HETEK

Styring af revner i ung beton
Anvisning

Rapport nr. 119
1997

Vejdirektoratet

IRRD Information

Title in English	HETEK - Control of Early Age Cracking - Guidelines
Title in Danish	HETEK - Styring af revner i ung beton - 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	Stress Analysis	5573
Creep	4732	Thermal analysis	7152
Cracking	5211	Stress (in material)	5575
Modulus of Elasticity	5919	Temperature	6722
Specifications	0147	Surveillance	9101
Heat	6743	Tension	5502
Development	9013	Strength (mater)	5544
Material (constr)	4555	Expansion	6720
Numerical	6432	Coefficient	5504
Properties	5925	Research Project	8557
Shrinkage	4743	Denmark	8028

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.

This guideline points out how concrete structures can be designed and builded without harmful formation of cracks during the hardening process.

UDK	691.32, 620.191.33
ISSN	0909-4288
ISBN	877491 8346

Indholdsfortegnelse

0. Forord 1

1.0 Indledning 3

2.0 Baggrund 5
2.1 Sammenstøbning - Gennemgående revner 5
2.2 Lokale spændingsbidrag - Overfladerevner 7
2.3 Beregningsmodeller til bestemmelse af revnerisiko 9
2.4 Temperaturberegning 10
2.5 Spændingsberegning 11

3.0 Konstruktionsudformning 13
3.1 Dilatationsfuger 13
3.2 Støbeskel 13
3.3 Revnevidde/minimumsarmering 14

4.0 Betonegenskaber 15
4.1 Modenhed 16
4.2 Adiabatisk varmeudvikling 17
4.3 Varmefylde og densitet 19
4.4 Varmeledningsevne 20
4.5 Temperaturudvidelseskoefficient, E- modul og trækstyrke 20
4.6 Elastisk Poisson-forhold 23
4.7 Autogent svind 23
4.8 Krybning 24

5.0 Planlægning af udførelsen 28
5.1 Strategier for styring af revnedannelse 28
5.1.1 Reduktion af risiko for gennemgående revner 30
5.1.2 Reduktion af risiko for overfladerevner 31
5.2 Prøvning af betonens egenskaber 31
5.3 Planlægning baseret på beregning af hærdeforløbet 32
5.3.1 Planlægning af udførelsen 32
5.3.2 Støbeform 32
5.3.2.1 Overflade / æstetik 33
5.3.2.2 Geometri 33
5.3.2.3 Isoleringseffekt 33
5.3.2.4 Formens farve 34
5.3.3 Isolering 35
5.3.3.1 Isolering af fri betonoverflader 35
5.3.3.2 Isolering af forme 35
5.3.3.3 Isolering af afformede flader 35
5.3.4 Betonens udstøbningstemperatur 36
5.3.5 Opvarmning 37
5.3.5.1 Varmekabler/-tråde 38

5.3.6 Køling 39
5.3.7 Klimaforhold 42
5.3.8 Modellering af understøtningsbetingelserne 43
5.4 Forprøvning af udførelsen 45

6.0 Dokumentation 46
6.1 Planlægning 46
6.1.1 Temperaturberegning 46
6.1.2 Spændingsberegning 47
6.1.3 Revneviddeberegning 47
6.1.4 Detaljeret arbejdsbeskrivelse 47
6.1.5 Dokumentation af temperaturer under udførelsen 48
6.1.5.1 Termofølere i konstruktioner uden kølerør/varmetråde 49
6.1.5.2 Termofølere i konstruktioner med kølerør/varmetråde 50
6.2 Registreringer under hærdeforløb (logbog) 51
6.3 Evaluering 52
6.3.1 Målte temperaturer 52
6.3.1.1 Temperaturforskel i hærdende konstruktion uden kølerør/varmetråde 52
6.3.1.2 Temperaturforskel i hærdende konstruktion med kølerør/varmetråde 52
6.3.1.3 Indbyrdes temperaturforskel mellem konstruktionsdele 53
6.3.2 Revneregistrering 56
6.3.3 Afvigelser 56
6.4 Måleudstyr 58

7.0 Krav vedr. hærderelaterede revner 60
7.1 I hvilke konstruktioner optræder hærderevner? 60
7.2 Hvilket krav bør stilles ? 60
7.3 Krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse 61
7.3.1 Direkte krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse 61
7.3.2 Krav til spændingsberegning 62
7.3.3 Krav til dokumentation 62
7.3.4 Krav i forbindelse med afvigelser 63
7.3.5 Krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse repræsenteret ved temperatur-krav 63
7.4 Formulering af temperatur-krav 63
7.4.1 Krav til ydre temperaturforskel, D_{ydre} 63
7.4.2 Krav til indre temperaturforskel, D_{indre} 64
7.4.3 Krav til temperaturberegning 64
7.4.4 Krav til dokumentation 65
7.4.5 Krav i forbindelse med afvigelser 65
7.5 Revneviddekrav 66
7.5.1 Direkte revneviddekrav 66
7.5.2 Krav til revneviddeberegning 66
7.5.3 Krav til dokumentation 66
7.5.4 Krav i forbindelse med afvigelser 66
7.5.5 Revneviddekrav repræsenteret ved temperatur-krav 66

7.6 Økonomi 67

8.0 Eksempel på beregning af hærdeforløbet 68
8.1 Beregningsforudsætninger 68
8.2 Indledende beregning uden hærdemæssige foranstaltninger 70
8.2.1 Temperaturberegning 70
8.2.2 Spændingsberegning - tværsnittet tillades at krumme frit 72
8.2.3 Spændingsberegning - tværsnittet fastholdes mod krumning 77
8.3 Beregning med hærdemæssige foranstaltninger 80
8.3.1 Hærdemæssige foranstaltninger 80
8.3.2 Resultater 80
8.3.3 Alternativ beton 82

9.0 Litteratur 85

Bilag

A Isoleringsevne

B Klimaforhold i Danmark

0. Forord

Dette projekt vedr. styring af revner i ung beton er en del af Vejdirektoratets udviklingsprogram Højkvalitetsbeton - Entreprenørens Teknologi, forkortet til HETEK.

Højkvalitetsbeton er beton med en funktionsmæssig levetid på mindst 100 år i ekstra aggressivt miljø.

Dette udviklingsprogram inkluderer undersøgelser vedrørende entreprenørens oplæg til højkvalitetsbeton og udførelse af betonarbejde med reference til at opnå den krævede funktionsmæssige levetid på 100 år.

Dette udviklingsprogram er opdelt i 7 delopgaver indenfor de følgende emner:

- Chloridmodstandsevne
- Frostbestandighed
- Styring af revner i ung beton
- Komprimering
- Efterbehandling (udtørringsbeskyttelse)
- Prøvestøbning
- Reparationer i udførelsesfasen

Vejdirektoratet har indhentet tilbud til dette udviklingsprojekt, hvilket primært er finansieret af Erhvervsministeriet.

Nærværende anvisning vedrører styring af revner i ung beton.

Af holdbarhedsmæssige hensyn skal armeringen i betonkonstruktioner være beskyttet mod indtrængende vand og chlorider. Derfor skal revnevidder begrænses eller revner helt undgås. Revnedannelse kan ske allerede under hærdeprocessen. En vurdering af risikoen for revnedannelse kan foretages vha. spændingsberegninger. I en sådan spændingsberegning består lasten af forskelle i temperaturbevægelser hidrørende fra betonens varmeudvikling. I modsætning til sædvanlige spændingsberegninger ændrer de mekaniske egenskaber (inklusive autogent svind) sig under hærdeprocessen. Hvis en spændingsberegning viser, at der er høje spændinger i forhold til betonens trækstyrke, er der en stor risiko for revner.

Formålet med denne anvisning er at medvirke til, at der kan opføres konstruktioner med tilfredsstillende holdbarhed, funktionsdygtighed og udseende, dvs. konstruktioner, hvor revnedannelsen er styret, dvs. begrænset eller hvis det ønskes - undgået.

Anvisningen vejleder:

- bygherren i at opstille relevante krav ved udarbejdelse af specifikationer (kap. 7)
- den projekterende i at overveje risikoen for hærderelaterede revner i designfasen (kap. 3)

- entreprenøren i at styre revnedannelse gennem planlægning og valg af udførelsesmetode (kap. 5) og dokumentere hærdeforløbet (kap. 6)

Gennem en indsats på ovennævnte 3 områder kan konstruktioner opføres med en tilstrækkelig, men ikke unødvendig, høj sikkerhed mod skadelig revnedannelse. Dette vil resultere i, totaløkonomisk set, lave omkostninger til etablering, vedligehold og reparation.

Kapitlerne 1 og 2 beskriver baggrunden for hærdeproblematikken, mens kapitel 4 beskriver materialeegenskaber.

Idet kapitlerne kan læses uafhængigt af hinanden, forekommer gentagelser i enkelte tilfælde.

Projektet er udført af et konsortium bestående af:

Dansk Betoninstitut repræsenteret af:

Højgaard & Schultz A/S
Monberg & Thorsen A/S
RAMBØLL
COWI

og

Dansk Teknologisk Institut, repræsenteret af Betoncentret

og

Danmarks Tekniske Universitet, repræsenteret af Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer.

To eksterne konsulenter, professor Per Freiesleben Hansen og afdelingsleder Jens Frandsen er tilknyttet konsortiet.

1.0 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.

Dette fænomen er hidtil søgt begrænset ved at kræve, at der ikke må optræde for store temperaturforskelle under hærdeprocessen.

Kravene omfatter:

- den maksimale temperaturforskel, der må optræde mellem en konstruktions indre og overfladerne
- den maksimale forskel, der må optræde mellem to sammenstøbte konstruktionsdeles respektive middeltemperaturer

Umiddelbart virker temperaturkravene nemme at anvende, men i praksis er det forbundet med en vis usikkerhed, at fastlægge hvor store dele af en konstruktionsdel, der skal medtages i fastlæggelsen af middeltemperaturer.

Krav til maksimale temperaturforskelle tager ikke hensyn til graden af samvirkning med andre konstruktionsdele (herunder underlaget). Der tages heller ikke hensyn til de mekaniske materialeegenskabers udviklingstakt for den aktuelle beton.

Et generelt temperaturkrav er derfor ikke altid hensigtsmæssigt. For nogle konstruktioner vil temperaturkravet føre til unødvendige foranstaltninger, og for andre til for stor revnerisiko. Skal en konstruktions revnerisiko vurderes realistisk, er det nødvendigt at udføre spændingsberegninger. En spændingsberegning viser, om spændingen på noget tidspunkt overskrider betonens trækstyrke og derved skaber revnedannelse.

Udover temperaturbevægelser bidrager også betonens svind til risikoen for revnedannelse. Svindet kan opdeles i:

- udtørringssvind pga. udveksling af fugt med omgivelserne
- autogent svind, som foregår uden udveksling af fugt med omgivelserne.

Udtørringssvindet kan udskydes ved at efterbehandle som beskrevet i anvisningen for efterbehandling [HETEK-Efterbehandling,1997], mens det autogene svind kun kan styres gennem valg af beton-sammensætning.

Når udtørringssvindet udskydes vha. efterbehandling har det ingen indflydelse på revnerisikoen i forbindelse med hærdeprocessen. Derfor beskæftiger nærværende anvisning sig alene med styring af revnedannelse forårsaget af temperaturbevægelser og autogent svind.

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].

2.0 Baggrund

På grund af temperatur- og svindbevægelser skabes der i hærdnende betonkonstruktioner en 3-dimensional spændingstilstand.

Spændingstilstanden kan typisk opfattes som bestående af to bidrag :

- spændinger pga. temperatur- og svindbevægelser i forhold til andre konstruktionsdele (herunder underlaget)
- spændinger pga. forskelle i temperatur- og svindbevægelser mellem konstruktionens indre og overfladerne.

I praksis ses begge bidrag i de samme konstruktioner, hvor de forårsager revnerisiko på forskellige tidspunkter. Størst risiko for overfladerevner haves, på det tidspunkt hvor temperaturen er maksimal, mens risikoen for gennemgående revner er størst efter afkølingen. Disse spændingstilstande er beskrevet i de to følgende afsnit.

2.1 Sammenstøbning - Gennemgående revner

Spændinger, som opstår pga. differensbevægelser mellem sammenstøbte konstruktionsdele, er vist i figur 2.1d. En betonstang tænkes udstøbt mellem to tilstødende hærdnede konstruktioner. Fra begyndelsen er beton en væske, men efterhånden som hærdeprocessen forløber, udvikles stivhed (fig. 2.1 c).

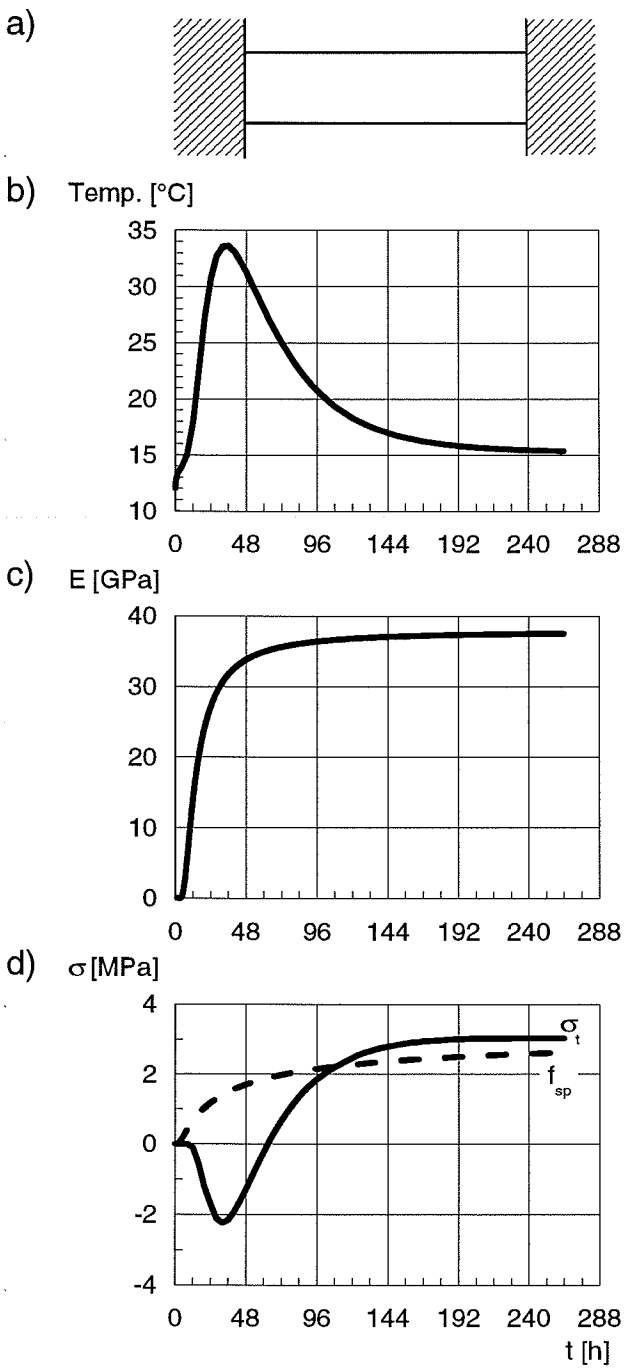
Samtidigt udvikles varme, hvilket resulterer i en temperaturstigning (fig. 2.1 b). Temperaturstigningen medfører en længdeudvidelse af stangen, men da de tilstødende konstruktioner forhindrer udvidelsen opstår der trykspændinger (fig. 2.1 d) i betonstangen.

Når temperaturen begynder at falde, trækker stangen sig sammen, og da stivheden i afkølingsfasen er langt større end i opvarmningsfasen (fig. 2.1 c), er stangen trækpåvirket, når hærdeprocessen er afsluttet.

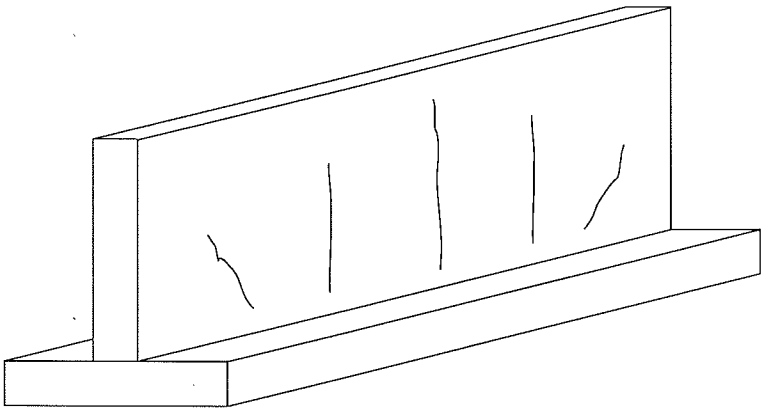
Spændingsniveauet på dette tidspunkt afhænger af:

- temperaturstigningen
- udviklingstakten af stivheden (herunder svind og krybning)
- stivhedsforholdet mellem stangen og de tilstødende konstruktioner.

Hvis trækspændingen overskrider trækstyrken, som også udvikles under hærdeprocessen, fås revnedannelse.



Figur 2.1: Udvikling af spændinger i beton udstøbt mellem to stive konstruktioner.



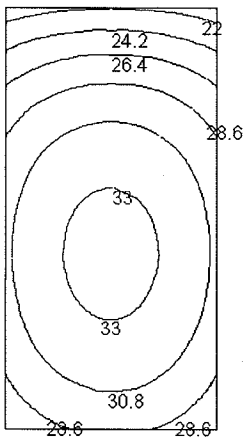
Figur 2.2: Væg støbt på bundplade

Revner, som er dannet i afkølingsfasen, vil ofte være gennemgående, og de vil forblive åbne. Denne type revner ses f.eks. ved påstøbning af væg på en tidligere udstøbt bundplade som vist i fig. 2.2.

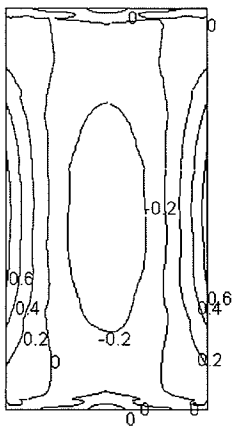
Denne revnetype er traditionelt søgt undgået eller reduceret ved at begrænse forskellen i middeltemperatur mellem tilstødende konstruktioner, i det følgende betegnet D_{ydre}.

2.2 Lokale spændingsbidrag - Overfladerevner

På grund af forskelle i temperatur- og svindbevægelser mellem det indre af en betonkonstruktion og dens overflader opstår der også spændinger i tværsnittets plan. Figur 2.3 viser temperaturfordelingen i tværsnittet for stangen fra figur 2.1, til det tidspunkt, hvor temperaturen er maksimal. Den indre del af tværsnittet får en større temperaturstigning og derved en større termisk udvidelse end overfladerne. Herved skabes en egenspændingstilstand, hvor det indre af tværsnittet er i tryk, mens overfladerne trækpåvirkes. På figur 2.4 er vist, hvorledes den lodrette spændingskomposant er fordelt til tidspunktet, hvor temperaturen er maksimal.

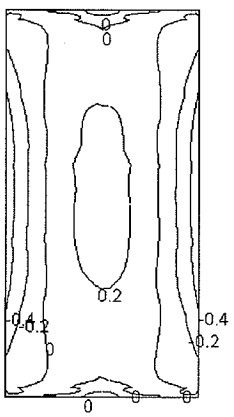


Figur 2.3: Temperaturfordeling til tiden med maksimal temperatur [°C].



Figur 2.4: Fordeling af den lodrette spændingskomposant til tiden med maksimal temperatur [MPa].

Hvis temperaturforskellen mellem det indre af tværsnittet og overfladen bliver for stor, fås revnedannelser i overfladen. Disse revner vil lukke sig, når temperaturprofilet udjævnes i afkølingsfasen. På dette tidspunkt bliver overfladerne trykpåvirkede, idet den største termiske sammentrækning er sket i tværsnittets indre, som herved bliver trækpåvirket (se fig. 2.5).



Figur 2.5: Fordeling af den lodrette spændingskomposant efter hærdeperioden [MPa].

Spændingsniveauet afhænger af:

- temperatur-profilet
- udviklingstakten af betonens mekaniske egenskaber, herunder autogent svind
- tværsnitsgeometrien.

Normalt lukker overfladerevner sig og bliver svære at lokalisere ved inspektion af betonoverfladen, men der er skabt adgangsvej for vand og klorider gennem dæklaget. Fugt- og temperaturbevægelser senere i konstruktionens levetid vil kunne øge risikoen for indtrængning gennem overfladerevnerne.

Denne revnetype er traditionelt søgt undgået eller reduceret ved at begrænse forskellen mellem tværsnittets middeltemperatur og overfladetemperaturen, i det følgende betegnet D_{indre}.

2.3 Beregningsmodeller til bestemmelse af revnerisiko

Revnerisikoen bestemmes i praksis som forholdet mellem maksimal trækhovedspænding og et mål for betonens aktuelle trækstyrke. Beregningen af trækhovedspændingen kræver i praksis brug af EDB-værktøjer. I vurderingen af revnerisikoen indgår:

- en beregning, som fastlægger temperaturforløbet i hærdefasen for ethvert punkt i konstruktionen
- en beregning af spændingsforløbet i ethvert punkt som funktion af temperaturbevægelser, mekaniske egenskaber (inkl. autogent svind), understøtningsforhold m.m.
- en model for, hvordan betonens mekaniske egenskaber (stivhed, styrke m.m.) udvikler sig i løbet af hærdeprocessen

Temperaturforløbet kan i en vis grad styres af entreprenøren gennem valg af udførelsesmetode. Disse temperaturforløb fastlægger dels temperaturbevægelserne og dels "udviklingsniveauet" (modenheden) for betonens mekaniske egenskaber.

Revnerisikoen vurderes ved at sammenligne de beregnede trækspændinger med betonens trækstyrke. I praksis anvendes spaltetrækstyrken, da den er nem at fastlægge ved prøvning. Observationer på en række af konstruktioner har vist, at der er risiko for gennemgående revner , jvf. afsn. 2.1, når de beregnede trækspændinger overstiger ca. 80% af spaltetrækstyrken (efter [DS423.34]), mens der sjældent observeres revner under dette niveau [Pedersen,E.J., 1997].

2.4 Temperaturberegning

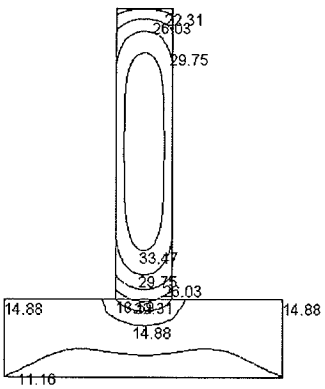
I en hærdnende betonkonstruktion er temperaturfordelingen samt dennes variation i tiden er bestemmende for:

- temperaturbevægelserne
- udviklingstakten af de mekaniske egenskaber herunder det autogene svind.

Temperaturhistorien bestemmes normalt ved en indledende analyse, hvorefter resultatet udnyttes i den egentlige spændingsberegning. Temperaturen bestemmes ved løsning af varmeledningsligningen. Heri indgår:

- betonens udstøbningstemperatur
- betonens varmeudvikling
- betonens varmefylde, varmeledningsevne, densitet
- de termiske randbetingelser i form af konvektion, stråling, kølerør, varmetråde etc.
- konstruktionens geometri.
- eventuelle nabokonstruktioners geometri og temperatur.

Temperatur-fordelingen i hærdnende beton er 1,2 eller 3-dimensional afhængig af geometri og randbetingelser. I konstruktionen i figur 2.2 haves en 3-dimensional temperaturfordeling i endezonerne, da der afgives energi ved endefladerne. Imellem endezonerne haves en 2-dimensional temperaturfordeling som vist i figur 2.6. I jo højere grad endefladerne isoleres desto kortere bliver endezonerne med 3-dimensionale temperaturfordelinger. Ofte bestemmes kun 2-dimensionale temperaturfordelinger ved praktiske opgaver.



Figur 2.6: Væg støbt på gammelt fundament. 2-dimensional temperaturfordeling [°C].

Normalt anvendes computerprogrammer til numerisk løsning, idet herved både det ikke-stationære (tidsvarierende) forløb samt en 2- eller 3-dimensional temperaturfordeling kan beskrives. En ikke-stationær analyse er i princippet en række stationære

analyser, hvor begyndelsesbetingelsen i et givet tidsinterval er resultatet af beregningen af det forudgående tidsinterval.

Da varmeudviklingen samt strålingsrandbetingelser gør problemet ulineært, er det nødvendigt at iterere i de enkelte tidsintervaller. Beregning af en temperaturfordeling er dog langt mindre ressourcekrævende end spændingsberegninger.

I temperaturberegninger forudsættes sædvanligvis, at fugttransport til omgivelserne er forhindret, idet der ikke tages hensyn til fugtprofiler.

2.5 Spændingsberegning

Da der ved spændingsopbygningen (se f.eks. figur 2.1d) indgår en ikke-stationær (tidsvarierende) temperaturtøjning og materialeegenskaber, der afhænger af temperatur- og spændingshistorien, må spændingsanalysen være inkremental. Dette betyder, at hærdeperioden opdeles i et antal tidsintervaller og det antages, at betonens egenskaber er konstante inden for hvert tidsinterval. Den inkrementale analyse udføres ved at foretage en i princippet stationær analyse i hvert tidsinterval. Analysens begyndelsesbetingelse i det enkelte interval er resultatet af analysen i det forudgående tidsinterval.

Under hærdeprocessen optræder tøjninger fra:

- udtørringssvind
- autogent svind
- termisk ekspansion/kontraktion
- krybning
- revnedannelse

Udtørringssvind kan på kort sigt give anledning til svindtøjninger i overfladerne. I den periode, hvor der er den største risiko for overfladerevner (opvarmningsfasen), foretages normalt en efterbehandling, som udskyder udtørringen. Risikoen for gennemgående revner senere i hærdeforløbet, regnes upåvirket af, at der sker en langsom udtørring af overfladerne. Derfor ses normalt bort fra udtørringssvind i praktiske beregninger.

De materialeegenskaber som er bestemmende for de øvrige tøjningsbidrag er afhængige af betonens "udviklingsniveau" (modenhed). Derudover kan være en vis afhængighed af det absolutte temperatur- og spændingsniveau som beskrevet i State-of-the-Art-rapporten [Pedersen et al.,1996]. Til brug for praktiske beregninger kan anvendes materialemodeller som angivet i kap. 4. Heri er alle egenskaber konstante eller funktioner af modenheden.

I praksis foretages ikke spændingsberegninger hvori der tages hensyn til revnedannelse. For at kunne beskrive revnevidder og revneafstande kræves en 3-dimensional brudmekanisk analyse, som er for tidskrævende til praktisk brug. Desuden haves ingen klar sammenhæng mellem revnevidde og mangel på holdbarhed.

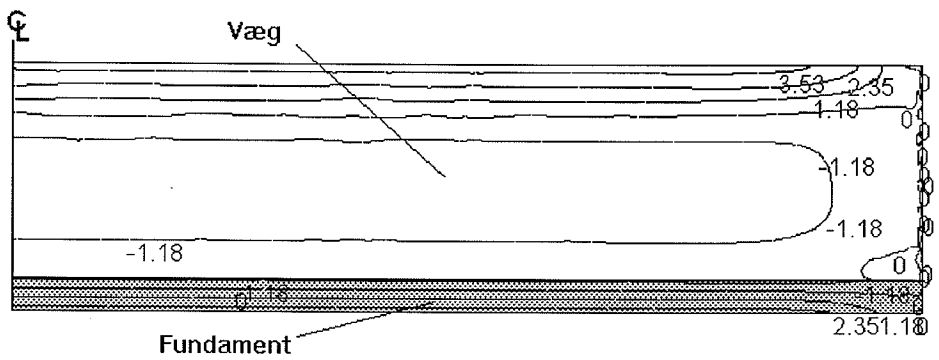
De omfattende beregninger (mange tidsintervaller, iteration i hvert tidsinterval) nødvendiggør brug af computerprogrammer. Der findes en række kommercielle programmer, som er i stand til at foretage en ikke-stationær spændingsberegning under hensyn til temperatur- og egenskabshistorien.

Afhængigt af program kan der regnes i henholdsvis 1, 2 eller 3 dimensioner. 3-dimensionale analyser kan selvfølgelig beskrive vilkårlige spændingsfelter, men resulterer i meget lange regnetider. Ofte kan spændingstilstande beskrives ved hjælp af enklere midler ved at foretage en række tilnærmelser.

Et klassisk sammenstøbningsproblem, hvor en væg udstøbes på et hærdnet fundament, er vist i figur 2.7. I praksis kan observeres gennemgående revner i væggen, som skyldes forskelle i temperaturbevægelser mellem væg og bundplade, jvf. afsnit 2.1. Studier med 3-dimensionale analyser viser, at spændingstilstanden ikke ændrer sig fra tværsnit til tværsnit, når området mellem endezonerne betragtes. Da normalspændingerne (σ_z) på endetværsnittene er nul, omsættes normalspændingerne i mellemzonen til forskydningsspændinger i endezonerne (figur 2.7).

I mellemzonen, hvor der ikke optræder forskydningsdeformationer, kan det derfor antages, at plane tværsnit forbliver plane. Dermed kan normalspændingsfordelingen hen over tværsnittet bestemmes ved en ikke-stationær tværsnitsanalyse, hvori indgår egentøjninger og materialeegenskaber, jvf. ovenstående. Denne metode udnyttes i flere kommercielle computerprogrammer.

I de betragtede tværsnit forekommer også spændinger i tværsnittets plan fra temperaturforskelle mellem midte og rand (jvf. afsnit 2.2) og pga. betonens tværkontraktion (Poisson's forhold) er der en kobling mellem disse spændinger og normalspændingen σ_z. Når denne effekt medtages i ovennævnte tværsnitsanalyse fås samme resultat som ved en fuld 3-dimensional analyse, når mellemzonen betragtes.



Figur 2.7: Iso-kurver for den langsgående spændingskomposant σ_z [MPa]

I korte konstruktioner, hvor der ikke opbygges en mellemzone uden forskydningsdeformationer, vil antagelsen om, at plane tværsnit forbliver plane, medføre en overvurdering af spændingsniveauet. I denne situation må foretages en 3-dimensional beregning for at tage hensyn til forskydningsdeformationens aflastende virkning på egenspændingstilstanden.

3.0 Konstruktionsudformning

Allerede i forbindelse med projekteringen skal der træffes en række valg, der har betydning for, hvorledes konstruktionen skal udføres for at undgå revnedannelse som følge af hærdningen. En række spørgsmål skal afklares som f.eks.:

- Skal der være dilatationsfuger?
- Hvor skal støbeskellene placeres?
- Hvor meget armering skal der ilægges af hensyn til revnefordeling ?

En uhensigtsmæssig konstruktionsudformning kan betyde, at konstruktionen ikke - eller kun vanskeligt - lader sig udføre uden hærderevner. Det bør derfor tilstræbes, at konstruktionen udføres således, at temperatur- og svindbevægelser kan foregå uden, at der opstår skadelige tvangskræfter.

3.1 Dilatationsfuger

I jo højere grad konstruktionen udformes så temperatur- og svindbevægelser ikke kan finde sted, desto sværere vil konstruktionen være at udføre uden hærderevner.

Eksempel 3.1

Som et eksempel betragtes en lang tunnel, der typisk opdeles i en række sektioner. Ved at indlægge dilatationsfuger mellem sektionerne, fremfor direkte sammenstøbning, opnås en øget mulighed for at temperaturbevægelser frit kan finde sted. Herved reduceres risikoen for gennemgående revner i væggene i afkølingsfasen. Hvis der kun indlægges fuger i vægge og dæk, men ikke i fundamentet, vil risikoen for revner i væggene øges i forhold til, hvis der også indlægges fuger i fundamentet. Dette skyldes, at det lange fundament i højere grad vil forhindre væggenes og dækkets temperatur- og svindbevægelser.

Erfaringsmæssigt er det vanskeligt at udføre dilatationsfuger korrekt, hvilket afstedkommer, at skader oftere udvikler sig ved dilatationsfuger end ved støbeskel eller ved hærde-/svind relaterede revner. Omfanget af dilatationsfuger bør altså begrænses til det, der er nødvendigt. Armeringen bør ved dilatationsfuger afsluttes med sædvanligt dæklag.

3.2 Støbeskel

Holdbarhedsmæssigt opfattes støbeskel som et svagt punkt i konstruktionen, og der kan derfor være steder, hvor støbeskel af denne årsag er uønskede. Det kan f.eks. være i

splashzonen (vandlinien) for konstruktioner i marint miljø. Ligeledes kan der være steder, hvor støbeskel er uønskede af æstetiske årsager.

Sædvanligvis foretager entreprenøren planlægningen af støbningen. En parameter heri er støbetakten og dermed placeringen af støbeskel. Hvis der er områder i konstruktionen, hvor der ikke må placeres støbeskel af holdbarhedsmæssige eller æstetiske årsager, kan disse specificeres i udbudsmaterialet. Herved opnås, at entreprenøren kan bestemme den placering af støbeskel, der er optimal af hensyn til udførelsen, og samtidigt tage hensyn til holdbarhed og æstetik.

3.3 Revnevidde/minimumsarmering

Armering forhindrer ikke revner, men virker revnefordelende, således at der fås flere revner med mindre vidde.

Revnevidder og -afstande afhænger af armeringsmængde og -dimension samt påvirkninger i form af:

- temperatur- og svindbevægelser fra hærdeprocessen
- temperatur- og svindbevægelser i brugssituationen
- last fra egenvægt, nyttelast, etc.
- differenssætninger af fundamenter

[BS 8007], [DIN 1045] og [Beton-Teknik, 1981] angiver beregningsmetoder, hvor ovennævnte påvirkninger indgår. Det bør dog understreges, at beregningsmæssig fastlæggelse af revnevidder er forbundet med stor usikkerhed.

4.0 Betonegenskaber

Betons opførsel under hærdning opdeles i en række selvstændige egenskaber, der bestemmes hver for sig ud fra erfaring, ved beregning eller ved prøvning. Når disse egenskaber efterfølgende sættes sammen i en beregning af temperatur- og spændingsforløb, kan opførslen af enhver konstruktion i princippet beskrives. Beskrivelsen af de enkelte egenskaber og eventuelle koblinger mellem dem, skal være tilstrækkeligt detaljeret til, at de ønskede fænomener kan beskrives med tilfredsstillende nøjagtighed uden et unødigt stort prøvningsomfang.

I takt med at beton udvikler sig fra plastisk tilstand til et fuldt hærdnet materiale ændres såvel de termiske som de mekaniske egenskaber. For at kunne planlægge hærdeprocessen ved beregning af temperatur- og spændingsforløb skal de nødvendige egenskaber beskrives fra blandetidspunktet og fremefter i hele hærdeprocessen, jvf. afsnit 2.3.

Følgende betonegenskaber bør anvendes som data ved planlægning af betonarbejder:

Termiske egenskaber
- Adiabatisk varmeudvikling
- Varmefylde
- Densitet
- Varmeledningsevne

Mekaniske egenskaber
- Temperaturudvidelseskoefficient
- E-modul
- Trækstyrke (feks. spaltetrækstyrke)
- Poissonforhold
- Autogent svind
- Krybning

Hvis der kun skal udføres en beregning af temperaturen, er det tilstrækkeligt at kende betonens termiske egenskaber, mens beregning af spændinger kræver både de termiske og mekaniske egenskaber.

Det er væsentligt, at alle relevante betonegenskaber bestemmes på den aktuelle beton, der skal anvendes til støbearbejdet, således at der er sikkerhed for, at det er samme reaktionsforløb som danner grundlag for alle egenskaber. I [Spange og Pedersen, 1996] og i [Riis et al.,1997] er vist to komplette sæt materialeegenskaber for givne betonsammensætninger.

I forbindelse med hærdeberegninger kan man ikke (som feks. ved en bæreevneberegning) afgøre om en given egenskab skal tillægges en stor eller en lille karakteristisk værdi for at være på den sikre side. Derfor beskrives egenskaberne alene ved middel-

værdier således, at det beregnede forløb i videst muligt omfang svarer til det faktisk forekommende.

Da der er en vis spredning på egenskaberne, er der også en vis spredning på de beregnede spændinger. Hvis alle egenskaberne, inklusive trækstyrken, var ukorrelerede ville der opstå revner i 50% af tilfældene, hvis trækstyrken måtte udnyttes 100%. Egenskaberne er dog ikke ukorrelerede, feks. haves et højt E-modul, når styrken er høj. Sikkerheden mod revnedannelse afspejler sig i den udnyttelse af trækstyrken, som kan tillades. En høj udnyttelse medfører, at der vil opstå skader med en vis hyppighed, mens et for lavt niveau medfører, at der foretages unødvendige hærdeforanstaltninger.

Udover prøvning i relation til styring af revnedannelse skal også vises, at den valgte betonsammensætning opfylder de krav, der stilles til bearbejdelighed, udstøbelighed, stabilitet i frisk tilstand, og de krav, som stilles til egenskaberne i den færdige betonkonstruktion.

4.1 Modenhed

Hastigheden af den kemiske reaktion, der forløber mellem vand og cement er afhængig af temperaturen. Jo højere temperatur, jo højere reaktionshastighed. I en hærdnende konstruktion har hvert punkt sin egen temperaturhistorie (se fig.2.3) og dermed sin egen egenskabsudvikling. Det er derfor nødvendigt at definere en parameter, som beskriver, hvor langt den kemiske proces er nået.

Eksempel 4.1

Et mål for hvor langt reaktionsprocessen er nået kan udtrykkes ved "modenheden". Modenheden svarer til det sted i reaktionsforløbet som processen ville være nået til, hvis reaktionen var forløbet ved 20 °C.

I praksis findes modenheden i et punkt ved at inddele temperaturforløbet i punktet i tidsintervaller. Middeltemperaturen i et tidsinterval, Δt, bestemmer intervallets hastighedsfaktor, H, og intervallets bidrag til den samlede modenhed er produktet af tidsintervallets længde og hastighedsfaktoren. Den samlede modenhed M findes som den samlede sum af alle intervallers modenhedsbidrag:

$$M = \Sigma \Delta t \cdot H \qquad [\text{timer ved } 20\,^{\circ}C] \tag{4.1}$$

hvor Δt *er det betragtede tidsinterval*
H *er hastighedsfaktoren i tidsintervallet*

Hastighedsfaktoren til beregning af modenheden er givet ved følgende formel:

$$H = \exp E/R\,[\,1/293 - 1/(273 - \theta)] \tag{4.2}$$

hvor $E = 33500$ *for* $\theta \geq 20\,°C$ *[J/mol]*
$E = 33500 + 1470(20 - \theta)$ *for* $\theta < 20\,°C$ *[J/mol]*
$R = 8.314$ *[J/mol °K]*
θ *er middeltemperatur i det betragtede tidsinterval [°C]*

Hastighedsfaktoren kan desuden aflæses i tabel 4.1.
Hastighedsfaktorens afhængighed af temperaturen er bestemt udfra trykstyrke-udviklinger målt ved forskellige temperatur-niveauer.

Ved praktiske beregninger antages, at der er en entydig sammenhæng mellem hvor langt reaktionen er nået og en konkret egenskabs størrelse.

Ved prøvning fastlægges de forskellige egenskabers udviklingstakt ved laboratorietemperatur og herefter omsættes denne takt til at være en funktion af reaktionsprocessen. Herefter kan egenskaberne udnyttes ved de vilkårlige temperaturforløb, som opleves i virkelige konstruktioner.

°C	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
-10	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13
0	0.15	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.41	0.45
10	0.50	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
20	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5
30	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3
40	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	3.3	3.5
50	3.6	3.7	3.9	4.0	4.2	4.3	4.5	4.7	4.8	5.0
60	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.5	6.7	6.9	7.2

Tabel 4.1: Hastighedsfaktoren ved forskellige temperaturer. Eksempel: Hastighedsfaktoren ved 15 °C aflæses til 0.75.

4.2 Adiabatisk varmeudvikling

Betons varmeudvikling, der er et resultat af cements reaktion med vand, måles som adiabatisk varmeudvikling, dvs. at al varme, der udvikles afsættes som en temperaturstigning i betonen. Da varmeudviklingen i beton afspejler reaktionen mellem cement og vand, vil forløbet være afhængigt både af den valgte cement-type og af mængden af cement og vand. Varmeudviklingen er proportional med det totale pulverindhold (cement+flyveaske+mikrosilica) og afhænger derudover af mængden af vand. Hvis alt vandet forbruges, går reaktionen og dermed varmeudviklingen istå.

Cementtypen bestemmer, hvor hurtigt der udvikles varme, og hvor meget varme der totalt udvikles. Som oftest styres disse egenskaber ved cementens finhed og ved cementsammensætningen. Normalt vil man således kunne vælge mellem hurtigt hærdnende cementer typisk med høj varmeudvikling, og normal eller langsomt hærdnende cementer med moderat til lav varmeudvikling.

Udover at kunne styre varmeudviklingen direkte ved valg af cementtype kan man også påvirke forløbet gennem retarderende eller accelererende tilsætningsstoffer. Ofte vil anvendelsen af plastificerende tilsætningsstoffer kunne give en retarderende bieffekt.

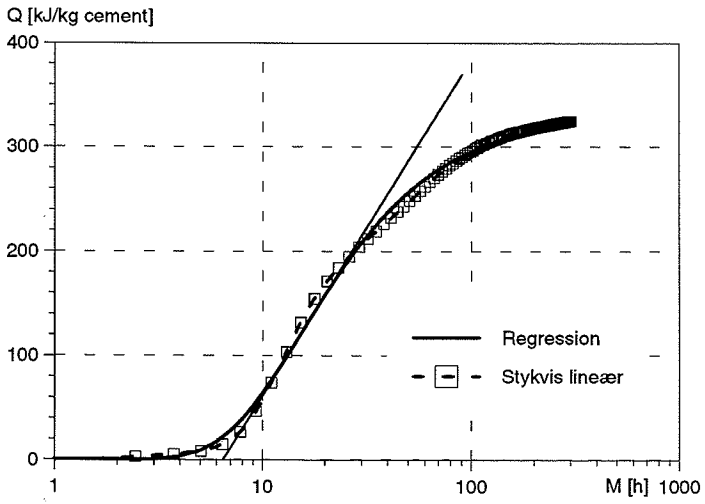
Varmeudvikling kan bestemmes f.eks ved prøvning efter [NT BUILD 388 "Heat development"]. Den udviklede varme er proportional med cementindholdet eller det samlede pulverindhold, hvor der er anvendt mikrosilica og flyveaske. Disse størrelser er givet i betonsammensætningen. Man skal således sikre sig, at der ved beregningen af temperaturforløbet anvendes samme grundlag for pulverindhold, som er angivet i den anvendte adiabatiske varmeudvikling.

Eksempel 4.2

I figur 4.1 er vist en målt varmeudvikling, Q med enheden [kJ/(kg cement eller pulver)] på en konkret beton. På figuren er indtegnet en regressionskurve:

$$Q = Q_\infty \exp[- (\tau_e / M)^\alpha] \qquad (4.3)$$

Q_∞ *er den totale varmeudvikling*
τ_e *er en hældningsparameter, der fastlægger kurven tidsmæssigt,*
α *er en krumningsparameter, der beskriver, hvor skarpt egenskabskurven krummer i S-formen.*
M *er modenheden.*



Figur 4.1: Eksempel på varmeudvikling.
Q_∞ = 332 kJ/kg cement, τ_e = 14.43 h, α = 1.15, τ_0 = 6.46

De tre parametre kan bestemmes ved regression. I afbildningen vises vendetangen til kurven. Vendetangenten skærer x-aksen til tiden τ_0. Dette tidspunkt svarer ca. til afbindingstiden, som bestemmes ved [DS 423.17]. Ved beton som indeholder såvel mikrosilica som flyveaske kan det være vanskeligt at få god overensstemmelse mellem målingerne og denne regressionskurve. Hvis udviklingsforløbet ikke kan beskrives på tilfredsstillende vis vha. regressionskurven, kan en stykkevis lineær kurve som fås ved at forbinde de enkelte observationer anvendes, se figur 4.1.

4.3 Varmefylde og densitet

Betonens densitet har sammen med varmefylden betydning for, hvor megen energi, der skal til for at øge betontemperaturen.

Densiteten er i høj grad bestemt af tilslagsmaterialernes densitet og af mængden af luft i den friske beton. Densiteten vil ofte ligge i området 2250 kg/m³ til 2400 kg/m³.

Varmefylden påvirkes af vandindholdet og reduceres i løbet af hærdeforløbet. I praksis regnes varmefylden konstant og beregnes udfra betonens sammensætning f.eks i forbindelse med den adiabatiske varmeudvikling. Størrelsesordenen er typisk 1.0 - 1.1 kJ/kg °C.

Varmefylden kan beregnes af udtrykket:

$$C_{beton} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \qquad (4.4)$$

hvor c_{beton} er betonens varmefylde [kJ/kg °C]
m_i er massen af delmateriale [kg]
c_i er varmefylden af delmateriale [kJ/kg °C]
n er antallet af delmaterialer

4.4 Varmeledningsevne

For beton sammensat med normale tilslag vil betonens varmeledningsevne variere fra et niveau på ca. 8 kJ/m h °C i frisk tilstand til et niveau på ca. 6 kJ/m h °C i færdighærdnet tilstand. Hvis der anvendes lette tilslag til let konstruktionsbeton, vil værdien blive reduceret til niveauet ca. 2.5 kJ/m h °C.

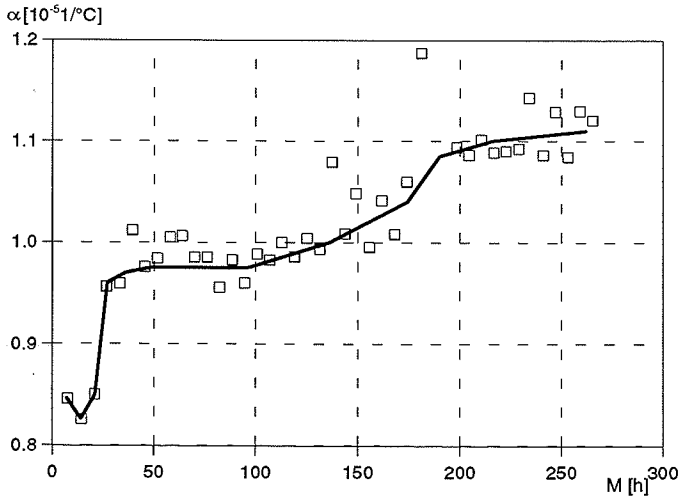
For beregning af hærdeforløbet i normal beton har det vist sig, at man almindeligvis opnår passende nøjagtighed i beregningerne, hvis man antager en konstant varmeledningsevne på ca. 8 kJ/m h °C svarende til værdien for hærdnende beton.

4.5 Temperaturudvidelseskoefficient, E- modul og trækstyrke

Temperaturudvidelseskoefficient, E- modul og trækstyrke bestemmes ved prøvning til diskrete terminer. Da spændingsberegninger kræver, at disse egenskaber er kendt til enhver tid, fastlægges en regressionskurve udfra prøvningsresultaterne. For at kunne beskrive udviklingsforløbene med passende nøjagtighed bør der foretages prøvning ved terminerne 0.5, 1, 2, 3 ,7, 14 og 28 modenhedsdøgn. Feks. kan E-moduler bestemmes efter TI-B 102, spaltetrækstyrker efter DS 423.34 og en-aksede trækstyrker efter DS 423.24.

Eksempel 4.3

I figur 4.2 er vist en målt udvikling af temperaturudvidelseskoefficienten som funktion af modenheden.



Figur 4.2: Eksempel på udvikling af temperaturudvidelses-koefficient.

Eksempel 4.4

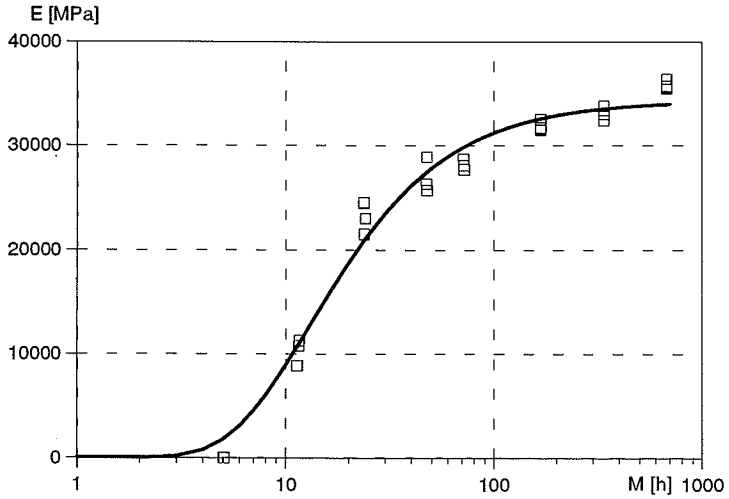
Figur 4.3 og 4.4 viser hhv. E-moduler og spaltetrækstyrker fundet ved prøvning til 7 forskellige terminer. Ved hver termin er foretaget en 3-dobbelt bestemmelse. Endvidere udnyttes at E-modul og spaltetrækstyrke er nul ved afbindingstidspunktet (se eksempel 4.2). På figurerne er indtegnet funktionsudtryk af formen:

$$v = v_{\infty} \cdot \exp[- (\tau_e / M)^{\alpha}] \qquad (4.5)$$

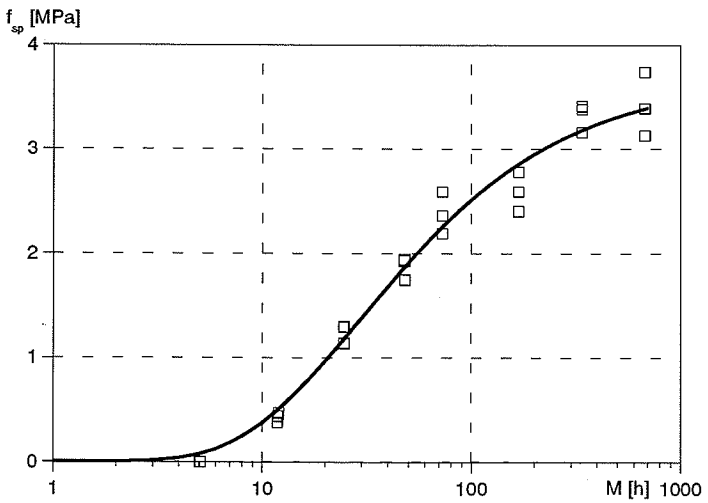
hvor værdierne:

- v_{∞} *egenskaben for tiden gående mod uendelig*
- τ_e *hældningsparameter, der fastlægger kurven tidsmæssigt,*
- α *krumningsparameter, der beskriver, hvor skarpt egenskabskurven krummer i S-formen.*

er fastlagt ved regression. M er modenheden.



Figur 4.3: Eksempel på E-modul udvikling.
E_∞ = 34330 MPa, τ_e = 12.89 h, α = 1.15



Figur 4.4: Eksempel på spaltetrækstyrke udvikling.
$f_{sp,\infty}$ = 3.7 MPa, τ_e = 29.22 h, α = 0.77

4.6 Elastisk Poisson-forhold

Teoretisk udvikler det elastiske Poisson-forhold sig fra en værdi på 0.5 (for væske) til ca. 0.17 i løbet af hærdeprocessen. Normalt foretages ikke prøvning og der anvendes en værdi på 0.17 i hele hærdeforløbet.

4.7 Autogent svind

Beton svinder under hærdeprocessen selvom udtørring, og dermed udtørringssvind er forhindret. Dette svind benævnes autogent svind. Størrelsen af det autogene svind er bestemt af betonsammensætningen.

Når cement reagerer med vand, dannes nye faststoffer, hvis volumen fylder mindre end summen af de oprindelige volumener af cement og vand. Derved opstår tidligt under hærdningen et svind, som betegnes det kemiske svind.

I beton med lavt v/c-forhold vil kapillarvandet efterhånden blive forbrugt til hydratiseringen. Herved skabes gradvist et yderligere svind, hvilket betegnes selvudtørringssvind.

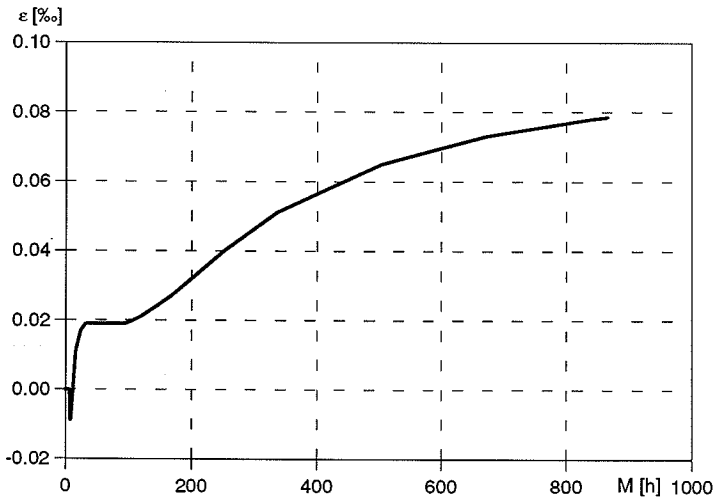
Det kemiske svind er størst for høje v/c-forhold, mens selvudtørringssvindet er størst for lave v/c-forhold. Højt indhold af finkornede materialer som mikrosilica vil øge selvudtørringssvindet.

Ved målinger til tidspunkter før afbindingstiden (se eksempel 4.2) kan observeres voldsomme svindtøjninger. Disse har dog ingen betydning i relation til hærdespændinger, idet betonen stadig er en væske og derfor ikke kan opbygge elastiske spændinger.

Svindet bestemmes normalt ved en kontinuert måling, som fastlægger, hvordan svindet udvikles under hærdeprocessen.

Eksempel 4.5

Fig 4.5 viser et svindforløb målt efter [TI-B 102]. Svindet er angivet som funktion af modenheden.



Figur 4.5: Eksempel på autogent svind.

4.8 Krybning

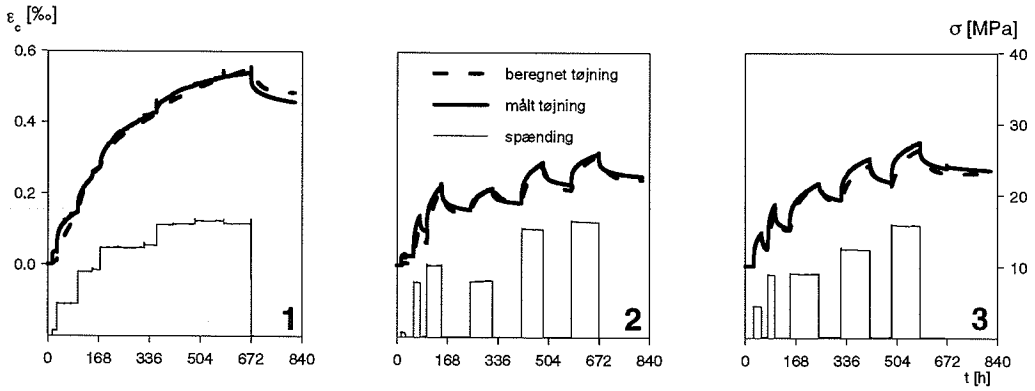
Når ung beton belastes observeres såvel permanente som reversible krybetøjninger (se fig. 4.6). Beton regnes normalt at krybe lige meget for samme tryk- og trækpåvirkning, ved de spændingsniveauer som normalt optræder i hærdnende betonkonstruktioner. Normalt kan anvendes lineære visco-elastiske krybemodeller.

Betons evne til at krybe er knyttet til visco-elastiske deformationer i kitmassen, og vil derfor være aftagende med hærdningen. Ethvert punkt i en hærdnende konstruktion gennemgår et spændingsforløb, som starter i tryk og ender i træk eller omvendt (se fig. 2.1). Derfor skal betonens opførsel med hensyn til permanent og reversibel krybning fastlægges i hele hærdeperioden. I praksis regnes krybeegenskaberne at udvikle sig som funktion af hærdeprocessen (f.eks. modenheden).

Poisson-forholdet for krybning regnes i praksis at have samme værdi som det elastiske Poisson-forhold.

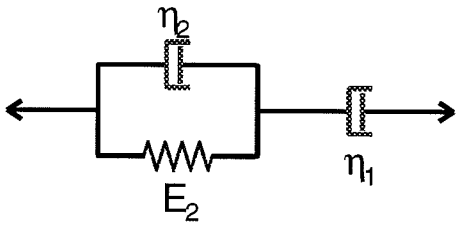
Eksempel 4.6

Prøvningsmetoden [TI-B 102] anbefaler lasthistorier på 3 beton-emner som vist i figur 4.6. Lasthistorie 2 og 3 sikrer, at der fås information om "tilbagekrybningsegenskaberne" ved et passende antal terminer. Lasthistorie 1 beskriver en langsomt voksende belastning svarende til spændingsudviklingen i praktiske konstruktioner, efter at spændingen har passeret nulpunktet.

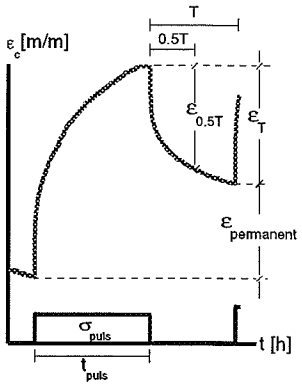


Figur 4.6: Målte og beregnede krybetøjninger samt spændingshistorier.

Tøjningsforløbene fra figur 4.6 kan beskrives vha. den i figur 4.7 viste fjeder-stempel model. De permanente krybetøjninger beskrives af det enkeltstående stempel, mens de reversible tøjninger beskrives af parallel-koblingen.



Figur 4.7: Model til beskrivelse af krybetøjninger



Figur 4.8: Betegnelser anvendt i (4.6) - (4.8).

Ved at måle, hvor stor en permanent deformation en lastpuls forårsager i lasthistorierne 2 og 3, kan viskositeten af det enkeltstående stempel bestemmes til en række terminer som:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{puls} \cdot t_{puls}}{\varepsilon_{permanent}} \qquad (4.6)$$

hvor σ_{puls}, t_{puls} og $\varepsilon_{permanent}$ fremgår af figur 4.8. På tilsvarende vis kan et skøn for E_2 og η_2 bestemmes ved:

$$\eta_2 = \frac{-E_2 \cdot T}{ln(1 - \frac{\varepsilon_T \cdot E_2}{\sigma_{puls}})} \qquad (4.7)$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot \varepsilon_{0.5T} - \varepsilon_T}{\varepsilon^2_{0.5T}} \cdot \sigma_{puls} \qquad (4.8)$$

hvor T, ε_T, $\varepsilon_{0.5T}$ og σ_{puls} fremgår af figur 4.8.

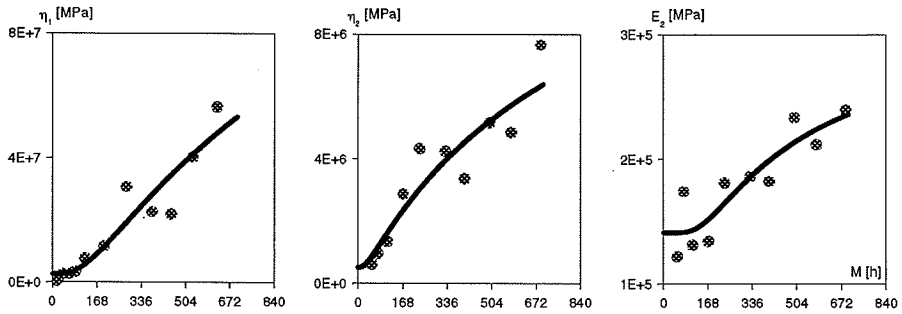
I figur 4.9 er optegnet observerede værdier for η_1, η_2 og E_2. I figuren er optegnet funktionsudtryk af formen:

$$v = v_0 + v_\infty \exp[- (\tau_e / M)^\alpha] \qquad (4.9)$$

hvor værdierne:

v_0	*egenskaben for tiden lig nul*
v_∞	*egenskaben for tiden gående mod uendelig*
τ_e	*hældningsparameter, der fastlægger kurven tidsmæssigt,*
α	*krumningsparameter, der beskriver, hvor skarpt egenskabskurven krummer i S-formen.*

er fastlagt ved regression. M er modenheden.



Figur 4.9: Udvikling af krybeegenskaber

I figur 4.6 er optegnet overensstemmelsen mellem prøvning og opstillet beregningsmodel. Målingen i lasthistorie 1 indgår ikke i opstillingen af krybeparametre og kan derfor anvendes til vurdering af krybemodellens nøjagtighed.

Der findes en række krybemodeller. Fælles for dem alle er, at de styrende parametre fastlægges udfra prøvning. Kvaliteten af en opstillet krybemodel afgøres ud fra den overensstemmelse, som opnås mellem observeret og beregnet krybetøjningsforløb. Man bør være opmærksom på, at en krybemodel kan indeholde så mange parametre at den uden videre kan bringes til at passe med målte forløb. Dette garanterer ikke at krybemodellen er i stand til at simulere et krybetøjningsforløb, som ikke indgår i fastlæggelsen af de styrende parametre.

5.0 Planlægning af udførelsen

Når et givet projekt skal udføres, skal der vælges en udførelsesmetode, som lever op til de hærdemæssige krav, der er stillet. Kravene kan jvf. kap. 7 være baseret på:

- maksimale temperaturforskelle
- maksimale trækstyrkeudnyttelser
- maksimale revnevidder

I planlægningsfasen kan foretages beregninger som udfra betonens 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
- etc.

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. Rækkefølgen i den viste liste er ikke prioriteret.

5.1 Strategier for styring af revnedannelse

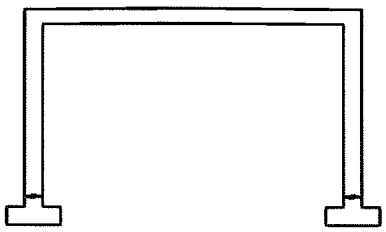
Revner kan opstå:

- når der er for stor forskel i temperatur-bevægelserne mellem sammenstøbte konstruktionsdele

- når der er for stor forskel i temperatur-bevægelser indenfor samme konstruktion

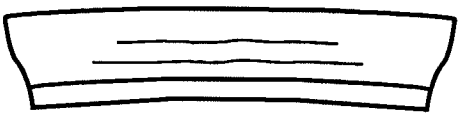
- når en understøttende form fjernes og konstruktionen skal bære sin egenvægt

Eksempel 5.1

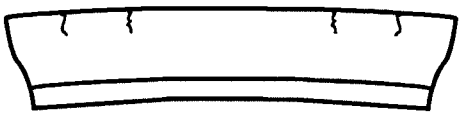


Figur 5.1: Tunnelelement.

I et tunnel-element som vist på figur 5.1 kan alle ovennævnte 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.



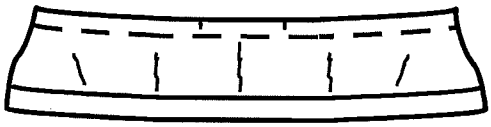
Figur 5.2: Overfladerevner



Figur 5.3: Gennemgående revner i toppen af væggen

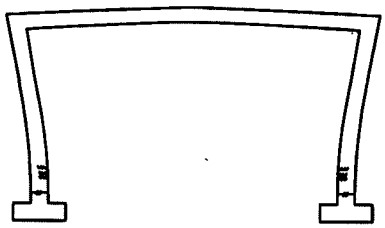
Der kan opstå midlertidige gennemgående revner i toppen af væggen (og i dækket hvis det støbes samtidigt) på det tidspunkt, hvor betontemperaturen er maksimal. Denne revnetype fås fortrinsvis i endezonerne, som vist på figur. 5.3.

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

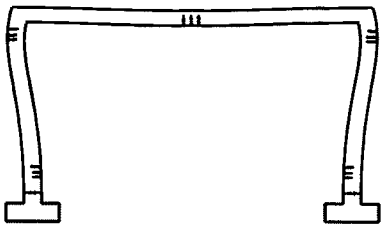


Figur 5.4: Gennemgående revner i vægge og dæk.

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.



Figur 5.6: Revner pga. egenvægt

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).

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 temperaturudvidelse.

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

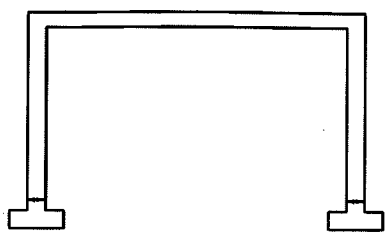
5.1.1 Reduktion af risiko for gennemgående revner

Revner som opstår pga. forskelle mellem nabokonstruktioners temperatur-bevægelser kan forhindres gennem:

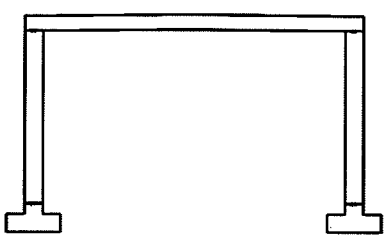
- placering af støbeskel
- valg af støbetakt
- temperaturstyring

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 5.1



Figur 5.7: Vægge og dæk støbes i samme støbning.



Figur 5.8: Vægge og dæk støbes i to støbninger.

I en tunnelkonstruktion kan man vælge at udstøbe vægge og dæk i en eller to støbninger (fig 5.7-5.8).

Udførelsen uden støbeskel mellem vægge og dæk kan mindske risikoen for revnedannelse i dækket, idet vægge og dæk i højere grad vil følges ad i afkølingsfasen.

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 undgå hærderevner.

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 bla. 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 feks. vha. elektriske varmekabler, se afsnit 5.3.5
- kold beton eller kølerør under støbningen , se afsnit 5.3.6
- forsinkelse af den første del af en støbning vha. retarderende tilsætningsstoffer

5.1.2 Reduktion af risiko for overfladerevner

Risikoen for overfladerevner kan reduceres 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 risiko for overfladerevner
- konstruktionsdelen får en større temperaturbevægelse i forhold til nabokonstruktioner og derved øges risikoen for andre revnetyper

Anvendelse af kold beton eller køling vha. rør placeret i formen kan også reducere risikoen for overfladerevner. En sådan løsning reducerer hærdeprocessens hastighed, og kan derved udskyde tidspunktet for afformning, ophør af udtørringsbeskyttelse, kabelopspænding etc.

5.2 Prøvning af betonens egenskaber

I planlægningsfasen udføres beregninger hvori betonens egenskaber indgår. Afhængigt af om der skal foretages temperatur- eller spændingsberegninger gennemføres to forskellige prøvningsprogrammer (se kap. 4.1). I projektbeskrivelsen vil normalt være angivet, hvilke prøvninger der skal udføres.

Prøvningen foretages normalt af beton-leverandøren, dog bestemmes svind og krybning typisk på eksterne laboratorier. Prøvningen tager inklusiv rapportering ca. 3 uger til temperaturberegninger og ca. 6 uger til spændingsberegninger. De to typer prøvning koster henholdsvis 5 tkr. og 100-150 tkr. i 1996-priser.

For større projekter hvor udgifterne til hærdestyring er tilsvarende store, kan det være en fordel at undersøge flere beton-sammensætninger med henblik på at vælge en beton med hensigtsmæssige egenskaber.

5.3 Planlægning baseret på beregning af hærdeforløbet

5.3.1 Planlægning af udførelsen

I forbindelse med planlægningen af udførelsen af betonstøbninger er der mulighed for at fastlægge:

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

Derudover skal planlægningen baseres på :

- betonegenskaberne
- de forventede klimatiske forhold under støbning og hærdning
- understøtningsforhold
- krav til udtørrings-/frost-beskyttelse.

Planlægningen skal:

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

5.3.2 Støbeform

Foruden krav til isoleringsevnen er valget af støbeform også styret af krav til overfladestruktur og geometri (se tabel 5.1). 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 5.1

5.3.2.1 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 feks. at den færdige betonoverflade skal fremstå med bræddestruktur, vælges støbebrædder.

5.3.2.2 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.

5.3.2.3 Isoleringseffekt
Formmaterialerne har forskellig isoleringseffekt. Dette fremgår af figur 5.9 og bilag A .

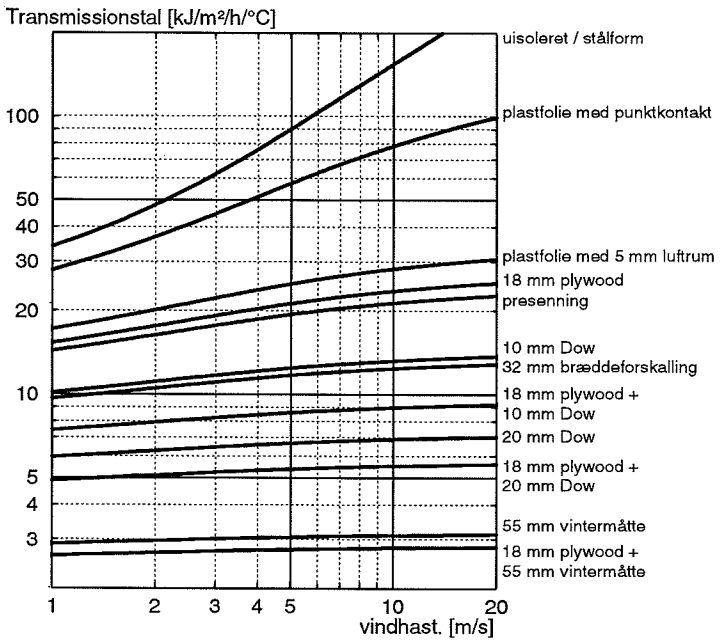
Støbeplader / finérplader:
Anvendes både ved lodrette og vandrette støbninger, og indgår i standard formsystemer. Materialetykkelsen er typisk fra 18 - 21 mm og formen har en moderat isolerende effekt. Afgivelse af varme til omgivelserne er hensigtsmæssig, hvilket normalt fører til moderate temperaturforskelle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

Støbebrædder på 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:
Anvendes normalt som formunderlag ved vandrette støbninger, feks. undersiden af en bro. Formopbygningen minder om en gulvkunstruktion 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 bla. betyder et jævnt temperaturprofil over konstruktionens tværsnit og en højere maksimum temperatur.

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 5.9: Transmissionskoefficient afhængig af vindhastigheden.

5.3.2.4 Formens farve

Formmaterialets farve har betydning for udveksling af strålevarme under hærdeforløbet. En mørk formflade optager mere varme fra stråling end en lys flade. Om dagen tilføres betonen/formen varme fra solen i form af stråling. Der kan være tale om en markant energitilførsel, som er betinget af årstid, skydække, solens stilling på himlen og formens orientering i forhold til verdenshjørnerne. Modsat afgives om natten varme fra betonen/formen til nattehimlen i form af stråling. Selvom effekten fra stråling kan måles på en hærdende betonoverflade, er det vanskeligt at fastsætte størrelsen af denne effekt på forhånd.

Hvis beregning af hærdeforløbet viser, at der kun i begrænset omfang kan accepteres ændringer i hærdeforløbet før kravene overskrides, bør det overvejes hvorvidt der er behov for at skabe skygge for konstruktionen, eller om anvendelse af hvidt formmateriale kan reducere risikoen for overskridelse af kravene.

Man bør desuden være opmærksom på, at anvende lyse materialer ved afdækning af nyudstøbte overflader (jvf. anvisningen [HETEK-Efterbehandling,1997]).

5.3.3 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 5.9 og bilag A. Af figuren ses, at isolerede formes isoleringseffekt ikke påvirkes væsentligt af vindhastigheden.

5.3.3.1 Isolering af fri betonoverflader

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

Isolering af fri overflader kan anvendes af entreprenøren, med henblik på at optimere tidspunktet for fx. 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]).

5.3.3.2 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.

5.3.3.3 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 for at reducere risikoen for gennemgående revner i 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 5.2

Hvor der anvendes relativt godt isolerende forme (feks. 50 mm træ), kan der afformes tidligt for at reducere maksimumstemperaturen, hvorefter der dækkes af med en isolering, der har mindre isoleringseffekt end formen feks. et eller to lag presenninger. Herved kan krav til D_{ydre} opfyldes, samtidigt med at krav til D_{indre} stadig overholdes.

5.3.4 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 middeldøgntemperaturen, undtaget når betonen opvarmes under blanding.

Sommer

Beton leveret fra betonfabrik kan på varme dage 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 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 produktionska-

paciteten 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 er typisk ca. 11-18°C.

5.3.5 Opvarmning

Risikoen for gennemgående revner ved støbning mod tidligere udstøbte konstruktionsdele, kan reduceres ved 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 revnedannelse 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 (feks. 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 opvarmning 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 feks. 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

5.3.5.1 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:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad [W] \qquad (5.1)$$

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

$$R_T = R_{15} \cdot (1 + 0.004 \cdot (T - 15)) \quad [\Omega] \qquad (5.2)$$

Normalt tåler varmekabler/-tråde ikke temperaturer over 60°C. Jvf. formel (5.2) er modstanden ved 60°C øget med 18% i forhold til modstanden ved 15 °C. Herved afsættes iht. formel (5.1) 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 (5.1).

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.

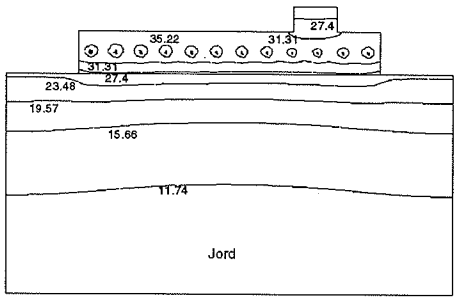
Den nødvendige effekt afhænger af den samlede mængde varme, der skal tilføres og længden af opvarmningsperioden. Ved for hurtig opvarmning er der risiko for revnedannelse i den konstruktionsdel, der opvarmes. Desuden gælder, at jo færre varmetråde

en given effekt tilføres med, jo større er risikoen for revnedannelse. Denne risiko kan vurderes udfra en spændingsberegning.

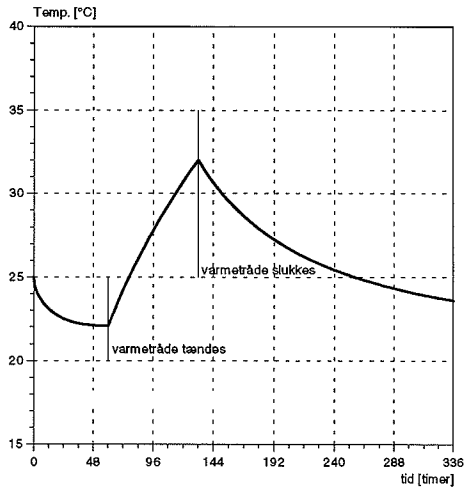
Ved støbning mod jord skal den mængde jord, som påvirkes af opvarmningen, medtages i beregningen. Gennem valg af begyndelses- og randbetingelser bør man sikre sig, at middeltemperaturen i den konstruktionsdel, som opvarmes, ikke er lavere ved afslutningen af forløbet, end den er, når opvarmningen startes.

Eksempel 5.3

Et fundament på jord skal opvarmes, så middeltemperaturen øges 10 °C. Tværsnittet ses i fig. 5.10. 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. Fundamentets begyndelsestemperatur (25 °C) reduceres herved til 22 °C efter 60 timer (se fig. 5.11) svarende til at en quasi-stationær 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 væggs temperaturbevægelser.



Figur 5.10: Temperaturfordeling i fundament og jord til tiden t= 132 timer [°C].



Figur 5.11: Middeltemperatur i fundament.

5.3.6 Køling

I konstruktioner med store godstykkelser kan risikoen for overfladerevner i opvarmningsfasen reduceres vha. køling.

Køling anvendes også til at reducere en konstruktionsdels temperaturbevægelse i forhold til nabokonstruktioner, hvorved risikoen for gennemgående revner reduceres.

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 risikoen for overfladerevner i opvarmningsfasen reduceres, når rørene placeres der, hvor der bliver varmest i den ukølede konstruktion. Tilsvarende gælder, at risikoen for revner i afkølingsfasen reduceres, når rørene placeres i de områder, hvor revnerisikoen er størst i den ukølede konstruktion. En optimal placering af kølerørene kan fastlægges udfra en spændingsberegning.

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

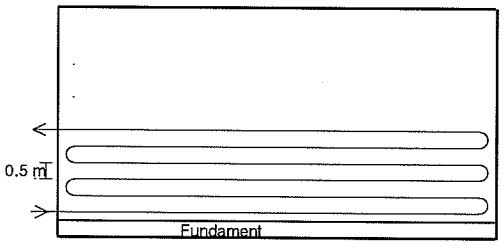
injiceres. Alternativt kan kølerørene udføres med udluftning, således at de ikke kan vandfyldes.

Kølesystemets tæthed bør kontrolleres ved trykprøvning før støbning.

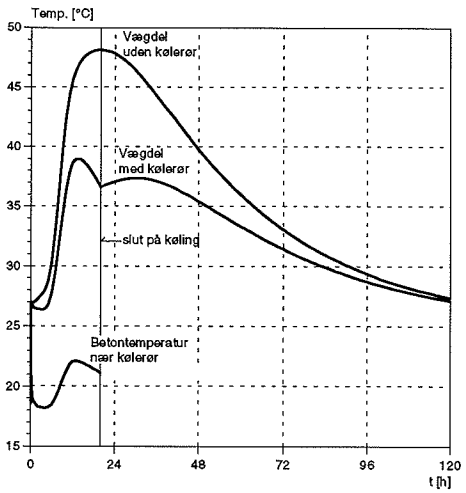
Bilag A viser hvordan kølerørs transmissionskoefficienter bestemmes.

Eksempel 5.4

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.5.12). I væggens midterlinie indlægges plast-kølerør med en indbyrdes afstand på 0.5 m. Kølerørets længde er ca. 120 m. og vandføringen er 2.4m³/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 5.13 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 5.13 fremgår at betonens temperatur omkring kølerøret er ca. 20 °C.



Figur 5.12: Sidebillede af væg med kølerør.



Figur 5.13: Middeltemperatur i væggen med og uden kølerør, samt betontemperatur ved kølerør. Kølerørene slukkes 20 timer efter støbning.

Den nødvendige indløbstemperatur kan bestemmes til:

$$T_{indløb} = T_{beton} - \frac{(T_{beton} - T_{middel}) \cdot k}{(1 - e^{-k})} = 13.3\,°C \qquad (5.3)$$

hvor

$$k = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot d \cdot s}{c_{vand} \cdot Q} = 0.604 \qquad (5.4)$$

T_{beton}	*er betonens temperatur (20 °C)*
T_{middel}	*er kølevandets middeltemperatur (15 °C)*
α	*er transmissionskoefficienten for kølerørsvæggen, t=2 mm (576 kJ/m²/°C/h)*
d	*er kølerørets indre diameter (0.028 m)*
s	*er kølerørets længde (120 m)*
c_{vand}	*er vands varmefylde (4192 kJ/m3/°C)*
Q	*er vandføringen (2.4 m³/h)*

Pr. time skal altså tilføres 2.4 m³ vand med en temperatur på 13.3 °C eller derunder. Hvis vandet leveres fra et køleanlæg, kan den nødvendige effekt bestemmes som:

$$P = (T_{udløb} - T_{indløb}) \cdot c_{vand} \cdot Q = 30182 \text{ kJ/h} \qquad (5.5)$$

hvor

$$T_{udløb} = T_{beton} + (T_{indløb} - T_{beton}) \cdot e^{-k} = 16.3°C \qquad (5.6)$$

5.3.7 Klimaforhold

I forbindelse med planlægningen af betonstøbninger skal det besluttes, hvilke klimaforhold, der skal undersøges i temperatur- og evt. spændingsberegninger. Definitionen af klimaforhold bør inkludere udetemperatur, vindhastighed og evt. solindfald. Desuden har klimaforholdene almindeligvis stor indflydelse på temperaturen af den friske beton jvf. afsnit 5.3.4.

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 6.1.4.

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.

5.3.8 Modellering af understøtningsbetingelserne

Valget af understøtningsbetingelser er, som i en traditionel statisk beregning, af væsentlig betydning ved spændingsberegninger af hærdnende betonkonstruktioner.

Da beton er et skørt materiale, især i afkølingsfasen, kan selv små bevægelser af understøtningerne medføre revnedannelse. Beskrivelsen af understøtningsforhold er vanskeligst ved konstruktioner, som opføres i terrænet, f.eks. tunneler, støttemure, fundamenter o.lign.

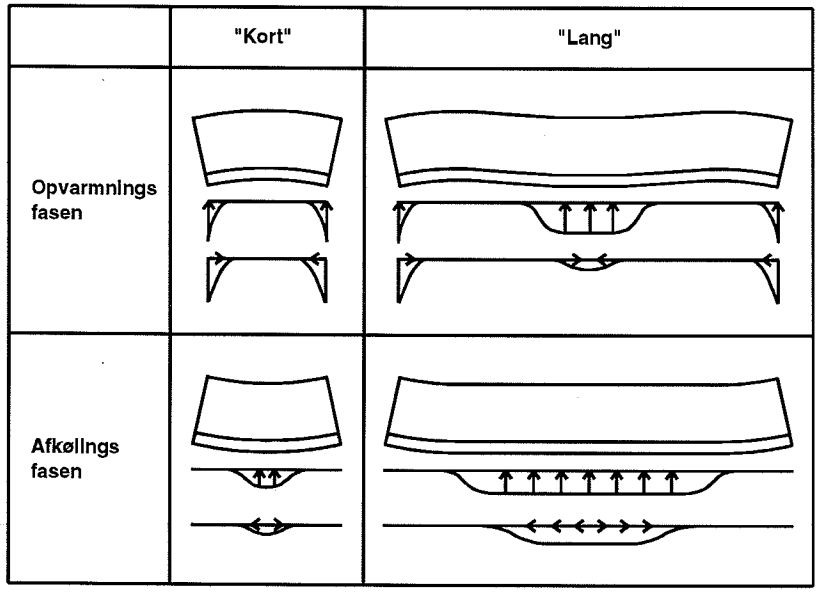
I figur 5.14 er vist en række principielle reaktionsfordelinger i opvarmnings- og afkølingsfasen for hhv. en kort og en lang konstruktion. I lange konstruktioner fastholdes en strækning midt på konstruktionen i en retlinet geometri pga. egenvægten.

En beregningsmæssig bestemmelse af reaktionsfordelingerne kræver en 3-dimensional analyse, hvori indgår underlagets E-modul, Poisson-forhold, friktionsvinkel og kohæsion. En sådan analyse er ikke gennemførlig i forbindelse med praktiske opgaver og derfor må gøres en række forudsætninger, på den sikre side, om understøtningsforholdene. Dette indebærer, at der skal foretages en vurdering af om:

- konstruktionen kan bevæge sig vinkelret på fundamentsfladens plan (kan krumme)
- konstruktionen er i stand til at bevæge sig i fundamentsfladens plan.

Lange konstruktioner indeholder både tværsnit, der kan krumme frit, og tværsnit der er fastholdt i en retlinet geometri pga. egenvægten, jvf. figur 5.14. Da man ikke på forhånd kan afgøre, hvilken af de to situationer, der vil være den farligste for ethvert punkt i konstruktionen til enhver tid, bør begge situationer vurderes.

Korte konstruktioner vil ikke have tværsnit med fastholdt krumning, jvf. figur 5.14 , da egenvægten er af mindre betydning.



Figur 5.14: Principielle reaktionsfordelinger i tunnel set fra siden

Der kan ikke gives faste regler for om en konstruktion er lang eller kort, men det er muligt at give en indikation af, hvornår der kan skelnes mellem de to situationer. Overgangen mellem kort og lang ligger omkring et længde/højdeforhold på 3. Konstruktioner med et længde/højdeforhold større end 3 kan normalt betragtes som lange og omvendt for korte konstruktioner. Forholdet 3 er ikke en endegyldig værdi og der kan forekomme tilfælde, hvor forholdet er større eller mindre, se [Andersen et al., 1997]. Ved støbning direkte mod kalk eller fjeld, vil også korte konstruktioner være fastlåst af underlaget. Dette kan tages i regning ved at opfatte underlaget som en konstruktionsdel der støbes imod, og lade denne indgå i spændingsberegningen.

Understøtningsforholdene vedr. bevægelser i fundamentsfladens plan, fastlægges ud fra en afvejning af de kræfter, der kan etableres af underlaget, set i forhold til de kræfter som den hærdnende konstruktion kan udøve på underlaget.

Eksempel 5.5

Tunnelkonstruktioner opdeles sædvanligvis i konstruktionsafsnit adskilt af dilatationsfuger. Sådanne konstruktioner regnes sædvanligvis ikke fastholdt af underlaget mod vandrette bevægelser vinkelret på tværsnittets plan, forårsaget af temperatur- og svindtøjninger. Dette skyldes, at de friktionskræfter, som kan opbygges indenfor konstruktionsafsnittet, ikke får en størrelse, som giver væsentlige bidrag til spændingerne i tunneltværsnittet. Dette gælder ikke, når der støbes direkte mod kalk eller fjeld, ligesom indflydelsen af friktionskræfterne bør indgå i overvejelserne ved meget lange konstruktioner.

Ved de understøtningsforhold, som har betydning for spændingerne i et tunneltværsnits plan, er forholdene anderledes. Da tunnelvæggene er relativt slappe overfor

bøjningspåvirkning (se fig. 5.5) vil der sædvanligvis ikke kunne etableres kræfter i fundamentsfladen som vil resultere i en flytning af betydning. Derfor kan fundamenterne regnes fastholdt mod vandrette flytninger i tværsnittets plan.

5.4 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. 6.3 som om nødvendigt kan resultere i en revideret planlægning.

6.0 Dokumentation

Dette kapitel omhandler generelt den dokumentation, der hører til planlægning og udførelse af betonarbejdet, og som bør indgå ved støbninger, hvor der kræves revnestyring. Der bør foreligge dokumentation for:

- Beregningsmæssig planlægning af hærdeforløb
- Detaljeret arbejdsbeskrivelse
- Registreringer og observationer under udstøbning
- Registreringer og observationer under og efter hærdning.
- Evaluering i forhold til stillede krav

6.1 Planlægning

Ved beregning skal det eftervises at en planlagt udførelsesmetode resulterer i hærdeforløb som lever op til de krav, der er stillet mht. temperaturer, modenhed (af hensyn til udtørringsbeskyttelse, afformningsstyrke), trækstyrkeudnyttelser og/eller revnevidder.

Hvis der er stillet krav til trækstyrkeudnyttelser og/eller revnevidder, må entreprenøren i sin planlægnig foretage beregninger, som viser, hvor store temperaturforskelle den aktuelle konstruktion kan tåle uden at overskride kravene.

Opgaven er herefter at planlægge en hensigtsmæssig udførelsesmetode, som giver konstruktionen et temperaturforløb, der lever op til de opstillede krav om maksimale temperaturforskelle. Endvidere bør vurderes, i hvor høj grad en ændring af grundlaget for planlægningen, vil reducere muligheden for at opfylde kravene.

6.1.1 Temperaturberegning

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

6.1.2 Spændingsberegning

Til den udførelsesmetode, der tilfredsstiller kravet om maksimal trækstyrkeudnyttelse, hører en temperaturberegning, som beskriver, hvorledes temperaturen i ethvert punkt kan forventes at forløbe under hærdeprocessen. På grundlag heraf opstilles der temperaturkrav, som netop er gældende for den aktuelle støbning. Disse temperatur-krav vikarierer for krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse.

Beskrivelse af grundlaget for beregningerne udover hvad der angivet for temperaturberegninger:

- model af understøtningsbetingelserne
- modellering af egenvægt og ydre last
- modeller for betonens mekaniske egenskaber (temperaturudvidelseskoefficient, elasticitetsmodul, Poisson's forhold, krybning, autogent svind, trækstyrke)

Beskrivelse af resultatet af spændingsberegninger:

- udviklingen af spænding og trækstyrkeudnyttelse i kritiske punkter som funktion af tiden
- isokurver for spænding og trækstyrkeudnyttelse til tidspunkter med ekstreme trækstyrkeudnyttelser, feks. tidspunktet for maksimal trækstyrkeudnyttelse på overfladen (opvarmningsfasen og ved afformning) og tidspunktet for maksimal risiko for gennemgående revner (afkølingsfasen)

6.1.3 Revneviddeberegning

Revneviddeberegninger udføres i henhold til det i specifikationen angivne beregningsgrundlag. I beregning af revnevidder indgår bla. beregning af hærdetemperaturer.

Til den udførelsesmetode der tilfredsstiller kravet om maksimal revnevidde hører en temperaturberegning som beskriver hvorledes temperaturen i ethvert punkt kan forventes at forløbe under hærdeprocessen. På grundlag heraf opstilles der temperaturkrav som netop er gældende for den aktuelle støbning. Disse temperatur-krav vikarierer for krav til revnevidden.

6.1.4 Detaljeret arbejdsbeskrivelse

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
- temperatur-krav

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].

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.

6.1.5 Dokumentation af temperaturer under udførelsen

Uanset om der er stillet krav til temperaturer, trækstyrkeudnyttelser eller revnevidder, så foretages dokumentationen 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.

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 6.1. 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 6.1: Nummerering af termoføler i begge ender [Vinterstøbning af beton, 1985]

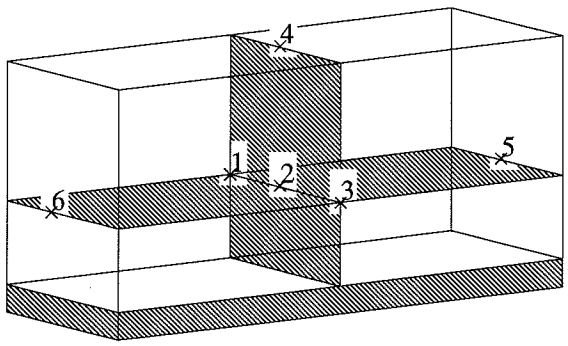
6.1.5.1 Termofølere i konstruktioner uden kølerør/varmetråde

I figur 6.2 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.

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 6.2: Typisk placering af temperaturmålepunkter i konstruktionsdel.

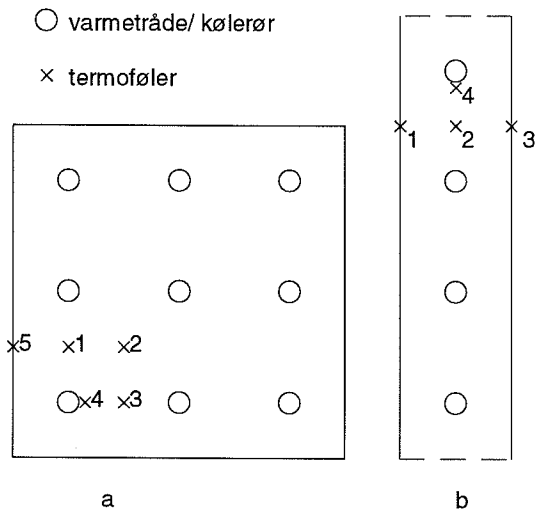
6.1.5.2 Termofølere i konstruktioner med kølerør/varmetråde
I konstruktioner hvor der køles med kølerør eller hvor der opvarmes med varmetråde, optræder der komplicerede temperaturprofiler i tværsnittet, hvorfor antallet af termofølere nødvendigvis må forøges for at kunne vurdere/dokumentere hærdeforløbet.

I figur 6.3 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 temperaturgradient 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. På baggrund af disse målinger kan der beregnes en middeltemperatur udfra en på forhånd defineret beregningsprocedure, se afsnit 6.3.1.1-6.3.1.2.



Figur 6.3: Placering af termofølere i konstruktioner med kølerør/varmekabler.

6.2 Registreringer under hærdeforløb (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 ?

6.3 Evaluering

6.3.1 Målte temperaturer

Det kan afgøres om temperatur-krav er overholdt vha. de i afsnit 6.3.1.1- 6.3.1.3 viste kriterier. I kriterierne indgår formler for beregning af middeltemperaturer på basis af målte temperaturer i termofølere. Brugbarheden af disse formler bør for den aktuelle beton-geometri eftervises vha. en temperaturberegning.

Såfremt det ikke kan dokumenteres at temperatur-kravene er overholdt bør det undersøges, hvad årsagen til afvigelsen fra de planlagte temperatur-forløb i termofølerne kan være. I afsnit 6.3.3 er nævnt en række forhold, som kan forårsage afvigelser. Med udgangspunkt heri kan der foretages en opdateret temperatur-beregning, som i højere grad vil svare til det observerede.

Herved bliver krav til temperatur-forskelle dog ikke tilfredsstillet, men en spændingsberegning baseret på den opdaterede temperaturberegning, kan vise sig at opfylde et evt. krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse.

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.

6.3.1.1 Temperaturforskel i hærdende konstruktion uden kølerør/varmetråde

Middeltemperaturen, T_m, i et tværsnit som vist på figur 6.2 kan vejledende defineres som:

$$T_m = 2/3 \cdot T_2 + 1/6 \cdot (T_1 + T_3) \qquad (6.1)$$

Denne formel baseres på, at temperaturprofilet er tilnærmelsesvist parabolsk, hvilket forudsætter, at T_1 og T_3 ikke afviger væsentligt fra hinanden.

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

$$T_m - T_1 < D_{indre,max} \; ; \qquad T_m - T_3 < D_{indre,max} \qquad (6.2)$$

6.3.1.2 Temperaturforskel i hærdende konstruktion med kølerør/varmetråde

For et tværsnit som vist i figur 6.3a kan middeltemperaturen, T_m, vejledningsvist defineres som:

$$T_m = 2/3 \cdot (2/3 \cdot (T_1 + T_2 + T_3)/3 + 1/3 \cdot T_4) + 1/3 \cdot T_5 \qquad (6.3)$$

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

$$T_m - T_5 < D_{indre,max} \quad (6.4)$$

For et tværsnit som vist i figur 6.3b kan middeltemperaturen, T_m, vejledningsvist defineres som:

$$T_m = 1/6 \cdot T_1 + 1/6 \cdot T_3 + 2/3 \cdot (4/5 \cdot T_2 + 1/5 \cdot T_4) \quad (6.5)$$

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:

$$T_m - T_1 < D_{indre,max} \quad ; \quad T_m - T_2 < D_{indre,max} \quad (6.6)$$

6.3.1.3 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. I figur 6.4 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. Forskellen i de to konstruktionsdeles temperaturbevægelse til et aktuelt tidspunkt t efter t_{max} kan jvf. figuren bestemmes som:

$$\alpha \cdot (\Delta_{NY} - \Delta_{GL}) \quad (6.7)$$

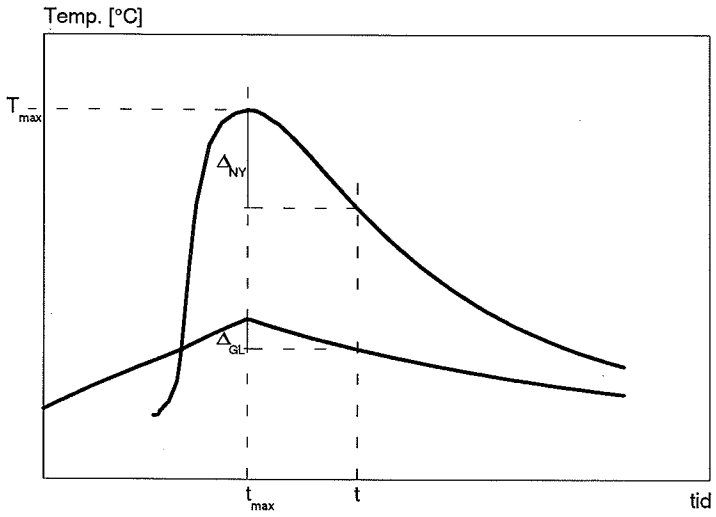
hvor

Δ_{NY} er forskellen mellem maksimumtemperatur (der optræder ved tiden t_{max}) og den aktuelle temperatur i den konstruktionsdel, hvori revnerisikoen vurderes (se figur 6.4)

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

Δ_{GL} er forskellen mellem temperaturen til tiden t_{max} og den aktuelle temperatur i den tidligere udstøbte beton (se figur 6.4)

α er betonens temperaturudvidelseskoefficient



Figur 6.4 Middeltemperaturforløb i nabokonstruktioner

I praksis udtrykkes krav til den maksimalt tilladelige forskel i temperaturbevægelse ved en temperaturforskel. Herved udgår temperaturudvidelseskoefficienten α.

Et krav til D_{ydre} er overholdt hvis

$$D_{ydre} = \Delta_{NY} - \Delta_{GL} < D_{ydre,krav} \qquad (6.8)$$

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.

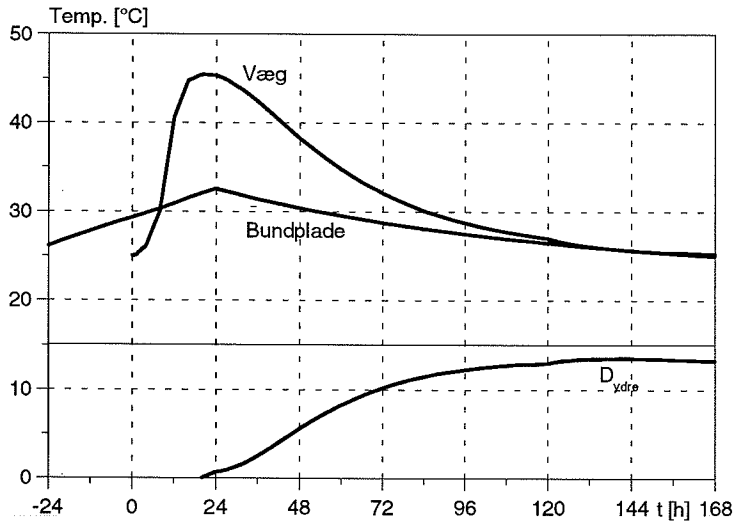
Eksempel 6.1

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 6.5.

I figur 6.5 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.

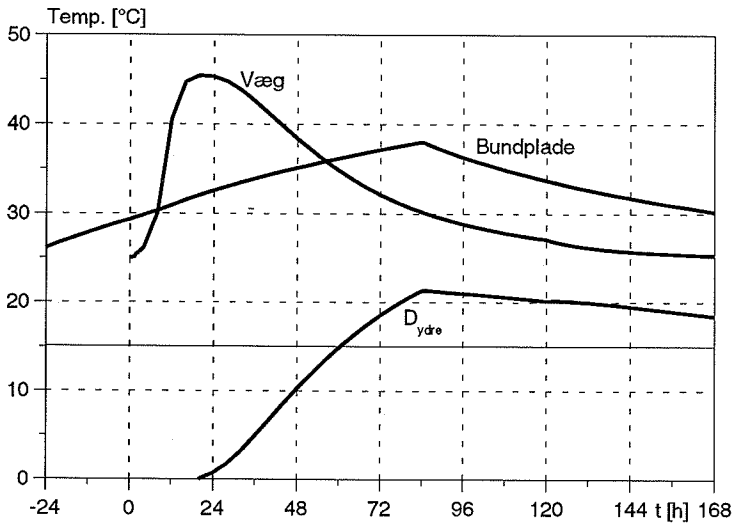


Figur 6.5: Middeltemperaturer og D_{ydre} som funktion af tid. Tiden t = 0 svarer til støbning af væggen.

Hvis opvarmningen afbrydes for sent fås det figur 6.6 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 6.6: Middeltemperaturer og D_{ydre} som funktion af tid. Tiden t = 0 svarer til støbning af væggen.

6.3.2 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.

6.3.3 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 beregning viser revnefrihed
- Større revnevidder end ønsket observeres

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

Afvigelse i form af revnedannelse kan skyldes afvigelse i temperatur-forløb men også forkerte forudsætninger om understøtningsbetingelser og materialeegenskaber kan være årsagen.

Øget revnevidde kan skyldes afvigelse i temperatur-forløb eller at de anvendte revnevidde-formler undervurderer effekten af den revnefordelende armering.

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

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.

Betonens temperatur ved udstøbning.

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 temperatur, varmefylde og varmeledningsevne
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, 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.

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

Understøtningsbetingelser
De statiske understøtningsbetingelser har en væsentlig indflydelse på de beregnede spændinger. Det må i det enkelte tilfælde vurderes om understøtningsforholdene er rimeligt vurderet. I tilfælde, hvor der opstår revner, hvor det blev beregnet, at der ikke skulle opstå revner, kan det være muligt at vurdere udfra revnemønsteret om understøtningsbetingelserne har været rimelige. Er problemet løst som et 2-dimensionalt problem, må det vurderes om det faktiske problem er 3-dimensionalt.

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:

Unøjagtighed ved beregninger
For Finite Element Metodens (FEM) gælder, at den beregnede løsnings nøjagtighed er afhængig af elementnettets finhed. For både temperatur- og spændingsberegninger betyder det 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.

Unøjagtighed ved materiale-modeller
Det bør kontrolleres om de anvendte materialemodeller i tilstrækkelig grad beskriver de prøvningsresultater som er opnået, se eksempel 4.1.

Overfladetransmissionskoefficienter
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 en forventet i en støbning, så kan solindflad 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.

6.4 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. Datalog-

geren kobles derfor til en PC'er, som via et særligt program løbende tømmer dataloggeren for en samtidig 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.

7.0 Krav vedr. hærderelaterede revner

Dette kapitel handler om, hvilke krav der kan stilles for at begrænse eller undgå revnedannelse i hærdeperioden. For samme periode skal der stilles krav som sikrer betonen mod for tidlig udtørring og mod frysning. Om disse krav kan læses i henholdsvis anvisningen [HETEK-Efterbehandling,1997] og [Vinterstøbning af beton, 1985].

Det skal understreges, at formålet med dette kapitel **ikke** er at angive et færdigt forslag til en specifikation. Formålet er at beskrive nogle af de forskellige muligheder, der findes for opstilling af krav vedr. revnedannelse, således at læserne får et bredere kendskab til de relevante problemstillinger. Det endelige valg af krav vedr. revnedannelse bør altid baseres på overvejelser vedr. teknik, tid og økonomi for det aktuelle projekt.

7.1 I hvilke konstruktioner optræder hærderevner?

Revnedannelse hidrørende fra hærdeprocessen kan forekomme som:

- overfladerevner pga. for stor forskel i temperaturbevægelse mellem betonens indre og overfladerne. Disse revner dannes når hærdetemperaturen er maksimal, men lukker sig i løbet af afkølingsfasen.
- gennemgående revner pga. for stor forskel i sammenstøbte konstruktionsdeles temperaturbevægelse. Revnerne dannes typisk i afkølingsfasen og lukkes ikke igen.

Overfladerevner kan optræde i konstruktioner med større dimensioner som feks. anlægskonstruktioner. I konstruktioner af mindre dimension, som feks. bjælker og søjler til husbygning, ledes hærdevarmen hurtigere bort og giver sjældent anledning til overfladerevner.

Gennemgående revner optræder oftest i konstruktioner af større dimension, men kan også forekomme i mindre konstruktioner, hvis temperaturbevægelserne er forhindret af stive nabokonstruktioner.

7.2 Hvilket krav bør stilles ?

Hvis der er risiko for, at en konstruktion kan få revner i hærdefasen, skal det afgøres om revner kan tillades. Dette afgøres på baggrund af:

- miljømæssig påvirkning kombineret med ønsket levetid
- funktion (typisk tæthed)
- mulighed for vedligeholdelse (reparation)
- ønske om udseende

Eksempel 7.1

Revner bør ikke forekomme i
- *vandrette flader der vandmættes feks. pga. regn*
- *konstruktionsdele som kan opsuge vand fra underlaget*
- *konstruktionsdele der befinder sig i splash-zonen*
- *vægge og dæk under vandtryk*

Revner må normalt forekomme i konstruktioner som befinder sig i passiv og moderat miljøklasse, hvis der ikke er særlige krav til tæthed og udseende.

Hvis revner ikke må forekomme bør krav baseres på maksimale trækstyrkeudnyttelser. Kravet er nærmere beskrevet i afsnit 7.3.

Hvis revner må forekomme, kan der stilles et krav til den maksimale revnevidde. Revnevidden er afhængig af armeringsarrangement samt lasten i anvendelsesgrænsetilstanden. Derudover afhænger revnevidden af det temperatur- og svindforløb, som konstruktionen gennemgår under hærdeforløbet. For en given minimumsarmering kan kravet bestå i maksimalt tilladelige temperatur-bevægelser udtrykt ved D_{ydre}.

I praksis udelades ofte en revnevidde-beregning, da disse er behæftet med stor usikkerhed. Istedet specificeres krav til D_{ydre} udfra en erfaringsmæssig vurdering af de stivhedsforhold som haves mellem de sammenstøbte konstruktionsdele. Kravene vedrørende temperaturforskel og revnevidde er nærmere beskrevet i afsnit 7.4-7.5.

7.3 Krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse

Krav til maksimale trækstyrkeudnyttelser kan formuleres direkte ved en given talstørrelse eller inddirekte ved angivelse af hvilke temperatur-forskelle, der maksimalt må optræde.

7.3.1 Direkte krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse

Ved spændingsberegninger vurderes revnerisikoen ud fra forholdet mellem en beregnet trækspænding i betonen og betonens aktuelle trækstyrke (trækstyrkeudnyttelse). Formelt set antages det, at der ikke opstår revner, så længe de beregnede trækspændinger ikke overstiger betonens aktuelle trækstyrke. Da den beregnede trækspænding og betonens aktuelle trækstyrke er bestemt med en vis usikkerhed, skal der tages stilling til, hvilken sikkerhed, der ønskes for at undgå eller minimere antallet af revner.

I rapporten [Pedersen,E.J.,1997] er det på basis af en række observationer af revnedannelse i betonkonstruktioner konkluderet, at der normalt forekommer meget få revner, hvis trækspændinger i afkølingsforløbet udgør mindre end ca. 80% af den aktuelle spaltetrækstyrke (efter [DS423.34]). Hvis der under ingen omstændigheder må opstå revner, kan det vælges at foreskrive en maksimal udnyttelse af spaltetrækstyrken på 65 - 70%.

Det kan overvejes, om der skal indarbejdes flere forskellige grænser for trækstyrkeudnyttelsen. Der kan eksempelvis opstilles forskellige krav for spændinger, der skyldes sammenstøbning mellem gammel og ny beton (ydre fastholdelse) og for spændinger, der skyldes temperaturforskel mellem overflade og det indre af et tværsnit (indre fastholdelse).

Ved vurdering af revnerisikoen for sammenstøbnings situationer skal det erindres, at ydre fastholdelse medfører permanente trækspændinger, der til en vis grad reduceres med tiden pga. betonens krybning. Når konstruktionen tages i brug overlejres de permanente spændinger af bidrag fra egentlige laste, men også fra årstidsbestemte temperaturvariationer og udtørringssvind. Konsekvensen af en utilstrækkelig sikkerhed mod revnedannelse for ydre fastholdelse kan altså medføre, at bygværket accepteres og afleveres uden revner, men at der efter en hård vinter eller varm sommer pludseligt opstår revner. Derfor bør altid ilægges en vis mængde revnefordelende armering selvom der er foretaget spændingsberegninger.

Eksempel 7.2

En aktuel konstruktions tæthed vurderes, ikke at være truet af midlertidige overfladerevner men derimod af gennemgående, blivende revner (se fig. 2.2). I dette tilfælde stilles derfor alene krav om bestemmelse af den spændingskomposant som direkte giver anledning til revnerisiko (se fig. 2.7).

7.3.2 Krav til spændingsberegning

Da spændingsberegninger for hærdnende betonkonstruktioner er baseret på en forudgående temperaturberegning, er alle bemærkninger vedr. temperaturberegning, jvf. afsnit 7.4.3, også gældende for spændingsberegninger.

Det bør kræves dokumenteret, at et anvendt beregningsværktøj er brugbart til den foreliggende opgave. Dokumentationen kan bestå af referencer til tidligere udførte projekter, tekniske beskrivelser af algoritmer, manualer etc.

Derudover bør specificeres hvilke mekaniske egenskaber der skal indgå i beregningen (se kap. 4). Endvidere bør specificeres hvordan de mekaniske egenskaber bestemmes eller evt. hvilke værdier de kan tillægges.

I forbindelse med udarbejdelse af specifikationer baseret på trækstyrkeudnyttelse bør det overvejes, hvilke understøtningsforhold, der skal beregnes for. I specifikationen kan der f.eks. stilles krav om, at der skal udføres en vurdering af forskellige understøtningsforhold ved beregninger. For meget høje støbninger bør der indføres en begrænsning for, hvor mange af de foregående støbninger, der ønskes medregnet evt. bestemt ved beregning.

7.3.3 Krav til dokumentation

Der skal foreligge temperatur- og spændingsberegninger svarende til den valgte udførelsesmetode, jvf. afsnit 6.1.1-6.1.2. Overholdelse af kravet til trækstyrkeudnyttelse skal dokumenteres, men da det ikke er praktisk muligt at måle spændingerne i en hærdnende betonkonstruktion, dokumenteres overholdelse af kravet

i praksis, ved måling af temperaturforløb (se afsnit 6.1.2). Dokumentationen svarer derfor til dokumentationen af temperaturkrav beskrevet i afsnit 7.4.4.

7.3.4 Krav i forbindelse med afvigelser

Det bør fremgå af specifikationen, at de udførte beregninger og de tilhørende forudsætninger skal analyseres. Baseret på denne analyse skal udførelsen kræves ændret, så gentagelser ikke forekommer. Såfremt kravene er overholdt, men der alligevel fås revner, skal de stillede krav tages op til fornyet overvejelse.

7.3.5 Krav til maksimal trækstyrkeudnyttelse repræsenteret ved temperatur-krav

Retningslinier for hvordan temperatur-krav kan stilles udfra spændingsberegninger kan udledes af afsnit 6.1.2 og 6.3.1. Vedrørende formuleringen af temperatur-krav henvises til afsnit 7.4.

7.4 Formulering af temperatur-krav

Krav til maksimale temperatur-forskelle kan være udledt af krav til maksimale trækstyrkeudnyttelser (afsnit 7.3), maksimale revnevidder (afsnit 7.5) eller baseret direkte på erfaringsmæssige værdier. Temperatur-krav udtrykkes som maksimalt tilladelige værdier af D_{ydre} og D_{indre} se afsnit 2.1-2.2.

7.4.1 Krav til ydre temperaturforskel, D_{ydre}

Kravet vedrører den maksimale forskel der må optræde i to sammenstøbte konstruktionsdeles respektive middeltemperaturer. Kravet bør stilles til konstruktionsdele, der støbes til forskellige tidspunkter. Hvis der optræder væsentlige forskelle i godstykkelse indenfor samme støbning bør denne underopdeles i konstruktionsdele, og der stilles også krav til den maksimale temperaturbevægelse, der må foregå mellem disse.

Det anbefales, at definere hvilke konstruktionsdele, der skal opfylde krav til D_{ydre}, dvs. hvilke konstruktionsdele, der vurderes at være fastholdt af tilstødende konstruktionsdele, såvel tidligere støbte, som samtidigt støbte.

For større betonarbejder, hvor der anvendes flere betontyper og/eller udstøbes flere forskellige konstruktionstyper bør det overvejes at definere forskellige maksimale tilladelige temperaturforskelle for de enkelte konstruktionsdele. Det er i praksis ofte dette krav, der nødvendiggør anvendelse af komplicerede og dyre foranstaltninger til temperaturstyring som f.eks. kølesystemer. For konstruktionsdele med en høj grad af fastholdelse, f.eks. lange konstruktionsdele eller konstruktionsdele, der støbes ind imellem andre konstruktionsdele (se afsnit 3.1), bør der stilles skærpede krav til D_{ydre}.

Eksempel 7.3

Den maksimalt tilladelige D_{ydre} er i DS411 vejledende angivet til 15°C, ved støbning mod en tidligere udstøbt konstruktion. Kravet er ofte blevet skærpet eller lempet

indenfor intervallet 12 til 20°C, afhængigt af stivheds- og understøtningsforhold samt mængden af revnefordelende armering.

Eksempel 7.4

Der vil være væsentlig forskel på temperaturniveauet:

- *i den massive bundplade og kantbjælkerne når et brotværsnit udstøbes*
- *i vægge og dæk, med stor forskel i godstykkelse*

7.4.2 Krav til indre temperaturforskel, D_{indre}

Kravet vedrører den maksimalt tilladelige forskel mellem en konstruktionsdels middeltemperatur og overfladetemperatur. I praksis er der forskel mellem temperaturdeformationerne i det indre og på overfladen for alle konstruktionsdele pga. varmeudveksling med omgivelserne. Derfor er kravet til D_{indre} gældende for alle konstruktionsdele. Mængden af revnefordelende armering har sædvanligvis ingen indflydelse på kravet til D_{indre}.

Eksempel 7.5

D_{indre} er i [DS 411] vejledende angivet til 15°C. Praktiske erfaringer fra byggepladsen tyder på, at kravet om en maksimal tilladelig D_{indre} på 15°C sædvanligvis forhindrer dannelse af overflade-revner.

7.4.3 Krav til temperaturberegning

Det bør kræves dokumenteret, at et anvendt beregningsværktøj er brugbart til den foreliggende opgave. Dokumentationen kan bestå af referencer til tidligere udførte projekter, tekniske beskrivelser af algoritmer, manualer etc.

Specifikationen bør definere hvilke termiske egenskaber der skal indgå i beregningen (se kap. 4). Endvidere bør specificeres hvordan de termiske egenskaber bestemmes eller evt. hvilke værdier de kan tillægges.

Der skal udføres temperaturberegninger, der sikrer, at kravene overholdes for de klimaforhold (temperatur, vind etc.), der kan forventes under støbningen. Almindeligvis overlades det til entreprenøren at definere passende klimaforhold, og så i øvrigt kontrollere, at de pågældende klimaforhold er tilstede før og under støbning. Det kan vælges at kræve, at der for hver støbning udføres et foreskrevet antal beregninger med forskellige klimaforhold (f.eks. 2 eller 3 tilfælde).

7.4.4 Krav til dokumentation

Som udgangspunkt for dokumentation af temperaturberegninger må det kræves, at samtlige data skal oplyses i et sådant omfang, at der kan foretages en uafhængig beregning, jvf. afsnit 6.1.1. Derudover bør det også overvejes hvor lang tid før støbning, beregninger skal være udført for at give tid til den detaljerede planlægning af udførelsen af betonarbejdet.

For specifikationer baseret på temperaturkrav bør dokumenteres:

1. Planlægning af udførelsesmetoden jvf. afsnit 6.1.1

2. Temperaturmålinger
   Specifikationen bør stille krav om:

   - i hvilke kontruktionsdele temperaturen skal måles. Temperaturen bør måles for alle konstruktionsdele med forskellig geometri, randbetingelse eller metode til temperaturstyring.
   - varigheden af målingerne. Målingen bør udføres fra støbningen sættes i gang til alle krav relateret til temperatur eller modenhed er dokumenteret opfyldt, dog minimum til konstruktionens temperatur er i ligevægt med omgivelsernes temperatur.
   - hvor termofølere placeres og hvordan gennemsnitstemperaturer beregnes. Princippet for vægtning af termofølere kan enten foreskrives i specifikationen, eller det kan overlades til entreprenøren, at vælge et passende system for vægtning af temperaturmålinger. Hvis den sidste metode vælges, bør det kræves, at entreprenøren vha. temperaturberegninger verificerer det valgte princip for beregning af gennemsnitstemperaturen.
   - løbende måling og overvågning af temperaturen under hærdningen
   - måleudstyrets nøjagtighed

3. Log bog vedr. hærdning
   Der bør udarbejdes en log bog vedr. hærdning med et indhold svarende til det i afsnit 6.2 beskrevne.

4. Revneeftersyn
   Der bør stilles krav om, at der skal udføres en inspektion af konstruktionen for revnedannelse, jvf. afsnit 6.3.2.

7.4.5 Krav i forbindelse med afvigelser

Det bør fremgå af specifikationen, at de udførte beregninger og de tilhørende forudsætninger skal analyseres. Baseret på denne analyse skal udførelsen kræves ændret, så gentagelser ikke forekommer. Såfremt temperatur-kravene er overholdt men der alligevel fås revner og/eller for store revnevidder, skal grundlaget for de stillede temperatur-krav tages op til fornyet overvejelse.

7.5 Revneviddekrav

Krav til maksimale revnevidder kan formuleres direkte ved en given talstørrelse eller inddirekte ved angivelse af hvilke temperatur-forskelle, udtrykt ved D_{ydre}, der maksimalt må optræde for en given mængde revnefordelende armering.

7.5.1 Direkte revneviddekrav

Der er iflg. [DS 411] ingen klar sammenhæng mellem revnevidde og risikoen for korrosion. For konstruktioner, hvor revnevidden kan have betydning for holdbarheden, anbefaler DS 411 at holde revnevidden under 0,2 - 0,3 mm i aggressiv miljøklasse.

7.5.2 Krav til revneviddeberegning

Der bør anvises en relevant beregningsprocedure. Der findes adskillige revnevidde formler, der muliggør en bestemmelse af revnevidder for blivende belastning og for svind for en fastlagt armeringsprocent. Hærderelaterede revner svarer til svind-inducerede revner, hvorfor beregningsformler for svind til en vis grad kan tages i anvendelse for hærderevner (se afsnit 3.3).

Den anviste beregningsprocedure bør inkludere armeringsprocent, armeringsdiameter, geometri samt svind- og temperaturdeformationer. Deformationerne skal indeholde bidrag både fra hærdeforløbet og fra temperaturens variation over året.

Det bør dog understreges, at beregning af revnevidder er behæftet med stor usikkerhed.

7.5.3 Krav til dokumentation

Den nødvendige dokumentation i forbindelse med overholdelse af revneviddekrav bør omfatte:

- dimensionering af armering under hensyn til planlagt hærdeforløb
- en inspektion af konstruktionen for revnedannelse, jvf. afsnit 6.3.2.
- en dokumentation som bekrevet vedr. temperaturkrav, jvf. afsnit 7.4.4.

7.5.4 Krav i forbindelse med afvigelser

Det bør fremgå af specifikationen, at de udførte beregninger og de tilhørende forudsætninger skal analyseres. Baseret på denne analyse skal udførelsen kræves ændret, så gentagelser ikke forekommer.

7.5.5 Revneviddekrav repræsenteret ved temperatur-krav

Hvis der specificeres temperaturkrav skal hertil være knyttet en nødvendig mængde revnefordelende armering. Vedrørende formuleringen af temperaturkrav henvises til afsnit 7.4.

7.6 Økonomi

Ved udarbejdelse af specifikationer bør det tilstræbes at definere klart, hvilke ydelser, der skal være inkluderet i tilbuddet. Det anbefales, at fastsætte en række enhedspriser for de forskellige foranstaltninger til temperaturstyring og -måling (f.eks. kølerør, varmetråde, vintermåtter, termofølere etc.), således at entreprenør og bygherre har et fast grundlag for afregning af eventuelle mer-ydelser. Foranstaltningerne bør prissættes, således at der betales efter det faktiske forbrug (inkl. drift og montage). Prisfastsættelse på alternative foranstaltninger i forbindelse med tilbudsgivningen forøger muligheden for at opnå teknisk og økonomisk optimale løsninger.

Derudover kan det overvejes at indføre en pris for temperatur- og spændingsberegninger i tilbudslisten, således at yderligere beregninger udover det antal beregninger, der er inkluderet i tilbuddet kan afregnes separat.

Der bør tilstræbes klare linier, så bygherren ikke fristes til at forsøge at få entreprenøren til at betale for ydelser, der ikke er indeholdt i kontrakten, og entreprenøren ikke fristes til at forsøge at få ekstra betaling for anvendelse af unødvendige foranstaltninger.

Hvis specifikationerne er baseret på veldefinerede temperaturkrav, er tilbudsgivningen normalt relativt ukompliceret og bør indeholde alle foranstaltninger til temperaturstyring og -måling.

Indførelse af spændingsberegning betyder, at omkostningerne til foranstaltningerne til temperaturstyring kan tilpasses den aktuelle støbning. I visse tilfælde reduceres omkostningerne i forhold til de almindelige temperaturkrav, men i andre tilfælde øges omkostningerne.

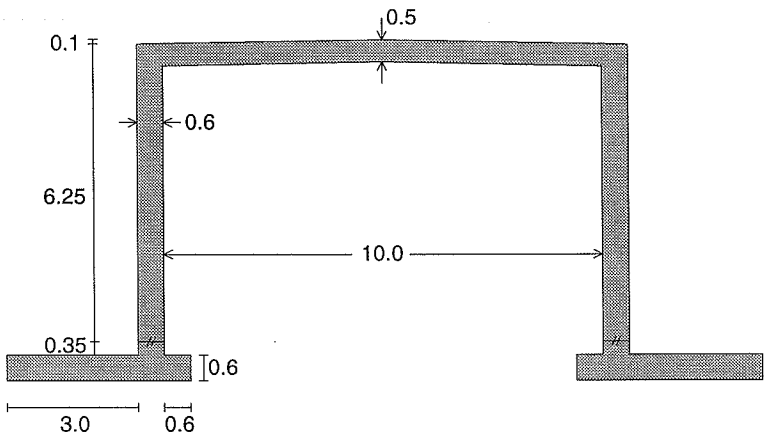
Uanset om omkostningerne til udførelsen reduceres eller ej ved indførelse af krav til trækstyrkeudnyttelsen, så vil omkostningerne til planlægningen forøges i forhold til temperaturkrav af nedenstående årsager:

- Specifikationen bliver ofte mere detaljeret/kompliceret og skal måske understøttes af analyser i projekteringsfasen
- Beregningsarbejdet tager længere tid, da der både skal udføres temperatur- og spændingsberegninger
- Udarbejdelse og evaluering af rapporter vedr. de udførte beregninger og de tilhørende arbejdsbeskrivelser tager ofte længere tid
- Forlænget opstartsperiode på byggesagen pga. bestemmelse af flere betonegenskaber

For projekter af en vis størrelse må de samlede omkostninger for etablering, vedligeholdelse og evt. reparation dog antages at være reducerede når der anvendes spændingsberegninger idet der herved opstilles individuelle krav til de enkelte konstruktionstyper og ikke anvendes generelle temperaturkrav.

8.0 Eksempel på beregning af hærdeforløbet

Der betragtes en tunnelkonstruktion som vist i figur 8.1. Væghøjden er ca. 7 m og bredden af dækket ca. 11 m. Tykkelsen af vægge og dæk er hhv. 0.5 og 0.6 m. Tunnellen er understøttet på liniefundamenter. Tunnellen støbes i 20 m lange sektioner adskilt af dilatationsfuger i såvel fundamenter som overbygning. Vægge og dæk udstøbes i samme støbning, det vil sige uden støbeskel. Fundamenterne er støbt længe før overbygningen. Konstruktionen skal udføres om sommeren.



Figur 8.1 Tunneltværsnit

Tunnellen ønskes støbt i en 18 mm plywood form. Der anvendes samme formtype til såvel inderside som yderside af væggene og til dækkets underside. Formen ønskes fjernet 120 timer efter støbning af hensyn til klargøringen til støbning af efterfølgende sektioner. Oversiden af dækket tænkes beskyttet mod udtørring ved påføring af curing membran efter principperne angivet i [HETEK-Efterbehandling,1997].

Det er krævet at forholdet mellem trækspænding og spaltetrækstyrke ikke overskrider 80 % til enhver tid. Konstruktionen skal være beskyttet mod udtørring i mindst 120 modenhedstimer.

8.1 Beregningsforudsætninger

Beregningerne er udført vha. programmet CIMS 2D [DTI Byggeri, 1995], der baserer sig på beregningsprincipperne beskrevet i kap. 2.

Geometri
Da konstruktionen er symmetrisk med hensyn til såvel geometri som påvirkninger, regnes der kun på den ene halvdel af tværsnittet vist i figur 8.1. Herved opnås reduktion af regnetiden. I symmetrilinien udveksles der ikke energi med omgivelserne.

Betonegenskaber
Den valgte beton har et v/c-forhold på 0.40. Der anvendes lavalkali sulfatbestandig portland cement samt flyveakse og mikrosilica. Betonens egenskaber er bestemt ved prøvning som angivet i kap. 4. Egenskaberne er beskrevet i [Spange og Pedersen, 1996].

Støbetakt
Da fundamenterne er gamle på tidspunktet for støbning af overbygningen antages E-modulet at være fuldt udviklet. Desuden ses bort fra krybning og autogent svind for fundamenterne.

Vægge og dæk støbes i samme arbejdsgang. I praksis vil der naturligvis gå et stykke tid fra støbning af væggene påbegyndes til dækket er støbt. I beregningen antages væggene at være støbt til tiden t=0 timer og dækket at være støbt til tiden t=6 timer. Væggenes oversider antages i beregningen at være uisolerede indtil dækket støbes.

Form
Varmeledningsevnen for formen sættes til 0.5 kJ/m/h/°C. Formen fjernes til tiden t=120 timer.

Klimaforhold
Der betragtes et varmt sommertilfælde med

lufttemperatur	= 25 °C
vindhastighed	= 5 m/s
betontemperatur	= 27 °C

Fundamentets begyndelsestemperatur sættes lig lufttemperaturen. Da temperaturen ved fundamentsundersiden antages ikke at blive væsentlig påvirket af væggens støbning, antages at der ikke udveksles energi mellem fundament og jord.

Understøtningsbetingelser
Konstruktionen vurderes at ligge på grænsen mellem at være lang og kort jvf. afsnit 5.3.8 idet

$$L/H = 20/7 \approx 3$$

Der regnes derfor både et tilfælde, hvor tværsnittet tillades at krumme frit om den vandrette akse i tværsnittets plan og et hvor tværsnittet er forhindret i at krumme. Dette svarer til situationen i et snit liggende hhv. ved enden og ved midten af konstruktionen. (se fig. 5.14). Da der kun regnes på den ene halvdel af konstruktionen, skal tværsnittet forhindres i at krumme om den lodrette akse af symmetriårsager.

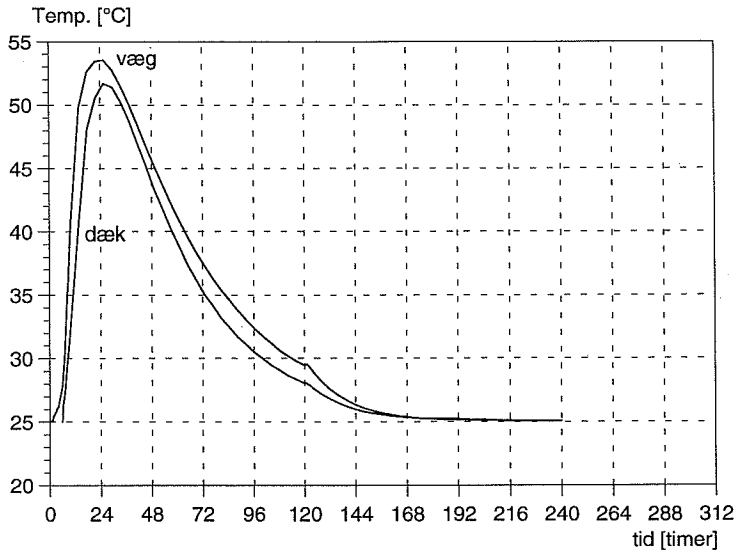
I planen fastholdes fundamentsundersiden mod bevægelser i såvel vandret som lodret retning. I symmetrilinien i dækket forhindres bevægelser i vandret retning.

Egenvægt
I det øjeblik dækket afformes bæres egenvægten ikke længere af formen, men skal kunne optages af konstruktionen selv. Dette har betydning for spændingerne i såvel dækket som væggene (se fig. 5.6). I beregningen medtages egenvægten i form af en nedadrettet linielast på 0.012MN/m påført langs oversiden af dækket. Størrelsen af linielasten svarer til egenvægten af dækket.

8.2 Indledende beregning uden hærdemæssige foranstaltninger

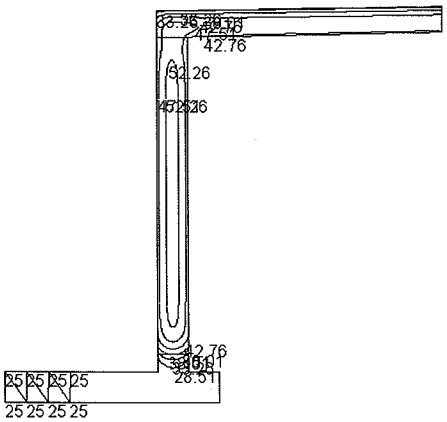
8.2.1 Temperaturberegning

I fig. 8.2 er vist maksimumstemperaturer som funktion af tiden for hhv. væg og dæk. Den maksimale temperatur i væg og dæk ses at blive hhv. 53.5°C og 51.5°C og optræder ca. 24 timer efter væggens støbning. Ved afformningstidspunktet ses maksimumstemperaturen at være faldet til ca. 29.5°C i væggen og ca. 28°C i dækket. Overbygningen ses at være afkølet til omgivelsernes temperatur efter ca. 168 timer.



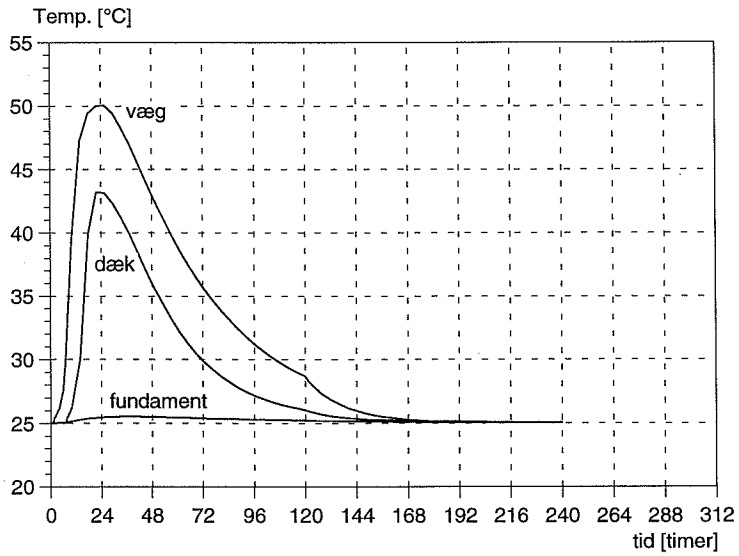
Figur 8.2: Maximumtemperaturer.

I fig. 8.3 ses temperaturfordelingen over tværsnittet 24 timer efter støbning af væggen. Temperaturfordelingen over væggen ses at være symmetrisk. Væggens overfladetemperatur er ca. 45°C. Der ses at være en skæv temperaturfordeling over dækket, med en temperatur på hhv. ca. 42°C ved undersiden og ca. 33°C ved oversiden. Dækkets maksimale temperatur optræder i området over væggen.



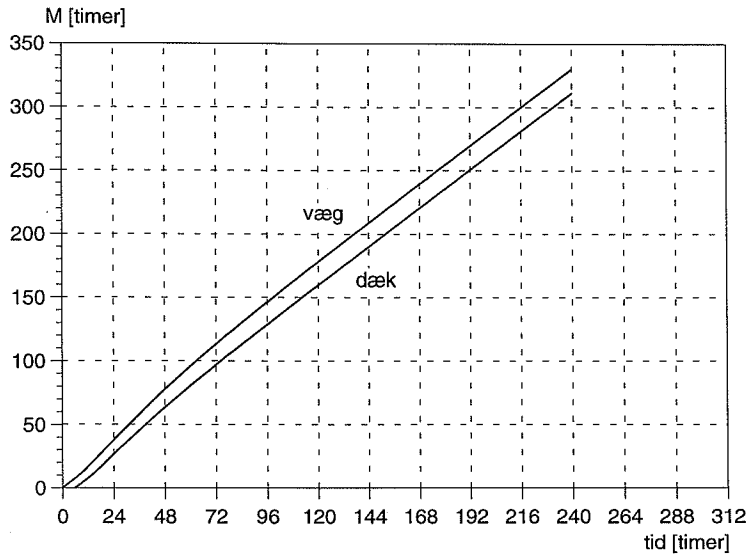
Figur 8.3: Temperaturfordeling til tiden t = 24 timer.

I fig. 8.4 er vist middeltemperaturen som funktion af tiden for hhv. fundament, væg og dæk. Den maksimale middeltemperatur i væg og dæk er hhv. ca. 50 °C og ca. 43 °C. Fundamentets middeltemperatur ses at stige under 1 °C i som følge af overbygningens støbning. Det bemærkes at fundamentets middeltemperatur svarer til begyndelsestemperaturen, når overbygningen er kølet ned til omgivelsernes temperatur. (Se afsnit 5.3.5.1)



Figur 8.4: Middeltemperaturer

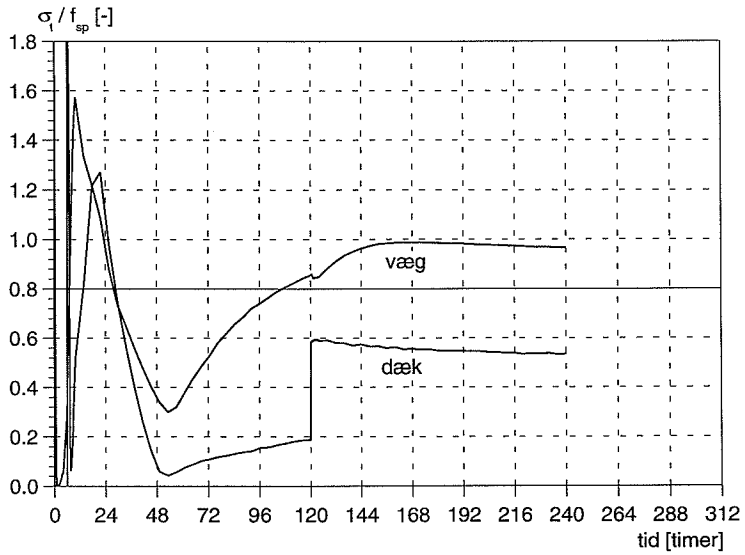
I fig. 8.5 er vist den mindste modenhed i overfladen af såvel væg som dæk som funktion af tiden. Det ses at modenheden ved afformningen (t = 120 timer) er ca. 160 timer. Kravet til udtørringsbeskyttelsen er altså opfyldt.



Figur 8.5: Mindste modenhed i væg og dæk.

8.2.2 Spændingsberegning - tværsnittet tillades at krumme frit

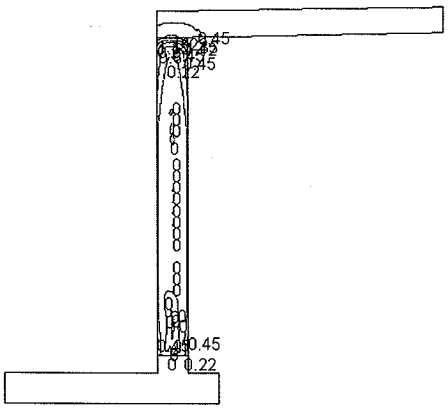
I fig. 8.6 et vist den maksimale trækspænding i forhold til spaltetrækstyrken for væg og dæk som funktion af tiden, når tværsnittet tillades at krumme frit. Det ses, at kravet på maksimalt 80% udnyttelse er overskredet i såvel opvarmningsfasen som afkølingsfasen.



Figur 8.6: Maksimal spaltetrækstyrkeudnyttelse. Fri krumning.

Der ses tilsyneladende at være en meget høj trækstyrkeudnyttelse umiddelbart efter såvel væggens støbning (t=0 timer) som dækkets støbning (t=6 timer). Umiddelbart efter støbning er E-modulet og dermed de beregnede spændinger ca. nul. Ligeledes er spaltetrækstyrken på dette tidspunkt ca. nul. Den meget høje udnyttelse umiddelbart

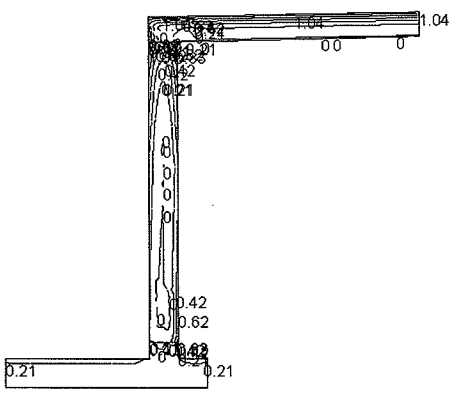
efter støbning er derfor ikke udtryk for et reelt problem, idet betonen stadig er en væske på dette tidspunkt.



Figur 8.7: Spaltetrækstyrkudnyttelse til tiden t = 10 timer. Fri krumning

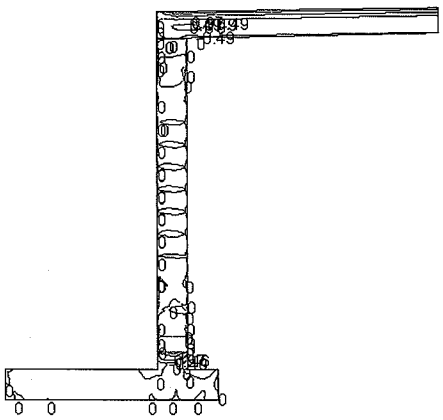
I fig. 8.7 er vist fordelingen af spaltetrækstyrkeudnyttelsen over tværsnittet til tiden t=10 timer svarende til tidspunktet for maksimal udnyttelse i væggen i opvarmningsfasen. Den maksimale trækstyrkeudnyttelse ses at optræde i væggens øverste hjørner. Problemet hidrører fra spændingskomposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z) og skyldes at væggens top afkøles pga. den frie overflade inden dækket udstøbes. I beregningen er det som nævnt i afsnit 8.1.1 antaget, at dækket udstøbes 6 timer efter væggen. I praksis vil støbningen af dækket foregå i umiddelbar forlængelse af væggens støbning, hvilket betyder at toppen af væggen ikke vil blive afkølet. Den høje udnyttelse er derfor ikke udtryk for et reelt problem.

I fig.8.8 ses spaltetrækstyrkeudnyttelsen til tiden t = 22 timer svarende til tidspunktet for maksimal udnyttelse i dækket i opvarmningsfasen. Der ses at være en høj trækstyrkeudnyttelse i oversiden af dækket med maksimum i området over væggen. Problemet hidrører fra den vandrette komposant i tværsnittets plan (σ_x), men også spændingskomposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z) er stor.



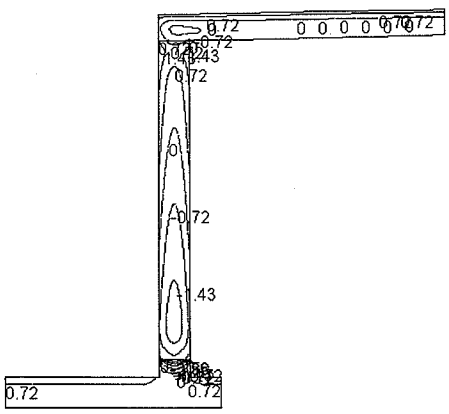
Figur 8.8: Spaltetrækstyrkeudnyttelse til tiden t = 22 timer. Fri krumning.

Fordelingen af σ_x til tiden t = 22 timer er vist i fig. 8.9. Trækspændingerne i oversiden af dækket skyldes at den frie overflade afkøles i forhold til midten. Den maksimale trækspænding ses at optræde i overfladen over væggen. En årsag til dette er, at temperaturen i dækket er størst i dette område (se fig. 8.3). En anden årsag er, at dækket udvider sig i tværsnittets plan som følge af opvarmningen. Da konstruktionen virker som en ramme, medfører denne udvidelse trækspændinger i rammehjørnets overside (se figur 5.5). Den høje σ_x giver risiko for langsgående midlertidige revner i dækkets overside.



Figur 8.9: Vandret spændingskomposant σ_x til tiden t = 22 timer.

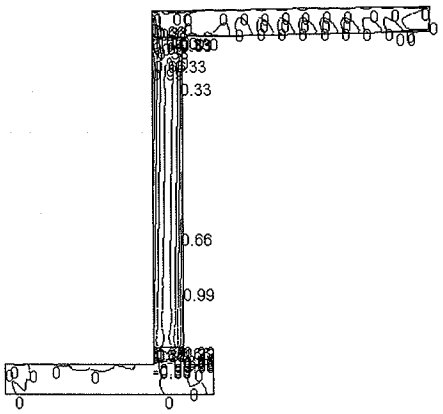
Fordelingen af σ_z til tiden t = 22 timer er vist i fig. 8.10. Trækspændingerne i toppen af dækket skyldes dels temperaturprofilet over dækket og dels at væg og dæk udvider sig i forhold til fundamentet (se figur 5.3). Da tværsnittet tillades at krumme frit medfører dette, som det ses trykspændinger nederst i væggen. Den høje σ_z i toppen af dækket giver risiko for overfladerevner på tværs af dækket.



Figur 8.10: Spændingskomposant vinkelret på tværsnittet, σ_z til tiden t = 22 timer. Fri krumning.

I toppen af væggen ses på dette tidspunkt en høj σ_z i overfladerne. Dette hidrører fra væggens afkøling før dækkets støbning. Som tidligere nævnt finder denne afkøling ikke sted i praksis. Den høje udnyttelse øverst i væggens overflader (se fig. 8.8) er derfor ikke et udtryk for et reelt problem.

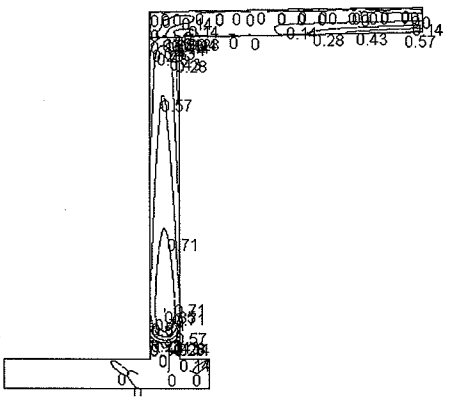
I fig. 8.11 ses fordelingen af den lodrette spændingskomposant σ_y til tiden t = 22 timer. Variationen over vægtykkelsen skyldes temperaturforskellen mellem midte og rand. Derudover giver dækkets tværgående længdeudvidelse anledning til bøjning i væggen, hvilket ses af, at isokurverne er skrå. I det aktuelle tilfælde giver dette ikke anledning til risiko for revnedannelse, men hvis dækket havde været bredere ville revnerisikoen være større.



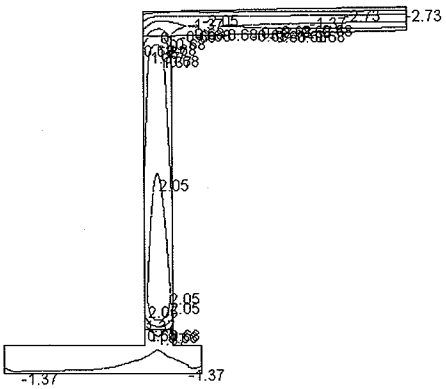
Figur 8.11: Lodret spændingsfordeling σ_y til tiden t = 22 timer.

I fig. 8.12 ses spaltetrækstyrkeudnyttelsen til tiden t = 121 timer svarende til umiddelbart efter afformningen. Den største udnyttelse ses at optræde nederst i væggen og hidrører fra spændingskomposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z). Problemet skyldes at væg og dæk afkøles og dermed trækker sig sammen i forhold til fundamentet (se figur 5.4). Da tværsnittet tillades at krumme frit optræder de største trækspændinger nederst i væggen, mens der er trykspændinger i dækket som vist i fig. 8.13. Årsagen til at de største trækspændinger ikke optræder ved støbeskellet er, at væggens nederste del bliver afkølet af fundamentet (se fig. 8.3) og dermed ikke får så store temperaturbevægelser. Den høje σ_z giver risiko for lodrette gennemgående revner i væggen.

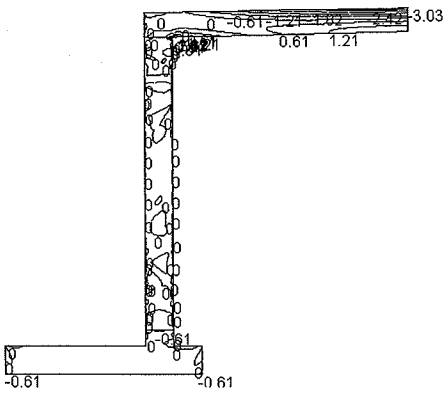
Af fig. 8.12 ses det, at udnyttelsen ved dækkets underside i området nær fagmidte er høj sammenlignet med resten af dækket. Udnyttelsen hidrører fra den vandrette komposant i tværsnittets plan (σ_x). I fig. 8.14 ses fordelingen af σ_x til tiden t = 121 timer. Der ses at være trykspændinger i dækkets overside ved fagmidte og trækspændinger i undersiden. Dette skyldes egenvægten, der udløses når formen fjernes. Da konstruktionen virker som en ramme, giver egenvægten desuden trækbidrag i rammehjørnets overside. I det aktuelle tilfælde medfører egenvægten ikke risko for revnedannelse i dækket.



Figur 8.12: Spaltetrækstyrkeudnyttelse umiddelbart efter afformning (t = 121 timer). Fri krumning.

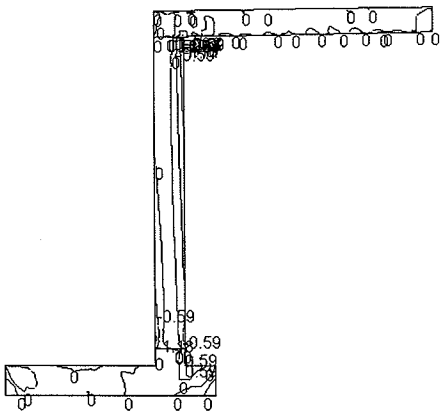


Figur 8.13: Spændingskomposant vinkelret på tværsnittet σ_z



Figur 8.14: Vandret spændingskomposant σ_x umiddelbart efter afformning (t = 121 timer).

I fig. 8.15 er fordelingen af den lodrette spændingskomposant (σ_y) vist til tiden t = 121 timer. Variationen over vægtykkelsen skyldes, at der har været varmest i midten af væggen. Udløsningen af egenvægten medfører trækbidrag øverst i væggens yderside samt nederst i indersiden pga. rammevirkningen. Derudover giver dækkets tværgående sammentrækning som følge af afkølingen anledning til trækbidrag nederst i væggens yderside. I det aktuelle tilfælde giver dette ikke anledning til risiko for revnedannelse, men en større spændvidde (dækbredde) ville øge risikoen.



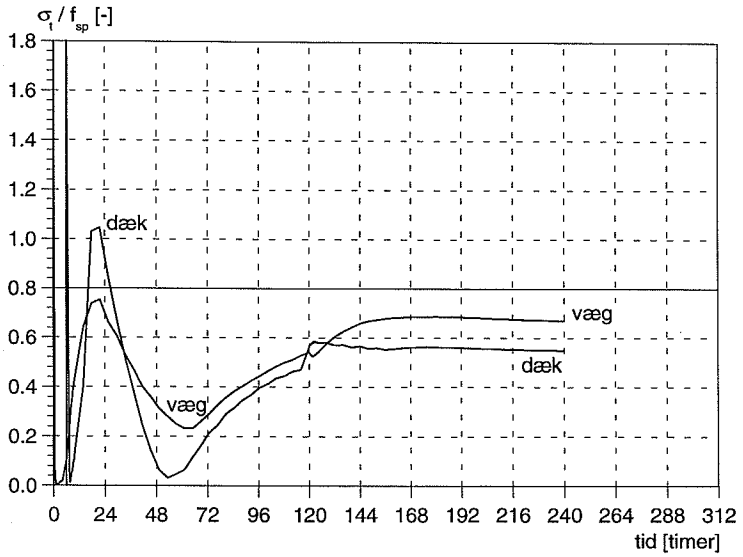
Figur 8.15: Lodret spændingskomposant σ_y umiddelbart efter afformning (t = 121 timer).

Afkølingen af overfladerne som følge af afformningen giver et trækbidrag i overfladerne. I det aktuelle tilfælde er disse bidrag imidlertid små, da temperaturen ved afformningstidspunktet er tæt på omgivelsernes temperatur (se fig. 8.2).

Den maksimale spaltetrækstyrkeudnyttelse optræder jvf. fig 8.6 til tiden t = 168 timer. Den største udnyttelse optræder nederst i væggen og hidrører fra spændingskomposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z). Spændingsfordelingen svarer principielt til fordelingen tiden t = 121 timer (se fig. 8.13). Det vil sige, at der er risiko for gennemgående permanente revner i væggen.

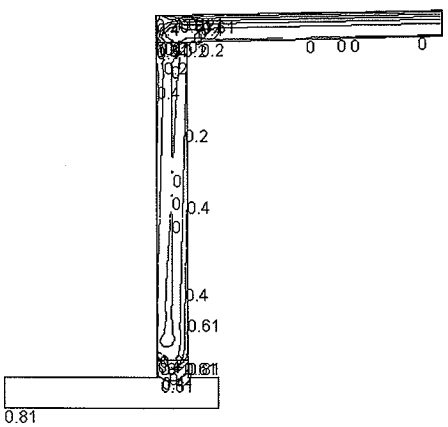
8.2.3 Spændingsberegning - tværsnittet fastholdes mod krumning

I fig. 8.16 et vist den maksimale trækspænding i forhold til spaltetrækstyrken for væg og dæk som funktion af tiden når tværsnittet fastholdes mod krumning. Det ses at kravet på maksimalt 80% udnyttelse er overskredet i dækket i opvarmningsfasen. Som i tilfældet med fri krumning beskrevet i afsnit 8.2.2 er den meget høje udnyttelse umiddelbart efter støbning ikke udtryk for et reelt problem.



Figur 8.16: Maksimal spaltetrækstyrkeudnyttelse. Forhindret krumning.

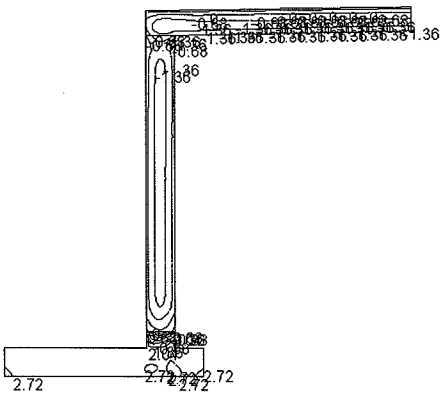
Spændingerne i tværsnittets plan (σ_x og σ_y) er stort set uafhængige af om tværsnittet tillades at krumme eller ej. Det betyder, at forholdene vedr. egenvægten, tværgående temperaturbevægelser af dækket og temperaturforskelle mellem midte og overflade svarer til situationen med fri krumning (se afsnit 8.2.2). I det følgende betragtes derfor primært spændingerne vinkelret på tværsnittet (σ_z).



Figur 8.17: Spaltetrækstyrkeudnyttelse til tiden t = 22 timer. Forhindret krumning.

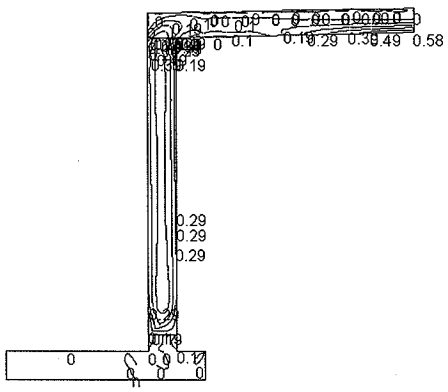
I fig. 8.17 ses spaltetrækstyrkeudnyttelsen til tiden t = 22 timer svarende til tidspunktet for maksimal udnyttelse i dækket i opvarmningsfasen. Der ses at være en høj udnyttelse i oversiden af dækket med maksimum i området over væggen svarende til situationen,

hvor tværsnittet tillades at krumme frit (se fig. 8.8). I tilfældet med fri krumning skyldtes dette den vandrette komposant i tværsnittets plan (σ_x) såvel som komposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z) som beskrevet i afsnit 8.2.2. I tilfældet med fastholdt krumning giver σ_z ikke anledning til revnerisiko. Fordelingen af σ_z til tiden t = 22 timer er vist i fig. 8.18. Der ses at være en spændingsfordeling i væggen, som ikke varierer over væghøjden.



Figur 8.18: Spændingskomposant vinkelret på tværsnittet σ_z til tiden t = 22 timer. Forhindret krumning.

I fig. 8.19 ses fordelingen af σ_z til tiden t = 121 timer. Her ses afkølingen af overbygningen at føre til trækspændinger over hele væghøjden i modsætning til tilfældet med fri krumning, hvor trækspændingen er størst nederst i væggen (se fig. 8.13). Trækspændingsniveauet i væggen ses at være størst i tilfældet, hvor tværsnittet kan krumme. Modsat er trækspændingsniveauet i dækket højest i tilfældet, hvor krumning er forhindret.



Figur 8.19: Spaltetrækstyrkeudnyttelse umiddelbart efter afformning (t = 121 timer). Forhindret krumning.

på forhånd at afgøre, hvilken af de to situationer, der vil være farligst for ethvert punkt i konstruktionen til enhver tid.

8.3 Beregning med hærdemæssige foranstaltninger

8.3.1 Hærdemæssige foranstaltninger

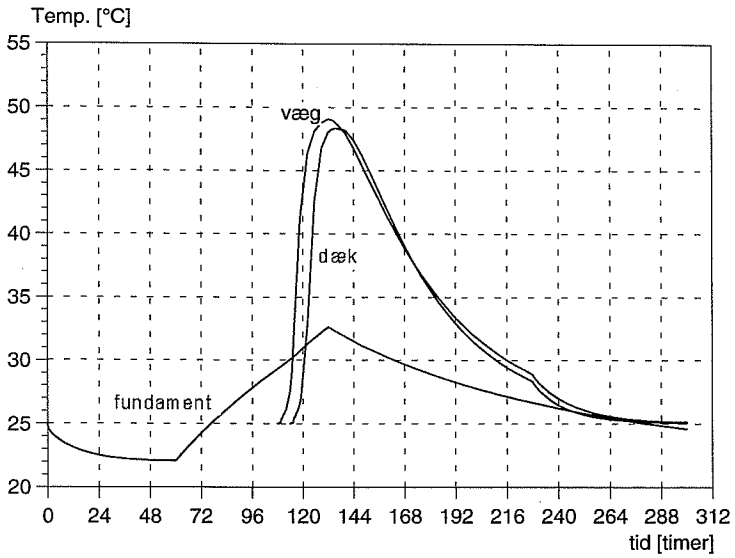
For at fjerne risikoen for langsgående revner i dækkets overside i opvarmningsfasen isoleres oversiden med presseninger. Disse beskytter desuden mod udtørring og erstatter derfor påføringen af curing membran. I beregningen antages presseningerne at være lagt på 1 time efter dækkets støbning.

For at fjerne riskoen for tværgående revner i dækkets overside i opvarmningsfasen og gennemgående revner i væggene i afkølingsfasen, opvarmes fundamenterne vha. varmetråde. Der placeres 12 varmetråde i hvert fundament med en afstand på 0.35 m. Effekten er 33 W/m pr. varmetråd. Fundamenterne isoleres med 55 mm vintermåtter samtidig med, at varmetrådene tændes. Fundamentets geometri, isolering og varmetråde svarer til eksempel 5.3. Heraf fremgår det, at de valgte foranstaltninger kan opvarme fundamentet ca. 10°C i løbet af 72 timer. En sådan opvarmning skønnes at være passende. Som beskrevet i afsnit 5.3.5 skal fundamenter og overbygning afkøles samtidig. Overbygningen maksimumtemperatur optræder ca 24 timer efter støbning af væggen (se fig. 8.2). Varmetrådene tændes derfor 48 timer inden støbning af væggen og holdes tændt i 72 timer.

Af eksempel 5.3 fremgår det, at det i dette tilfælde er passende at medtage en mængde jord, der er 1 m bredere end fundamentet i hver side og går ned til 3 m's dybde (se figur 5.10). Eksemplet viser, at der skal regnes i ca. 60 timer for at opnå en realistisk temperaturfordeling i jord og fundament før varmetrådene tændes, når begyndelsestemperaturen sættes til hhv. 11°C i jorden og 25°C i fundamentet. Jordens varmeledningsevne er sat til 6 kJ/m/h/°C, varmefylden er sat til 1.1 kJ/kg/°C og densiteten til 1700 kg/m^3.

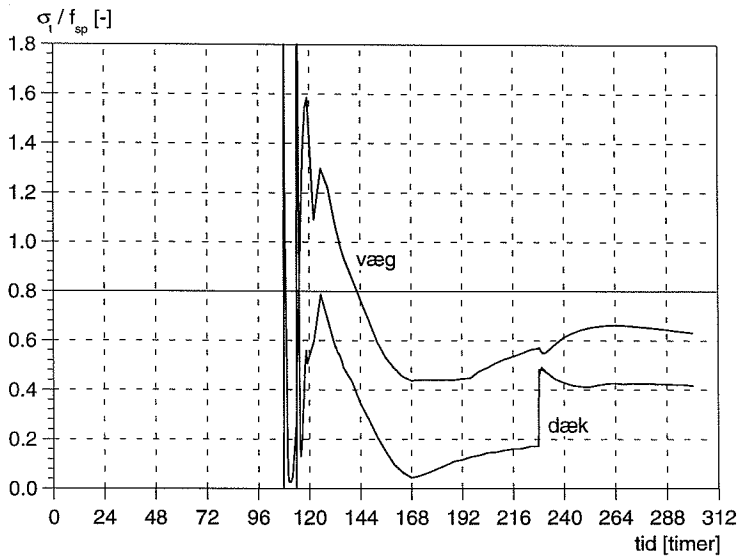
8.3.2 Resultater

I fig. 8.20 er vist middeltemperaturen som funktion af tiden for hhv. fundament, væg og dæk. Den maksimale middeltemperatur i væg og dæk er hhv. ca. 49°C og ca. 48°C. Fundamentets middeltemperatur ses at stige ca. 12°C i som følge af opvarmningen med varmetråde. Fundament og overbygning ses at afkøle samtidigt som ønsket.



Figur 8.20: Middeltemperaturer. Fundamentet opvarmes med varmetråde.

I fig. 8.21 er vist den maksimale trækspænding i forhold til spaltetrækstyrken for væg og dæk som funktion af tiden, når tværsnittet tillades at krumme frit. Det ses, at kravet på maksimalt 80% udnyttelse er overholdt for dækket til enhver tid. For væggen ses en tilsyneladende overskridelse i opvarmningsfasen. Forholdene er de samme som i den indledende beregning (se fig. 8.7 - 8.8) og skyldes væggens afkøling før dækkets støbning, der som nævnt i afsnit 8.2.2 ikke finder sted i praksis. Det er kontrolleret, at de foreslåede foranstaltninger ikke giver anledning til problemer i tilfældet, hvor tværsnittet forhindres i at krumme. Det kan derfor konkluderes at den valgte løsning fører til overholdelse af det stillede krav. Af fig. 8.20 ses det, at fundamentet ikke er fuldt afkølet, når overbygningen er det. Fundamentet vil derfor fortsat trække sig sammen, hvilket yderligere vil mindske risikoen for gennemgående revner senere i forløbet.

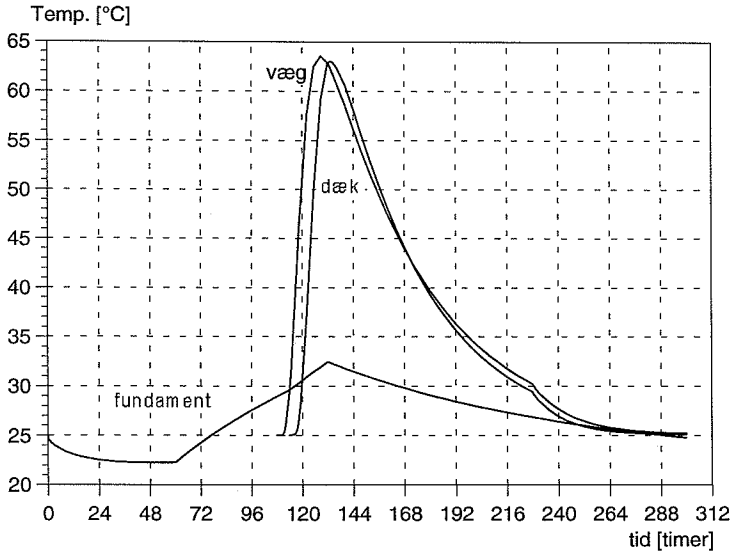


Figur 8.21: Maksimal spaltetrækstyrkudnyttelse. Fundamentet opvarmes med varmetråde. Fri krumning.

8.3.3 Alternativ beton

I [Riis et al., 1997] er betonegenskaberne for en alternativ betontype beskrevet. Denne beton har et v/c-forhold på 0.45. Der er anvendt portland limestone cement samt mikrosilica og flyveakse. I figur 8.22 og 8.23 er vist hhv. middeltemperaturer og spaltetrækstyrkeudnyttelse som funktion af tiden med anvendelse af den alternative beton. Bortset fra betontypen svarer beregningsforudsætningerne til de i afsnit 8.1 beskrevne. Tværsnittet regnes at kunne krumme frit. De hærdemæssige foranstaltninger svarer til de i afsnit 8.3.1 beskrevne.

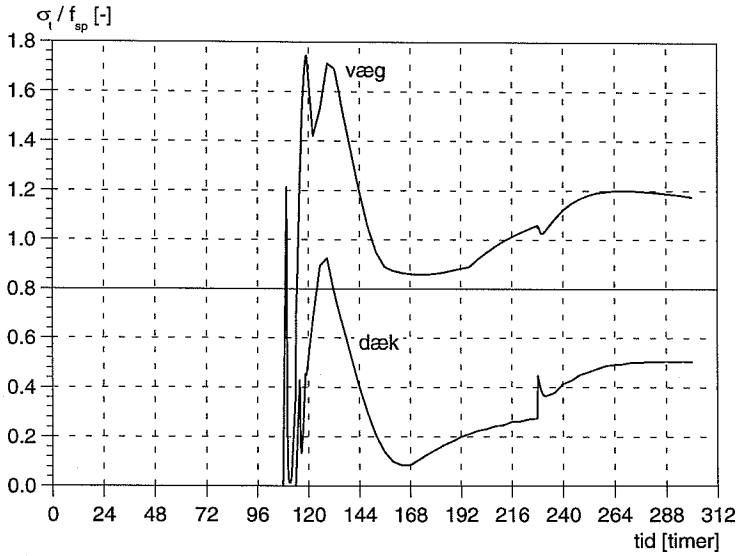
I figur 8.22 ses den maksimale middeltemperatur i væg og dæk at være hhv. ca. 64 °C og ca. 63 °C, dvs. ca. 15 °C højere end hvad der opnås med den første betontype (se figur 8.20). Fundamentets middeltemperatur svarer til det tidligere opnåede forløb (figur 8.20).



Figur 8.22: Middeltemperaturer ved anvendelse af alternativ beton. Fundamentet opvarmes med varmetråde.

I figur 8.23 ses, at væggen overskrider kravet på maksimalt 80% udnyttelse i hele perioden. Overskridelsen i opvarmningsfasen skyldes imidlertid, at væggen i beregningen afkøles i perioden før dækket støbes. Da denne afkøling som nævnt i afsnit 8.2.2 ikke finder sted i praksis, er den høje udnyttelse i væggen i opvarmningsfasen ikke udtryk for et reelt problem. Det er imidlertid den høje udnyttelse i væggen i afkølingsfasen. Den maksimale spaltetrækstyrkeudnyttelse optræder nederst i væggen og hidrører fra spændingskomposanten vinkelret på tværsnittet (σ_z). Spændingsfordelingen svarer principielt til fordelingen vist i figur 8.13. Det vil sige, at der er risiko for gennemgående permanente revner i væggen.

Spaltetrækstyrkeudnyttelsen i dækket ses at overskride 80% i opvarmningsfasen. Den høje udnyttelse optræder i oversiden af dækket i området over væggen. Problemet hidrører fra den vandrette komposant i tværsnittets plan (σ_x) og giver risiko for langsgående midlertidige revner i dækkets overside.



Figur 8.23: Maksimal spaltetrækstyrkeudnyttelse ved anvendelse af alternativ beton. Fundamentet opvarmes med varmetråde. Fri krumning.

9.0 Litteratur

Andersen, M.E. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking - Phase 8: Modelling of Support Conditions", Vejdirektoratet, Rapport nr. 98, 1997.

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

Beton-Teknik, 3/09/1981. "Revner i beton".

BS 8007, 1987.

DIN 1045/07.88. "Beton und Stahlbeton".

DS 411. "Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner", 1984.

DS 423.17. "Betonprøvning. Frisk beton. Afbinding", 1984.

DS 423.34. "Betonkonstruktioner. Prøvningsmetoder. Betons spaltetrækstyrke.", 1985.

DTI Byggeri "CIMS-2D Ver. 1.1 - User Manual", October 1995.

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

NT Build 388. "Heat development", 1992.

Pedersen, E. J. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking - Phase 9: Stress Calculations and Crack Observations", Danish Road Directorate, Report no. 115, 1997.

Pedersen, E.S et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - State of the Art", Danish Road Directorate, Report no. 52, 1996.

Riis, K. et al.: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 6: Early Age Properties of Alternative Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 114, 1997.

Spange, H. og Pedersen, E.S: "HETEK - Control of Early Age Cracking in Concrete - Phase 1: Early Age Properties of Selected Concrete", Danish Road Directorate, Report no. 59, 1996.

Spange, H. og Pedersen, E.S: "HETEK - Styring af revner i ung beton - Hovedrapport", Vejdirektoratet, Rapport no. 117, 1997.

TI-B 102. "Prøvningsmetode. Beton. tøjninger fra krybning og svind i tidlig alder", DTI Byggeri, 1995.

Vinterstøbning af beton. SBI Anvisning 125, 1985.

Bilag A

Isoleringsevne

Bilag A Isoleringsevne

Transmissionskoefficienten for en vindpåvirket flade kan beregnes af:

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

med

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

$$\alpha_k = 25.6 \cdot v^{0.78} \qquad v > 5 \text{ m/s} \qquad \textbf{(2)}$$

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:

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

hvor

e	er 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	Varmeledningstal [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 punktkontakt	-	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 vintermåtte	0.5 + 0.174	2.5	2.8	2.8
10-30 mm vandfilm på betonoverflade	-	50-> 70	-	-
Sprinklet vand på betonoverflade	-	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 Danmark

Bilag B Klimaforhold i Danmark

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.