Hærdestyring

Højkvalitetsbeton
Entreprenørens teknologi – Anvisning

Rapport nr. 125
1997

Vejdirektoratet

IRRD Information

Title in English	High Performance Concrete - Contractors Technology. Control of Hardening temperatures in concrete
Title in Danish	Højkvalitetsbeton - Entreprenørens teknologi. Hærdestyring. Anvisning
Authors	Erik Steen Pedersen, Helle Spange, Erik Jørgen Pedersen, Henrik Elgaard Jensen, Mette Elbæk Andersen, Per Fogh Jensen, Jan Graabek Knudsen
Subject classification	Field 32: Concrete

Key words

Analysis	7152	Simulation	9103
Concrete	4755	Thermal analysis	7152
Cracking	5211	Temperature	6722
Specifications	0147	Research Project	8557
Heat	6743	Denmark	8028
Development	9013		
Numerical	6432		

Abstract

This guideline is a part of the Danish Road Directorate's research programme called High Performance Concrete - The Contractor's Technology (abbreviated to HETEK). For durability reasons reinforced concrete structural members should be well protected against penetration of water, chloride, etc. This means that cracks should be avoided or at least the crack-width limited. Cracks can form already during the hardening process. An evaluation of the risk of crack formation involves a stress analysis. In stress analysis of hardening concrete structures, the load consists of the differences in thermal strains that arise from the heat of hydration. The mechanical properties (including autogenous shrinkage) of the concrete also change during the hardening process. If a stress analysis shows high stresses relative to the tensile strength there is a high risk of crack formation. Based on stress analysis requirements to the hardening temperature can be specified.

This guideline assist the contractor in controlling the hardening temperatures and thereby fulfill the requirements.

UDK	691.32, 620.191.33
ISSN	0909-4288
ISBN	877491 842-7

INDHOLDSFORTEGNELSE

0. FORORD 5

1. INDLEDNING 6

2. PLANLÆGNING 7
2.1 Detaljeret arbejdsbeskrivelse 8
2.2 Reduktion af den ydre temperaturforskel, D_{ydre} 9
2.3 Reduktion af den indre temperaturforskel, D_{indre} 11
2.4 Støbeform 11
2.4.1 Overflade / æstetik 12
2.4.2 Geometri 12
2.4.3 Isoleringseffekt 12
2.5 Isolering 14
2.5.1 Isolering af fri betonoverflader 14
2.5.2 Isolering af forme 14
2.5.3 Isolering af afformede flader 15
2.6 Betonens udstøbningstemperatur 16
2.7 Opvarmning 16
2.7.1 Varmekabler/-tråde 18
2.8 Køling 21
2.9 Klimaforhold 25
2.10 Dokumentation af temperaturberegninger 26
2.11 Forprøvning af udførelsen 26

3. TEMPERATURMÅLINGER 27
3.1 Måleudstyr 27
3.2 Placering af termofølere 28
3.2.1 Temperaturmålinger i konstruktioner uden kølerør/varmetråde 29
3.2.2 Temperaturmåling i konstruktioner med kølerør/varmetråde 30

4. LOGBOG 36

5. REVNEREGISTRERING 37

6. AFVIGELSER 40
6.1 Afvigelser i temperaturforløb 40
6.2 Afvigelser i form af revner 42

7. LITTERATUR 43

BILAG A ISOLERINGSEVNE
BILAG B KLIMAFORHOLD I DANMARK

0. FORORD

Erhvervsministeriet - Udviklingskontraktudvalget har medfinansieret det af Vejdirektoratet initierede betonteknologiske forskningsprojekt HETEK - Højkvalitetsbeton, Entreprenørens Teknologi. Højkvalitetsbeton er i HETEK-projektet defineret som en beton i en konstruktion placeret i aggressivt miljø med mindst 100 års levetid.

Projektet blev opdelt i 8 delopgaver, som hver for sig repræsenterede et selvstændigt emne med betydning for betonens kvalitet og levetid:

- Chloridindtrængning
- Prøvning af frostbestandighed
- Selvudtørring
- Hærdeteknologi
- Udstøbning og bearbejdning (komprimering)
- Efterbehandling
- Vejledning i forprøvning af beton
- Reparationer i udførelsesfasen.

De 8 delopgaver er blevet løst af forskellige konsortier og firmaer, som er specialister indenfor hver deres delemne. Under jævnlige møder mellem alle opgaveløsere er løsningen af de enkelte delopgaver blevet koordineret og informationer udvekslet. Denne model for løsning af HETEK-projektet har i høj grad medvirket til at forny og intensivere samarbejdet mellem universiteter, institutter, betonlaboratorier, rådgivere og entreprenører.

HETEK-projektet er blevet gennemført i perioden november 1995 til marts 1997 med Vejdirektoratet som projektleder.

Resultatet af projektarbejdet er rapporteret i en samling rapporter, som er blevet udgivet af Vejdirektoratet. Essensen af rapporterne er endvidere blevet trykt i nogle kortfattede og præcise anvisninger, der ligeledes er blevet udgivet af Vejdirektoratet.

Nærværende anvisning er baseret på arbejdet udført i HETEK-delopgaven vedrørende selvudtørring og hærdeteknologi. For yderligere information henvises til referencelisten.

Vejdirektoratet
Maj 1997

1. INDLEDNING

Af hensyn til:

- holdbarhed
- funktionsdygtighed (f.eks. tæthed)
- udseende

søges revnedannelse i betonkonstruktioner begrænset. Der kan opstå revner pga. ydre last, sætninger etc., men allerede under hærdeprocessen er der risiko for revnedannelse. Disse revner opstår hovedsageligt på grund af forskelle i temperaturbevægelser inden for konstruktionen.

Ved at begrænse temperaturforskellene under hærdeprocessen kan revner helt undgås eller revnevidderne kan begrænses til et tilladeligt niveau.

Afhængigt af den aktuelle konstruktion kan der opstilles krav til de maksimale temperaturbevægelser, og dermed til de maksimale temperaturforskelle, der må optræde. I [HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning], som ligger til grund for nærværende anvisning, redegøres for hvordan temperatur-krav kan stilles med udgangspunkt i et ønske om revnefrihed eller begrænsede revnevidder.

I nærværende anvisning forudsættes temperatur-kravene at være fastlagt, enten direkte i bygherrens betingelser, eller inddirekte vha. spændings- eller revneviddeberegninger iht. [HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning].

Nærværende anvisning vejleder entreprenøren i at planlægge og udføre støbninger på en sådan måde at temperaturkravene opfyldes.

Anvisningen indeholder en beskrivelse af den praksis, som anvendes på området. Baggrunden for de i anvisningen givne vejledninger er baseret på den viden og erfaring, som er oparbejdet af institutter, rådgivere og entreprenører. En del af grundlaget er oparbejdet ved gennemførelse af HETEK-projektet "Styring af revner i ung beton". Denne del er sammenfattet i "HETEK - Styring af revner i ung beton - Hovedrapport" [Spange & Pedersen, 1997].

2. PLANLÆGNING

Når et givet projekt skal udføres, skal der vælges en udførelsesmetode, som lever op til de temperaturkrav, der er stillet. Temperaturkrav udtrykkes normalt som maksimalt tilladelige værdier af D_{ydre} og D_{indre}.

D_{ydre}

Kravet til den ydre temperaturforskel, D_{ydre}, vedrører den maksimale forskel der må optræde i to sammenstøbte konstruktionsdeles respektive middeltemperaturer. Kravet stilles til konstruktionsdele, der støbes til forskellige tidspunkter. Hvis der optræder væsentlige forskelle i godstykkelse inden for samme støbning kan denne være underopdelt i konstruktionsdele, og der kan også være stillet krav til den maksimale temperaturbevægelse, der må foregå mellem disse.

D_{indre}

Kravet til den indre temperaturforskel, D_{indre}, vedrører den maksimalt tilladelige forskel mellem en konstruktionsdels temperatur og overfladetemperatur.

I planlægningsfasen foretages beregninger som udfra betonens termiske egenskaber og en valgt strategi indikerer om kravene vil kunne overholdes. I strategien indgår:

- placering af støbeskel
- støbetakt
- valg af støbeform
- tidspunkt for afformning
- brug af isolering
- brug af køling/opvarmning
- brug af kold/varm beton

Da der er mange måder at opfylde et givet krav på, har entreprenøren mulighed for at vælge den udførelsesmetode, som er mest hensigtsmæssig i det aktuelle projekt.

Derudover skal planlægningen baseres på:

- betonens varmeudvikling
- de forventede klimatiske forhold under støbning og hærdning

Foruden at tilfredsstille temperaturkravene skal udførelsesmetoden også sikre, at betonen ikke udsættes for tidlig udtørring, og beskyttes mod

frysning. Om disse krav kan læses i henholdsvis anvisningen [HETEK-Efterbehandling, 1997] og [Vinterstøbning af beton, 1985]. Derudover kan afformningstidspunkter være afhængige af, hvornår betonen har udviklet tilstrækkelig styrke til at egenvægten kan optages uden skadevirkninger.

Planlægningen skal resultere i en detaljeret arbejdsbeskrivelse vedr. udførelsen af støbningen, og fastlægge omfanget af dokumentationen af støbningen (f.eks. antal og placering af termofølere).

2.1 Detaljeret arbejdsbeskrivelse

Ved beregning skal det eftervises at en planlagt udførelsesmetode resulterer i hærdeforløb som lever op til de krav, der er stillet mht. temperaturer og modenheder. Krav til modenheden stilles af hensyn til udtørringsbeskyttelse, frostsikkerhed og afformningsstyrken. Endvidere bør vurderes, i hvor høj grad en ændring af grundlaget for planlægningen, vil reducere muligheden for at opfylde kravene.

Med udgangspunkt i den beregningsmæssige planlægning skal der udarbejdes en detaljeret beskrivelse af:

- forudsatte udstøbningstemperatur og klimaforhold
- formtyper, isolering
- afformningstidspunkter
- placering af kølerør/varmetråde
- start-/stop-tidspunkter af køling/opvarmning
- udtørringsbeskyttelse
- placering af termofølere
- temperaturkrav

Arbejdsbeskrivelsen skal tage højde for afvigelser fra de i planlægningen gjorte forudsætninger. Afvigelser i udstøbningstemperatur, klimatiske forhold etc. kan resultere i temperaturforløb, som ikke svarer til de planlagte. Undervejs i hærdeforløbet skal de målte temperaturer benyttes til at vurdere frostbestandighed, modenhed og afformningsstyrke. På grundlag heraf kan det blive nødvendigt at ændre tidspunkter for afformning, fugttabsbeskyttelse og start/stop af køling/opvarmning. Praksis vedrørende disse emner er beskrevet i litteraturen og vil ikke blive behandlet nærmere her. Der henvises eksempelvis til [Vinterstøbning af beton, 1985].

Vejrmelding Vejrmeldingen bør følges nøje i dagene op til en støbning for at afgøre om supplerende beregninger er nødvendige. På selve dagen for støbningen bør følgende forudsætninger for de udførte temperaturberegninger kontrolleres før støbningen sættes i gang:

- temperaturen af den friske beton
- udetemperaturen (forventet middel, minimum og maksimum)
- temperaturen af evt. kølevand
- vindhastigheden

Støbningen bør ikke sættes i gang, hvis forudsætningerne for planlægningen ikke er opfyldt. Forudsætningerne bør løbende kontrolleres under støbning og hærdning.

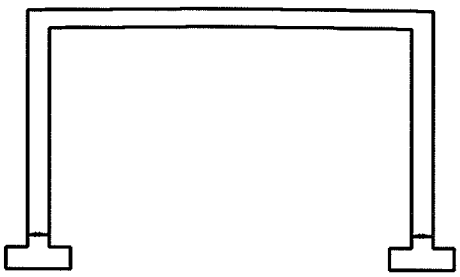
2.2 Reduktion af den ydre temperaturforskel, D_{ydre}

Krav til den ydre temperaturforskel, D_{ydre}, kan opfyldes gennem:

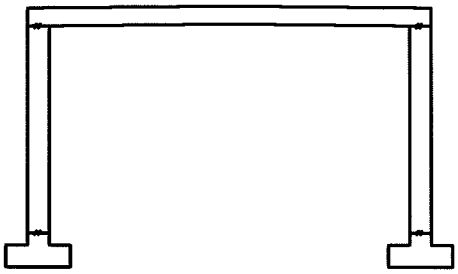
- placering af støbeskel
- valg af støbetakt
- temperaturstyring

Det er normalt en fordel at udføre konstruktionerne med så få støbeskel (og dermed støbeafsnit) som muligt, idet antallet af sammenstøbninger herved reduceres. Placering af støbeskel kan være specificeret af bygherren.

Eksempel 2.1



Figur 2.1. Vægge og dæk støbes i samme støbning



Figur 2.2. Vægge og dæk støbes i to støbninger

I en tunnelkonstruktion kan man vælge at udstøbe vægge og dæk i en eller to støbninger (fig 2.1-2.2).

Ved i det konkrete tilfælde at gennemføre beregninger af forskellige placeringer af støbeskel, kan det afgøres, hvilken opdeling af støbningen, der er den mest hensigtsmæssige, dvs. kræver færrest mulige foranstaltninger for at opfylde temperaturkravene.

Det skal naturligvis indgå i overvejelserne, om den valgte opdeling er hensigtsmæssig af hensyn til den praktiske udførelse. Følgende bør bl.a. overvejes:

- Er støbeafsnittene af passende størrelse?
- Er væggen så høj, at korrekt udstøbning af den nederste del er umulig?
- Bliver arbejdsgangene i forbindelse med evt. flytning af formen uhensigtsmæssige?

Temperaturstyring foregår bl.a. ved at anvende form- og isoleringsmaterialer som kombineret med passende formtider medfører hensigtsmæssige temperaturforløb. Som supplement hertil kan om nødvendigt anvendes:

- opvarmning af den konstruktionsdel, der støbes mod f.eks. vha. elektriske varmekabler, se afsnit 2.7.
- kold beton eller kølerør under støbningen, se afsnit 2.8.
- forsinkelse af den første del af en støbning vha. retarderende tilsætningsstoffer

2.3 Reduktion af den indre temperaturforskel, D_{indre}

Krav til den indre temperaturforskel, D_{indre}, kan opfyldes ved at isolere overfladerne. Herved mindskes temperaturforskellen mellem konstruktionens indre og overfladerne, men samtidigt hæves temperaturniveauet generelt. Det højere temperaturniveau vil bevirke at:

- afformningstidspunktet må udskydes, indtil betonen igen har nået et temperaturniveau, hvor den kan tåle at blive afformet uden at krav til D_{indre} bliver overskredet
- konstruktionsdelen får en større temperaturbevægelse i forhold til nabokonstruktioner og derved øges risikoen for at overskride krav til D_{ydre}

Anvendelse af kold beton eller køling vha. rør placeret i formen kan også bidrage til opfyldelsen af krav til D_{indre}. En sådan løsning reducerer hærdeprocessens hastighed, og kan derved udskyde tidspunktet for afformning, ophør af udtørringsbeskyttelse, kabelopspænding etc.

2.4 Støbeform

Foruden krav til isoleringsevnen er valget af støbeform også styret af krav til overfladestruktur og geometri (se tabel 2.1). Dette kan være specificeret af bygherren. Mulighed for genanvendelse af formen spiller også ind på valg af formmateriale. Forme af stål kan anvendes flere gange end f.eks forme af træ.

Ved anlægsarbejder er de mest almindeligt anvendte formmaterialer træ, støbeplader (finér, plywood eller anden behandlet støbeplade), stål eller en kombination af disse materialer.

Formmaterialet	**Æstetik**	**Isoleringseffekt**	**Genanvendelse**
Stål	Glat flade	Ingen isolering	Høj grad
Finér / støbeplader	Glat flade	Moderat isolering	Moderat grad
Støbebrædder	Rustik flade	Stor isolering	Lav grad

Tabel 2.1

2.4.1 Overflade / æstetik

Projektets krav til udseendet af den færdige overflade spiller ind på valg af formmateriale. Ønskes en glat overflade vælges finér eller stål og ønskes f.eks. at den færdige betonoverflade skal fremstå med bræddestruktur, vælges støbebrædder.

2.4.2 Geometri

Formen opbygges under hensyn til om støbetrykket er lodret eller vandret, så formen får en stivhed, der giver den færdige konstruktion, den forudsatte geometri.

2.4.3 Isoleringseffekt

Formmaterialerne har forskellig isoleringseffekt. Dette fremgår af figur 2.3 og bilag A .

Støbeplader/ finérplader

Støbeplader/finérplader anvendes både ved lodrette og vandrette støbninger, og indgår i standardformsystemer. Materialetykkelsen er typisk fra 18 - 21 mm og formen har en moderat isolerende effekt. Afgivelse af varme til omgivelserne er hensigtsmæssig, hvilket normalt fører til moderate temperaturforskelle og temperaturniveauer. Af hensyn til styring af hærdeforløbet, kan det især under vinterforhold være nødvendigt at supplere formen med isolering.

Støbebrædder på finérplader

Støbebrædder på finérplade anvendes normalt ved lodrette støbninger af en betydelig højde, og har pga. af opbygningen en samlet tykkelse på ca. 50 mm. Formen har en relativ stor isolerende effekt. Da der ofte er tale om en symmetrisk formopbygning, har hærdevarmen vanskeligt ved at afgives til omgivelserne, hvilket betyder et jævnt temperaturprofil over konstruktionens tværsnit og en højere maksimum temperatur.

Støbebrædder

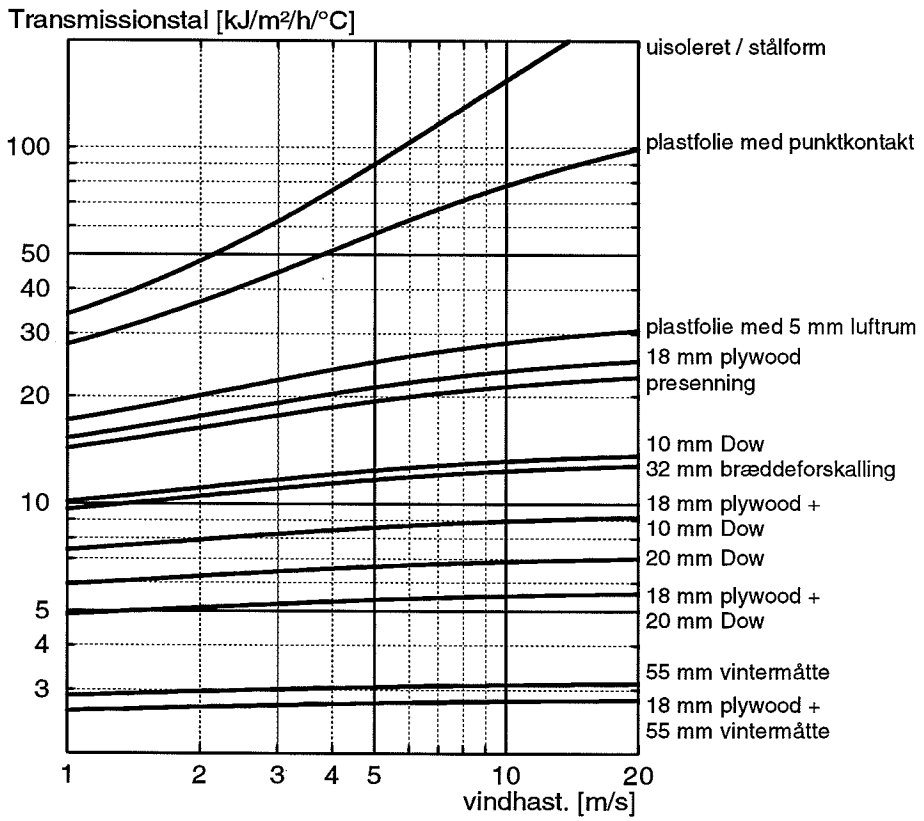
Støbebrædder anvendes normalt som formunderlag ved vandrette støbninger, f.eks. undersiden af en bro. Formopbygningen minder om en gulvkonstruktion i en bolig, dvs. brædder på strøer. Formen har normalt en tykkelse på ca. 30 mm, og isolerer relativt godt.

Betonens hærdevarme har svært ved at afgives til omgivelserne, hvilket bl.a. betyder et jævnt temperaturprofil over konstruktionens tværsnit og en højere maksimum temperatur.

Stålforme

Stålforme anvendes normalt kun i forbindelse med støbning af "standard" konstruktioner. Der er som regel tale om en formopbygning, der svarer til opbygningen af standard formsystemer af almindelige støbeplader. Normalt udføres stålforme i tykkelser mellem 6 og 8 mm. Tykkelsen er dog af sekundær betydning, da stålformen stort set ikke er isolerende.

Stålformens ringe isoleringseffekt betyder, at hærdevarmen nemt slipper væk, hvilket især ved tykke konstruktioner giver et uhensigtmæssigt temperaturprofil over konstruktionens tværsnit (stor forskel på overflade og midte temperatur) og en reduktion af den maksimale temperatur. Stålformen giver stor flexibilitet for hærdestyring, idet den kan suppleres med en passende mængde isolering, så det mest hensigtsmæssige temperaturprofil opnås. I praksis er det dog ofte vanskeligt at isolere formene.



Figur 2.3. Transmissionskoefficient afhængig af vindhastigheden

2.5 Isolering

Med henblik på at styre hærdeforløbet kan udstøbte betonoverflader, støbeformen eller afformede overflader isoleres. De mest almindeligt anvendte isoleringsmaterialer er:

- mineraluldsmåtter
- ekspanderet/ekstruderet polystyren
- plastfolie eller presenninger.

Materialerne har forskellig isoleringseffekt, hvilket fremgår af figur 2.3 og bilag A. Af figuren ses, at isolerede formes isoleringseffekt ikke påvirkes væsentligt af vindhastigheden.

2.5.1 Isolering af fri betonoverflader

Frisk udstøbt beton kan ikke bære f.eks. vintermåtter, uden at det giver aftryk i overfladen. Derfor udlægges en lettere isolering f.eks. ekspanderet polystyren det første døgns tid, hvorefter der senere pålægges f.eks. vintermåtter.

Isolering af fri overflader kan anvendes af entreprenøren, med henblik på at optimere tidspunktet for f.eks. afformning eller opspænding af en konstruktion, selvom hærdeforløbet uden isolering ville overholde kravene.

Udlægning af isolering har også betydning for beskyttelse imod fordampning fra overfladen (jvf. anvisningen[HETEK-Efterbehandling, 1997]).

2.5.2 Isolering af forme

Isolering af forme skal ske uden på afstivningssystemet for at opnå den bedste effekt. Isolering er ofte tilstrækkelig i form af presenninger, der monteres uden på formen, så der skabes et hulrum med stillestående luft. Løsningen er håndteringsvenlig og robust. Det er vigtigt at sikre, at der ikke er mulighed for træk under presenningerne.

Anvendes vintermåtter skal det sikres, at måtterne slutter tæt til formen. Dette kan ske med etablering af et ramme system.

2.5.3 Isolering af afformede flader

Isolering af afformede flader sker:

- for at få et jævnt temperaturprofil over tværsnittet så krav til D_{indre} opfyldes.

- for at optimere udnyttelsen af formene og for samtidigt at få et jævnt temperaturprofil, så krav til D_{indre} opfyldes. En fornuftig isolering har typisk en isoleringseffekt, der modsvarer formens.

- når formen fjernes, inden hærdekravene er opfyldt. Ved tykkere konstruktioner, kan en isolering der har mindre isolerende effekt end formen, udnyttes til at reducere maksimumstemperaturen og samtidigt sikre overholdelse af krav til D_{indre}. Metoden er en kombination af de to førnævnte.

- for at holde på hærdevarmen af hensyn til efterfølgende støbninger. Isolering af afformede flader kan anvendes for, at holde på hærdevarmen så krav til D_{ydre} kan overholdes i forhold til de efterfølgende støbninger. Ved forskydninger i støbeprogrammet vil temperaturen stadig falde i den hærdnende konstruktion, hvilket har betydning for muligheden for at opfylde krav til D_{ydre}. Dette bør tages med i overvejelserne, før denne metode anvendes.

Eksempel 2.2

Hvor der anvendes relativt godt isolerende forme (f.eks. 50 mm træ), kan der afformes tidligt for at reducere maksimumstemperaturen, hvorefter der dækkes af med en isolering, der har mindre isoleringseffekt end formen f.eks. et eller to lag presenninger.

Herved kan krav til D_{ydre} opfyldes, samtidigt med at krav til D_{indre} stadig overholdes.

2.6 Betonens udstøbningstemperatur

En væsentlig parameter i forhold til temperaturniveauet er betonens udstøbningstemperatur. Typisk kan antages, at 1 °C højere udstøbningstemperatur medfører 1 °C højere maksimaltemperatur.

Betonens udstøbningstemperatur varierer i forhold til lufttemperaturen og leveringstidspunktet på dagen. Det har også betydning for betonens temperatur, hvorvidt den er blandet som en enkeltstående sats eller den er blandet i et forløb, hvor blandemaskinen er blevet varm. Som tommelfingerregel kan regnes med, at betontemperaturen er ca. 2-5 °C varmere end middeldøgnstemperaturen, undtaget når betonen opvarmes under blanding.

Sommer Beton leveret fra betonfabrik kan på varme sommerdage nå op på 25-30 °C. En reduktion af udstøbningstemperaturen, kan opnås ved tilsætning af flydende kvælstof i betonkanonen, men det er kostbart.

Vinter Uden iværksættelse af særlige forholdsregler vil betontemperaturen om vinteren normalt ikke være lavere end ca. 7-8 °C. Beton kan leveres varm med temperaturer på typisk 13-18 °C afhængig af den aktuelle transportafstand. Den varme beton fremstilles ved iblanding af varmt vand, hvilket kan hæve temperaturen med ca. 5 °C. Anvendelse af tilslag fra opvarmede siloer kan bidrage til yderligere at hæve temperaturen, men produktionskapaciteten er begrænset til silokapaciteten. Damp kan anvendes til at hæve temperaturen, men den tilførte vandmængde er svær at styre og dokumentere.

Forår og efterår Betontemperaturen forår og efterår er typisk ca. 11-18 °C.

2.7 Opvarmning

Ved støbning mod tidligere udstøbte konstruktionsdele kan krav til den ydre temperaturforskel, D_{ydre}, opfyldes vha. opvarmning. Ved at lade den tidligere udstøbte konstruktionsdel opvarme inden der støbes, og derefter lade den afkøle i samme takt som udstøbningen, reduceres forskellen i temperaturbevægelserne.

Den konstruktionsdel som opvarmes må ikke være forhindret i at udvide sig/trække sig sammen af nabokonstruktioner eller af et massivt underlag af

fjeld eller kalk. Massive underlag og konstruktioner i vand er meget vanskelige at opvarme.

Det bør ved beregning kontrolleres, at opvarmningen ikke giver anledning til overskridelse af D_{indre} i den opvarmede konstruktionsdel.

Varme kan tilføres som ydre eller indre opvarmning, og kan iværksættes nøjagtigt på det tidpunkt hvor der er behov, og i præcis den nødvendige periode af hærdeforløbet. Normalt iværksættes opvarmning fra døgn til timer før udstøbningen starter, og fortsætter til den hærdnende konstruktion har opnået passende temperatur. Den samlede opvarmningperiode er normalt fra 2 til 4 døgns varighed, alt afhængig af konstruktionsopbygning.

Opvarmningen skal stoppes når den nyudstøbte konstruktionsdel når sin maksimale middeltemperatur. I modsat fald er opvarmningen meningsløs.

Ydre opvarmning anvendes som regel som en nødløsning, i situationer, hvor der ikke er planlagt opvarmning af en hærdet konstruktion. Ydre opvarmning er opvarmning fra betonens overflade f.eks i form af infrarødt eller alm. lys (f.eks. halogen), varmekanoner eller varmemåtter. Metoden er mindre effektiv end opvarmning fra betonens indre. Den bedste sikkerhed mod at betonoverfladen ikke lider overlast, fås ved at placere en termoføler på overfladen.

Indre opvarmning, er en planlagt hærdeforanstaltning, der indarbejdes i forbindelse med udstøbningen af en konstruktion. Indre opvarmning udføres enten i form af indstøbte elektriske varmekabler/-tråde, eller ved at anvende indstøbte rør til op- varmning ved hjælp af varmt vand. Samtidigt bør de ydre overflader isoleres, så der fås en jævnt fordelt opvarmning af konstruktionens tværsnit. Den bedste styring af opvarmningsforløbet fås ved at styre på basis af termofølere i betonen.

Opvarmning kan også anvendes når:

- hærdeprocessen ønskes accelereret f.eks. af hensyn til styrkeudvikling og efterbehandling
- støbeskel skal opvarmes for at være frostfri
- der kan ske frysning af frisk beton
- en hærdet konstruktion skal opvarmes til +5 °C før forspændingskanaler må injiceres

2.7.1 Varmekabler/-tråde

Indre opvarmning kan foretages vha. varmekabler (220V/380V) eller varmetråde (40-50V). Varmekabler tilsluttes direkte til el-nettet, mens varmetråde kræver brug af transformere. For varmekabler afhænger effekten af den valgte kabeltype, mens varmetrådes effekt kan reguleres vha. transformerne. For begge typer afgives (og forbruges) normalt 10 - 50 W pr. meter kabel/tråd. Afhængigt af den påtrykte spænding U og modstanden R kan den afsatte effekt P bestemmes som:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad [\mathrm{W} \tag{2.1}$$

Modstanden R vokser med stigende temperatur. Hvis modstanden ved 15 °C er R_{15} kan modstanden ved temperaturen T skønnes til:

$$R_T = R_{15} \cdot (1 + 0.004 \cdot (T - 15)) \quad [\Omega] \tag{2.2}$$

Normalt tåler varmekabler/-tråde ikke temperaturer over 60 °C. Jvf. formel (2.2) er modstanden ved 60 °C øget med 18% i forhold til modstanden ved 15 °C. Herved afsættes iht. formel (2.1) en tilsvarende mindre effekt i betonen. For varmetråde gælder yderligere, at der afsættes en vis effekt i koblingsdåser, kontakter osv.

Varmekabler/-tråde placeres normalt med en indbyrdes afstand på 20 - 40 cm afhængigt af opvarmningsbehovet. Ofte vil kablerne/trådene kunne monteres direkte på armeringsjern vha. plastic-bindere. Kabler/tråde må ikke komme i kontakt med hinanden eller med isolering. De fleste typer kræver fuldstændig omstøbning for ikke at blive for varme og derved ødelagte. En evt. overskydende længde kan tildækkes med sand, der holdes vådt. Hvis kabler/tråde afkortes reduceres modstanden og effekten øges tilsvarende. Efter montering bør kablerne/trådene tændes i nogle få sekunder, hvorefter modstandene registreres med et Ohm-meter. De faktiske effekter kan herefter bestemmes udfra formel (2.1).

Den samlede mængde varme, som skal tilføres, afhænger af:

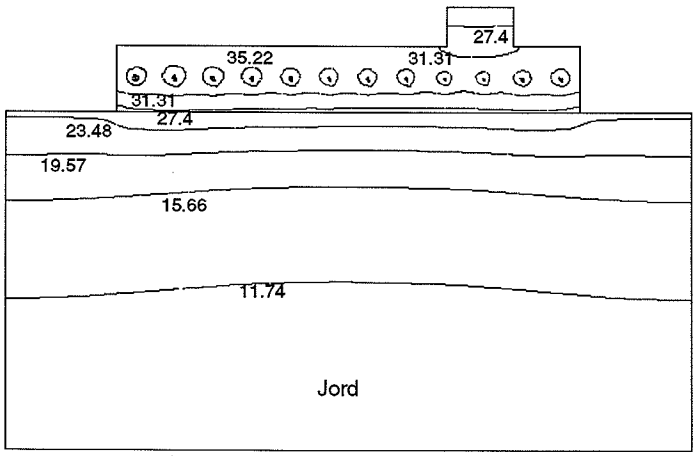
- mængden af beton som skal opvarmes
- den ønskede temperaturstigning
- varmetabet til den omgivende luft
- varmetabet til nabokonstruktioner herunder underlaget

Den nødvendige effekt afhænger af den samlede mængde varme, der skal tilføres og længden af opvarmningsperioden. Ved for hurtig opvarmning er der risiko for revnedannelse i den konstruktionsdel, der opvarmes. Desuden gælder, at jo færre varmetråde en given effekt tilføres med, jo større er risikoen for revnedannelse. Denne risiko kan vurderes ud fra en spændingsberegning.

Ved støbning mod jord skal den mængde jord, som påvirkes af opvarmningen, medtages i beregningen. Gennem valg af begyndelses- og randbetingelser bør man sikre sig, at middeltemperaturen i den konstruktionsdel, som opvarmes, ikke er lavere ved afslutningen af forløbet, end den er, når opvarmningen startes.

Eksempel 2.3

Et fundament på jord skal opvarmes, så middeltemperaturen øges 10°C. Tværsnittet ses i fig. 2.4. I en sommersituation antages lufttemperaturen at være 25 °C og den underliggende jord til 11 °C. For at etablere en "korrekt" temperaturfordeling mellem luften og de dybere liggende jordlag startes temperatur-beregningen inden varmekablerne tændes.

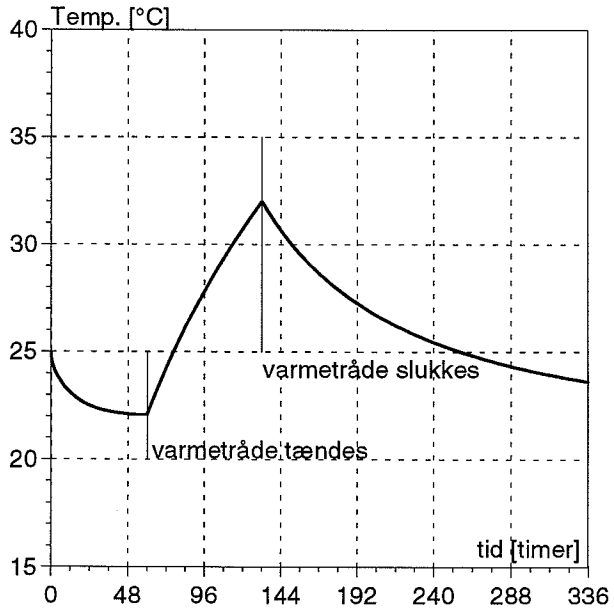


Figur 2.4. Temperaturfordeling i fundament og jord til tiden t= 132 timer [°C]

(fortsættes)

(Eksempel 2.3 fortsat)

Fundamentets begyndelsestemperatur (25 °C) reduceres herved til 22 °C efter 60 timer (se fig. 2.5) svarende til at en quasistationær tilstand er opnået. På dette tidspunkt isoleres fundamentet med vintermåtter og der tændes 12 varmetråde med en samlet effekt på 396 W pr. meter fundament. Efter 3 døgn er middeltemperaturen steget 10 °C og varmetrådene slukkes. Tidspunktet for påstøbning fastlægges, så de to konstruktionsdele opnår maksimumstemperaturen samtidigt. Afkølingsforløbet kan styres vha reduktioner i isoleringsmængden, således at temperaturbevægelserne følger en påstøbt vægs temperaturbevægelser.



Figur 2.5. Middeltemperatur i fundament

2.8 Køling

I konstruktioner med store godstykkelser kan krav til den indre temperaturforskel, D_{indre}, opfyldes vha. køling. Køling anvendes også til at reducere en konstruktionsdels temperaturbevægelse i forhold til nabokonstruktioner, og dermed opfylde krav til D_{ydre}.

Køling af beton udføres normalt ved, at der igennem indstøbte rør cirkuleres vand, der har en lavere temperatur end den ukølede beton. De indstøbte rør er normalt af plast eller metal. Kølerørene placeres normalt med en indbyrdes afstand på 0.3 - 0.6 m, afhængig af den ønskede afkølingseffekt. En fordobling af afstanden reducerer effekten til en fjerdedel.

Som hovedregel gælder, at krav til D_{ydre} kan opfyldes når rørene placeres der, hvor der bliver varmest i den ukølede konstruktion. Krav til D_{ydre} bør opfyldes ved at placere rørene i de områder, hvor revnerisikoen er størst i den ukølede konstruktion. En optimal placering af kølerørene kan fastlægges udfra en spændingsberegning. Se [HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning].

I begyndelsen af hærdeprocessen udvikles mest og hurtigst varme, og det er i den periode, at kølingen skal foretages. Køling iværksættes normalt fra det tidspunkt i støbeforløbet, hvor betonen har dækket kølerørene. Undervejs kan vandføringen og/eller kølevandstemperaturen justeres, for at styre afkølingsforløbet. Denne styring kan foretages på grundlag af temperaturmålinger i betonen, kølevandets ind- og udløbstemperatur og vandføringen. Det er hensigtsmæssigt at indbygge alarmer til registrering af svigt i kølesystemet.

Kølingen vil normalt kunne indstilles når betontemperaturen, efter at have passeret maksimum, er faldet 2-3 °C. Normalt vil det være passende at køle til det tidspunkt, hvor temperaturmaksimum ville optræde, hvis der ikke blev kølet. Ved at indstille kølingen så tidligt så muligt, reduceres de lokale egenspændinger omkring kølerørene.

Normalt kræves 2-dimensionale beregningsværktøjer, når temperaturforløbet skal planlægges.

Som kølevand kan anvendes:

- grundvand, vand fra sø og å-løb samt havvand. For at hindre at rørene tilstoppes pga. urenheder bør filtre benyttes. Afkølingen kan styres via gennemstrømningshastigheden. Normalt antages grundvand at være 8 °C, men temperaturen bør kontrolleres i god tid før støbning. Grundvandet kan ofte være betydeligt varmere afhængigt af, hvor dybt grundvandsspejlet ligger og hvor tæt på kysten vandet pumpes op.

- vand kølet af køleanlæg. Afkølingen kan styres ved en kombination af vandets indløbstemperatur og gennemstrømningshastigheden.

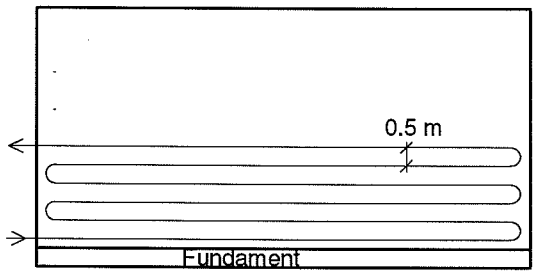
Ved transport af vand over lange strækninger, skal det sikres, at vandtemperaturen ikke påvirkes væsentligt af solindfald eller frost. Frost kan medføre såvel afbrydelse af kølingen som frostsprængninger af betonen. Anvendes der saltholdigt vand, bør kølerør af stål skylles efter med fersk vand for at mindske korrosionsrisikoen. I konstruktioner som udsættes for frost skal rørene blæses igennem med en frostsikker væske før de injiceres. Alternativt kan kølerørene udføres med udluftning, således at de ikke kan vandfyldes.

Kølesystemets tæthed bør kontrolleres ved trykprøvning før støbning.

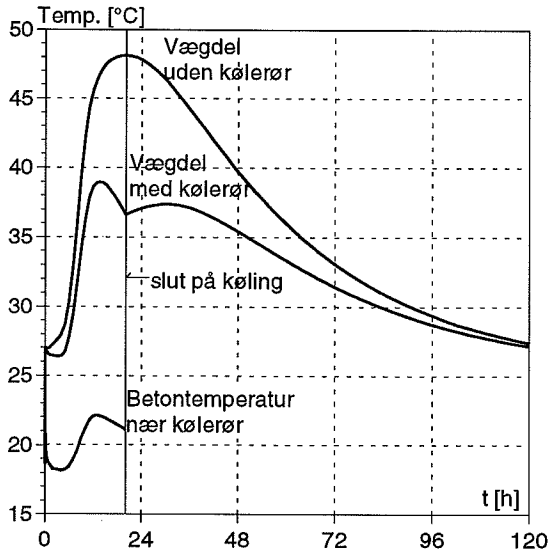
Bilag A viser hvordan kølerørs transmissionskoefficienter bestemmes.

Eksempel 2.4

I den nederste halvdel af en 0.5 m tyk væg skal den maksimale middeltemperatur sænkes ca. 10 °C for at begrænse temperaturbevægelsen i forhold til fundamentet (se fig.2.6). I væggens midterlinie indlægges plast-kølerør med en indbyrdes afstand på 0.5 m. Kølerørets længde er ca. 120 m og vandføringen er 2.4m^3/h. Når vandet gennemløber kølerøret stiger kølevandets temperatur. Der er foretaget en beregning, hvori det er skønnet, at kølevandets temperatur i middel er 15 °C. Af figur 2.7 fremgår middeltemperaturforløbene i vægdele med og uden køling, og det ses, at maksimum reduceres fra 48 °C til 38.5 °C i det kølede område. Af fig 2.7 fremgår at betonens temperatur omkring kølerøret er ca. 20 °C.



Figur 2.6. Sidebillede af væg med kølerør



Figur 2.7. Middeltemperatur i vægdelen med og uden kølerør, samt betontemperatur ved kølerør. Kølerørene slukkes 20 timer efter støbning

(fortsættes)

(Eksempel 2.4 fortsat)

Den nødvendige indløbstemperatur kan bestemmes til:

$$T_{indløb} = T_{beton} - \frac{(T_{beton} - T_{middel}) \cdot k}{(1 - e^{-k})} = 10.3\,°C \qquad (2.3)$$

hvor

$$k = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot d \cdot s}{c_{vand} \cdot Q} = 1.52 \qquad (2.4)$$

T_{beton}	er betonens temperatur (20 °C)
T_{middel}	er kølevandets middeltemperatur (15 °C)
α	er transmissionskoefficienten for kølerørsvæggen, t=2 mm (576 kJ/m^2/°C/h)
d	er kølerørets indre diameter (0.028 m)
s	er kølerørets længde (120 m)
c_{vand}	er vands varmefylde(4192 kJ/m^3/°C)
Q	er vandføringen (2.4 m^3/h)

Pr. time skal altså tilføres 2.4 m^3 vand med en temperatur på 13.3 °C eller derunder. Hvis vandet leveres fra et køleanlæg, kan den nødvendige effekt bestemmes som:

$$P = (T_{udløb} - T_{indløb}) \cdot c_{vand} \cdot Q = 76140 \text{ [kJ/h]} \qquad (2.5)$$

hvor

$$T_{udløb} = T_{beton} + (T_{indløb} - T_{beton}) \cdot e^{-k} = 17.9\,°C \qquad (2.6)$$

2.9 Klimaforhold

I forbindelse med planlægningen af betonstøbninger skal det besluttes, hvilke klimaforhold, der skal undersøges i temperaturberegninger. Definitionen af klimaforhold bør inkludere udetemperatur, vindhastighed og evt. solindfald. Desuden har klimaforholdene almindeligvis stor indflydelse på temperaturen af den friske beton jvf. afsnit 2.6.

Information vedr. klimaforhold i Danmark kan findes i bilag B.

Hvis der er tale om en støbning på en specifik årstid, vil det almindeligvis være tilstrækkeligt at undersøge to klimatilfælde svarende til en kold og en varm situation for den pågældende årstid.

Hvis der er tale om flere støbninger af den samme konstruktionsdel (gentagelser) over en lang periode, vil det i de fleste tilfælde være passende at undersøge to klimatilfælde svarende til en vinter og en sommer situation. Eventuelt kan et mellemliggende klimatilfælde svarende til efterår/forår også undersøges.

Planlægningen bør resultere i acceptable grænser for de relevante parametre, f.eks. temperaturen af den friske beton, udetemperaturen, kølevandstemperaturer etc. jvf. afsnit 2.1.

Som det fremgår af ovenstående, giver konservative valg af de forudsatte klimaforhold et større interval for de forskellige parametre, hvilket betyder større sikkerhed for, at støbningen kan gennemføres iht. planlægningen. Til gengæld vil omkostningerne ofte forøges.

Der gøres opmærksom på, at sikkerheden vedr. valg af klimaforhold bør være større for konstruktioner uden køling, da der kun er få muligheder for at påvirke temperaturforløbet i konstruktionen, efter at støbningen er startet.

2.10 Dokumentation af temperaturberegninger

Når beregnede temperaturer præsenteres, bør de i nedenstående liste anførte punkter inkluderes.

Beskrivelse af grundlaget for beregningerne:
- geometrisk model (målsatte skitser)
- modeller for betonens termiske egenskaber (adiabatiske varmeudvikling, varmeledningsevne, specifikke varmefylde og densitet)
- klimaforhold
- temperaturen af den friske beton
- randbetingelser (f.eks. transmissionskoefficienter og deres tidsvariation)
- systemer til temperaturstyring (kølesystemer eller systemer til opvarmning)

Beskrivelse af resultatet af beregningerne:
- udviklingen af middeltemperatur for de enkelte konstruktionsdele som funktion af tiden
- udviklingen af den ydre temperaturforskel (D_{ydre}) som funktion af tiden
- udviklingen af den indre temperaturforskel (D_{indre}) som funktion af tiden
- iso-kurve til tidspunktet for maksimal indre temperaturforskel (D_{indre})
- iso-kurve til tidspunktet for maksimal ydre temperaturforskel (D_{ydre})
- iso-kurve der viser, hvor og hvornår maksimal temperatur optræder
- iso-kurve der viser, hvor der opstår lave temperaturer på betonoverfladen i forbindelse med evt. risiko for tidlig frysning
- udvikling af modenheden ved betonens overflade som funktion af tiden

2.11 Forprøvning af udførelsen

Det anbefales at foretage en prøvestøbning. I hærdemæssig sammenhæng anvendes denne til at:

- afprøve om de planlagte foranstaltninger kan udføres
- foretage temperaturmålinger
- observere revnedannelse
- verificere de værktøjer der er anvendt i planlægningen til forudsigelse af temperaturer og revnedannelse.

Efter prøvestøbningen kan der foretages en evaluering jvf. kap. 2. som om nødvendigt kan resultere i en revideret planlægning.

3. TEMPERATURMÅLINGER

Dokumentationen af udførelsen foretages ved at måle temperaturer i den hærdnende konstruktion. Forekommer der sammenstøbninger mellem gammel og ny beton, så foretages der også temperaturmålinger i den gamle beton.

3.1 Måleudstyr

Målinger af temperaturen i den hærdede beton kan principielt foretages på 3 niveauer:

- Manuel måling med jævnlige registreringer
- Kontinuert måling med datalogger
- On-line kontinuert måling med datalogger og PC'er

Denne vejledning vil primært beskrive automatisk måling med datalogger via indstøbte termoelementer.

For en nærmere beskrivelse af forskellige typer temperaturfølere henvises til litteraturen, eksempelvis [Betonteknik, 1975].

Måling af betontemperaturen foretages almindeligvis ved hjælp af et såkaldt termoelement, hvor princippet er, at to forskellige metaller i indbyrdes elektrisk kontakt vil forårsage en spændingsforskel, der er afhængig af omgivelsernes temperatur. Spændingsforskellen kan måles med millivoltmeter eller en datalogger, hvortil termoledninger fra konstruktionen kobles.

Ønskes der blot en efterfølgende dokumentation af temperaturforløbet kan indlæsning af målinger fra dataloggeren gøres f.eks. ved afslutning af hærdeprocessen. Man har herved ikke mulighed for at påvirke temperaturforløbet aktivt under hærdningen.

Hvis det derimod kræves, at der kan foretages korrigerende indgreb under støbningen baseret på temperaturmålinger skal en såkaldt on-line registrering etableres. Dataloggeren kobles derfor til en PC'er, som via et særligt program løbende tømmer dataloggeren og samtidig muliggør en grafisk præsentation af temperaturforløbet. Programmet kan udbygges til modenhedsberegninger, relæstyring af f.eks. kølevand m.m.

De fleste EDB-programmer, der bruges ved registrering af temperaturforløb under en afhærdning, lagrer løbende data på PC'ens harddisk. Operatøren, der styrer registreringen af temperaturdata, bør før hver opstart af EDB-programmet sikre sig, at der er tilstrækkelig plads på PC'ens harddisk til at kunne lagre samtlige forventede data plus en vis overkapacitet.

Man bør være opmærksom på, at termoelementer kan være følsomme for magnetfelter hidrørende fra elektrisk strøm eller radiosignaler. En hensigtsmæssig ledningsføring samt test af systemet i god tid før støbning, vil dog kunne lokalisere og minimere sådanne forstyrrelser. Ledningsføringen bør også planlægges under hensyn til de øvrige arbejder på byggepladsen for at undgå skader på kablerne og dermed afbrydelse af målingerne.

PC'ere, der anvendes som dataloggere strømforsynes som oftes fra netspændingen, der etableres på byggepladsen. Der kan for disse midlertidige elektriske installationer ske kortvarige afbrydelser af strømmen. Et strømsvigt vil for de fleste PC'ere betyde, at temperatur-registreringen afbrydes, og i værste fald mistes de data, der er opsamlet indtil strømsvigtet. Ved at installere et back-up batteri, der løbende strømforsynes af netspændingen, kan PC'en fungere i et tidsrum efter et strømsvigt.

3.2 Placering af termofølere

Der kan ikke gives retningslinier, der dækker samtlige situationer for placering af termofølere, da dette afhænger meget af konstruktionernes kompleksitet. Normalt placeres termofølerne i de punkter, hvor de ekstreme temperaturer forventes. Typisk er dette i konstruktionsdelenes indre og i overfladerne. Der placeres normalt termofølere 10 mm fra betonoverfladen. Udføres der temperaturberegninger i planlægningsfasen bør disse ligge til grund for placeringen af termofølerne.

Der er risiko for at termofølerne beskadiges ved udstøbningen af betonen. For at minimere risikoen for beskadigelse kan termoføleren feks. placeres på en afstandsklods. Placeres termoføleren på en afstandsklods, bør den placeres på siden af denne for at undgå, at føleren kommer til at ligge i en luftlomme under afstandsklodsen og derved giver en unøjagtig visning. Især for termofølere i dæklaget er det vigtigt at kende den nøjagtige position i forhold til overfladen. Da de største temperatur-gradienter normalt optræder i overfladen vil en mindre fejlplacering af termofølerne medføre en stor fejl på målingen. Placeres termoføleren vha. en armeringsstang, så bør føleren ikke placeres i direkte kontakt med armeringsnettet, da dette kan give

elektriske forstyrrelser. Termofølerne kan eksempelvis placeres på en ikke elektrisk ledende stang, der er fastholdt i formen.

Alle følere skal nummereres på en tegning, der også viser den fysiske placering. Termofølerne nummereres tydeligt i begge ender af ledningen, således at der ikke kan forekomme ombytninger, der resulterer i, at temperaturerne ikke kan dokumenteres, se figur 3.1. Indstøbte termofølere skal beskyttes eksempelvis med krympeplast, for at forhindre strømoverførsel og dermed fejlmåling.

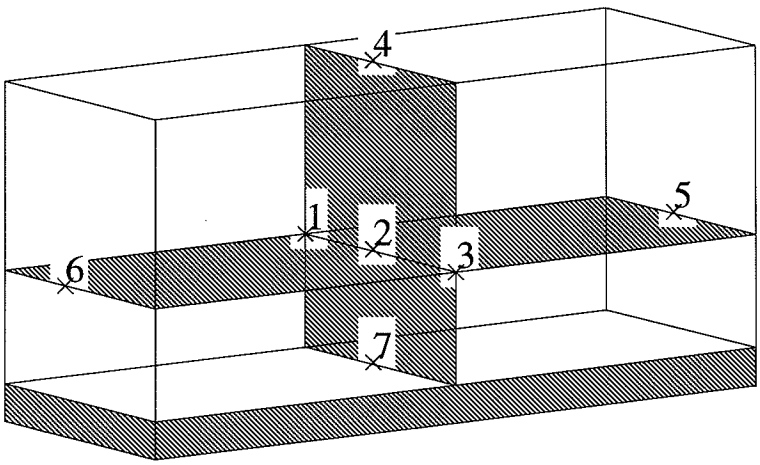
Der bør placeres en eller flere termofølere, der under hærdningen kan registrere udetemperaturen ved konstruktionen.

Figur 3.1. Nummerering af termoføler i begge ender [Vinterstøbning af beton, 1985]

3.2.1 Temperaturmålinger i konstruktioner uden kølerør/varmetråde

I figur 3.2 er vist en typisk placering af termofølere i en konstruktion uden kølerør. De viste placeringer 1-6 gør det muligt at dokumentere temperaturkravene mht. temperaturdifferencer mellem tværsnittets indre og overfladerne. Føleren 2 benyttes også til at dokumentere tværsnittes maksimale temperatur.

Føler 1,3,4,5 og 6 kan også benyttes til at bestemme modenheden af betonoverfladen og dermed tidspunktet for mulig afforskalling.



Figur 3.2. Typisk placering af temperaturmålepunkter i konstruktionsdel

Middeltemperaturen, T_m, i et tværsnit som vist på figur 3.2 kan vejledende defineres som:

$$T_m = 2/3 \cdot T_2 + 1/6 \cdot (T_1 + T_3) \qquad (3.1)$$

Denne formel baseres på, at temperaturprofilet er tilnærmelsesvist parabolsk, hvilket forudsætter, at T_1 og T_3 ikke afviger væsentligt fra hinanden. Brugbarheden af formel (3.1) bør for den aktuelle beton-geometri eftervises vha. en temperaturberegning.

Et krav om at temperaturforskellen mellem middeltemperaturen og overfladen i tværsnittet ikke må overskride en fastsat temperaturforskel, $D_{indre,max}$, er opfyldt når følgende gælder i hele hærdeperioden:

$$T_m - T_1 < D_{indre,max} \; ; \; T_m - T_3 < D_{indre,max} \qquad (3.2)$$

3.2.2 Temperaturmåling i konstruktioner med kølerør/varmetråde

I konstruktioner hvor der køles med kølerør eller hvor der opvarmes med varmetråde, optræder der komplicerede temperaturprofiler i tværsnittet, hvorfor antallet af termofølere nødvendigvis må forøges for at kunne vurdere/dokumentere hærdeforløbet.

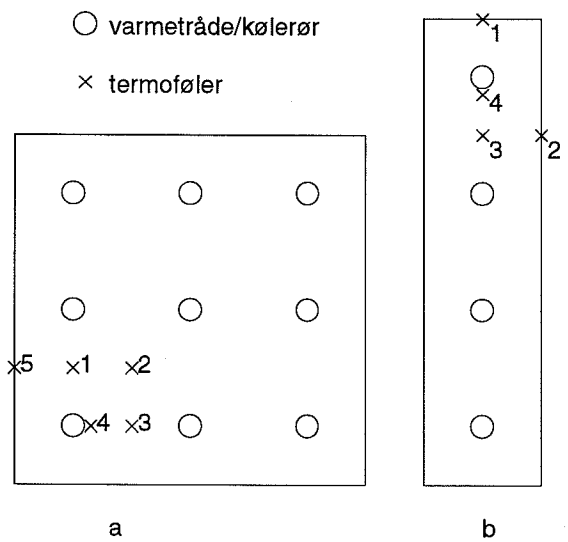
I figur 3.3 er vist et eksempel på placering af termofølere i et kølet/opvarmet tværsnit. Ved kølede konstruktioner registrerer termoføler 4 temperaturen på overfladen af et kølerør. Da der er en stor temperaturgradi-

ent i nærheden af kølerør/varmetråde bør den nøjagtige placering af termoføleren være kendt.

Såfremt konstruktioner støbt på jord skal opvarmes bør der placeres en termoføler feks. 0.5 m under fundamentsfladen. Målinger fra denne kan vise om de værdier, der er antaget for jordens varmefylde og varmeledningsevne er passende.

På grund af det elektriske felt, der virker omkring en varmetråd kan målinger fra termofølere placeret på varmetråde være fejlbehæftede.

De øvrige termofølere 1, 2,3 og 5 registrerer temperaturen i forskellige positioner omkring kølerør/varmeråde.



Figur 3.3. Placering af termofølere i konstruktioner med kølerør/varmekabler

For et tværsnit som vist i figur 3.3a kan middeltemperaturen, T_m, vejledningsvist defineres som:

$$T_m = 2/3 \cdot (2/3 \cdot (T_1 + T_2 + T_3)/3 + 1/3 \cdot T_4) + 1/3 \cdot T_5 \qquad (3.3)$$

Et krav om at temperaturforskellen mellem middeltemperaturen og overfladen i tværsnittet ikke må overskride en fastsat temperaturforskel, $D_{indre,max}$, er opfyldt når følgende gælder i hele hærdeperioden:

$$T_m - T_5 < D_{indre,max} \qquad (3.4)$$

For et tværsnit som vist i figur 3.3b kan middeltemperaturen, T_m, vejledningsvist defineres som:

$$T_m = 1/6 \cdot T_1 + 1/6 \cdot T_3 + 2/3 \cdot (4/5 \cdot T_2 + 1/5 \cdot T_4) \quad (3.5)$$

Et krav om at temperaturforskellene mellem midddeltemperaturen og overfladen i tværsnittet ikke må overskride en fastsat temperaturforskel, $D_{indre,max}$, er opfyldt når følgende gælder i hele hærdeperioden:

$$T_m - T_1 < D_{indre,max} \; ; \; T_m - T_2 < D_{indre,max} \quad (3.6)$$

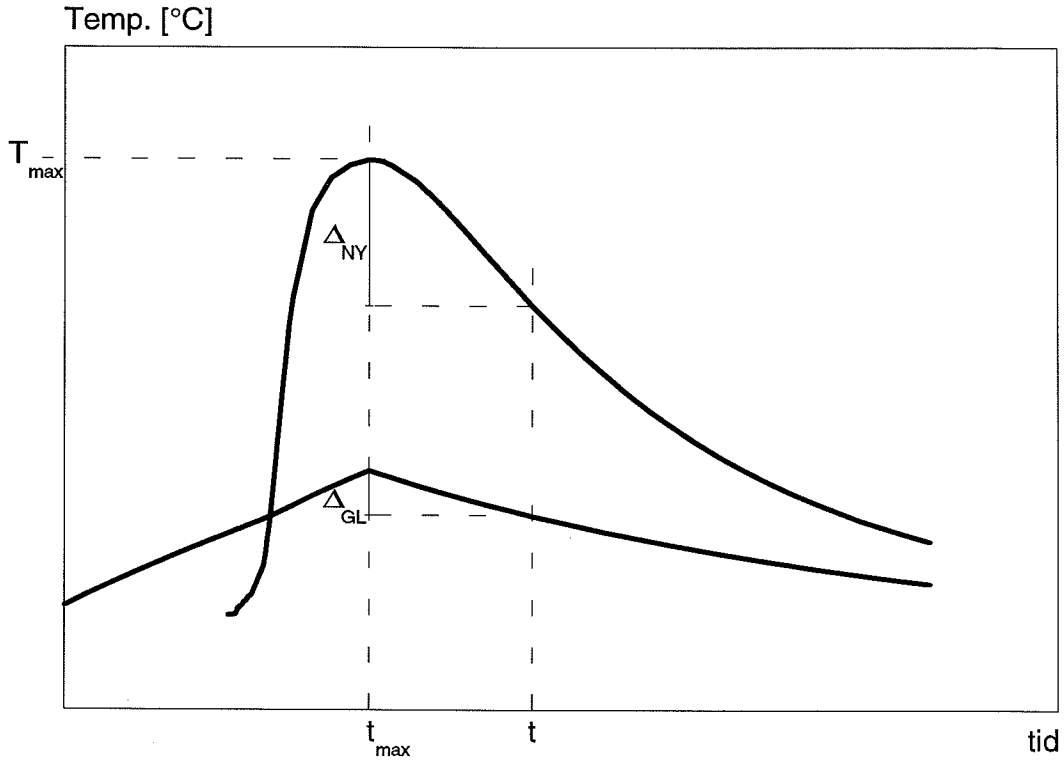
Brugbarheden af hhv. formel (3.3) og (3.5) bør for den aktuelle betongeometri eftervises vha. en temperaturberegning.

3.2.3 Indbyrdes temperaturforskel mellem konstruktionsdele

Variationen af en konstruktionsdels middeltemperatur kan bruges som mål for, hvor store temperaturbevægelser konstruktionsdelen gennemgår. Når konstruktioner sammenstøbes skal de enkelte konstruktionsdeles temperaturbevægelser i afkølingsfasen vurderes i forhold til hinanden.

Dokumentation af temperaturforskelle mellem sammenstøbte konstruktionsdele kræver, at der placeres termofølere i begge konstruktionsdele. Varmetransport fra den nye beton over i den gamle beton ved støbeskel medfører en lokal opvarmning af den gamle beton i området under støbeskellet. Såfremt der kun placeres én termoføler i den gamle konstruktionsdel skal denne placeres i et punkt hvor temperaturen ikke påvirkes af udstøbningen. Hvis der placeres flere termofølere kan disse udnyttes til at fastlægge hvordan den gamle konstruktionsdels middeltemperatur varierer under påvirkning af den nye konstruktionsdels hærdeforløb. Ofte vil der i forvejen være monteret termofølere i den gamle konstruktionsdel af hensyn til dennes dokumentation.

Stilles der krav om begrænset temperaturdifferens mellem gammel beton og ny beton og støbes der mod en gammel beton, hvori der ikke er termofølere, så kan disse placeres ved indboring til den ønskede dybde. Termofølere der indsættes i borede huller, kræver at borehullet injiceres for at få en pålidelig temperatur måling. Da injektionsmørtel også udvikler varme under afhærdning, bør indborede termofølere indsættes i god tid før selve støbningen, så disse ikke måler injektionsmørtlens hærdevarme, hvilket vil medføre en undervurdering af temperaturforskellene.



Figur 3.4. Middeltemperaturforløb i nabokonstruktioner

I figur 3.4 er vist middeltemperaturforløbene for henholdsvis en tidligere udstøbt og en nyudstøbt konstruktionsdel. Stigningen i middeltemperatur af den tidligere udstøbte konstruktionsdel kan stamme fra en varmestrøm gennem støbeskellet fra den hærdnende konstruktionsdel, direkte fra opvarmning vha. varmetråde eller evt. fra en rest af hærdevarme. Temperaturforskellen mellem de to konstruktionsdele til et aktuelt tidspunkt t efter t_{max} kan jvf. figuren bestemmes som:

$$D_{ydre} = \Delta_{NY} - \Delta_{GL} \tag{3.7}$$

hvor

Δ_{NY} er forskellen mellem maksimal middeltemperatur (der optræder ved tiden t_{max}) og den aktuelle middeltemperatur i den konstruktionsdel, hvori revnerisikoen vurderes (se figur 3.4)

t_{max} er tidspunktet for maksimal middeltemperatur i den konstruktionsdel, hvori revnerisikoen vurderes

Δ_{GL} er forskellen mellem middeltemperaturen til tiden t_{max} og den aktuelle middeltemperatur i den tidligere udstøbte beton (se figur 3.4)

Et krav til Dydre er overholdt hvis

$$D_{ydre} = \Delta_{NY} - \Delta_{GL} < D_{ydre,krav} \tag{3.8}$$

Kravet skal være opfyldt til enhver tid efter den hærdnende konstruktionsdel har opnået maksimumtemperatur, dvs. til alle tider senere end t_{max}.

På samme måde kan krav til den maksimalt tilladelige forskel i temperaturbevægelse for samtidigt udstøbte konstruktionsdele vises at være opfyldt.

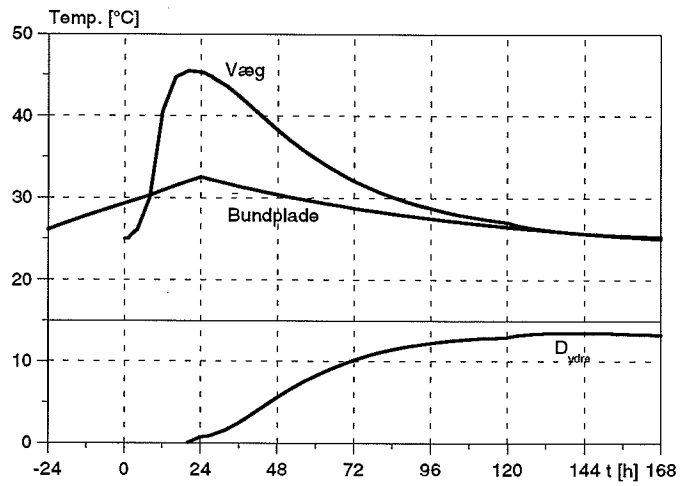
Eksempel 3.1

En bundplade opvarmes 10°C på 72 timer vha. elektriske varmekabler. Efter 48 timers opvarmning støbes en væg på bundpladen. Denne opnår sin maksimale middeltemperatur efter 20 timer, se figur 3.5.

I figur 3.5 er D_{ydre} som funktion af tiden vist. Efter 144 timer bestemmes den maksimale værdi af D_{ydre} som

$$D_{ydre} = \Delta_{NY} - \Delta_{GL} = (45.5 - 25.6) - (32.0 - 25.6) = 13.5\ °C$$

hvilket tilfredsstiller et krav på 15°C.



Figur 3.5. Middeltemperatur og D_{ydre} som funktion af tid. Tiden t=0 svarer til støbning af væggen

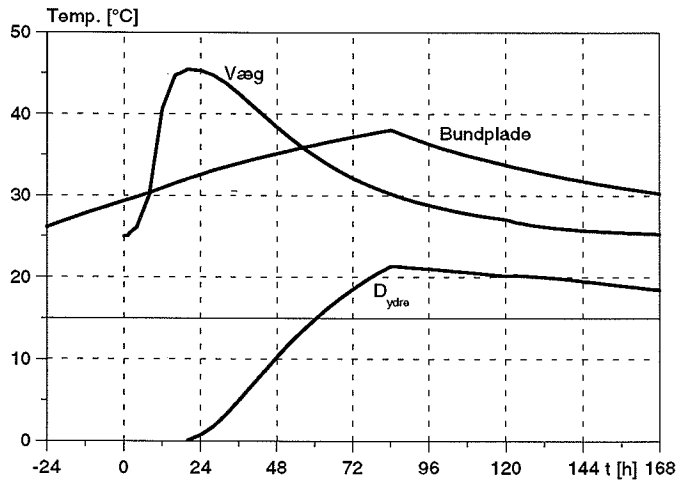
(fortsættes)

(Eksempel 3.1 fortsat)

Hvis opvarmningen afbrydes for sent fås det figur 3.6 viste forløb for middeltemperaturer og D_{ydre}. I dette tilfælde bestemmes den maksimale værdi af D_{ydre} efter 84 timer som

$$D_{ydre} = \Delta_{NY} - \Delta_{GL} = (45.5 - 30.2) - (32.0 - 38.0) = 21.3\,°C$$

hvilket ikke tilfredsstiller et krav på 15 °C.



Figur 3.6. Middeltemperaturer og D_{ydre} som funktion af tid. Tiden t = 0 svarer til støbning af væggen

4. LOGBOG

I forbindelse med støbning bør der udfyldes en logbog. Logbogen skal indeholde:

- Reference til detaljeret arbejdsbeskrivelse
- Reference til beregning (hvis udført), der ligger til grund for arbejdsbeskrivelsen.
- Reference til planlægningsdokument vedr. placering af termofølere
- Registrering af temperatur-forløbet i jorden i relevant dybde
- Hvornår startes opvarmning/køling ?
- Registrering af kølevands ind- og udløbstemperatur samt vandføring
- Hvornår startes støbningen ?
- Hvad er beton temperaturen ved modtagelse og udstøbning ?
- Hvad er temperaturen af evt. nabokonstruktioner ?
- Klima før under og efter støbning (temperatur, vind, nedbør, skydække)
- Hvornår afsluttes støbningen ?
- Hvornår standses køling/opvarmning ?
- Hvornår afdækkes og eventuelt isoleres, og med hvad ?
- Hvornår blev der afformet (evt. efterisoleret) ?
- Modenhed og temperatur ved afformning
- Fjernelse af isolering
- Revnekontrol ved afformning (temperatur,hvor og hvor store?)
- Overfladebehandling ved afformning (curing membran, hvor meget, hvilken og inden for hvor lang tid.)
- Revnekontrol efter afkøling (temperatur, hvor og hvor store?)
- Er efterberegning udført ?

5. REVNEREGISTRERING

For in situ støbninger er den eneste praktisk anvendelige metode for revneftersyn visuel inspektion af betonoverfladerne.

Overfladerevner, der opstår pga. indre fastholdelse opstår i opvarmningsfasen og lukker under afkølingsfasen, mens gennemgående revner, der opstår pga. ydre fastholdelse opstår i afkølingsfasen og vil normalt ikke lukke sig. Det er derfor vanskeligt at fastlægge ét tidspunkt, som er velegnet til at lokalisere både overfladerevner og gennemgående revner. Praktisk erfaring viser dog, at det normalt er lettere at få øje på revner umiddelbart efter afformning end senere i hærdeforløbet.

Det anbefales, at der udføres to revneeftersyn. Et umiddelbart efter afformning og et når konstruktionen er i termisk ligevægt med omgivelserne, dog tidligst når kravet til varigheden af udtørringsbeskyttelsen er opfyldt.

Opmåling/registrering af revner bør inkludere udarbejdelse af skitser, der viser revnernes placering og forløb samt opmåling af revnevidde og -længde

.

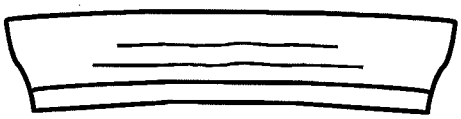
Eksempel 5.1

Figur 5.1. Tunnelelement

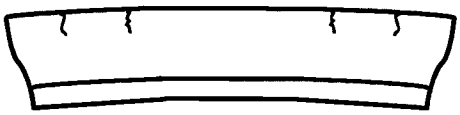
I et tunnel-element som vist på figur 5.1 kan flere forskellige revnebilleder forekomme. Midlertidige overfladerevner kan forekomme i de tykke konstruktionsdele på det tidspunkt, hvor betonen opnår sin maksimale temperatur og/eller når en varm konstruktion afformes og momentant afkøles i overfladerne (fig. 5.2). Revnerne kan have et mere tilfældigt mønster end vist.

(fortsættes)

(Eksempel 5.1 fortsat)



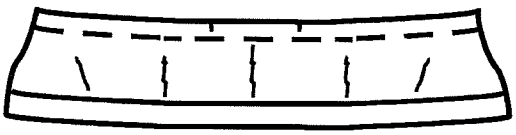
Figur 5.2. Overfladerevner. Revnerne kan have et mere tilfældigt mønster end vist



Figur 5.3. Gennemgående revner i toppen af væggen

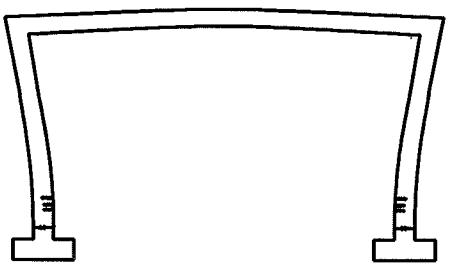
Der kan opstå midlertidige gennemgående revner i toppen af væggen (og i dækket hvis det støbes samtidigt) på det tidspunkt, hvor betontemperaturen er maksimal. Denne revnetype fås fortrinsvis i endezonerne, som vist på figur. 5.3.

I afkølingsfasen kan der fås permanente gennemgående revner i såvel vægge som dæk, se figur 5.4.



Figur 5.4. Gennemgående revner i vægge og dæk

Også temperatur-bevægelser i tværsnittets plan kan give anledning til revnedannelse. På grund af dækkets tværudvidelse, kan der opstå revner, som vist på figur 5.5.

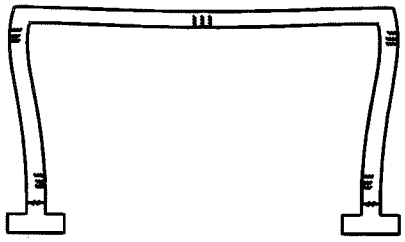


Figur 5.5. Revner pga. tværbevægelse i dækket

(fortsættes)

(Eksempel 5.1 fortsat)

Når forskallingen på undersiden af dækket fjernes, skal egenvægten optages ved rammevirkning i tunneltværsnittet. Hvis der ikke er udviklet tilstrækkelig trækstyrke fås revnedannelse (fig. 5.6).



Figur 5.6. Revner pga. egenvægt

Også de tidligere udstøbte konstruktionsdele kan skades: Et fundament som er spinkelt i forhold til den væg, der påstøbes, kan trækkes i stykker pga. væggens temperatur-udvidelse.

Hvis der er stor forskel på godstykkelse og dermed på temperaturerne imellem dele af den samme støbning, kan revner dannes.

6. AFVIGELSER

Efter støbning kan en sammenligning af beregninger og målinger vise om der er afvigelser mellem det planlagte og det udførte hærdeforløb. Afvigelserne kan være:

- Forskelle mellem beregnede og målte temperatur-forløb
- Revner observeres selv om temperaturkravene er overholdt
- Større revnevidder end ønsket observeres

Såfremt den betragtede støbning er én af mange, bør afvigelser altid efterforskes ligegyldigt om afvigelsen er ugunstig eller gunstig. Hvis en støbning er udført som planlagt og der alligevel fås afvigelser er det planlægningsmæssige grundlag ikke er godt nok. Et usikkert grundlag kan resultere såvel i skader som i for omfattende hærdeforanstaltninger i kommende støbninger.

6.1 Afvigelser i temperaturforløb

Såfremt det ikke kan dokumenteres at temperatur-kravene er overholdt bør det undersøges, hvad årsagen til afvigelsen fra de planlagte temperaturforløb i termofølerne kan være. I det følgende er nævnt en række forhold, som kan forårsage afvigelser.

Når støbningen er udført, kan det umiddelbart undersøges om følgende forudsætninger kan være årsag til afvigelser:

Måleusikkerhed Måleusikkerheden for den enkelte temperaturmåler i beton er typisk af størrelses ordenen ± 2 °C. For termofølere placeret i områder med store temperaturvariationer (f.eks. nær en overflade eller ved kølerør/varmetråde) gælder at usikkerhed på placeringen i høj grad kan medføre usikkerhed på målingen.

Udførelse Det undersøges om udførelsen rent faktisk er foregået som planlagt. Dette gøres ud fra den førte logbog og den beregning som ligger til grund for planlægningen.

Udstøbnings temperatur I de tilfælde, hvor der ikke er stillet et krav til en bestemt betontemperatur ved levering, kan der forekomme temperaturvariationer på den leverede betons temperatur. Dette kan nemt kontrolleres ved at måle hver enkelt betonleverances temperatur og sammenholde dette med den forudsatte udstøbningstemperatur.

Betonrecept Det undersøges om den leverede betons recept svarer til den beton som er forudsat i planlægningen

Vejr forhold Sjældent vil vejret på støbedagen være som antaget under planlægningen. Under planlægningen kan der tages hensyn til en typisk vejrsituation med typiske afvigelser i den pågældende støbeperiode. Afviger vejret væsentligt fra det forventede kan dette være årsagen til afvigelser mellem målte og beregnede værdier af temperaturen.

Jordens termiske egenskaber Såfremt underlaget (jorden) indgår i temperaturberegningen kan den nedgravede termofølers temperaturforløb sammenlignes med det beregnede. Jordens vandmætningsgrad og sammensætning har dog stor indflydelse på de termiske egenskaber (varmefylde og varmeledningsevne), hvorfor de faktiske egenskaber kan afvige betydeligt fra de antagne. Ved at variere på jordens termiske egenskaber i en beregning kan det konstateres, om dette kan forklare den observerede afvigelse.

Kølevands-temperatur/ varmetråds-effekt Det undersøges om observerede kølevandstemperaturer (ind- og udløb) og vandføringer svarer til det planlagte. Varmetrådes faktiske modstand kan måles vha. et Ohm-meter og effekten beregnes og sammenlignes med den værdi, der er anvendt ved planlægningen.

Generelt Såfremt der viser sig afvigelser på et eller flere af ovennævnte punkter må der foretages en revurdering ved hjælp af en ny beregning baseret på de reviderede forudsætninger. Hvis en sådan opdateret beregning ikke giver overensstemmelse mellem målinger og beregninger kan forklaringen søges i:

Overflade-transmis-sionskoef-ficienter Betonoverfladernes transmissionskoefficienter antages normalt udfra nogle erfaringstal, der tager hensyn til vindhastigheden omkring formen eller frie overflader. I den faktiske støbesituation kan nogle betonflader være i læ og andre kan være udsat for væsentligt større vindhastigheder grundet turbulens eller blot kraftigere vind end antaget under planlægningen. Ligeledes som for jordens egenskaber, må det i det enkelte tilfælde vurderes om betonoverfladernes egenskaber kan forklare den observerede afvigelse.

Solindfald Er der observeret større temperaturer end forventet i en støbning, så kan solindfald i visse tilfælde være årsagen hertil. I det enkelte tilfælde må det vurderes om solindfaldet kan forårsage den observerede forskel. Konstruktionens orientering i forhold til solen, fladernes vinkel i forhold til solens placering både lodret og vandret har indflydelse på solens bidrag til ekstra opvarmning af betonen. Solindfaldet er også afhængigt af årstiden samt de varmeoptagne fladers struktur og farve. Solindfaldet afhænger også af skydækket i den periode, der betragtes.

Unøjagtighed ved beregning For Finite Element Metoden (FEM) gælder, at den beregnede løsnings nøjagtighed er afhængig af elementnettets finhed. Dette betyder at en "korrekt" løsning først er opnået når en forfining af elementnettet ikke ændrer på resultat. Det bør undersøges om de elementnet, der er anvendt i beregningen er fine nok.

6.2 Afvigelser i form af revner

Afvigelse i form af revnedannelse eller øgede revnevidder kan skyldes afvigelse i temperaturforløb jvf. afsnit 6.1. Såfremt overskridelse af temperaturkravene ikke kan forklare utilsigtet revnedannelse er de anvendte temperaturkrav utilstrækkelige og bør revurderes jvf. [HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning].

7. LITTERATUR

Beton-Teknik, 4/04/1975. "Temperatur-måling i beton".

"HETEK - Efterbehandling - Anvisning", Vejdirektoratet, Rapport nr. 103, 1997.

"HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning", Vejdirektoratet, Rapport nr. 119, 1997.

Spange, H. og Pedersen, E.S: "HETEK - Styring af revner i ung beton - Hovedrapport", Vejdirektoratet, Rapport nr. 117, 1997.

Vinterstøbning af beton. SBI Anvisning 125, 1985.

BILAG A ISOLERINGSEVNE

Transmissionskoefficienten for en vindpåvirket flade kan beregnes af:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_k} + \left(\frac{e}{\lambda} \right)_i + \left(\frac{e}{\lambda} \right)_f \right)^{-1} \quad [\mathrm{kJ/m^2/h/^\circ C}]$$

med

$$\alpha_k = 20 + 14 \cdot v \qquad v \leq 5 \text{ m/s}$$

$$\alpha_k = 25.6 \cdot v^{0.78} \qquad v > 5 \text{ m/s}$$

hvor

e	er tykkelsen af hhv. isolering og form [m]
λ	er varmeledningstal for hhv. isolering og form [kJ/m/h/°C]
v	er vindhastigheden [m/s]

For kølerør kan der ved turbulent strømning ses bort fra overgangsmodstanden imellem kølevand og rørvæg. Kølerørets transmissionskoefficient kan da bestemmes som:

$$\alpha = \frac{\lambda}{e} \quad [\mathrm{kJ/m^2/h/^\circ C}]$$

hvor

e	er kølerørets godstykkelse [m]
λ	er varmeledningstallet for rørmaterialet [kJ/m/h/°C]

I tabel A.1 er angivet varmeledningstal og transmissionskoefficienter for en række materialer.

Materiale	Varmeled-ningstal [kJ/m/h/°C]	Transmissionskoefficient [kJ/m²/h/°C]		
		v= 0 m/s	v= 5 m/s	v= 10 m/s
PEL-kølerør (plast)	1.152	-	-	-
Presenning (alfa= 24,8)*	*	11.1	19.4	21.4
Vintermåtte 1 x 55 mm	0.174	2.7	3.1	3.1
Vintermåtte 2 x 55 mm	0.174	1.5	1.6	1.6
Vintermåtte 3 x 55 mm	0.174	1.0	1.0	1.0
Dow-måtte 1 x 10 mm	0.144	8.3	12.4	13.2
Dow-måtte 2 x 10 mm	0.144	5.3	6.7	6.9
Dow-måtte 3 x 10 mm	0.144	3.9	4.6	4.7
Plastikfolie med punkt-kontakt	-	28.0	57.4	75.0
Plastikfolie med 5 mm luftrum	-	17.8	25.0	28.0
Systemforskalling 18 mm plywood	0.5	11.6	21.2	23.5
Bræddeforskalling 32 mm	0.43	10.7	13.3	14.2
Systemforskalling 18 mm plywood + 55 mm vinter-måtte	0.5 + 0.174	2.5	2.8	2.8
10-30 mm vandfilm på betonoverflade	-	50-> 70	-	-
Sprinklet vand på betono-verflade	-	200	-	-
6-8 mm stålform	200	20.0	90.0	153.4
Ubeskyttet betonoverflade	-	20.0	90.0	153.4

Tabel A.1. Varmeledningsevne og transmissionskoefficient

BILAG B KLIMAFORHOLD I DAMNARK

Tabel B.1 viser klimaforholdene i årets enkelte måneder for Danmark, Færøerne og Grønland. Ved henvendelse til Meteorologisk Institut i København kan der fremskaffes mere detaljerede klimadata for en række lokalieter her i landet. Tabellen er taget fra SBI Anvisning 125.

Danmark	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Absolut max. temperatur [1] ..... °C	11.8	15.5	21.2	28.2	32.8	35.5	35.3	36.4	32.3	24.1	18.5	14.5
Måneds-max.temperatur [2] ..... °C	6.8	6.7	10.7	16.5	23.6	26.0	26.9	24.8	21.5	16.4	10.9	8.2
Døgn-middel-max.temperatur [3] ... °C	2.0	2.2	5.0	10.2	15.7	19.0	21.1	20.6	17.2	12.0	7.2	4.1
Middeltemperatur [3] ..... °C	-0.1	-0.4	1.7	6.2	11.1	14.5	16.6	16.3	13.1	8.7	4.9	2.2
Døgn-middel-min.temperatur [3] ... °C	-2.4	-3.0	-1.3	2.4	6.3	9.7	12.2	12.2	9.7	5.9	2.6	0.1
Måneds-min.temperatur [2] ..... °C	-9.9	-10.0	-7.2	-3.0	0.5	4.5	7.3	7.0	2.9	-1.4	-5.2	-8.3
Absolut min.temperatur [1] ..... °C	-31.0	-29.0	-27.0	-19.0	-8.0	-3.5	-0.9	-2.0	-5.6	-11.9	-21.3	-24.4
Antal sommerdage i måneden [4] ,max. > 25°C	-	-	-	-	0.6	2.1	3.8	3.4	0.3	-	-	-
Antal isdøgn i måneden [4] , max. < 0 °C	8.9	8.5	2.8	0.0	-	-	-	-	-	-	0.1	2.8
Antal frostdøgn i måneden [3], min. < 0 °C	21.0	19.0	19.0	6.0	1.0	0.0	-	-	0.1	2.0	6.1	14.0
Antal blæstdøgn [4], vindstyrke ≤6m/s	5.0	3.9	4.6	4.0	3.0	2.6	2.2	2.5	2.8	3.4	4.2	4.3
Middelvindstyrke [5], 0-12	4.0	3.7	3.8	3.4	3.0	3.2	3.3	3.5	4.4	3.8	4.5	4.2
Færøerne	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Middeltemperatur [6] ..... °C	3.4	2.2	2.8	4.6	6.5	9.7	10.3	10.7	9.5	7.0	4.2	3.6
Grønland	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Middeltemperatur [7], Angmagssalik °C	-7.6	-8.5	-10.9	-5.3	0.9	4.5	5.8	5.6	3.4	-2.2	-4.6	-7.7
Middeltemperatur [7], Prins Christians Sund ..... °C	-2.7	-4.1	-4.4	-1.7	1.9	3.8	5.9	6.3	4.2	0.8	-1.1	-2.4
Middeltemperatur [7] ,Egedesminde .. °C	-12.5	-13.4	-17.0	-9.6	-1.3	2.5	5.8	5.2	2.3	-2.3	-5.9	-9.5

Tabel B.1. Klimaforhold for Danmark, Færøerne og Grønland, efter statisisk årbog 1971.
1) Perioden 1874-1971, 2) gennemsnit for perioden 1886-1925,
3) gennemsnit for perioden 1931-1960, 4) gennemsnit for perioden 1938-1960,
5) 1978, 6) Perioden 1966-1970, 7) Perioden 1967-1970.