											14°		
19/1	9 <sup>30</sup>	38°						6°	18,5°					-2,5°	
19/1	16 <sup>45</sup>	27°	t.isat	t.isat				6°	17°				11°	-2°	
20/1	10 <sup>00</sup>	35°	23,5°	25°				6°	15°					-1°	
20/1	16 <sup>30</sup>	22,5°	15°	22°				8°	15°					-1,5°	
21/1	13 <sup>30</sup>	21°	26,5°	22,5°				9°	13,5°					-2°	
21/1	16 <sup>30</sup>	19,5°	27,5°	23°				9,5°	13°					-2°	
22/1	11 <sup>00</sup>	21°	32°	?				10°	13°					0°	
22/1	16 <sup>30</sup>	20°	30°	?				10°	13°					-2°	
23/1	10 <sup>30</sup>	19°	31°	24°				11°	12°					-2°	
23/1	19 <sup>00</sup>	20,5°	27,5°	20°				11,5°	12°					-1°	
24/1	9 <sup>30</sup>	17°	31°	21°				12°	12°					-1,5°	
24/1	11 <sup>30</sup>									t.isat			13°	-1,5°	
24/1	16 <sup>15</sup>	19°	27°	23,5°				11°	12°	23°	t.isat		10°	-1,5°	
25/1	10 <sup>00</sup>	14,5°	26,5°	22°				11,5°	12°	35°	26°			-2°	
25/1	17 <sup>00</sup>	5°	26,5°	22°	t.isat			d)	12°	30°	27°		11°	-1°	
26/1	11 <sup>00</sup>	-0,5°	25°	17°	22°			d)	10°	18°	16,5°			-1,5°	
26/1	13 <sup>30</sup>											t.isat	12°	-2°	
26/1	16 <sup>15</sup>	0°	9°	14°	18°			6°	10°	15,5°	14°	11,5°		-1,5°	
27/1	9 <sup>30</sup>	-2°	-3,5°	1°	14°			6°	10°	10,5°	7°	14,5°		-4°	
27/1	16 <sup>15</sup>	-1°	-2°	2°	16°			5,5°	10°	9,5°	6°	14°		-2,5°	
28/1	11 <sup>00</sup>	1°	0°	3°	20,5°			5,5°	10°	8°	4°	14,5°		-2°	
31/1	10 <sup>00</sup>	*5°	*2°	*4,5°	22,5°									1,5°	
1/2	16 <sup>30</sup>			4°		t.isat							9,5°	2,5°	* term. fjernet
4/2	16 <sup>30</sup>					15°	t.isat						5°	-1,5°	
5/2	17 <sup>30</sup>							6°	3°		7,5°	8°	5°	5°	
7/2	9 <sup>30</sup>					20°	1°	*	*	*	*	10°		-5°	* gr. af- forsk.
7/2	17 <sup>00</sup>				-1,5°	20°	30°							-5°	
11/2	14 <sup>30</sup>					2°	22°	-4°	-3°	-4°	0°	8°		-2,5°	
15/2	14 <sup>30</sup>					5,5°	-1,5°					6°		-3°	
17/2	11 <sup>30</sup>					8°	0°					4°		-4°	

Tabel 22. Temperaturmålinger i beton, dragere og buetag, blok III.