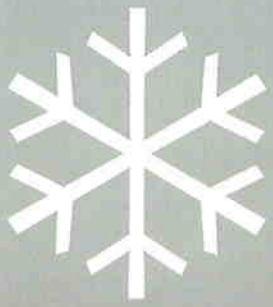
TEKNOLOGISK
INSTITUT

Per Freiesleben Hansen og Erik Jørgen Pedersen

VINTERSTØBNING AF BETON

Januar 1999



BETON

Vinterstøbning af beton

PER FREIESLEBEN HANSEN OG ERIK JØRGEN PEDERSEN

Forord til digital udgave, 2007

Denne udgave af "Vinterstøbning af beton" er skannet til pdf-format af Teknologisk Institut. Selv om visse dele af publikationen ikke er opdateret, bl.a. hvad angår cementbetegnelser, er det vores indtryk, at beskrivelsen af hærdeteknologi og hydratiseringsvarme stadig er gangbar i 2007 og at anvisningen udgør et værdigfuldt værktøj for betonteknologer.

Beregnings- og kontrolskemaer samt hærdediagrammer (side 14-41) er placeret i en separat pdf-fil.

Betoncentret, Taastrup, april 2007

Forord til genoptryk, 1999

Vinterstøbning af beton er udarbejdet af Beton- og Konstruktionsinstituttet i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut, SBI. Denne udgave er en scannet genoptrykning udført af TEKNOLOGISK INSTITUT, Beton, 1999, efter aftale med Statens Byggeforskningsinstitut.

I forhold til den oprindelige udgave fra 1982, SBI-ANVISNING 125, er der kun ganske få rettelser. De udførte rettelser tager alene hensyn til ændring af udgiver, adresser, telefonnummer etc.

Beregnings- og kontrolskemaet, der er omtalt på siderne 14-16 og som var trykt i en særskilt blok, er ikke genoptrykt.

Information om publikationen fås hos:

Teknologisk Institut
Beton
Gregersensvej
2630 Taastrup
www.teknologisk.dk\beton
Telefax 72 20 23 73
E-mail: **concrete.centre@teknologisk.dk**

Indhold

Forord ..... side 4

Vinterstøbning af beton 5

Introduktion 6
Hvad er formålet med vinterforanstaltninger? *6*
Hvordan styres betonens hærdeforløb? *6*
Hvad omfatter en kontrolleret hærdning i praksis? *7*
Hvilke informationer indeholder hærdediagrammerne? *8*
Hvordan bestemmes afkølingstallets værdi? *8*
Hvordan modvirkes temperaturrevner i hærdeperioden? *9*
Hvordan benyttes hærdediagramsystemet? *10*
Hærdediagramaflæsninger, *10*
Er det ikke nok blot at isolere betonen? *11*
Hvordan beregnes betonens modenhedsudvikling? *12*
Er det tilstrækkeligt blot at følge anvisningen? *13*
Kort sagt, *13*

Arbejdsblok med beregnings- og kontrolskema 14
Beregningsskema, *15*
Kontrolskema, *16*

Hærdediagrammer 17
Hurtighærdnende cement, type A, 250 kg/m³ *18/19*
Hurtighærdnende cement, type A, 300 kg/m³ *20/21*
Hurtighærdnende cement, type A, 350 kg/m³ *22/23*
Hurtighærdnende cement, type A, 400 kg/m³ *24/25*
Normalhærdnende cement, type B, 250 kg/m³ *26/27*
Normalhærdnende cement, type B, 300 kg/m³ *28/29*
Normalhærdnende cement, type B, 350 kg/m³ *30/31*
Normalhærdnende cement, type B, 400 kg/m³ *32/33*
Langsomhærdnende cement, type C, 250 kg/m³ *34/35*
Langsomhærdnende cement, type C, 300 kg/m³ *36/37*
Langsomhærdnende cement, type C, 350 kg/m³ *38/39*
Langsomhærdnende cement, type C, 400 kg/m³ *40/41*

Nogle typiske vinterstøbningseksempler 42
Eksempel 1. Støbning af støttemur, *43*
Eksempel 2. Støbning af søjle, *44*
Eksempel 3. Reparation af brodæk, *45*
Eksempel 4. Støbning af betonvæg, *47*

1. Frysning af jord 50
1.1 Jordens vandindhold, *50*
1.2 Frostens virkninger i jord, *50*
1.3 Frostsikker jord, *51*
1.4 Frostfarlig jord, *51*
1.5 Jordartens betydning for frostfarligheden, *51*

2. Frysning af beton 52
2.1 Betonteknologisk baggrund, *52*
2.2 Frysning af frisk beton, *53*
2.3 Frysning af hærdnet beton, *53*
2.4 Konklusion, *54*

3. Betons hærdning ..... side 55
3.1 Stofomsætning og hærdningsgrad, *55*
3.2 Hærdningens temperaturafhængighed, *55*
3.3 Betonens varmeudvikling, *55*
3.4 Måling af varmeudvikling, *56*
3.5 Adiabatisk kalorimetri, *56*
3.6 Varmeudviklingsforløbet, *57*
3.7 Styrkeudviklingsforløbet, *57*
3.8 Parametre for egenskabsudvikling, *58*

4. Frostsikkerhed og frostbestandighed 59
4.1 Frostsikkerhed, *59*
4.2 Frostbestandighed, *60*

5. Varmebalance under hærdning 61
5.1 Betonens temperaturforhold under hærdningen, *61*
5.2 Beregning af temperaturforløb i hærdeperioden, *62*
5.3 Hærdediagrammer, *63*
5.4 Temperatur Response Diagrammet, *63*
5.5 Overslagsformler for temperaturdifferenser, *65*

6. Styring af betons hærdeforløb 66
6.1 Styringsbegrebet, *66*
6.2 Klimatiske forudsætninger, *66*
6.3 Konstruktionens afkølingstal, *67*
6.4 Transmissionstallet, *68*
6.5 Udstøbningstemperaturen, *68*
6.6 Lufttemperaturen, *69*
6.7 Cementindholdet, *69*
6.8 Cementtyper, *70*
6.9 Vand/cement-forholdet, *70*
6.10 Varmekapaciteten, *70*

7. Temperaturmåling i beton 71
7.1 Målemetode, *71*
7.2 Placering af målesteder og montering af følere, *72*
7.3 Aflæsningsintervaller, *73*
7.4 Registrering og behandling af måleresultater, *74*

Appendix A: Dekrementfaktorer 75
Appendix B:
Overslagsformler for temperaturdifferenser 76
Appendix C:
Frostsikkerhed af hærdnende cementpasta 78
Appendix D: Beregningseksempler 79
Appendix E: Symbolliste 85
Appendix F: Leksikale stikord 87
Appendix G: Enheder for fysiske størrelser 93
Appendix H: Litteratur 96

Transparent bilag:
Varmeudviklingskurver for cementtyper A, B og C, efter 96

Forord

Høj luftfugtighed, rigelig nedbør og et betydeligt antal frysepunktspassager karakteriserer det danske vinterklima. Frostangreb på klimapåvirket beton – smuldring, afskalning og revnedannelser – har da også gennem tiderne skabt alvorlige holdbarhedsproblemer her i landet.

Siden 1920'erne er der internationalt gennemført omfattende undersøgelser og teoretiske analyser af de fysiske mekanismer, der ligger til grund for frostbeskadigelse af beton. Et vendepunkt i denne udvikling indtrådte i 1940'erne og 50'erne. Med udgangspunkt i T. C. Powers banebrydende studier af den hærdnende cementpastas struktur fremkom der i denne periode en række væsentlige bidrag til betonlitteraturen. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM) kunne i København 1956 på et symposium om vinterstøbning af beton fastslå den praktiske anvendelse af den udførte forskning.

En værdifuld dansk indsats på området blev i denne periode markeret gennem arbejder af bl.a. Nerenst, Rastrup, Idorn og Jessing. I SBI-anvisning 17 »Betonstøbning om vinteren« fra 1953 og 1958 blev bl.a. Powers grundlæggende arbejder udmøntet i en praktisk, betonteknologisk vejledning.

Nærværende anvisning om betons hærdning under vinterforhold erstatter SBI-anvisning 17. Grundtanken i den ny anvisning er den samme som i den nu mere end 20 år gamle anvisning, dog med den tilføjelse at frostfasthedskriteriet er suppleret med kriteriet: sikring mod kritiske temperaturspændinger.

En stærkt ændret disponering af stoffet, herunder separat udgivelse af en arbejdsblok med beregnings- og kontrolskema, har dog begrundet, at anvisningen har fået nyt nummer og ny titel.

Revisionen er udført af akademiingeniørerne Per Freiesleben Hansen og Erik Jørgen Pedersen, bkf-centralen (pr. 15.6.82 benævnt Beton- og Konstruktionsinstituttet, BKI), med bistand af en af SBI nedsat redaktionskomité med følgende sammensætning:

Rådgivende civilingeniør, dr. techn. G. M. Idorn.
Vinterkonsulent, civilingeniør Axel Kofoed.
Direktør, civilingeniør Poul Nerenst.
Lektor, civilingeniør, tekn. dr. Anders Nielsen.
Akademiingeniør Svend Øivind Olesen.
Vicedirektør, cand. polit. Per Bredsdorff.

Grundlaget for edb-grafikken i anvisningens hærdediagrammer er udarbejdet af civilingeniør Karl Grau, SBI.

Den afsluttende anvisningsredaktion er foretaget af civilingeniør Peter Mogensen, SBI.

Anvisningen kan ses som en naturlig del af et større arbejde om hærdeteknologi, som Per Freiesleben Hansen har udført, og som i 1978/79 blev udgivet i samarbejde med Aalborg Portland. Dette arbejde omfatter et generelt beregningsgrundlag, således at problemer, der falder uden for nærværende anvisning, kan behandles gennem generelle løsningsmetoder, som er beskrevet i notaterne »Hærdeteknologi« [8], [14].

SBI, anvisningens forfattere og dens redaktionskomité håber med denne udgivelse at opfylde behovet hos projekterende teknikere for et let håndterligt værktøj til brug ved planlægning og kontrol af betonstøbninger under vinterforhold.

Ved at følge fremgangsmåderne i denne anvisning, kan man forbedre holdbarheden af vinterstøbt beton.

Der er imidlertid andre problemer vedrørende betons holdbarhed, som ikke er dækket af denne SBI-anvisning.

Mange af disse andre problemer vil blive behandlet i de publikationer, der vil blive udsendt som resultat af de initiativer, der tages af det nyligt dannede ATV-udvalg vedrørende betonbygværkers holdbarhed.

Per Bredsdorff
Afdelingen for bygningskonstruktioner
Statens Byggeforskningsinstitut, september 1982

Vinterstøbning af beton

Denne SBI-udgivelse omfatter dels en anvisning, dels et tillæg til anvisningen. Selve anvisningen beskriver i hovedsagen det hærdeteknologiske grundlag for støbning af beton under vinterforhold. Tillægget udgøres af en arbejdsblok med beregnings- og kontrolskema til direkte brug i praksis.

Selv om anvisningen overvejende er af teoretisk karakter, indeholder den dog dels en populær introduktion, der sætter læseren i stand til at klare simple vinterstøbningsopgaver, dels en række beregningseksempler. Disse viser den praktiske anvendelse af det teoretiske stof med henvisning til de steder, hvor beregningsgrundlaget er behandlet.

Anvisningens vigtigste kapitler handler om, hvordan betonens hærdning kan beregnes eller styres ved hjælp af betonens temperaturforløb. Værktøjet hertil består af hærdediagrammer, som dels angiver betontemperaturens forløb i afhængighed af tiden i timer fra udstøbningstidspunktet, dels angiver, hvornår hærdningen er så langt fremskreden, at betonen har opnået en ønsket modenhed. Da betonens temperaturforløb afhænger af en række forhold som betonens sammensætning, den anvendte cementtype, konstruktionens dimensioner, formtype, formisolering og omgivelsernes temperatur- og vindforhold, har det været nødvendigt at udarbejde flere sæt diagrammer. Disse sæt er ordnet indbyrdes på en sådan måde, at brugeren forholdsvis let kan finde netop det sæt og det diagram, der passer til en bestemt støbesituation.

Anvisningen indeholder *ikke* noget om tilslagsmaterialer, betonproportionering, udstøbningsteknik, komprimering, byggepladsudstyr og byggepladsindretning; der henvises til [1], [2], [3], [4]. I øvrigt forudsættes almindelig, god betonpraksis anvendt.

Tillægget er en selvstændig arbejdsblok med beregnings- og kontrolskema, hvis anvendelse er nærmere anskueliggjort i et af anvisningens kapitler med nogle typiske vinterstøbningseksempler. Ved at bruge arbejdsblokken opnår man den fordel, at beregningsforudsætninger, forslag til udførelse og kontrol-check kan sagsarkiveres på en overskuelig måde.

Tilsammen udgør anvisning og tillæg et sammenhængende og systematiseret beregningsværktøj, der letter planlægning og kontrol af betonstøbning under vinterforhold.

Opmærksomheden henledes på de 8 afsluttende kapitler (Appendix A-H), der dels indeholder en detaljering af den teoretiske fremstilling, dels rummer praktisk opslagsstof, såsom symbolliste, leksikale stikord og enheder for fysiske størrelser.

Introduktion

En sikker og hensigtsmæssig udstøbning af beton under vinterforhold stiller en række krav til arbejdets planlægning og udførelse. For at hjælpe læseren til at få et overblik over vinterstøbningens problemer, er de grundlæggende principper for kontrolleret hærdning af beton om vinteren resumeret i det følgende.

Denne kortfattede introduktion vil, sammen med anvisningens hærdediagrammer, give det nødvendige grundlag for at planlægge og kontrollere forløbet af simple vinterstøbningsarbejder i beton.

Den fulde udnyttelse af de muligheder, man i praksis har for at styre betonens hærdeforløb, forudsætter dog en hærdeteknologisk viden ud over det, introduktionen omfatter. Under arbejdet med praktiske vinterstøbningsopgaver anbefales det derfor læseren selv at underbygge introduktionen med opslag i anvisningens øvrige kapitler. Herigennem vil det være muligt gradvis at tilegne sig den nødvendige teori, og opnå det tilsigtede udbytte af anvisningen.

Men introduktionen giver som nævnt et første, tilstrækkeligt grundlag for selv at kunne planlægge og kontrollere forløbet at simple vinterstøbningsopgaver.

Hvad er formålet med vinterforanstaltninger?

En sikker og hensigtsmæssig udstøbning af beton under vinterforhold er opnået, *når* betonen er sikret mod beskadigelse pga. tidlig frysning og pga. temperaturspændinger, og *når* betonen får et styret hærdeforløb.

1. Sikring mod beskadigelse ved tidlig frysning. Erfaringsmæssigt vil en hærdnende beton tage varig skade, såfremt den første frysning sker inden betonen har opnået en modenhed på 15–20 timer. Betonens modenhed angiver det antal hærdetimer ved 20 °C, der giver den samme hærdningstilstand.

2. Sikring mod beskadigelse som følge af temperaturspændinger. Optræder der store temperaturforskelle i betonen under hærdningen, vil der opstå spændinger på grund af betonens varmeudvidelse. Erfaringsmæssigt kan der således fremkomme trækrevner i betonens overflade, hvis temperaturforskellen mellem midten og overfladen af en væg eller søjle under afkøling overstiger 20–25 °C.

3. Sikring af hensigtsmæssigt hærdeforløb. Det skal sikres, at den nødvendige afformningsstyrke opnås på det ønskede tidspunkt, under samtidig hensyntagen til arbejdets tekniske, tidsmæssige og økonomiske forudsætninger.

Formålet med vinterforanstaltningerne er kort sagt at styre betonens hærdning således, at de tre nævnte forudsætninger opfyldes på en økonomisk og energimæssig forsvarlig måde.

Hvordan styres betonens hærdeforløb?

For at forstå de principper, der ligger til grund for en styring af betons hærdeforløb, er det nyttigt at fæstne opmærksomheden ved tre forhold.

1. Hastigheden af en hærdeproces er i det væsentlige bestemt af betontemperaturen. Øges betonens temperatur, forløber processen hurtigere. Sænkes betonens temperatur, forløber processen langsommere. Ved 35 °C sker hærdningen ca. dobbelt så hurtigt som ved 20 °C. Ved 10 °C er hastigheden ca. det halve af hastigheden ved 20 °C.

2. Under betonens hærdning udvikles der varme. Temperaturen i en beton, der hærdner uden varmetab til omgivelserne, vil som følge heraf øges. Denne selvopvarmning medfører bl.a., at temperaturen i en typisk betonblanding kan blive 60–80 °C højere end udstøbningstemperaturen.

3. Betonens temperaturforløb i en konstruktion er bestemt af balancen mellem varmeudviklingen i betonen og varmeudvekslingen til den omgivende luft. I meget svære konstruktioner, eller i stærkt isolerede konstruktioner bliver temperaturen høj, idet hærdevarmen kun vanskeligt kan afgives til den omgivende luft. I tyndvæggede, uisolerede konstruktioner er forholdet omvendt; den udviklede hærdevarme kan let afgives til den omgivende luft, og temperaturstigningen bliver derfor lille.

Af disse forhold vil det fremgå, at det væsentligste element i styringen af hærdeforløbet er kontrollen med betonens hærdevarme. Hvor stor en del af hærdevarmen ønskes afsat som temperaturstigning i betonen, og hvor stor en del af hærdevarmen skal ledes ud til omgivelserne?

I praksis har man en række muligheder for at styre denne balance mellem varmeudvikling og varmeudveksling. Vigtigst i denne forbindelse er de fire forhold, som er nævnt i det følgende.

1. Betonens udstøbningstemperatur. Jo højere betontemperaturen er ved udstøbningen, desto hurtigere vil hærdeprocessen indledes, og desto hurtigere vil betonens varmeudvikling blive. Betonens temperatur kan normalt hæves til det ønskede niveau ved brug af varmt

blandevand, eventuelt kombineret med en vis forvarmning af tilslagsmaterialerne.

2. Formsystem og formisolering. Med anvendelse af traditionelle formmaterialer og isoleringsforanstaltninger kan varmeudvekslingen mellem den udstøbte beton og omgivelserne fastlægges inden for vide rammer. Varmeledningsmodstanden i en stålform kan fx gennem simple isoleringsforanstaltninger øges 50–100 gange. Inden for vide grænser kan man derfor tilpasse et formsystem, så det under givne forudsætninger sikrer et ønsket hærdeforløb.

3. Afformningstidspunkt. Det tidligst mulige afformningstidspunkt er normalt bestemt af kravet til betonens styrke. I praksis kan man dog undertiden med fordel udnytte en forlænget formperiode som led i en hærdestyring. Dette gælder fx ved enkeltstøbninger, hvor hensynet til temperaturspændinger kræver en efterisolering af konstruktionen efter afformningen.

4. Cementtype og cementindhold. Under visse forhold kan det være hensigtsmæssigt at tilpasse en betonrecept til et støbearbejde, der skal udføres under vinterbetingelser. Ved anvendelse af en finere formalet cement, fx en hurtighærdnende portlandcement PC(R) i stedet for almindelig portlandcement PC(A), opnås en beton med hurtigere varme- og styrkeudvikling. En næsten tilsvarende effekt kan principielt opnås gennem et øget cementindhold i betonen. I praksis bør anvendelse af unødigt høje cementindhold dog undgås. Det vil i almindelighed være en uøkonomisk løsning, og kan i øvrigt have uheldige følgevirkninger for betonens brugsegenskaber.

Sammenfattende gælder det, at styringen af betonens hærdeforløb hovedsageligt sker ved valg af udstøbningstemperatur og ved valg af formsystem/formisolering. Vælges disse parametre korrekt under hensyntagen til betontype, konstruktionsudformning og vejrlig, kan hærdeprocessens forløb i vidt omfang tilpasses givne krav.

Hvad omfatter en kontrolleret hærdning i praksis?

For at opnå en sikker og hensigtsmæssig hærdning af beton, der udstøbes under vinterforhold, er det nødvendigt at investere en vis arbejdsindsats i forberedelsen og udførelsen af støbearbejdet. I forbindelse hermed vil ekstraindsats være påkrævet på de følgende tre punkter.

1. Planlægning af støbearbejdet. Inden støbearbejdet igangsættes, bør udstøbningstemperatur, formtype, isoleringsforanstaltninger samt eventuel efterbehandling være fastlagt, således at hærdeforløbet er tilpasset de aktuelle forudsætninger for opgaven. Til støtte for denne planlægning indeholder denne SBI-anvisning de nødvendige diagrammer og tabeller. Denne indledende planlægning kan på simpel og overskuelig måde ske ved anvendelse af beregningsskemaet i den arbejdsblok, der er udsendt som tillæg til anvisningen. Herved opnås samtidig, at der foreligger en overskuelig dokumentation til brug i byggesagen.

2. Kontrol af støbearbejdet. I forbindelse med støbearbejdets udførelse bør det kontrolleres, at betonkvalitet, udstøbningstemperatur, vejrlig og isoleringsforanstaltninger svarer til de forudsætninger, der er gjort i forbindelse med planlægningen. I modsat fald må de nødvendige ændringer i arbejdsforløbet foreskrives. Ét forhold, der i denne forbindelse kræver særlig opmærksomhed, er betonens udstøbningstemperatur. Hermed menes den temperatur betonen har i formen efter udstøbning og komprimering, og ikke den såkaldte leveringstemperatur fra blandestation. Selv beskedne ændringer i udstøbningstemperaturen kan influere væsentligt på det efterfølgende hærdeforløb. Til brug for denne kontrol og registrering af støbearbejdets forløb findes der et kontrolskema på bagsiden af beregningsskemaet i arbejdsblokken.

3. Kontrol af hærdeforløbet. Forudsigelsen af et hærdeforløb i en given, udstøbt betonkonstruktion, bygger på en lang række gjorte forudsætninger. Afhængig af den personlige erfaring man har i hærdestyring, kan disse forudsætninger stemme mere eller mindre godt overens med de virkelige forhold. Det bør derfor være en regel, at betonens hærdeforløb kontrolleres frem til afformningstidspunktet, og eventuelt også under den efterfølgende nedkøling. Tilstræber man tidlig afformning af betonen, bør den endelige beslutning om afformning *altid* baseres på in situ test af betonens styrke, eller på en modenhedsberegning ud fra målte temperaturforløb. Anvisningens hærdediagrammer bør alene benyttes som et planlægningsværktøj. De nødvendige temperaturmålinger, fx måling 2 à 3 gange pr. arbejdsdag, udføres mest hensigtsmæssigt med termoelementer; ved mindre støbearbejder kan målingerne dog eventuelt udføres med almindelige stavtermometre, der sænkes ned i et indstøbt, oliefyldt rør. Måleresultaterne kan noteres i arbejdsblokkens kontrolskema. Ved ændring af isoleringsbetingelserne for en varm, hærdnende betonkonstruktion, bør det sikres, at der ikke opstår kritiske temperaturspændinger i betonen. Kontrollen heraf er foreskrevet i arbejdsblokkens kontrolskema, samt i denne introduktions tabel 2. Baggrunden for denne kontrol findes i anvisningens kapitel 7.

Som det fremgår af det forannævnte, er det nødvendigt at planlægge og kontrollere støbearbejdets udførelse, såfremt man ønsker en sikker og hensigtsmæssig hærdning af betonen. De økonomiske og styringsmæssige fordele der herved kan opnås, vil dog i de fleste tilfælde langt opveje denne indsats. Med passende øvelse i brugen af anvisningens hærdediagrammer er der tale om et beskedent merforbrug af tid.

Hvilke informationer indeholder hærdediagrammerne?

Ved udformningen af diagrammerne er der lagt vægt på, at de skal indeholde de nødvendige og tilstrækkelige informationer for den bruger, der skal planlægge et støbearbejde under vinterforhold.

For at opnå et sikkert hærdeforløb, er det som nævnt nødvendigt at undgå frostbeskadigelse af den hærdnende beton, samt at begrænse temperaturspændingerne til et ukritisk niveau. For at opnå et hensigtsmæssigt hærdeforløb, er det på samme tid nødvendigt at kunne tilpasse betonens modenhedsudvikling til de arbejdsplaner, der gælder for støbearbejdet. De hertil krævede informationer fremgår af anvisningens diagramsystem.

Hærdediagram-systemet er opbygget over en række enkeltdiagrammer, som vist på den efterfølgende figur.

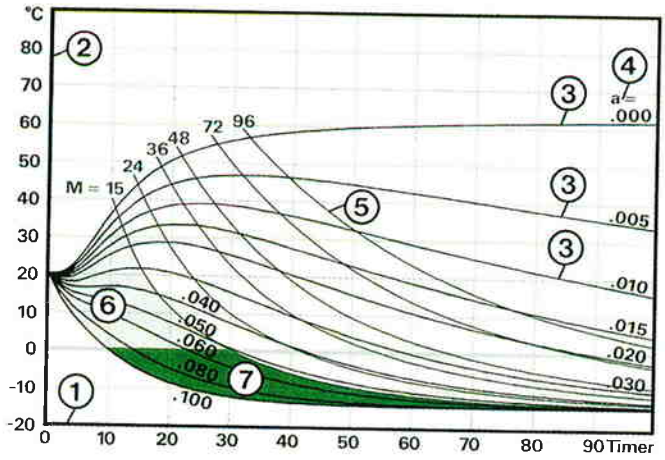
Diagrammet indeholder en vandret akse (1), der angiver tiden i timer fra udstøbningstidspunktet, og en lodret akse (2), der angiver betontemperaturen i °C.

I diagrammet er der indtegnet en række sorte kurver med temperaturforløb (3), der hver svarer til en bestemt værdi (4) for konstruktionens afkølingstal a. Afkølingstallet a er et mål for, hvor hurtigt en given konstruktion afgiver varme og kommer i ligevægt med den omgivende luft. De 11 kurver har værdier fra $a = 0.000$ til $a = 0.100$. Som det ses af diagrammet, opnås høje betontemperaturer ved lave af afkølingstal, og lave betontemperaturer ved høje afkølingstal. Afkølingstallet a har enheden »pr. time«, skrevet h^{-1}. Afkølingstallets størrelse er afhængig af konstruktionens dimensioner, af formtype og formisolering, samt af vindhastigheden i den omgivende luft.

Diagrammet indeholder endvidere en række farvede kurver (5), der angiver tidspunktet for opnåelse af en bestemt modenhed i betonen. Modenheden M, anført fra 15 til 96 timer, angiver den tilsvarende hærdetid i timer ved 20 °C for opnåelse af samme hærdningsgrad, fx udtrykt som betontrykstyrke.

I diagrammet er der indlagt et lyst farvefelt (6), og et mørkt farvefelt (7). Forløber betontemperaturen gennem det lyse felt (6), er hærdningen endnu ikke så fremskredet, at betonen kan tåle frysning uden at tage varig skade. Forløber betontemperaturen gennem det mørke felt (7), er der indtrådt frysning af betonen på et tidspunkt, der må forventes at have medført varig beskadigelse.

Det her gengivne diagram er beregnet for en bestemt cementtype, et bestemt cementindhold, en bestemt lufttemperatur og en bestemt betontemperatur ved udstøbningen. I anvisningens hærdediagram-system er et bestemt sæt af forudsætninger (cementtype, cementindhold, lufttemperatur og udstøbningstemperatur) kombineret og kortlagt.



Cementtype

Diagrammer med *rød* farve angiver varmeudviklingsdata svarende til en hurtighærdnende cement, type A. Diagrammer med *grøn* farve angiver varmeudviklingsdata svarende til en normalhærdnende cement, type B. Diagrammer med *blå* farve angiver varmeudviklingsdata svarende til en langsomhærdnende cement, type C.

Disse typebetegnelser, som gælder for denne SBI-anvisning, må ikke forveksles med de gængse handelsbetegnelser som fx PC(A), der står for almindelighærdnende portlandcement, PC(R) og PC(E), der betegner henholdsvis hurtighærdnende og ekstra hurtighærdnende cement.

Cementindhold			
250 kg/m³	300 kg/m³	350 kg/m³	400 kg/m³
Lufttemperatur			
-1 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C
Udstøbningstemperatur			
5 °C	10 °C	15 °C	20 °C

Ved brug af hærdediagrammerne kan alternative forslag til udførelse af et støbearbejde hurtigt vurderes, og den mest hensigtsmæssige udførelse vælges.

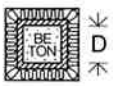
Hvordan bestemmes afkølingstallets værdi?

En konstruktions afkølingstal a er et mål for, hvor hurtigt varmen i konstruktionen kan afgives til omgivelserne. Jo højere afkølingstallets værdi er, desto hurtigere vil en temperaturforskel mellem konstruktionen og dennes omgivelser udlignes.

Fremgangsmåden ved beregning af afkølingstallet er beskrevet i detaljer i anvisningen. Til brug for planlægning af støbearbejder, omfattende simple væg- og søjletværsnit, er der i tabel 1 på side 9 angivet omtrentlige talværdier for afkølingstal for en række tværsnit.

Der er i tabellen forudsat en vindhastighed på ca. 5 m/s, svarende til let til jævn vind. Ved højere vindhastigheder vil afkølingstallet være højere end angivet, og omvendt ved lavere vindhastigheder.

Tabel 1. Omtrentlige værdier for afkølingstallet a, h^{-1} for de viste tværsnit. Skravering angiver formplade eller træforskalling med k = 18 kJ/m²h °C. Skravering plus bølgelinie angiver formplade/træforskalling plus 50 mm vintermåtte med samlet k = 3 kJ/m²h °C. Fede kursive tal angiver, at tværsnittet ligger uden for hærdediagrammernes gyldighedsområde. Der er i tabellen regnet med vindhastighed 5 m/s, betonrumvægt 2350 kg/m³ og betonvarmefylde 1.1 kJ/kg °C.

	Tværsnit	Dimension D, m							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
Plan væg eller plant dæk		0.14	0.07	0.046	0.035	***0.028***	***0.023***	***0.017***	***0.014***
		0.08	0.04	***0.027***	***0.020***	***0.016***	***0.014***	***0.010***	***0.008***
		0.023	0.012	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
Kvadratisk søjle		0.28	0.14	0.093	0.070	***0.056***	***0.046***	***0.035***	***0.028***
		0.05	0.023	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005
Cylindrisk søjle		0.28	0.14	0.093	0.070	***0.056***	***0.046***	***0.035***	***0.028***
		0.05	0.023	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005

Ved brug af tabellen kan der hurtigt fås et overblik over afkølingstallets størrelse for simple tværsnit og formsystemer. Det må dog stærkt anbefales, at man i videst muligt omfang selv beregner afkølingstallet ved brug af arbejdsblokkens beregningsskema, punkt 1–6. Kun herigennem får man den nødvendige rutine i at bedømme de forskellige faktorers indflydelse på hærdeforløbet. Den nødvendige baggrundsteori for denne beregning er gennemgået i anvisningens kapitler 5 og 6.

Hvordan modvirkes temperaturrevner i hærdeperioden?

I perioden umiddelbart efter afformning/afisolering af varm, hærdnende beton, kan der opstå betydelige temperaturforskelle. Disse temperaturforskelle vil, som følge af betonens varmeudvidelse, medføre en uensartet sammentrækning af betonen under afkølingen. Overfladen køles hurtigere ned end tværsnittets midtzone. Herved opstår trækspændinger, der i visse tilfælde kan føre til udbredte revnedannelser i konstruktionens overflade.

En nøjagtig beregning af disse temperaturbetingede spændinger i hærdnende beton er yderst kompliceret. Erfaringsmæssigt kan man dog begrænse eller eliminere risikoen for revnedannelse gennem simple forholdsregler.

Praktiske erfaringer og laboratorieforsøg viser samstemmende, at trækrevner i forbindelse med afformningen tidligst opstår, når temperaturforskellen mellem midten og overfladen af en væg eller søjle overstiger 20–25 °C under afkølingen.

I anvisningens afsnit 5.5 er der angivet beregningsmetoder til forhåndsvurdering af de største temperaturforskelle, der kan forventes ved afformning og nedkøling af et givet tværsnit. Ved simple overslagsberegninger kan den størst tilladelige temperaturbelastning af simple tværsnit dog hurtigere bestemmes udfra tabel 2.

I tabel 2 på side 10 er angivet vejledende værdier for den største acceptable temperaturforskel mellem beton og luft på det tidspunkt, hvor konstruktionens form og isolering fjernes. Overskrides de anførte temperaturforskelle, må det forventes, at temperaturdifferenserne i betonen overstiger 20 °C. Dette vil igen sige, at der er risiko for kritiske temperaturspændinger i betonen.

De første tre vandrette talrækker i tabel 2 beskriver den situation, hvor form/isolering fjernes, og konstruktionen henstår ubeskyttet under afkølingen. De følgende tre talrækker beskriver den situation, hvor der *umiddelbart* efter formens og isoleringens nedtagning etableres en efterisolering med presenningafdækning.

Anvendelsen af tabel 2 til simple forhåndsvurderinger kan illustreres med følgende eksempel: En 0.40 m tyk væg skal afformes uden brug af efterisolering. Lufttemperaturen er ca. -1 °C, og vindhastigheden ca. 5 m/s. Bestem den højeste betontemperatur der bør accepteres på afformningstidspunktet.

Tabel 2. Vejledende værdier for den størst tilladelige temperaturforskel i °C mellem beton og luft på det tidspunkt, hvor form og isolering fjernes, gældende for plan væg/plant dæk med tykkelse D, for kvadratisk/cylindrisk søjle med kvadratside/diameter D. Der er i tabellen regnet med normalbeton med varmeledningstal 8.0 kJ/m · h · °C.

Udførelse	Vindhastighed m/s	Dimension D, m							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
Konstruktionen henstår ubeskyttet efter det tidspunkt, hvor form og isolering er fjernet	1	–	–	83	67	58	51	44	39
	5	91	56	44	38	34	32	29	27
	10	60	40	33	30	28	27	25	24
Konstruktionen beskyttes med presenning eller plastfolie umiddelbart efter afformning/afisolering	1	–	–	96	77	66	58	49	43
	5	–	76	57	48	42	39	34	31
	10	–	63	48	41	37	34	31	29

Af tabel 2 ses, at den størst tilladelige forskel mellem betonens og luftens temperatur er ca. 38 °C for D = 0.40 m. Idet luftens temperatur er -1 °C, svarer dette krav til en største betontemperatur på ca. 37 °C på afformningstidspunktet.

Hvordan benyttes hærdediagram-systemet?

Brugen af anvisningens diagramsystem vil - med lidt øvelse - næppe volde særlige vanskeligheder. De nødvendige opslag til løsning af en simpel planlægningsopgave kan lettest illustreres med et eksempel.

Beregningseksempel. Forudsætninger.

Konstruktion: Støttemur, højde 2 m, tværsnit 0.40 m tykt.
Beton: Normalhærdnende cement, type B, 300 kg/m³.
Formsystem: Kan vælges frit.
Krav til udførelse:
1. Afformning 3 døgn efter udstøbning.
2. Modenhed ved afformning mindst 42 timer.
3. Modenhed ved første frysning mindst 15 timer.
4. Der må ikke opstå risiko for temperaturrevner.

Forventet vejrlig:
Laveste lufttemperatur -1 °C, vind ca. 5 m/s.

Der ønskes udarbejdet et forslag til støbearbejdets udførelse, hvor bl.a. udstøbningstemperatur, formsystem og eventuel formisolering anvises.

Ved løsningen af denne simple planlægningsopgave udsøges først de diagrammer, der svarer til de givne forudsætninger. Normalhærdnende cement, type B: Opslag i grønne diagramblade, cementtype B. Cementindhold: Opslag på blade med cementindhold 300 kg/m³. Lufttemperatur: Opslag i søjlen med fire deldiagrammer under lufttemperatur -1 °C.

Hærdediagramaflæsninger

Den lodrette linie (1) repræsenterer det ønskede afformningstidspunkt 3 døgn, svarende til 72 timer. På dette tidspunkt skal betonens modenhed være større end eller lig med 42 timer.

Kurven (2) angiver det tidspunkt, hvor betonens modenhed er 42 timer, hvilket svarer til det stillede krav.

Af tabel 1 ses, at den 0.40 m tykke væg har et afkølingstal på ca. 0.035 h^{-1} i en uisoleret form, og et afkølingstal på ca. 0.006 h^{-1} i en form, der isoleres med vintermåtter. De hertil svarende, forventede temperaturforløb er kurverne (3), henholdsvis (4).

Skæringspunkterne A, B, C og D mellem kurverne (2) og (3) angiver de tidspunkter, hvor modenhedskravet kan forventes opfyldt ved hærdning i uisoleret form.

Skæringspunkterne A', B', C' og D' mellem kurverne (2) og (4) angiver de tidspunkter, hvor modenhedskravet kan forventes opfyldt ved hærdning i form, der isoleres med 50 mm vintermåtter.

Benyttes uisoleret form, ses de stillede krav til afformningsmodenhed at være opfyldte for udstøbningstemperaturer 10 °C, 15 °C og 20 °C. En udstøbningstemperatur på 5 °C er for lav, idet modenhedskravet da først opnås efter ca. 4 døgns hærdning.

Benyttes isoleret form, kan afformningskravet forventes opfyldt for alle de angivne udstøbningstemperaturer.

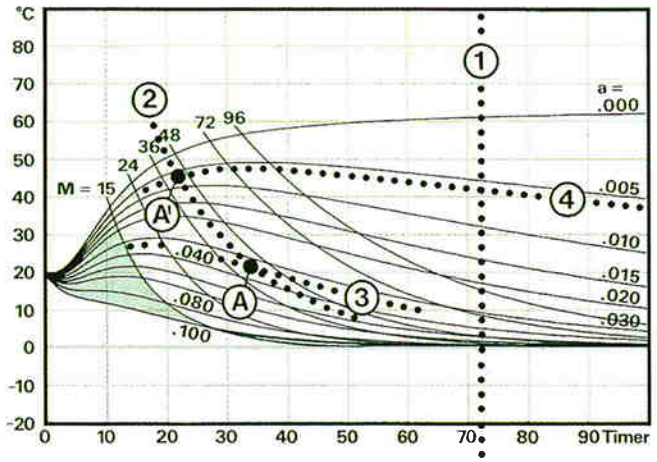
Som løsning kan vælges udstøbning med uisoleret form, og en betontemperatur på ikke under 10 °C (punkt C). Den maksimale betontemperatur må da forventes at blive ca. 18 °C, svarende til punktet X. Dette sikrer, at der ikke kan opstå temperaturforskelle i betonen på over 20 °C.

Det fremgår endvidere af diagrammet, at der ikke er risiko for beskadigelse af betonen ved tidlig frysning, idet temperaturforløbet ikke passerer et mørkt farvefelt.

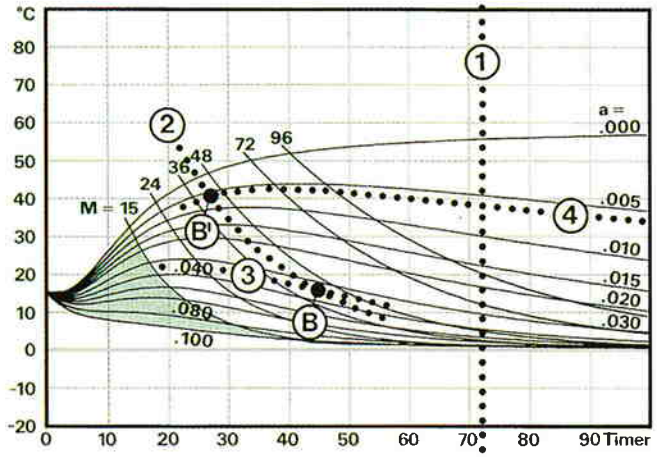
Med nogen øvelse kan de beskrevne diagramaflæsninger gennemføres på få minutter. Resultatet af aflæsningerne kan derefter udformes i et konkret forslag til udførelse af støbearbejdet. Det kan for det aktuelle eksempel være som angivet øverst på side 11.

Lufttemperatur θ_L = - 1 °C

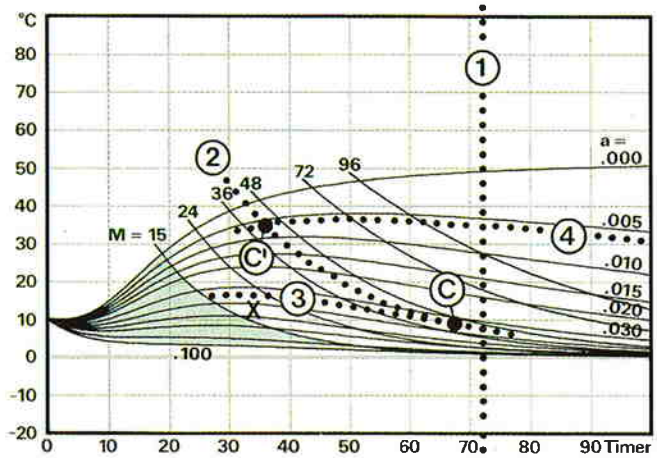
Beton-temp. θ_B = 20 °C



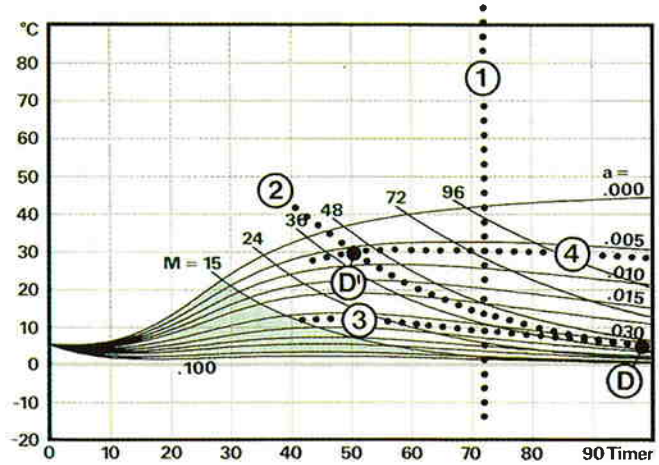
Beton-temp. θ_B = 15 °C



Beton-temp. θ_B = 10 °C



Beton-temp. θ_B = 5 °C



Beregningseksempel. Forslag til udførelse.

Formsystem: Betonen udstøbes i almindelig træforskalling uden brug af formisolering. Overside isoleres.
Udstøbningstemperatur: Efter udstøbning og komprimering skal betonens temperatur være mindst 10 °C.
Afformningstidspunkt: Forventet afformningstidspunkt 3 døgn efter udstøbning ved en modenhed på ca. 42 timer.
Kontrol: Såfremt udstøbningstemperaturen kommer under 10 °C, eller såfremt lufttemperaturen inden for hærdeperioden bliver lavere end ca. -1 °C, skal der udføres supplerende foranstaltninger efter nærmere ordre. Betonens temperaturforløb skal kontrolleres ved måling. Afformning må først ske, når det er eftervist, at den krævede modenhed er opnået overalt i tværsnittet. Denne kontrol skal også omfatte temperaturmåling i støbeskel ved underlag.

Som det fremgår af kapitlet »Nogle typiske vinterstøbningseksempler« med udfyldte skemaer fra arbejdsblokken, kan selv komplicerede planlægningsopgaver løses efter de her fremlagte principper. Som med alt andet forudsætter det dog en vis praktisk erfaring i brugen af den bagvedliggende teori.

Er det ikke nok blot at isolere betonen?

Det kan her være nyttigt at se, hvad der sker, hvis den i beregningseksemplet omtalte støttemur udstøbes efter traditionelle forskrifter. Med risiko for frosttemperaturer, har der i vintersæsonen været tradition for at foreskrive »varm beton«, suppleret med en isolering bestående af ét eller to lag vintermåtter.

Det antages fx, at støttemuren i beregningseksemplet udstøbes med 20 °C varm beton, og at formen isoleres med vintermåtter til et afkølingstal *a* på ca. 0.006 h^{-1}. Afformning efter 3 døgn ville da, som det ses af diagrammerne, have følgende sandsynlige resultat:

1. Den opnåede modenhed ved afformning ville være 3–5 gange større end krævet.
2. Betontemperaturen ville på afformningstidspunktet ligge ca. 42 °C over lufttemperaturen. Af tabel 2 ses, at dette formodentligt ville føre til revnedannelser i betonens overflade under afkølingen.

Resultatet af den ekstra investering i energi til opvarmning, i vintermåtter og i arbejdsindsats, ville med andre ord være ret pauvert: en dårligere kvalitet af den udstøbte beton!

Brugen af særlige isoleringsforanstaltninger kan naturligvis udnyttes som led i vinterstøbningsarbejdet. Det kan fx være påkrævet med ekstra isolering, når støbningen skal udføres ved lavere temperaturer, end det i eksemplet omhandlede.

Det kan endvidere være hensigtsmæssigt at øge isoleringen, såfremt man ønsker at forcere et støbearbejde. Således kunne formperioden i beregningseksemplet, med udstøbningstemperatur 20 °C, afkortes fra 3 til 1 døgn ved brug af isoleret form. Afformningstemperaturen måtte i så fald forventes at blive ca. 45 °C, eller ca. 46 °C over lufttemperaturen (se diagram). Af tabel 2 ses dette at være acceptabelt, såfremt der foretages afdækning med presenning *umiddelbart* efter formrivningen.

Den mest hensigtsmæssige og økonomiske løsning på en vinterstøbningsopgave kan ikke foreskrives generelt. Den må udarbejdes i forbindelse med planlægningen, hvor de nødvendige forudsætninger er kendte.

Hvordan beregnes betonens modenhedsudvikling?

Tidlig afformning af beton bør under ingen omstændigheder gennemføres, uden at der er skabt sikkerhed for, at den nødvendige betonstyrke er opnået. Eftervisningen heraf kan ske på forskellig vis:

1. In-situ bestemmelse af betonens styrke.
2. Beregning af betonens modenhed, kombineret med kontrol af, at den benyttede betons kvalitet har været som foreskrevet.

I forbindelse med kontrolleret hærdning, som beskrevet i denne SBI-anvisning, vil det være naturligt at basere kontrollen på en modenhedsberegning. De nødvendige informationer hertil indsamles netop som led i den foreslåede procedure for sikring mod tidlig frysning og mod kritiske temperaturspændinger. Men hvordan kan man nu på simpel vis bestemme betonens modenhed ud fra disse resultater?

Betonens modenhed angiver det antal timer betonen skal hærdne ved 20 °C, for at opnå samme hærdetilstand. En beton, der fx er hærdnet i 10 timer ved 35 °C, har opnået en modenhed på 20 timer. Det har den, fordi hærdeprocessens hastighed ved 35 °C netop er dobbelt så stor som ved 20 °C. Betonen skal med andre ord hærdne i 20 timer ved 20 °C for at opnå den hærdetilstand, fx udtrykt som betonstyrke, der opnås på 10 timer ved 35 °C.

Baggrunden for beregningen af betons modenhed M er behandlet i anvisningens kapitel 3. Brugere, der har behov for at gennemføre en hurtig, tilnærmet beregning af modenhedsudviklingen, kan dog benytte tabel 3.

Tabel 3 angiver talværdier for ændringer i hærdehastigheden, regnet i forhold til hastigheden ved 20 °C. Tabellen dækker temperaturområdet fra -10 °C til 69 °C. Den venstre, lodrette akse angiver temperaturerne med intervaller på 10 °C. Den øverste, vandrette akse angiver temperaturintervaller på 1 °C. Skal man fx bestemme hastighedsfaktoren ved 26 °C, aflæses i rækken ud for 20 °C under + 6 °C. Herved aflæses hastighedsfaktoren 1.3. Dette betyder, at en hærdetime ved 26 °C giver en modenhedstilvækst på ca. 1.3 time.

Modenhedstilvæksten i et tidsinterval mellem to temperaturaflæsninger beregnes tilnærmet efter følgende, simple procedure:

1. Bestem middeltemperaturen i måleperioden som det simple gennemsnit af de aflæste temperaturer, og aflæs den hertil svarende værdi af hastighedsfaktoren H i tabel 3.
2. Bestem modenhedstilvæksten i måleperioden ved at multiplicere tidsintervallets længde i timer med hastighedsfaktoren H.

Har man fx aflæst 24 °C kl. 08.00, og aflæst 32 °C kl. 16.00, beregnes modenhedstilvæksten i måleperioden fra kl. 08.00 til 16.00 af:

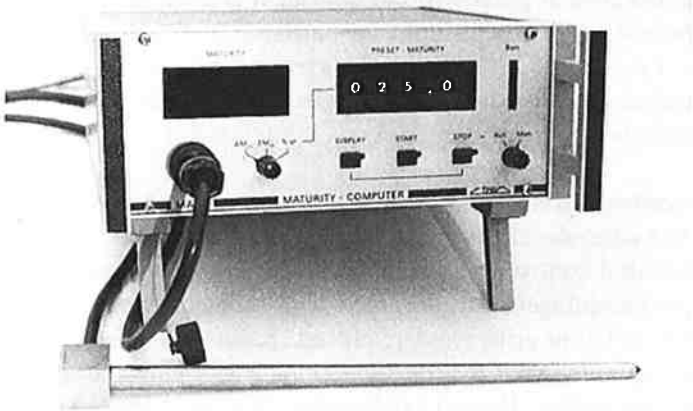
Middeltemperatur i måleperiode: $0.5 \cdot (24 + 32) = 28$ °C.
Hastighedsfaktor: Tabel 3 for 28 °C, $H = 1.4$.
Måleperiode: Fra 08.00 til 16.00 = 8 timer.
Modenhedstilvækst: 1.4 · 8 timer = 11.2 timer.

Tabel 3. Værdier for hastighedsfaktoren H fra -10 °C til 69 °C. Hastighedsfaktoren angiver hærdehastigheden ved den angivne temperatur i forhold til hastigheden ved 20 °C.

°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

I den betragtede måleperiode har betonen derfor tilnærmet opnået en modenhedstilvækst på 11.2 timer. Ud fra således beregnede modenhedstilvækster, kan betonens modenhedsudvikling bestemmes ved at summere tilvæksterne i modenhed fra de enkelte måleperioder.

En direkte måling af betonens modenhedsudvikling vil i mange tilfælde være at foretrække. Til dette formål findes der på markedet et måleudstyr, den såkaldte Maturity-Computer, der kontinuert registrerer betonens temperatur, og løbende beregner betonens øjeblikkelige modenhed.



Hærdningsmåleren MA-10, i praksis ofte kaldet Maturity Computer, monteret med lang føler. Føleren anbringes i den udstøbte beton. Temperaturen registreres i spidsen af føleren med korte tidsintervaller, hvorefter modenheden løbende beregnes og vises på instrumentets display.

Er det tilstrækkeligt blot at følge anvisningen?

Der er i anvisningen redegjort for en række af de forhold, der har indflydelse på betons hærdeforløb. Anvisningen indeholder herudover et ret omfattende hærdediagrammateriale, der kortlægger samspillet mellem betonens varmeudvikling, konstruktionens varmebalance og vejrliget. Dette diagrammateriale er baseret på nøje fastlagte forudsætninger med hensyn til cementens varmeudviklingsegenskaber, betonens termiske egenskaber, isoleringens egenskaber osv. osv. Hærdediagrammerne repræsenterer derfor et velordnet »univers«, set i forhold til en snedækket byggeplads i januar måned.

Denne åbenbare distance til den praktiske virkelighed medfører, at brugeren af anvisningen selv må opøve en vis erfaring i at talsætte de nødvendige beregningsforudsætninger i hver enkelt situation. Har den benyttede cement en varmeudvikling som type B? Eller er varmeudviklingen lidt højere? Hvad er transmissionstallet for denne våde, snesammentrykte vintermåtte? Er det den højere vindstyrke der har bevirket, at temperaturen er under det forventede? Hvor lav bliver lufttemperaturen i de følgende to døgn?

Disse, og mange lignende spørgsmål vil – anvisningen til trods – stadig gøre arbejdet med vinterstøbning af beton til et ingeniørmæssigt håndværk, der kræver stor praktisk erfaring og kunnen.

Kontrolleret hærdning af beton vil altid være en stor udfordring for den udførende. Anvisningen kan tjene som et udgangspunkt for det praktiske arbejde med vinterstøbningsopgaver. Den kan ikke – og må ikke – erstatte den erfaring, der er nødvendig for at støbe god beton under vinterforhold. Det er dog forfatternes håb, at anvisningen kan befordre den undertiden brydsomme proces det er, at høste egne erfaringer.

Kort sagt

Hvis man ønsker, at betonens hærdning skal forløbe på en sikker og hensigtsmæssig måde, er det nødvendigt at »investere« i 1. Planlægning af støbearbejdet, 2. Kontrol af støbearbejdet og 3. Kontrol af hærdeforløbet.

Planlægning af støbearbejdet

Inden støbearbejdet igangsættes bør
- udstøbningstemperatur
- formtype
- isoleringsforanstaltninger
- afformningstidspunkt
- efterbehandling

fastlægges under hensyntagen til tekniske krav, tidsplaner og økonomi.

Kontrol af støbearbejdet

Under støbearbejdets udførelse bør
- betonkvalitet
- udstøbningstemperatur
- klimaforudsætninger
- isoleringsforanstaltninger

kontrolleres, således at påkrævede ændringer i arbejdsforløbet kan foreskrives og gennemføres.

Kontrol af hærdeforløbet

Under betonens hærdning bør
- isoleringsforanstaltninger
- vejrlig
- hærdetemperatur
- modenhedsudvikling

kontrolleres, således at påkrævede ændringer i arbejdsforløbet kan foreskrives og gennemføres.

Nogle typiske vinterstøbningseksempler

På de følgende sider vises brugen af arbejdsblokkens skemaer ved fire korte eksempler.

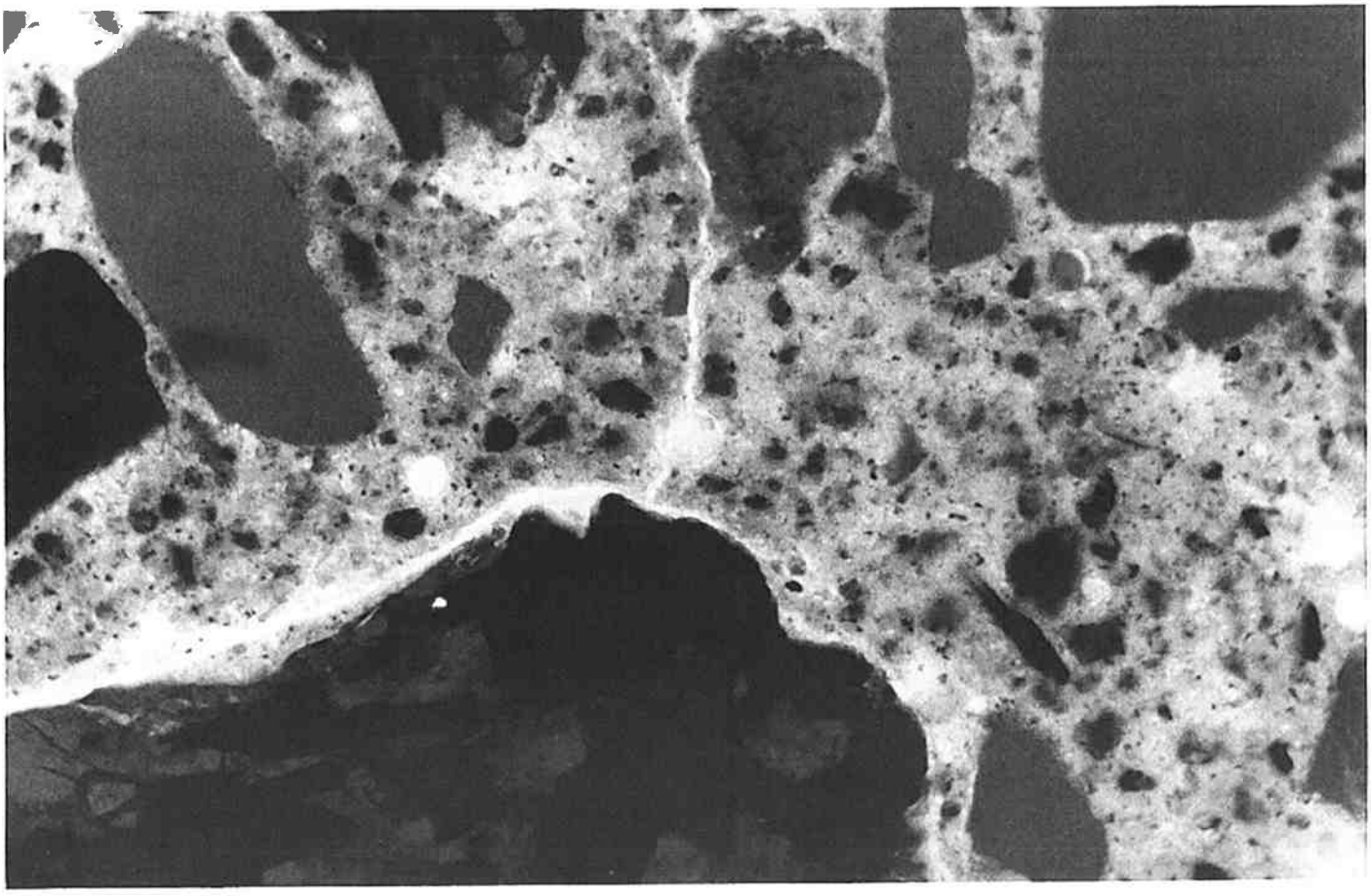
Eksempel 1 behandler forhåndsvurdering af temperaturforløbet i en væg og vurdering af frostsikkerhed. Det vurderes, hvornår en krævet afformningsstyrke opnås, og hvilken efterbehandling der er nødvendig efter afformningen. Kontrolskemaet anvendes.

Eksempel 2 viser anvendelsen af beregningsskemaet ved støbning af en rektangulær søjle. Hærdeforløbet ved støbeskellet mellem fundament og søjle vurderes. Kontrol gennem modenhedsberegning gennemgås.

Eksempel 3 omhandler en analyse ved hjælp af hærdediagrammerne og viser, hvorledes temperaturforløbet kan styres, således at revner undgås som følge af temperaturforskelle mellem hærdnende beton og eksisterende kold beton.

Eksempel 4 er et tværgående eksempel med udgangspunkt i en forsøgsrække, der blev udført af Beton- og Konstruktionsinstituttet i forbindelse med den såkaldte: Forundersøgelse vedrørende betonarbejder i forbindelse med bro over Storebælt. Fra denne undersøgelse stammer nedenstående foto, der viser en mikrorevne forårsaget af temperaturspændinger.

Billedet viser forløbet af en temperaturspændingsrevne (lysegrå) i en boreprøve, der er udtaget omkring en konstateret overfladerevne. Revnen ses her på et tyndslib fra prøven. Revnen viste sig at have en dybde på 8 cm med et forgrenet forløb fra overfladen, som ligger i billedets venstre side. Se eksempel 4, side 47.



Eksempel 1. Støbning af støttemur

Forhåndsvurdering af hærdeforløb i plant vægtværsnit

Der skal udstøbes en 0.30 m tyk støttemur i beton med cementindhold 350 kg/m³ af en langsomhærdnende cementtype, v/c-forhold 0.5, udstøbningstemperatur ca. 10 °C, lufttemperatur ca. –1 °C ved vindhastighed ca. 5 m/s. Formsystemet består af 19 mm formplade isoleret med 50 mm vintermåtte.

Der ønskes gennemført en simpel forhåndsvurdering af temperaturforløbet i et centralt afsnit af væggen, samt en undersøgelse af risikoen for beskadigelse af betonen ved tidlig frysning i dette afsnit.

Tværsnittet beskrives i arbejdsblokkens beregningsskemas punkt 2. Tværsnittets afkølingstal a = 0.008 h^{-1} aflæses i introduktionens tabel 1, side 9, og indføres i punkt 5, hvor også cementindhold og -type, lufttemperatur og udstøbningstemperatur indføres.

Data under punkt 5 udpeger det forventede hærdeforløb i de blå diagrammer for cementtype C. Temperaturforløbet overføres til punkt 5. Af diagrammet fremgår, at frostsikkerhed opnås ca. 22 h efter udstøbning, samt at en maksimal betontemperatur på 30–35 °C kan forventes ca. 40 h efter udstøbning.

Afformningstidspunkt og krav til efterisolering

I arbejdsbetingelser for den 0.30 m tykke støttemur er der krav til styrken ved afformning, svarende til en modenhed på 48 h. Det er samtidig krævet, at temperaturforskellen mellem tværsnittets midte og rand ($\theta_m - \theta_r$) ikke må overstige 20 °C under betonens hærdning og afkøling.

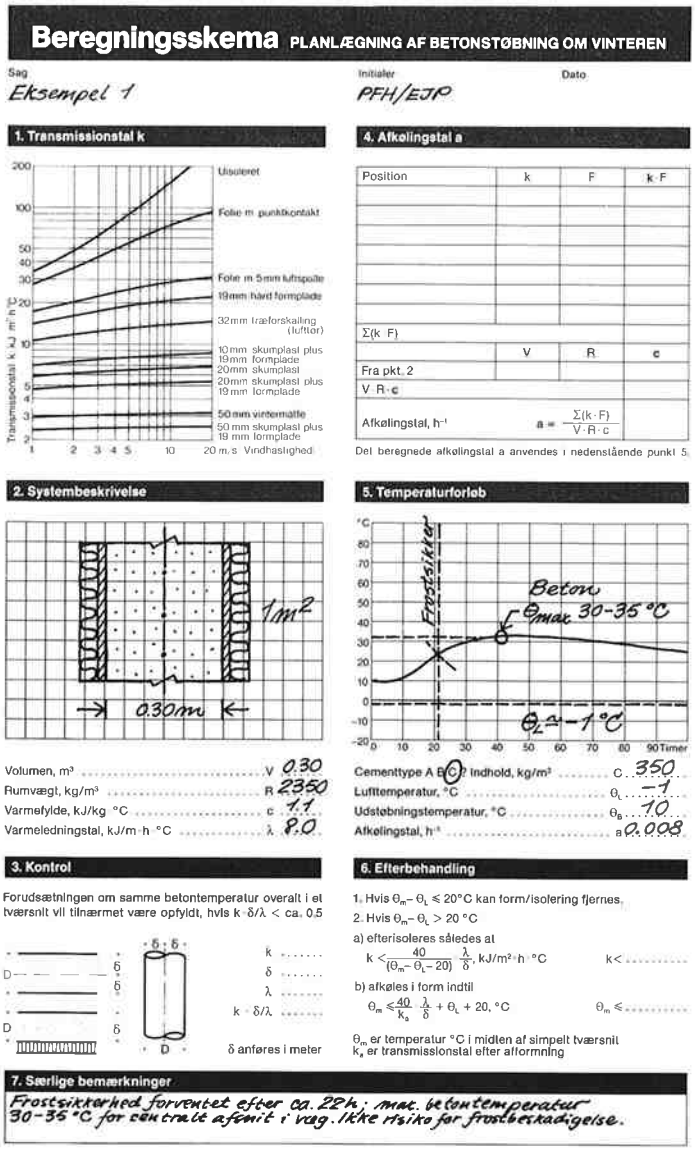
Der ønskes gennemført en vurdering af, hvornår den krævede modenhed er opnået i et centralt afsnit af væggen, og hvilken efterbehandling, der er nødvendig.

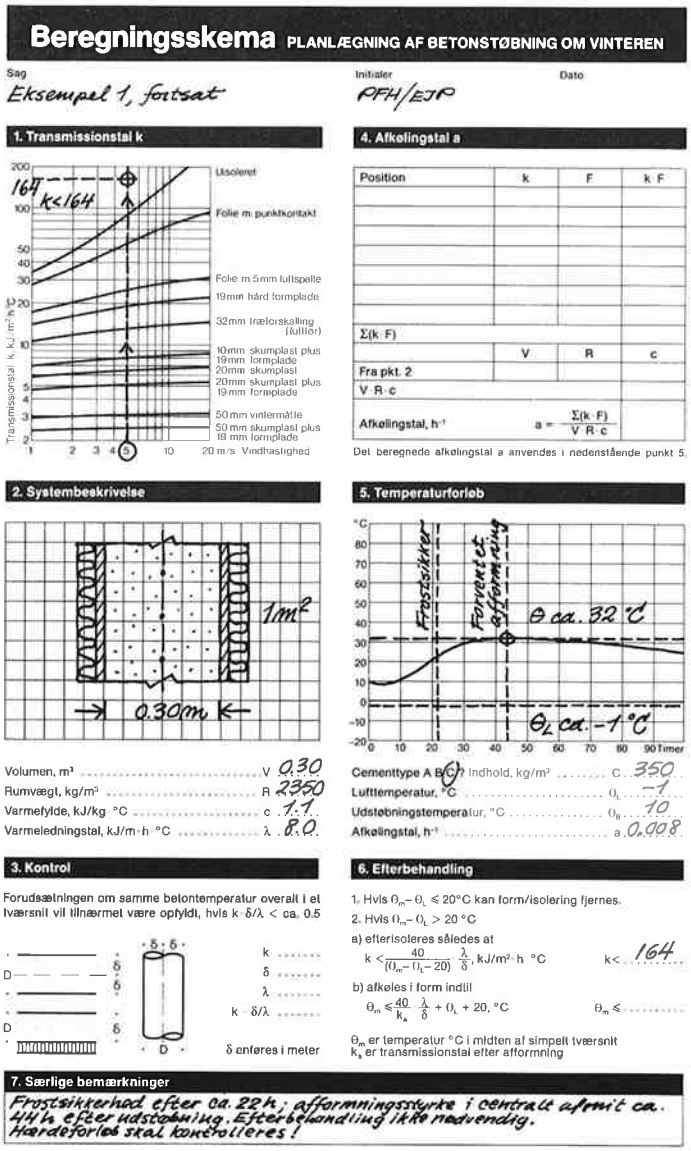
Af diagrammer for cementtype C ses, at den krævede modenhed på 48 h kan forventes opnået ca. 44 h efter udstøbningen; på dette tidspunkt er betontemperaturen ca. 32 °C. Ved indsætning i punkt 6a bestemmes krav til efterisolering af tværsnittet ved afformning:

$$k < \frac{40}{32-(-1)-20} \cdot \frac{8.0}{0.15} = 164 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

Sammenholdes dette med diagrammet i punkt 1 ses, at kravet til transmissionstal er opfyldt uden brug af efterisolering.

Forsøg på tilsvarende måde selv at bestemme kravet til k udfra diagramsystemet på omslaget til arbejdsblokken.





Kontrol af hærdeforløb i centralt vægafsnit

Efter aftale med tilsynet kontrolleres betonens hærdeforløb i udvalgte punkter i tværsnit, og i den omgivende luft. I nedenstående skema er der gengivet et eksempel på udførelse af denne kontrol i et centralt afsnit af den 0.30 m tykke støttemur. Det understreges, at en fuldstændig kontrol også vil omfatte måling af temperaturforløbet ved støbeskel etc.; dette forhold er nærmere belyst i eksempel 2. Aftaler om placering af målepunkter noteres på en målsat skitse; under denne anføres aftaler om måleudstyr og målehyppighed. Under måleforløbet beregnes og indføres efter hver aflæsning den øjeblikkelige værdi af temperaturforskellen $(\theta_m - \theta_r)$, således at temperaturbelastningen løbende kan sammenholdes med de stillede krav. Dette er især vigtigt i perioden umiddelbart efter afformning.

I det viste eksempel, er tværsnittet blevet afdækket med presenning umiddelbart efter afformning; herved er største temperaturdifferens begrænset til ca. 9 °C.

Eksempel 2. Støbning af søjle

Tilrettelægning af støbearbejde

Der skal støbes en rektangulær søjle 0.40 m · 1.20 m på et forsænket, hærdnet betonfundament. Betonen har et cementindhold på 300 kg/m³ af en normalhærdnende cement; v/c-forhold ca. 0.50. Lufttemperatur ca. -5 °C, vindhastighed ca. 3 m/s. Arbejdsbeskrivelsen kræver, at temperaturforskelle i søjle, og mellem søjle og fundament ikke overstiger 20 °C, samt at afformning ikke foretages før betonens modenhed er større end 30 h. Ved tildækning forventes fundamentet at kunne holdes på ca. 5 °C.

Støbearbejdet ønskes tilrettelagt således, at de stillede krav kan forventes overholdt, uden risiko for beskadigelse af betonen ved tidlig frysning.

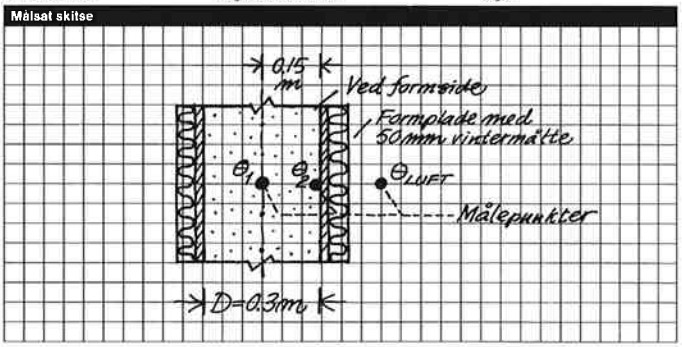
Søjlen udstøbes i form af 19 mm formplade, der isoleres med 50 mm skumplast ved korte sideflader. Beregningsskema udfyldes som vist; modenhedskrav forventes opfyldt i centralt søjleafsnit efter ca. 40 timer. Ved støbeskel skønnes betontemperaturen at være ca. 5 °C, svarende til en hastighedsfaktor på 0.29 (introduktionens tabel 3, side 12). Her forventes modenhedskravet opfyldt efter 30/0.29 = 100 h, svarende til ca. 4 døgn.

Kontrolskema UDFØRELSE AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Rådgivende | Udførende | Entreprise: Eksempel 1, fort.

Aftalt dato/initialer | Registreret dato/initialer | Sagsnr.

Målsat skitse



Hærdeforløb

Måleudstyr: Digitaltermometer, termoelement | Målehyppighed: 3x/døgn; pr ½h v. afform.

Registrering påbegyndt, dato/initialer: 27.2.79 | Støbning fra kl. 13 til kl. 14

Kontrol af måleudstyr. Reference: 0.5 °C. Udstyr: 1.0 °C. | Følgesedler:

Dato ▸	27.2.			28.2.			1.3.							
kl. ▸	14	16	20	7	14	20	7	14	14.10	14.30	15	16	17	20
«Alder» ▸	0	2	6	17	24	30	41	48	48.1	48.5	49	50	51	54
Målepkt. nr.▾	θ_a	TEMPERATURER, °C												
θ_1	7.8	7.6	8.4	19.3	26.3	29.7	32.1	32.4	32.4	32.2	31.1	28.8	25.8	19.0
θ_2	7.8	6.6	7.6	17.2	24.8	27.7	30.0	30.6	28.2	23.8	21.8	19.5	18.1	12.4
θ_3														
θ_4														
θ_5														
θ_6														
θ_7														
θ_8														
θ_9														
θ_L	1.0	0.8	0.0	0.5	4.8	-0.3	-2.9	0.4			-1.7	-2.3	-2.1	-0.4
$\theta_m - \theta_L$	0	1	0.8	2.1	1.5	2.0	2.1	1.8	4.2	8.4	9.3	9.3	7.7	6.6
$\theta_1 - \theta_2$														
$\theta_3 - \theta_4$														

Registrering afsluttet, dato/initialer: 1.3.79 | Set, dato/initialer:

Kontrol af måleudstyr. Reference: 1.5 °C. Udstyr: 1.0-1.5 °C. | Set, dato/initialer:

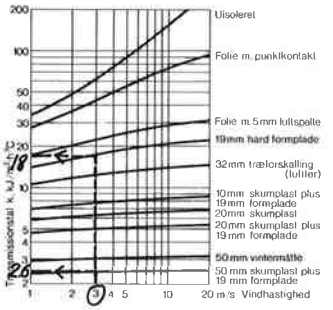
Bemærkninger om vejrlig og måleforløb

Tværsnit afdækket med presenning efter afformning.
Vindhastighed 4-6 m/s.

Beregningsskema PLANLÆGNING AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Sag: Eksempel 2 | Initialer: PFH/EJP | Dato:

1. Transmissionstal k



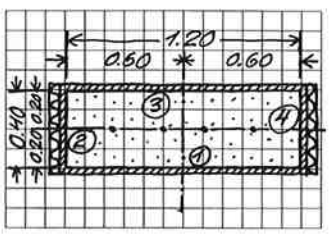
4. Afkølingstal a

Position	k	F	k·F
①	18	1.20	21.6
②	2.6	0.40	1.0
③	18	1.20	21.6
④	2.6	0.40	1.0
Σ(k·F)			45.2

	V	R	c
Fra pkt. 2	0.48	2330	1.1
V·R·c			1230
Afkølingstal, h⁻¹ $a = \frac{\Sigma(k \cdot F)}{V \cdot R \cdot c}$			0.037

Del beregnede afkølingstal a anvendes i nedenstående punkt 5.

2. Systembeskrivelse



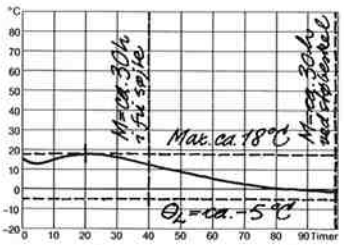
Volumen, m³: 0.40×1.20×1 — V: 0.48

Rumvægt, kg/m³ — R: 2330

Varmefylde, kJ/kg·°C — c: 1.1

Varmeledningstal, kJ/m·h·°C — λ: 8.0

5. Temperaturforløb



Cementtype A/B/C ? Indhold, kg/m³: C: 300

Lufttemperatur, °C: θ_L: -5

Udstøbningstemperatur, °C: θ_a: 15

Afkølingstal, h⁻¹: a: 0.037

3. Kontrol

Forudsætningen om samme betontemperatur overalt i et tværsnit vil tilnærmet være opfyldt, hvis k · δ/λ < ca. 0.5

k: 18

δ: 0.20

λ: 8.0

k · δ/λ: 0.45 OK!

δ anføres i meter

6. Efterbehandling

1. Hvis $\theta_m - \theta_L \leq 20$ °C kan form/isolering fjernes. OK!

2. Hvis $\theta_m - \theta_L > 20$ °C

a) efterisoleres således at

$k < \frac{40}{(\theta_m - \theta_L - 20)} \cdot \frac{\lambda}{\delta}$, kJ/m²·h·°C — k< .....

b) afkøles i form indtil

$\theta_m \leq \frac{40}{k_a} \cdot \frac{\lambda}{\delta} + \theta_L + 20$, °C — $\theta_m \leq$ .....

θ_m er temperatur °C i midten af simpelt tværsnit

k_a er transmissionstal efter afformning

7. Særlige bemærkninger

Forventet afformning ca. 4 døgn efter udstøbning - bestemt af temperatur ved støbeskel.
Temperatur skal kontrolleres både i fri søjle og ved støbeskel.

Kontrol af hærdeforløb for søjle

Efter aftale med tilsynet kontrolleres betonens hærdeforløb i søjlens midterzone, samt i støbeskellet mellem fundament og søjle. Et tidligere indstøbt målepunkt fra fundamentet er beregnet til dette formål. Kravet til temperaturforskelle er opfyldt såvel over tværsnit som i støbeskellet. Målingerne viser, at afkølingen af søjlefoden sker relativt hurtigt, således at hærdningen her vil forløbe langsomt. For at sikre, at de 30 modenhedstimer er opnået i området omkring målepunkt 4, beregnes modenhedsudviklingen ud fra temperaturen i dette punkt. Middeltemperaturen $\bar{\theta}$ beregnes for hvert tidsinterval t. I introduktionens tabel 3 aflæses hastighedsfaktoren H svarende til $\bar{\theta}$ for hvert t. For hvert interval beregnes bidraget til modenhedsudviklingen som $H \cdot t$ og bidragene summeres. Efter 103 timer er modenheden 30 h opnået i støbeskellet.

Eksempel 3. Reparation af brodæk

Betonribbedæk i brokonstruktion

I løbet af vinterperioden skal et betonribbedæk i en brokonstruktion repareres. Dækket er opbygget af jernbetonbjælker med dimensionerne 0.3 · 0.9 m. De danner sektioner på 2.7 · 4.0 m. Disse felter er udført som 0.15 m tykke armerede betondæk. Betonen i felterne skal udskiftes, mens bjælkebetonens tilstand er tilfredsstillende.

Reparationen udføres ved at hugge den nedbrudte dækbeton bort og frilægge armeringen, hvorefter et nyt betondæk udstøbes. Entreprenøren anvender en 35 mm træforskalling, beklædt med 40 mm polystyrolplader som underforskalling. Den ophænges og fastgøres mellem betonbjælkerne. Der anvendes en hurtighærdnende cement, type A. Cementindholdet er 310 kg/m³. Umiddelbart efter afretning af betonoverfladen tildækkes med 50 mm vintermåtter.

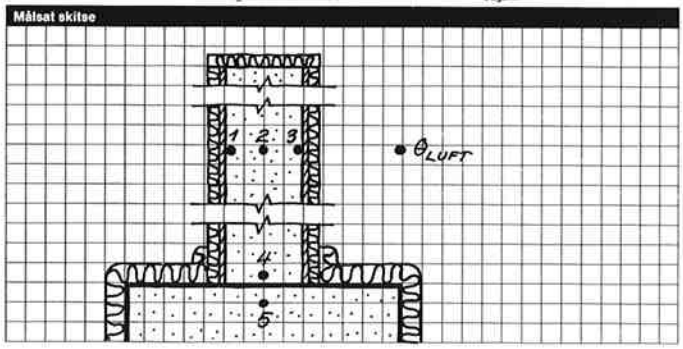
Reparationsarbejdet standses efter den første støbning, idet der konstateres tydelige gennemgående revner i dækket, da vintermåtterne fjernes efter 3 døgns hærdning.

Kontrolskema UDFØRELSE AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Rådgivende | Udførende | Entreprise: Eksempel 2, fort.

Aftalt dato/initialer | Registreret dato/initialer | Sagsnr.

Målsat skitse



Hærdeforløb

Måleudstyr: Kobber-Konstantan, termoelement — Målehyppighed:

Registrering påbegyndt, dato/initialer: 7.2.82/EJP — Støbning fra kl. 8.00 til kl. 13.00

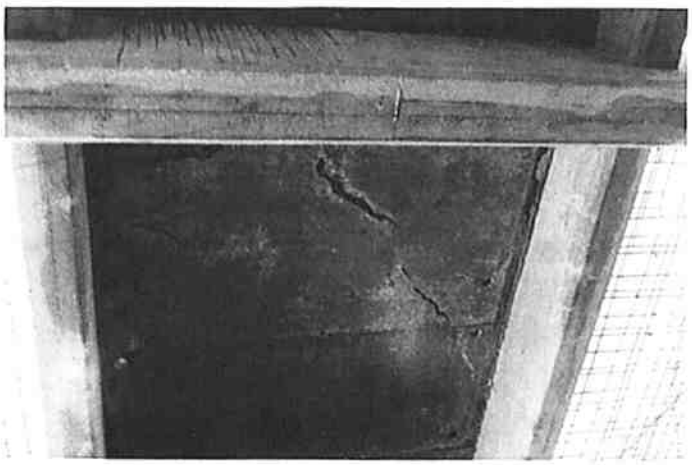
Kontrol af måleudstyr, Reference: 21.5 °C, Udstyr: 20 °C — Følgesedler:

Dato ▶	7.2.					8.2.			9.2.		10.2.	11.2.
kl. ▶	8.00	10.00	13.00	18.00	23.00	6.00	14.00	20.00	6.00	15.00	15.00	15.00
Alder ▶	0	2	5	10	15	22	30	36	46	55	79	103
Målepkt. nr. ▼	θ_a ▼	TEMPERATURER, °C										
θ_1	15	13	11	13	14	16	14	10	8	6	-1	-1
θ_2	15	14	12	15	17	18	15	11	9	7	0	-1
θ_3	15	12	11	14	15	16	13	10	8	5	-2	-2
θ_4	15	12	10	9	9	6	5	5	4	4	3	3
θ_5	4	4	5	6	5	5	5	4	4	4	4	4
$\theta_{...}$	Modenhedsudvikling ved θ_4:											
$\theta_{...}$	$\bar{\theta}$	13.5	11	9.5	9	7.5	5.5	5	4.5	4	3.5	3
$\theta_{...}$	H	0.67	0.54	0.47	0.45	0.39	0.31	0.29	0.27	0.26	0.24	0.23
$\theta_{...}$	tid, t	2	3	5	5	7	8	6	10	9	24	24
$\theta_{...}$	Hxt	1.3	1.6	2.4	2.3	2.7	2.5	1.7	2.7	2.3	5.8	5.5 Sum=30M
θ_L	-5	-4	-1	-3	-6	-5	-1	-3	-4	0	-1	-2
$\theta_m - \theta_L$	0	2	1	2	3	2	2	1	1	2	2	1
$\theta_4 - \theta_5$	11	8	5	3	4	1	0	1	0	0	-1	-1
$\theta_{...} - \theta_{...}$												

Registrering afsluttet, dato/initialer: 11.2.82/EJP — Sat, dato/initialer:

Kontrol af måleudstyr, Reference: -0.5 °C, Udstyr: -2 °C — Sat, dato/initialer:

Bemærkninger om vejrlig og måleforløb



Reparation af betonribbedæk. Efter første støbning konstateredes tydelige revner i den nystøbte betonplade. Her er pladen set nedefra.

Vurdering af årsager til revnedannelser

Ud fra det konstaterede revnebillede anses temperaturbelastning af den hærdnende beton for at være en sandsynlig revneårsag. Denne antagelse undersøges nærmere ved at vurdere temperaturforløbet i det udstøbte betondæk.

Betonens udstøbningstemperatur har været ca. 15 °C, og lufttemperaturen har varieret omkring –1 °C med en vindhastighed på ca. 5 m/s. Ved anvendelse af beregningsskemaet og de røde hærdediagrammer for cementtype A med cementindhold ca. 300 kg/m³, findes det i punkt 5 viste temperaturforløb. Den bestemte maksimale hærdetemperatur i dækket på ca. 38 °C, optræder ca. 25 timer efter udstøbning. Først omkring dette tidspunkt fikseres pladen til ribbekonstruktionen, idet betontemperaturen har været væsentligt lavere ved støbeskel langs kanten. Under den påfølgende afkøling vil dækket være fastholdt af de stivere ribber, således at der opstår trækspændinger i den udstøbte beton.

Afhjælpning af revneproblem

Hærdeprocessen ønskes tilrettelagt således, at de observerede revner undgås samtidig med, at betonarbejdet kan gennemføres i et passende tempo.

I dette tilfælde skønnes betonens trækbruddeformation at være $\epsilon_{br} = 1.3 \cdot 10^{-4}$ og β, temperaturudvidelseskoefficienten er $1.1 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$. Den maksimale temperaturændring, dækket kan udsættes for under hærdningen uden at revne, bliver bliver

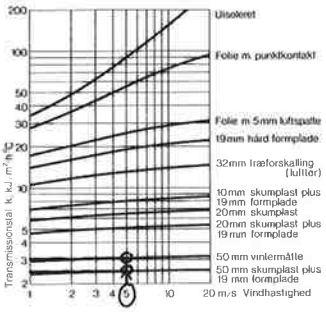
$$\Delta\theta = \frac{\epsilon_{br}}{\beta} = \frac{1.3 \cdot 10^{-4}}{1.1 \cdot 10^{-5}} \sim 12\ °C$$

Dvs. betontemperaturen under hærdningen skal være mindre end $\theta_{bjælke} + \Delta\theta = 5 + 12 = 17$ °C, idet bjælkernes temperatur kan holdes på ca. 5 °C. Med uisoleret træforskalling samt tildækning med 10 mm skumplastmåtte, viser diagramaflæsning, at arbejdet kan gennemføres uden at betontemperaturen overskrider 17 °C, hvis starttemperaturen er $\theta_B = 15$ °C eller derunder. Den nævnte 10 mm skumplastmåtte har k = ca. 14 kJ/m² · h · °C.

Beregningsskema PLANLÆGNING AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Sag: *Eksempel 3* Initialer: *PFH/EJTP* Dato:

1. Transmissionstal k

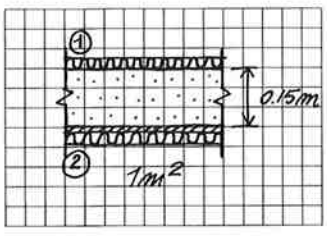


4. Afkølingstal a

Position	k	F	k·F
①	3.0	1	3.0
②	2.6	1	2.6
Σ(k·F)			5.6
	V	R	c
Fra pkt. 2	0.15	2330	1.1
V·R·c			384
Afkølingstal, h⁻¹		$a = \frac{\Sigma(k \cdot F)}{V \cdot R \cdot c}$	0.015

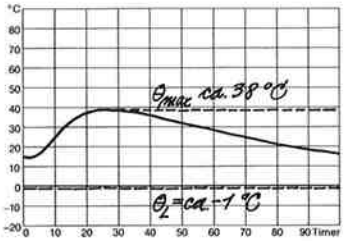
Det beregnede afkølingstal a anvendes i nedenstående punkt 5.

2. Systembeskrivelse



Volumen, m³ ..... V 0.15
Rumvægt, kg/m³ ..... R 2330
Varmefylde, kJ/kg·°C ..... c 1.1
Varmeledningstal, kJ/m·h·°C ..... λ 8.0

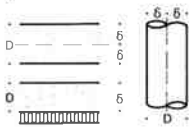
5. Temperaturforløb



Cementtype A B C ? Indhold, kg/m³ ..... C 310
Lufttemperatur, °C ..... θ_L –1
Udstøbningstemperatur, °C ..... θ_B 15
Afkølingstal, h⁻¹ ..... a 0.015

3. Kontrol

Forudsætningen om samme betontemperatur overalt i et tværsnit vil tilnærmet være opfyldt, hvis k·δ/λ < ca. 0.5



k 3.0
δ 0.075
λ 8.0
k · δ/λ 0.03
OK!
δ anføres i meter

6. Efterbehandling

1. Hvis $\theta_m - \theta_L \leq 20$°C kan form/isolering fjernes.
2. Hvis $\theta_m - \theta_L > 20$ °C
a) efterisoleres således at
$k < \frac{40}{(\theta_m - \theta_L - 20)} \cdot \frac{\lambda}{\delta}$, kJ/m²·h·°C k< .....
b) afkøles i form indtil
$\theta_m \leq \frac{40}{k_a} \cdot \frac{\lambda}{\delta} + \theta_L + 20$, °C $\theta_m \leq$ .....

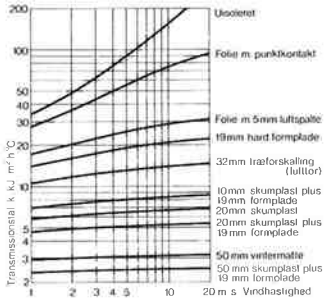
θ_m er temperatur °C i midten af simpelt tværsnit
k_a er transmissionstal efter afformning

7. Særlige bemærkninger

Beregningsskema PLANLÆGNING AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Sag: *Eksempel 3, forsat* Initialer: Dato:

1. Transmissionstal k

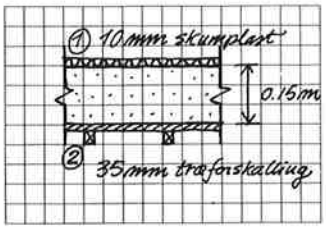


4. Afkølingstal a

Position	k	F	k·F
①	10	1	10
②	14	1	14
Σ(k·F)			24
	V	R	c
Fra pkt. 2	0.15	2330	1.1
V·R·c			384
Afkølingstal, h⁻¹		$a = \frac{\Sigma(k \cdot F)}{V \cdot R \cdot c}$	0.06

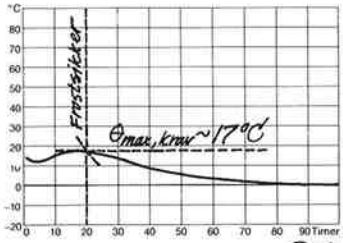
Det beregnede afkølingstal a anvendes i nedenstående punkt 5.

2. Systembeskrivelse



Volumen, m³ ..... V 0.15
Rumvægt, kg/m³ ..... R 2330
Varmefylde, kJ/kg·°C ..... c 1.1
Varmeledningstal, kJ/m·h·°C ..... λ 8.0

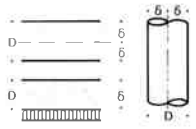
5. Temperaturforløb



Cementtype A B C ? Indhold, kg/m³ ..... C 300
Lufttemperatur, °C ..... θ_L –1
Udstøbningstemperatur, °C ..... θ_B 15
Afkølingstal, h⁻¹ ..... a 0.06

3. Kontrol

Forudsætningen om samme betontemperatur overalt i et tværsnit vil tilnærmet være opfyldt, hvis k·δ/λ < ca. 0.5



k 14
δ 0.075
λ 8
k · δ/λ 0.13
OK!
δ anføres i meter

6. Efterbehandling

1. Hvis $\theta_m - \theta_L \leq 20$°C kan form/isolering fjernes.
2. Hvis $\theta_m - \theta_L > 20$ °C
a) efterisoleres således at
$k < \frac{40}{(\theta_m - \theta_L - 20)} \cdot \frac{\lambda}{\delta}$, kJ/m²·h·°C k< .....
b) afkøles i form indtil
$\theta_m \leq \frac{40}{k_a} \cdot \frac{\lambda}{\delta} + \theta_L + 20$, °C $\theta_m \leq$ .....

θ_m er temperatur °C i midten af simpelt tværsnit
k_a er transmissionstal efter afformning

7. Særlige bemærkninger

Eksempel 4. Støbning af betonvæg

Dette eksempel illustrerer en række af de problemer og spørgsmål, der opstår ved planlægning og udførelse af et betonarbejde under vinterforhold. Der skal støbes en betonvæg i januar måned. Nedenstående data er til rådighed.

Konstruktionsdel
Plan væg
Vægtykkelse ..... $D = 0.45$ m

Beton
Almindelig beton
Rumvægt ..... $R = 2350$ kg/m³
Varmefylde ..... $c = 1.1$ kJ/kg · °C
Varmeledning ..... $\lambda = 8.0$ kJ/m · h · °C
Cementtype ..... PC(A)
Cementindhold ..... $C = 410$ kg/m³
v/c-forhold ..... $v/c \leq 0.45$
Cementens adiabatiske varmeudvikling er vist i nedenstående dokumentationsblad og er beskrevet ved udtrykket .... $Q = Q_\infty \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right]$
med parametrene $Q_\infty = 343.0$ kJ/kg, $\tau_e = 9.4$ h, $\alpha = 1.0$
Betontemperaturen umiddelbart efter endt udstøbning ..... $\theta_B = 21$ °C

Vejr
Lufttemperatur ..... $\theta_L = -1$ °C
Vindhastighed ..... $v = 5$–6 m/s

Formudstyr
Væggen er på begge sider beklædt med 19 mm formplade (plywood) beklædt md 50 mm vintermåtte.

Styrke- og stivhedskrav
Det er oplyst, at formen må fjernes når betonstyrken er større end 25 MPa.

Temperaturkrav
Ved afformningen må temperaturforskellen mellem midte og rand ikke overstige 20 °C.

Spørgsmål 1: Hvilke hærdediagrammer dækker den anvendte cementtype?

Man kan umiddelbart lægge dokumentationsbladet for adiabatisk varmeudvikling under transparenten med de typiske varmeudviklingskurver og heraf se, hvor den givne varmeudviklingskurve ligger i forhold til transparentens type A, B og C.

I dette tilfælde ligger den givne kurve omkring kurve B. Da det er forholdene efter 20–30 modenhedstimer der har interesse, er svaret hærdediagrammerne for type B. Alterna-

Støbning af forsøgsvægge med dimensionerne 0.45 × 2.4 × 2.4 m. Formpladerne er isoleret med mineraluldsmåtter. Ved varieret efterbehandling blev en serie vægge udsat for temperaturforskelle mellem midte og rand i området fra ca. 3 °C til ca. 34 °C. Billedet er fra vinteren 1978–79.

ADIABATISK KALORIMETRI
DOKUMENTATIONSBLAD

1. SAG — REKVIRENT: BKF,T1 — CEMENT: PC(A) — JOURNAL NR.: 79005
BKF-SAG: B2259.T1 — TSS: PLAST. — DATERET: 790123

2. VARMEUDVIKLING
VARMEFYLDE: 1.00 kJ/kg°C
ADIABATISK VARMEUDVIKLING Q(M) kJ/kg cement: 100, 200, 300, 400
M(20°C) = 1, 5, 10, 50, 100, 500 TIMER
MÅLT ▷ ▷ ▷ LINEÆR – – – EXPONENTIEL ——

3. BEREGNINGSPARAMETRE
LINEÆR MODEL: $Q(M) = Q_0 \ln(M/\tau_0)$ — Q_0 = 126.6 kJ/kg — τ_0 = 3.5 h
EXPONENTIEL MODEL: $Q(M) = Q_\infty \exp(-(\tau_e/M)^\alpha)$ — Q_∞ = 343.3 kJ/kg — τ_e = 9.4 h — α = 1.00

4. BETONSAMMENSÆTNING

	TYPE	MASSEF. kg/m³	VÆGT kg/m³	VOLUMEN m³	BEMÆRKNINGER
CEMENT	PC(A)	3110.	408.	0.131	SOM TIL DSB BROD?K
VAND	TAPHANE	1000.	159.	0.159	
LUFT					
TILSLAG	SØSAND 0/8	2620.	687.16	0.262	SKØNNET VANDI. 4%
	GRANIT 5/25	2690.	1100.46	0.409	SKØNNET VANDI.0.5%
TSS.	PLAST.	1000.	0.00	0.000	

5. BETONDATA

RUMVÆGT kg/m³		V/C - FORHOLD		LUFTINDHOLD %	
MÅLT	2366.	EFFEKTIVT	0.40	MÅLT 1	3.8
BEREGNET	2355.	ABSOLUT		MÅLT 2	

6. BEMÆRKNINGER PLASTISK S = 10 CM

dato: 12/78 init.: ejp/pfh revideret:

tivt hertil kan man indsætte i det matematiske udtryk for den målte varmeudvikling og beregne nogle støttepunkter, der viser hvor kurven ligger i forhold til de viste typiske kurver.

Hvis der ikke foreligger information om varmeudviklingen må man skønne denne bedst muligt. Hvis der anvendes tilsætningsstoffer såvel kemisk virkende som mineralske, fx flyveaske eller silica, skal man være opmærksom på, at egenskabsudviklingen kan ændres betydeligt, således at målinger er nødvendige.

Spørgsmål 2: Hvilket diagram beskriver den foreliggende vægstøbning?

I hærdediagrammerne for den normalhærdnende cement, type B, findes opslaget der dækker cementindholdet 400 kg/m³. Dette kan tilnærmet anvendes. Eventuelt kan man skønne, hvor meget 10 kg/m³ cement giver i forøget varmebidrag. En sådan nøjagtighed er imidlertid ikke rimelig i dette tilfælde. Det aktuelle diagram findes i søjlen med lufttemperatur $\theta_L = -1$ °C og i rækken med betontemperaturen $\theta_B = 20$ °C.

Spørgsmål 3: Hvilket afkølingstal a skal knyttes til den angivne, isolerede form?

Dette spørgmål besvares ved at udfylde et beregningsskema fra arbejdsblokken. Ved at sætte tal ind i punkterne 1 til 4 bestemmes afkølingstallet som vist til $a = 0.004\ \text{h}^{-1}$.

Spørgsmål 4: Optegn temperaturforløbet i væggen i arbejdsblokkens punkt 5.

Et beregningsskema fra blokken lægges over diagrammet, der blev udpeget i spørgsmål 2, således at aksernes værdier er sammenfaldende. Herefter kan en kurve svarende til afkølingstallet $a = 0.004\ \text{h}^{-1}$ direkte tegnes af. Kurven angiver det forventede temperaturforløb. Samtidig hermed indføres de benyttede data under punkt 5.

Spørgsmål 5: Er der risiko for frysning af betonen før den har nået en modenhed, hvor den er blevet frostsikker?

For den givne proces ses, at temperaturkurven skærer den grønne kurve $M = 15$ til tiden 10 timer. Herefter kan betonen tåle frysning.

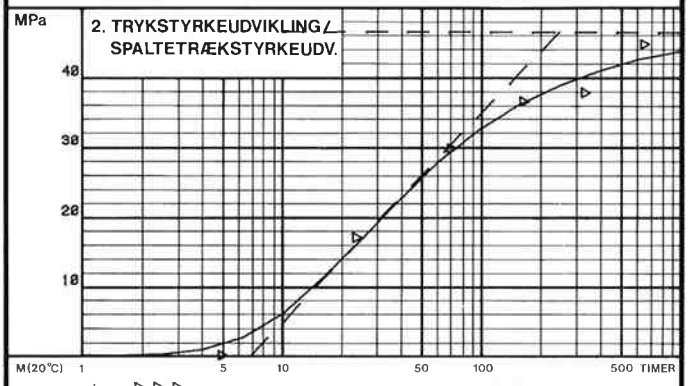
Spørgsmål 6: Hvor mange timer skal der gå, før formen må fjernes af hensyn til styrkekravet?

Det opstillede styrkekrav er stillet til normlagrede cylindre. Dvs. hærdningen sker ved 20 °C og tiden er dermed modenheden. Ved at trykprøve cylindrene til terminerne 24, 48 og 72, 168 og 672 timer, får man en god beskrivelse af hele styrkeudviklingsforløbet. Afbildes styrken som vist i dokumentationsbladet nederst til venstre, kan man aflæse, at det stillede styrkekrav er nået ved 48 modenhedstimer.

STYRKEUDVIKLING
DOKUMENTATIONSBLAD

1. SAG — REKVIRENT: BKF TI — CEMENT: PC(A) — JOURNAL NR.: 79003
BKF-SAG: B2253 — TSS: PLAST. — DATERET: 790123

2. TRYKSTYRKEUDVIKLING / SPALTETRÆKSTYRKEUDV.



3. BEREGNINGSPARAMETRE

LINEÆR MODEL: $\sigma(M) = \sigma_0 \ln(M/T_0)$ — σ_0 = 13.0 MPa — T_0 = 7.0 h
EXPONENTIEL MODEL: $\sigma(M) = \sigma_\infty \exp(-(T_e/M)^n)$ — σ_∞ = 46.3 MPa — T_e = 25.8 h — n = 0.76

4. BETONSAMMENSÆTNING

	TYPE	MASSEF. kg/m³	VÆGT kg/m³	VOLUMEN m³	BEMÆRKNINGER
CEMENT	PC(A)	3!10.	400.	0.131	
VAND	TAPHANE	1000.	159.	0.159	TILSAT 128KG
LUFT					
TILSLAG	SØSAND 0/4	2620.	687.16	0.262	SKØNNET VANDIND. 4%
	GRANIT 5/25	2690.	1100.46	0.409	SKØNNET VANDIND. 0.5%
TSS.	PLAST.	1000.	0.00	0.000	SIKA A40
	LUFTINDBL.	1000.	0.00	0.000	SIKA AIR

5. BETONDATA

RUMVÆGT kg/m³	V/C-FORHOLD	LUFTINDHOLD %
MÅLT : 2366.	EFFEKTIVT: 0.40	MÅLT 1 : 3.8
BEREGNET: 2355.	ABSOLUT :	MÅLT 2 :

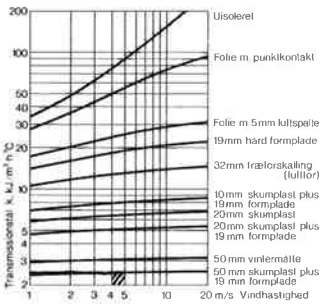
6. BEMÆRKNINGER S = 10 CM

dato: 12/78 init.: ejp/pfh — revideret:

Beregningsskema PLANLÆGNING AF BETONSTØBNING OM VINTEREN

Sag: Eksempel 4 — Initialer: PFH/EJP — Dato:

1. Transmissionstal k

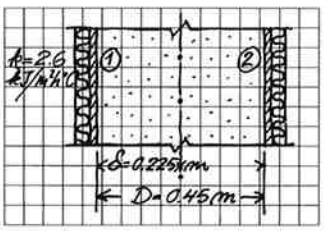


4. Afkølingstal a

Position	k	F	k F
①	2.6	1	2.6
②	2.6	1	2.6
Σ(k F)			5.2
	V	R	c
Fra pkt. 2	0.45	2350	1.1
V R c			1163
Afkølingstal, h⁻¹ $a = \frac{\Sigma(k\,F)}{V\,R\,c}$			0.004

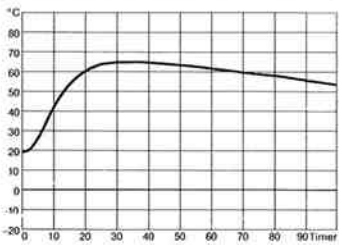
Det beregnede afkølingstal a anvendes i nedenstående punkt 5.

2. Systembeskrivelse



Volumen, m³ ..... 0.45×1×1 ..... V 0.45
Rumvægt, kg/m³ ..... R 2350
Varmefylde, kJ/kg·°C ..... c 1.1
Varmeledningstal, kJ/m·h·°C ..... λ 8

5. Temperaturforløb



Cementtype A/B/C? Indhold, kg/m³ ..... C 400
Lufttemperatur, °C ..... θ_L −1
Udstøbningstemperatur, °C ..... θ_B 20
Afkølingstal, h⁻¹ ..... a 0.004

3. Kontrol

Forudsætningen om samme betontemperatur overalt i et tværsnit vil tilnærmet være opfyldt, hvis k·δ/λ < ca. 0,5

k 0.225
δ 2.6
λ 8
k·δ/λ 0.07
OK!

δ anføres i meter

6. Efterbehandling

1. Hvis $\theta_m - \theta_L \leq 20$°C kan form/isolering fjernes.
2. Hvis $\theta_m - \theta_L > 20$ °C
a) eller isoleres således at
$k < \frac{40}{(\theta_m - \theta_L - 20)} \cdot \frac{\lambda}{\delta}$, kJ/m²·h·°C — k < 35
b) afkøles i form indtil
$\theta_m \leq \frac{40}{k_s} \cdot \frac{\lambda}{\delta} + \theta_L + 20$, °C — $\theta_m \leq$ 33

θ_m er temperatur °C i midten af simpelt tværsnit
k_s er transmissionstal efter affjernning

7. Særlige bemærkninger

I hærdediagrammet kan man aflæse, at temperaturkurven skærer den grønne kurve for $M = 48$ til tiden 18 timer efter støbningen. Dvs. at den krævede afformningsstyrke kan forventes opnået efter ca. 1 døgn.

Spørgsmål 7: Er efterbehandling nødvendig, såfremt der afformes 20 timer efter udstøbning? I bekræftende fald, hvilken tildækning skal anvendes, og hvor længe skal denne holdes?

Dette spørgsmål besvares ved hjælp af arbejdsblokkens beregningsskemas punkt 6. I punkt 5 aflæses $\theta_m = 60$ °C. Hermed er $\theta_m - \theta_L = 60 - (-1) = 61 > 20$ °C. Det betyder, at der skal tildækkes. Denne tildækning bør foretages så hurtigt som muligt efter afformningen.

Den nødvendige efterisolering beskrives ved transmissionstallet k:

$$k < \frac{40}{60-(-1)-20} \cdot \frac{8}{0.225} = 35 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

I punkt 1 kan man aflæse at dette transmissionstal med den givne vindhastighed $v = 5$–6 m/s kan opfyldes med fx presenning, der holdes fri af betonoverfladen ved hjælp af fx strøer.

Denne tildækning skal bevares indtil betonen er afkølet så meget at 20 °C-kravet også overholdes, når presenningen fjernes og betonen udsættes for et transmissionstal svarende til uisoleret beton. Under punkt 1 kan dette transmissionstal aflæses til $k_a = 100$ kJ/m² · h · °C. Betonen skal afkøles med efterisolering indtil

$$\theta_m \leq \frac{40}{100} \cdot \frac{8}{0.225} + (-1) + 20 \cong 33 \text{ °C}$$

Beton- og Konstruktionsinstituttet gennemførte i vinteren 1978–79, en undersøgelse af, hvor store temperaturbelastninger der kan accepteres under afkøling af plane vægtværsnit. Der blev herunder bl.a. udført støbning af en væg, svarende til den i eksemplet beskrevne. Ved dette forsøg blev væggen afformet 48 timer efter udstøbningen.

Spørgsmål 8: Hvor stor temperaturforskel mellem midte og rand, $\Delta\theta = \theta_m - \theta_r$ opstår der under afkølingen, når afformningen sker efter 48 timer?

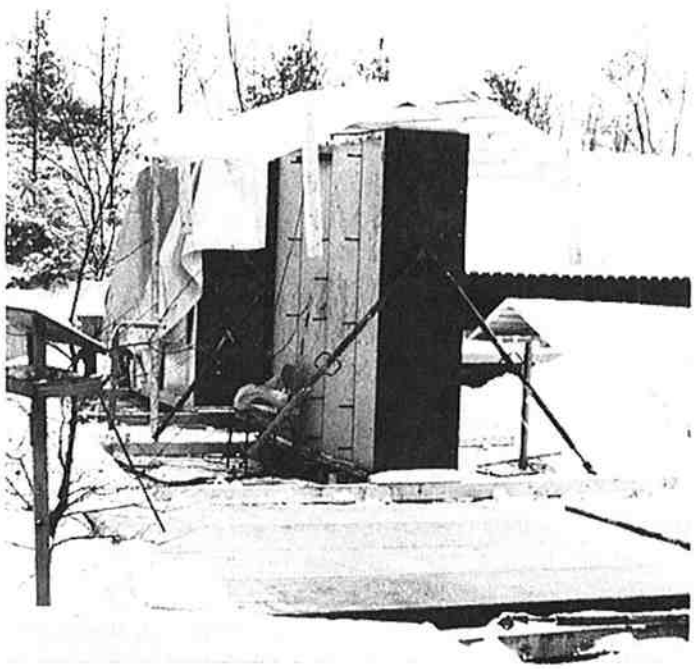
Dette spørgsmål kan vurderes ved hjælp af beregningsskemaets data. Her aflæses under punkt 5 at $\theta_m = 62$ °C ved 48 timer. Talværdierne fra spørgsmål 7 viser umiddelbart, at temperaturkravet vil blive overskredet. Det tilladelige transmissionstal bestemmes til $k = 35$ kJ/m² · h · °C, hvor afformningen fører til $k_a = 100$ kJ/m² · h · °C. Temperaturforskellen kan beregnes ved hjælp af diagrammet på indersiden af arbejdsblokkens omslag. Indgangsværdierne er:

Vindhastigheden ..... $v = 5$–6 m/s
Transmissionstallet ..... $k_a = 100$ kJ/m² · h · °C
Karakteristisk dimension ..... $\delta = 0.225$ m
Temperaturforskel midte/luft ..... $\theta_m - \theta_L = 63$ °C

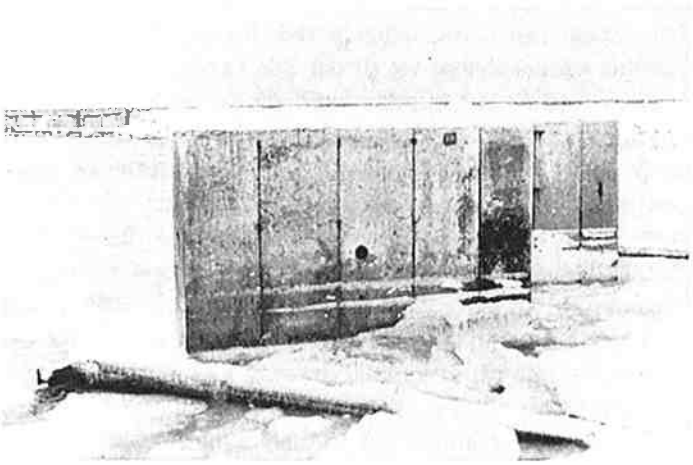
Med disse værdier aflæses temperaturforskellen mellem midte og rand til

$\Delta\theta = \theta_m - \theta_r = 33$ °C

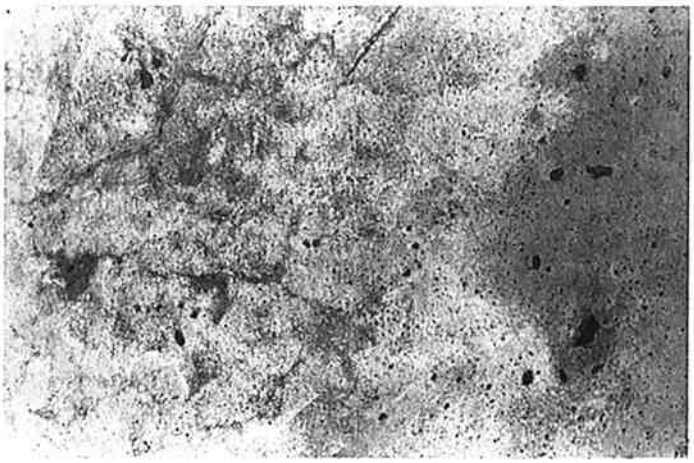
Væggen er efter forsøget opstillet ved Halskov Færgehavn og viser i dag, august 1982, et karakteristisk revnebillede, se fotografiet nederst til højre. Billedet i midten til højre viser væggen i december 1981.



Væggene umiddelbart efter afformning, hvor afkølingen af betonoverfladen er årsag til temperaturbelastningen over tværsnittet. I afkølingsperioden kunne fremkomst og udvikling af revner iagttages. Bemærkelsesværdigt var især, at de konstaterede revner ikke kunne ses på overfladen, når der var opnået temperaturligevægt i tværsnittet.



Som led i et opfølgende holdbarhedsforsøg er fire elementer anbragt på DSB's areal ved Halskov Havn. Elementerne er opstillet i vandgangszonen, hvor de nedbrydende påvirkninger erfaringsmæssigt er stærkest. Billedet er fra december 1981.



På de hårdest belastede elementer kan man se tydelige revner. Især ved overgangen fra våd til tør tilstand er krakeleringsrevner tydelige. Billedet er fra august 1982.

1. Frysning af jord

Dette kapitel er en summarisk oversigt over nogle fysiske egenskaber ved jordarter med henblik på deres forhold ved frysning. Oversigten danner en slags indledning til det følgende kapitel om frysning af beton, og giver samtidig en baggrund for praktiske forholdsregler i forbindelse med jordarbejder under vinterforhold.

1.1 Jordens vandindhold

Jord kan indeholde vand i forskellige former som vist skematisk i figur 1. Vandets egenskaber, især overfladespænding, viskositet og frysepunkt, afhænger af tilstandsformen, og bliver dermed bestemmende for jordmassens fysiske egenskaber som helhed.

Det *frie vand* i jorden er i det væsentlige kun under indflydelse af tyngdekraften. Det har frysepunkt, viskositet og overfladespænding som vand i almindelighed. Det *fysisk bundne vand,* nemlig adsorptions- og kapillarvandet, har derimod lavere frysepunkt, større overfladespænding og højere viskositet end frit vand.

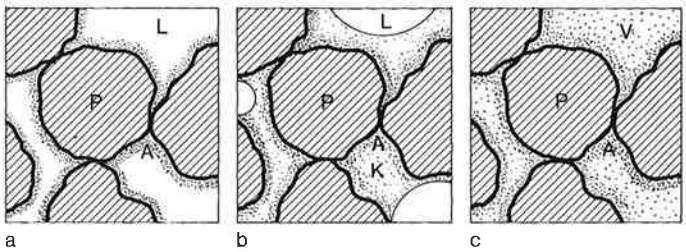
Adsorptionsvandet sidder som en film på overfladen af alle faste partikler i jorden. Nærmest ved partikeloverfladen har vandet fast form, længere væk fra partikeloverfladen nærmer egenskaberne sig til det frie vands. Tiltrækningskraften mellem det bundne vand og de faste partikler er stærkere end tyngdekraften. Indtil filmen har nået en tykkelse, hvor der er ligevægt mellem adsorptionskræfter og tyngdekraft, vil jordens vandindhold findes som film eller hinder omkring de enkelte partikler. Mellem partiklerne vil der i denne tilstand findes luftfyldte porer. Tilføres mere vand til jordmassen, vil dette vand udfylde mellemrummene, *enten* som kapillært bundet vand - hvis partikelafstanden er tilstrækkelig lille til, at kapillarvirkning kan optræde - *eller* som frit vand.

Kapillarvandet hæves ved vandets adhæsionskræfter og holdes ved vandets overfladespænding løftet en vis højde - den kapillære stighøjde - over grundvandspejlet. Dette område kaldes kapillarzonen. Den kapillære stighøjde tiltager med aftagende porediameter (partikelafstand). Vandets forekomst i jordlag er illustreret skematisk i figur 2.

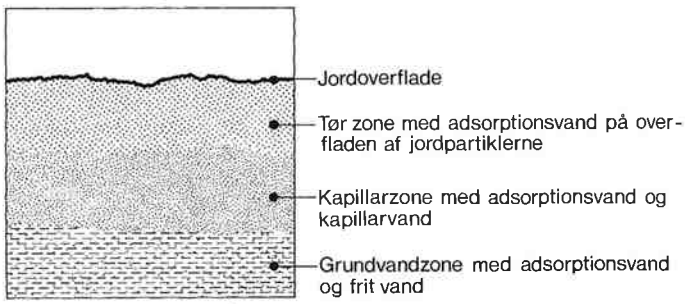
Ved jordens *permeabilitet* forstås den lethed, hvormed luft, vand eller andre væsker kan gennemtrænge jordmassen. Permeabiliteten vokser med jordens porøsitet. For enskornede jordarter vil permeabiliteten vokse med kornstørrelsen. For jordarter med uenskornet sammensætning vil fordelingen af partikler - kornkurven - have stor indflydelse på permeabiliteten. Fjernes vand fra den øverste del af den kapillære zone, fx ved fordampning eller ved dannelse af islinser, er permeabiliteten afgørende for, om tilførslen af vand kan opveje de fjernede mængder.

1.2 Frostens virkninger i jorden

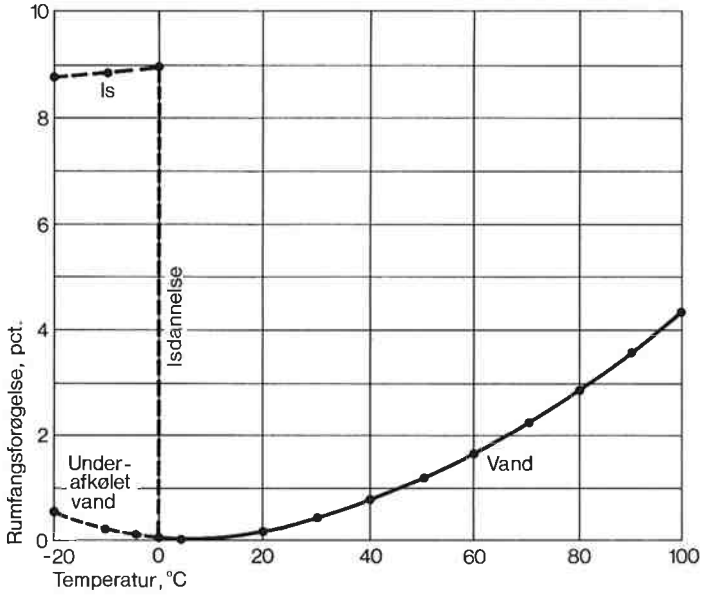
Trænger frosten ned i jord, ændres jordmassens fysiske egenskaber som helhed. Årsagen hertil er, dels at vandet overgår til fast form, dels at vandets volumen øges ved omdannelse til is.



Figur 1. Skematisk afbildning af fugtindhold i jord. I en udtørret jord (figur a) er der små mængder adsorptionsvand A bundet til overfladen af de enkelte jordpartikler P; L betegner luft. I en delvis vandmættet jord (figur b) forefindes vandet fysisk bundet som adsorptionsvand A og kapillarvand K, og i de større porer findes indesluttet luft L. I en vandmættet jord (figur c) er der en jævn overgang fra adsorptionsvand A til frit vand V.



Figur 2. Eksempel på forekomst af vand i jordlag. Fra en vandmættet grundvandzone kan der ske en kapillær opsugning af vand. Herved fremkommer en zone med fysisk bundet adsorptionsvand og kapillarvand. Ved udtørring af jordoverfladen kan der fremkomme en zone, hvor der kun forekommer adsorptionsvand.



Figur 3. Vands rumfang ved varierende temperatur. Ved afkøling indtil +4 °C formindskes vandets rumfang. Ved 0 °C forøges rumfanget med ca. 9 pct. ved isdannelse, medmindre vandet underafkøles; i så fald kan isdannelsen udeblive, og rumfangsudvidelsen vil da være væsentlig mindre.

Vandets temperaturbetingede volumenændringer er, som vist i figur 3 nederst på forrige side, af ret kompliceret natur. Det mindste rumfang, og dermed den største vægtfylde, har vand ved 4 °C. Frysning med isdannelse ved 0 °C medfører en volumenudvidelse på ca. 9 pct. Under påvirkning af et ydre tryk kan vand dog afkøles til under 0 °C uden at omdannes til is. Rumfangsforøgelsen bliver i dette tilfælde ubetydelig. De her nævnte forhold har betydning for frysningsfænomener i jord.

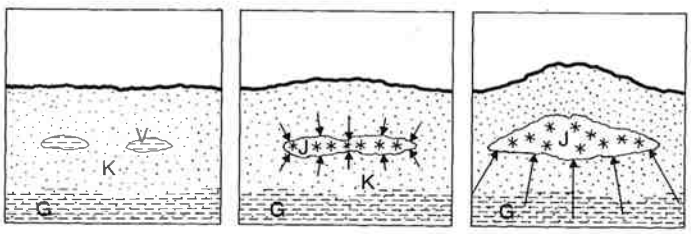
Det er karakteristisk ved frysning af jord, at rumfangsudvidelsen hovedsagelig sker i samme retning, som varmen afgives fra jord til luft, og man taler derfor om *frosthævning* af jord. Frosthævningernes størrelse er, foruden af de klimatiske forhold, bestemt af jordmassens permeabilitet og kapillaritet, dvs. af kornstørrelse og kornstørrelsesfordeling. I afhængighed heraf karakteriseres jordarter som *frostsikre* eller *frostfarlige*.

1.3 Frostsikker jord

Er jorden grovkornet, således at dens permeabilitet er stor og dens kapillære stighøjde er lav, findes en del af vandet som frit vand, der fryser ved 0 °C. Såfremt jorden ikke er helt vandmættet, vil en rumfangsudvidelse ved isdannelse blot bevirke, at en del af de luftfyldte porer og hulrum udfyldes med is. Der sker følgelig ingen hævning af jordoverfladen.

1.4 Frostfarlig jord

I finkornet jord er frysningsprocessen mere kompliceret. Det frie vand og vand i større porer eller hulrum fryser ved 0 °C. Kapillarvand og adsorptionsvand fryser først ved lavere temperaturer. Under frysningen tiltrækkes kapillarvand fra omgivende porer til isdannelserne i frostområdet, og fryser i tilslutning til allerede dannet is. Herved fremkommer de fænomener, der er karakteristisk for frysning af frostfarlig jord: opbygning af lagformede islinser med største udstrækning vinkelret på frostens indtrængningsretning. Se figur 4. Den samlede vandmængde forøges herunder væsentligt ud over jordens oprindelige vandindhold i ufrosset tilstand. Frosthævningerne bliver derfor langt større, end den udvidelse der ville fremkomme ved frysning af den oprindelige vandmængde.



Figur 4. Islinsedannelse ved frysning af jord vist skematisk. Når frit vand V i større porer og hulrum omdannes til is, tiltrækkes kapillarvand K fra den omgivende jord, og der dannes islinser I. Er der mulighed for en fortsat kapillær sugning fra en grundvandszone G, kan islinserne fortsat vokse og fremkalde frosthævninger.

1.5 Jordartens betydning for frostfarligheden

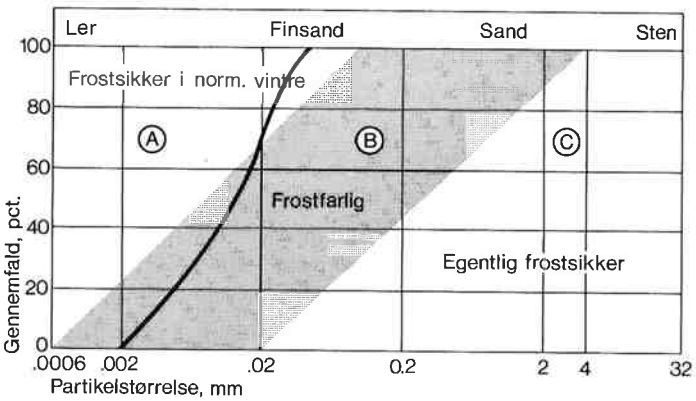
Frosthævningens omfang vil afhænge af den vandmængde, der ved kapillarvirkning kan tilføres fra grundvandspejlet i en given tid. Dette afhænger igen af produktet af kapillaritet og permeabilitet for den givne jordart.

Figur 5 viser, hvorledes en jordarts frostsikkerhed og frostfarlighed er bestemt af jordens kornstørrelsesfordeling. Casagrande angiver, at frosthævninger må forventes i jord med uensartet kornstørrelsesfordeling, når mere end 3 pct. af partiklerne er mindre end 0.02 mm, og i jord med nogenlunde ensartet kornstørrelse, når mere end 10 pct. af partiklerne er mindre end 0.02 mm. Jord der indeholder under 1 pct. partikler med diameter under 0.02 mm kan betragtes som frostsikker.

Som det vil fremgå af figur 5, er de egentlig frostsikre jordarter grovkornede, og dermed karakteriseret ved stor permeabilitet og ringe kapillaritet. Her i landet svarer dette til, at grus og sand uden væsentligt indhold af finstof er frostsikre materialer.

De meget finkornede materialer som fedt plastisk ler og lignende er på grund af deres ringe permeabilitet frostsikre i normale vintre. Deres kapillaritet er imidlertid meget stor. Under lange og strenge vintre kan disse jordarter derfor være frostfarlige, selv med dybtliggende grundvandspejl.

Finkornede jordarter med uensartet kornstørrelse er, på grund af den uheldige kombination af permeabilitet og kapillaritet, udpræget frostfarlige. Dette gælder for en væsentlig del af de danske moræneaflejringer.



Figur 5. De mest finkornede jordarter (A) er kun frostfarlige i lange og strenge vintre. Deres høje kapillaritet bevirker, at vandet kan tiltrækkes ved kapillær sugning fra stor afstand; den lave permeabilitet bevirker dog, at transporten sker meget langsomt. Mindre finkornede jordarter med uensartet kornstørrelse (B) er udpræget frostfarlige, idet kapillarvandet tiltrækkes med en tilstrækkelig hastighed fra et tilstrækkeligt stort område, således at islinsedannelsen kan finde sted. Grovkornede jordarter (C) er egentlig frostsikre, idet den lave kapillaritet forhindrer en tiltrækning af vand fra omgivelserne. Til sammenligning er indtegnet kornstørrelsesfordeling for en dansk, hurtig hærdnende cementtype PC(R).

2. Frysning af beton

Under hærdeprocessens første faser påvirkes betonen ved frysning på samme måde som en frostfarlig jord. Ved frysning senere under hærdningen kan vandets volumenudvidelse ved omdannelse til is forårsage revnedannelse, såfremt vandmætningsgraden er større end en vis, kritisk værdi. I de følgende afsnit skal disse forhold beskrives nærmere.

2.1 Betonteknologisk baggrund

Når vand og cement ved blanding kommer i indbyrdes kontakt, indledes hærdeprocessen. De forskellige trin i hærdeprocessen er gengivet skematisk i figur 6.

I frisk beton består cementpastaen af uhydratiserede cementkorn og vand. I den hærdnende og hærdnede cementpasta består cementpastaen herudover af reaktionsprodukter, dannet under cementens hydratisering.

Under hærdningen dannes en cementgel på cementkornenes overflade ved de kemiske reaktioner mellem cement og vand. I cementgelen indgår kemisk bundet vand, det såkaldte *ikke-fordampelige vand.* Det ikke-fordampelige vand bestemmes i laboratoriet ved tørring af cementpasta i en desiccator ved et specificeret lavt damptryk, og svarer tilnærmet til den vandmængde der indeholdes i en cementpasta efter længere tids tørring ved 105 °C.

I cementgelen findes desuden gelvand i porer med radius af størrelsesordenen 20–40 Ångström (1 Ångström = 10^{-10}m). Denne ringe porediameter bevirker, at vandet er så hårdt bundet, at det først fryser, når temperaturen falder langt under 0 °C. Ved -30 °C er mindre end halvdelen af gelvandet frosset, og først ved ca. -78 °C fryser det sidste gelvand.

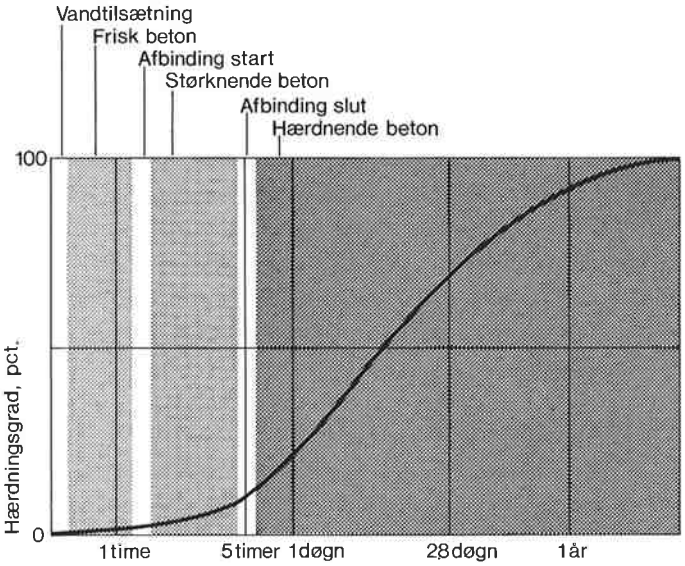
Mellem de uhydratiserede cementkorn i den friske beton findes mellemrum - de kapillære porer - der er fyldt med *kapillarvand.* Under hærdningen øges tykkelsen af cementgelen omkring cementpartiklerne, hvorved de kapillære porers størrelse aftager. I figur 7 er vist en skematisk fremstilling af cementgelens dannelse omkring et cementkorn, der reagerer med vand.

Under betonens hærdning kan en del af det tilsatte vand mistes ved fordampning. Denne fordampning sker først fra de kapillære porer med de største diametre.

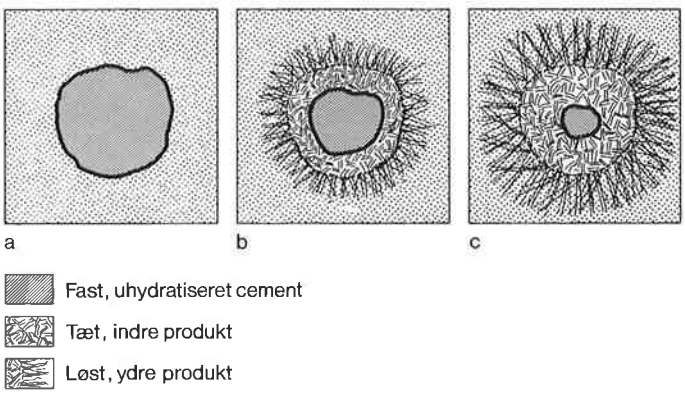
Cementgel og gelvand fylder mindre end det oprindelige volumen af cementkorn og vand. Der vil derfor, selv i prøvelegemer der ikke mister vand ved fordampning, ske en formindskelse af vandmængden i kapillarporerne. Herved fremkommer åbne porer med luft eller vanddamp. Dette fænomen kaldes *selvudtørring.*

Både ved fordampning og ved den foran nævnte selvudtørring sker der en formindskelse af cementpastaens *vandmætningsgrad,* der er defineret som forholdet mellem rumfanget af det kapillære vand og det totale rumfang af de kapillære porer i cementpastaen.

I beton forekommer altid et vist, *naturligt luftindhold* i form af relativt store, uregelmæssigt formede luftporer. *Ved luftindblanding* tilføjes det øgede luftindhold i form af et meget stort antal små og tætliggende porer i cementpastaen.



Figur 6. Skematisk fremstilling af hærdeprocessen for beton. Hærdningsgraden, dvs. den procentandel af cementen der har reageret med det tilsatte vand, øges kun langsomt i de første timer efter blandingen. I denne periode er betonen bearbejdelig og kan udstøbes. Efter 2–3 timers forløb ved 20 °C begynder afbindingen, og betonen er ikke længere bearbejdelig. Efter dette tidspunkt størkner betonen, og ved de kemiske reaktioner mellem cement og vand øges hærdningsgraden nu hurtigt. Den egentlige hærdning og styrketilvækst indtræder ved 20 °C 4–5 timer efter blandingen. Hærdningsgraden øges derefter med aftagende hastighed. Der vil således stadig forefindes ureageret cement i betonen, selv efter flere års hærdning.



Figur 7. Skematisk gengivelse af et cementkorns hydratisering. Et uhydratiseret cementkorn, der bringes i kontakt med vand (figur a), vil reagere kemisk med vandet. Herunder dannes en cementgel på cementkornets overflade (figur b). Ved den fortsatte hydratisering sker der en stadig formindskelse af kernen af uhydratiseret cement (figur c). De dannede gelprodukter er tættest ind mod kernen, og har en mere åben, ofte nåleformet struktur, ud mod overfladen. I en cementpasta fremkommer bindemiddelegenskaberne ved sammenvoksning af de dannede gelprodukter mellem de enkelte cementkorn.

Under betonens *hærdning* afhænger processernes hastighed af hærdetemperaturen. Øges temperaturen, forløber *hærdeprocessen* hurtigere. Sænkes hærdetemperaturen, forløber processerne langsommere for helt at ophøre ved temperaturer omkring -10 °C. I et følgende kapitel omtales, hvorledes der i praksis kan tages hensyn til temperaturens indflydelse på hærdningens forløb.

Som et mål for, hvor langt hærdeprocessen er forløbet, benyttes begrebet *hærdningsgraden,* der angiver, hvor stor en del af den tilsatte cementmængde der til et givet tidspunkt er reageret.

Det er påvist, at der består en nær sammenhæng mellem hærdningsgraden og den udviklede *hærdevarme.* Hærdningsgraden kan derfor også måles ved at bestemme den udviklede varme under hærdningen, hvilket har visse praktiske fordele.

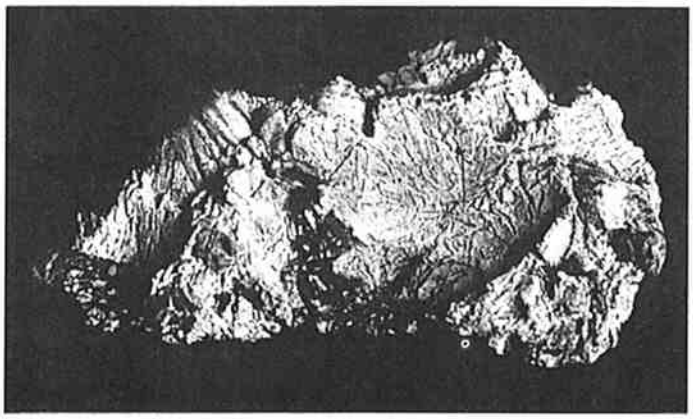
2.2 Frysning af frisk beton

Umiddelbart efter betonens blanding har den friske beton kun en ganske ringe sammenhængskraft. Det tilsatte vand er til stede i samme form som i en jordblanding, dvs. som adsorptionsvand, kapillarvand og som frit vand.

Den friske beton kan opfattes som en kunstigt sammensat »jordart«. Den er, på grund af den ret store permeabilitet og en vis kapillaritet, frostfarlig. De uhydratiserede cementkorn er til stede i så rigelig en mængde, at mere end 3 pct. af partiklerne er finere end 0.02 mm.

Det er da også konstateret, såvel i praksis som ved laboratorieforsøg, at der dannes islinser ved frysning af frisk beton, når der ikke er luft i betonen, og når vandindholdet kan forøges under frysningen ved kapillær sugning fra omgivelserne. Såfremt der ikke opsuges vand, sker isdannelsen mere jævnt fordelt i betonen. Den viser sig da ofte som isnåle i grænseflader mellem gruspartikler og cementpasta, samt i cementpastaens kapillære porer. Disse isnåle vil ved senere optøning efterlade hulrum og mærker, de såkaldte »påfuglespor«. På fotografiet i figur 8 er der vist et eksempel på isdannelser af denne art.

Analogien mellem beton og frostfarlig jord gælder kun for den friske og størknende beton. Under hærdningen ændres betonens struktur, og der sker herunder en vis selvudtørring som følge af de kemiske reaktioner mellem cement og vand.



Figur 8. »Påfuglespor« dannet ved frysning af frisk beton. Isdannelser af denne art er karakteristisk ved frysning af frisk beton. Hvis betonens vandindhold kan forøges ved kapillær sugning under frysningen, kan der dannes større sammenhængende islinser.

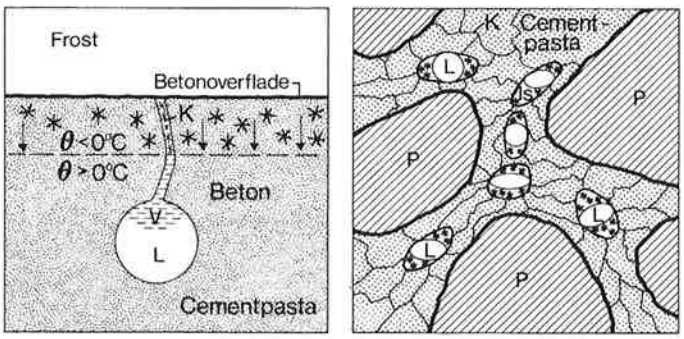
2.3 Frysning af hærdnet beton

Efter betonens afbinding fortsætter hærdeprocesserne, sålænge der er vand til stede. Herunder øges betonens trækstyrke, og dens evne til at modstå frysning ændres væsentligt.

Ifølge *Powers* vil der ved frysning af afbundet beton dannes is i porerne. På grund af den opnåede trækstyrke vil der dog ikke umiddelbart ske dannelse af islinser. Vandets omdannelse til is bevirker imidlertid en ekspansion, hvorunder det ikke-frosne vand presses ind i betonen foran frysezonen. Som følge af betonens lave permeabilitet kan der herved opbygges et hydraulisk tryk. *Dette tryk kan fremkalde revner i betonen, såfremt der ikke findes tætliggende luftblærer, hvor trykket kan udlignes,* se figur 9.

Risikoen for revnedannelse under betonens frysning afhænger bl.a. af cementpastaens *vandmætningsgrad,* dens permeabilitet og trækstyrke samt af luftporernes mængde og fordeling i betonen.

Cementpastaens vandmætningsgrad S, der angiver forholdet mellem indholdet af fordampeligt vand og det totale porevolumen, har afgørende indflydelse på betonens evne til at tåle frysning. Såfremt vandmætningsgraden *S* er mindre end ca. 0.9, kan vandets ekspansion under betonens frysning udlignes i de tilstedeværende luftporer. Dette er en nødvendig, men ikke tilstrækkelig betingelse for frostsikkerhed. Såfremt den indeholdte luft ikke er til stede i form af et stort antal ensartet fordelt, tætliggende luftblærer, vil modstanden mod denne udligning være stor på grund af den afbundne cementpastas lave permeabilitet. For at fremkalde den nødvendige vandbevægelse under frysningen, må der derfor opbygges store hydrauliske tryk i porevandet, hvilket indebærer risiko for revnedannelse.



Figur 9. Frysning af luftindblandet beton, skematisk. Til venstre: Ved frostindtrængning fra en overflade opstår der en vandbevægelse i frostens indtrængningsretning som følge af vandets udvidelse ved fryning. Denne vandbevægelse fremkaldes af et hydraulisk tryk i porevandet i cementpastaen. Såfremt der findes en luftfyldt pore L nær frysezonen, kan vandet V presses ind i denne pore gennem kapillaren K. Herved udlignes det hydrauliske tryk. I modsat fald kan det hydrauliske tryk vokse til en kritisk størrelse, der fremkalder revner i betonen. Til højre: Dette princip benyttes ved frostsikring af beton. Ved luftindblanding sikres det, at cementpastaen mellem tilslagspartiklerne P indeholder tætliggende, små luftporer L. Under frysningen udlignes det hydrauliske tryk, idet vandet gennem kapillarerne K presses ind i de luftfyldte porer L.

Betonens permeabilitet aftager under hærdningen. Modstanden mod vandbevægelser under frysning vil derfor øges med hærdningsgraden, se figur 10. Det er derfor ikke umiddelbart givet, at en betons modstandsevne over for frostpåvirkninger vil øges med alderen. *Jo lavere permeabiliteten er, og jo større afkølingshastigheden er, desto større bliver det hydrauliske tryk under frysningen.*

I luftindblandet beton forøges det hydrauliske tryk, når middelafstanden mellem de indeholdte luftblærer vokser. For opnåelse af frostsikkerhed er det derfor væsentligt, at betonen indeholder mange tætliggende luftblærer, hvori det hydrauliske tryk kan udlignes. I en vandmættet beton er mulighederne for trykudligning så små, at frysning vil beskadige betonen.

Som det vil være fremgået af det foranstående, afhænger betonens evne til at tåle frysning af en række faktorer, der i et vist omfang kan ændres med tiden. På denne baggrund vil der i det følgende blive skelnet mellem begreberne *frostsikkerhed* og *frostbestandighed.*

Frostsikkerhed betegner en øjeblikkelig *tilstand,* nemlig at betonen kan tåle frysning uden at beskadiges.

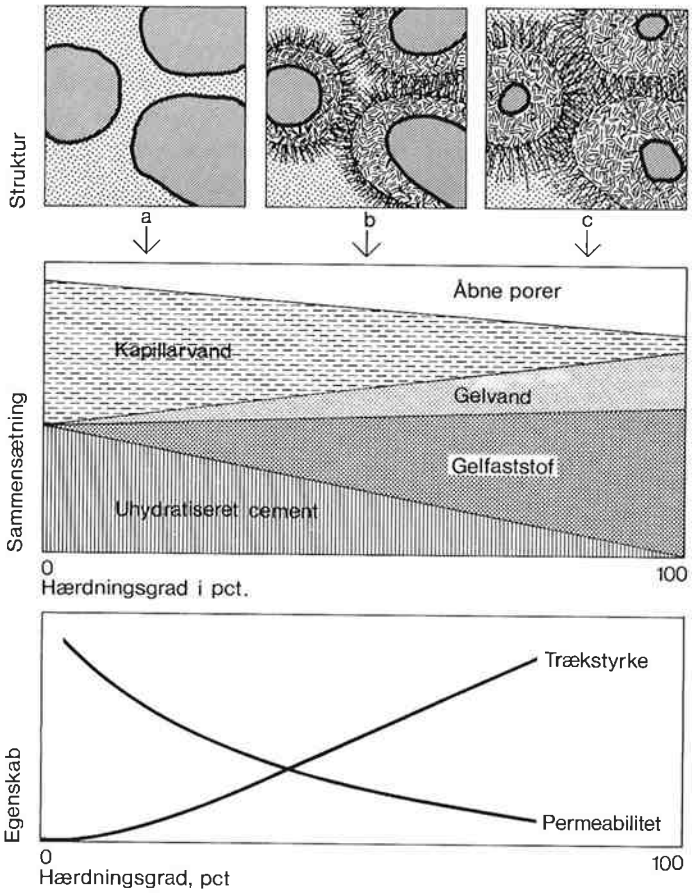
Frostbestandighed betegner en blivende *egenskab,* nemlig at betonen under givne brugsbetingelser kan tåle de dertil hørende frostpåvirkninger uden at beskadiges.

En betons frostsikkerhed vil således være bestemt af den øjeblikkelige hærdningsgrad og vandmætning. En betons frostbestandighed er i højere grad betinget af samspillet mellem betonens struktur, de givne fugtpåvirkninger i brugsperioden og de derunder optrædende frostpåvirkninger.

2.4 Konklusion

Det fremgår af foranstående redegørelse, at betonens modstandsevne over for frysning afhænger af en række faktorer, der i større eller mindre grad ændres under betonens hærdning og brug. Der er tre forudsætninger for at undgå frostbeskadigelse af betonen i forbindelse med vinterstøbninger.

- De benyttede grusmaterialer skal være frostbestandige.
- Dannelse af islinser skal hindres i den friske beton ved at beskytte den mod frysning på dette trin i hærdningen.
- Betonen skal have opnået en vis hærdning, inden frysning finder sted. Denne hærdningsgrad er karakteriseret ved, at mængden og fordelingen af den indeholdte luft er tilstrækkelig til at udligne det hydrauliske tryk ved den første frysning, inden det overstiger den trækstyrke, der er opnået under hærdningen.



Figur 10. Skematisk gengivelse af den hærdnende cementpastas struktur, sammensætning og egenskabsudvikling under hærdningen. Øverst: Ved reaktionen mellem cement og vand vokser der hydratiseringsprodukter ud fra overfladen af de enkelte cementpartikler a). Herved sker der en udfyldning af porerne mellem partiklerne efterhånden som hærdningen skrider frem b) og c). Udfældningen af hydratiseringsprodukter bevirker, at de enkelte partikler kittes sammen, hvorved den hærdnende cementpasta opnår indre sammenhæng og styrke. Samtidig medfører porefyldningen, at vandgennemtrængeligheden – permeabiliteten – bliver mindre. Under hærdningen ændres sammensætningen af cementpastaen. Mængden af uhydratiseret cement og mængden af kapillarvand aftager, idet disse to komponenter reagerer indbyrdes. Samtidig hermed øges indholdet af hydratiseringsprodukter i cementpastaen. Hydratiseringsprodukterne kaldes under ét for gelfaststof.

For at opfylde disse betingelser i praksis er det nødvendigt at kontrollere betonens temperatur- og hærdeforløb gennem en hensigtsmæssig udførelse af betonarbejdet. I de følgende kapitler redegøres der mere detaljeret for disse forhold.

3. Betons hærdning

3.1 Stofomsætning og hærdningsgrad

Under cementens hydratisering sker der kemiske reaktioner mellem cementens faste stoffer og det tilsatte vand. Ved disse reaktioner dannes under varmeudvikling nye faste stoffer, *hydrater,* der indeholder *kemisk bundet vand.* Cementens hærdningsgrad (hydratiseringsgrad) angiver på vægtbasis mængden af reageret cement i forhold til den oprindelige mængde. Som et mål for hærdningsgraden benyttes i praksis en bestemmelse af: mængden af kemisk bundet vand (»ikke fordampeligt vand«), størrelsen af den udviklede hærdevarme, styrkeudviklingen.

Måling af kemisk bundet vand er i det væsentlige begrænset til rene cementpastaer, hvorimod måling af udviklet hærdevarme og styrkeudvikling relativt simpelt kan udføres på betoner. Et omfattende forsøgsmateriale viser overensstemmende, at både varmeudvikling og styrkeudvikling tilnærmet kan udtrykkes som funktion af mængden af kemisk bundet vand. Under betonens hærdning kan styrken derfor også tilnærmet udtrykkes som en funktion af den udviklede hærdevarme.

3.2 Hærdningens temperaturafhængighed

De kemiske reaktioner mellem cement og vand forløber hurtigere, desto højere temperaturen er. Sammenlignes hydratiseringshastigheden ved temperaturen θ med hastigheden ved 20 °C for samme hydratiseringsgrad, vil forholdet efter [7] tilnærmet kunne udtrykkes ved

$$H(\theta) = \frac{\text{hastighed ved } \theta\ ^\circ\text{C}}{\text{hastighed ved } 20\ ^\circ\text{C}} \cong \exp\left[\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{1}{293}-\frac{1}{273+\theta}\right)\right]$$

hvor

E = karakteristisk aktiveringsenergi

$$= \begin{cases} 33500\ \text{J/mol} & \theta \geq 20\ ^\circ\text{C} \\ 33500 + 1470(20-\theta)\ \text{J/mol} & \theta < 20\ ^\circ\text{C} \end{cases}$$

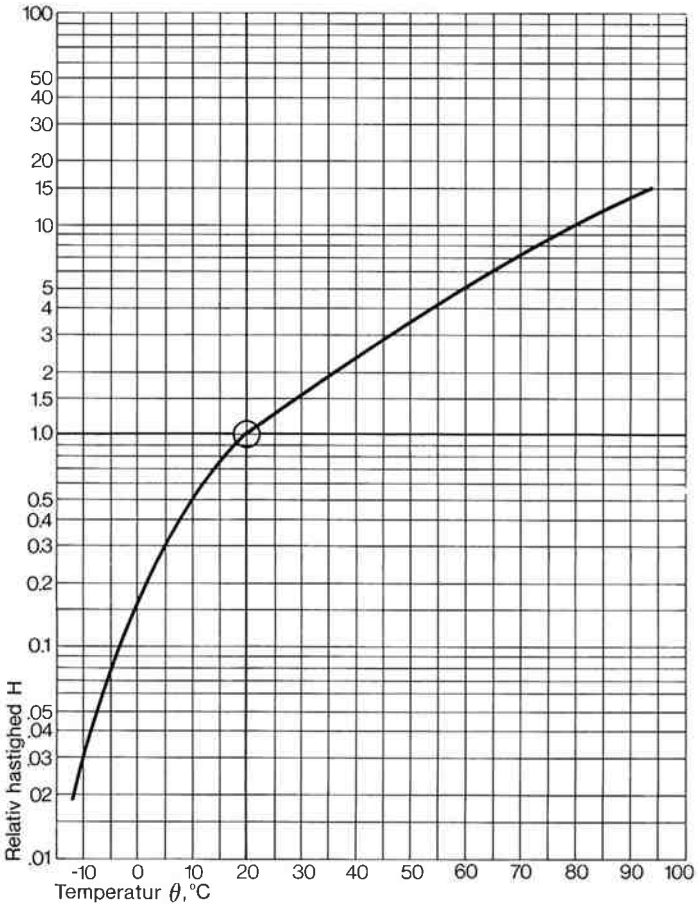
R = gaskonstanten = 8.314 J/mol °C

I figur 11 vises et diagram over temperaturfunktionen $H(\theta)$ for temperaturområdet $\theta = -10$ °C til $\theta = 90$ °C. Temperaturfunktionen $H(\theta)$ angiver hærdeprocessernes temperaturafhængighed regnet i forhold til hastigheden ved 20 °C. Referencetemperaturen 20 °C er valgt, fordi denne temperatur hyppigst benyttes ved laboratorieundersøgelser. Ved anvendelse af ovennævnte temperaturfunktion er det muligt at sammenligne et hærdeforløb ved en temperatur θ, forskellig fra 20 °C, med et forud kendt hærdeforløb undersøgt i laboratoriet ved 20 °C. Denne sammenligning udføres ved at beregne betonens modenhed M, der er den ækvivalente alder ved 20 °C, udtrykt som

$$M = \int_0^t H(\theta)\cdot d\tau$$

Ved numeriske beregninger benyttes det tilhørende differensudtryk

$$M = \sum_{i=1}^{n} H(\bar{\theta}_i)\cdot \Delta t_i$$



Figur 11. Diagram over temperaturfunktionen H(θ) i temperaturområdet fra -10 til 90 °C. Temperaturfunktionen H(θ) angiver hærdehastigheden ved temperaturen θ °C i forhold til hærdehastigheden ved 20 °C. Diagrammet kan benyttes ved beregning af temperaturens indflydelse på hærdehastigheden.

Et givet temperaturforløb opdeles i tidsintervaller Δt_i. For hvert tidsinterval bestemmes middeltemperaturen $\bar{\theta}_i$, og den dertil svarende værdi af temperaturfunktionen $H(\bar{\theta}_i)$ beregnes eller aflæses i diagrammet. Tilvæksten i betonens modenhed ΔM_i i det betragtede interval bestemmes af $H(\bar{\theta}_i)\cdot\Delta t_i$. Til slut bestemmes M ved summation af de beregnede modenhedstilvækster for de enkelte tidsintervaller.

3.3 Betonens varmeudvikling

Beton består af en blanding af cement, vand og tilslag. Under betonens hærdning reagerer cementen kemisk med det tilsatte vand og danner hydrater med bindemiddelegenskaber. Denne reaktion er ledsaget af en betragtelig varmeudvikling. Ved fuldstændig hydratisering af 1 kg portlandcement udvikles der en varmemængde på 400–500 kJ. I praksis opnås der ikke fuldstændig hydratisering af cementen under hærdningen, hvorfor den målte varmeudvikling normalt er lavere end den nævnte værdi.

Portlandcement består af fire hovedkomponenter, klinkermineralerne C_3S, C_2S, C_3A og C_4AF, der tilsammen udgør 90–95 pct. af cementen. De resterende 5–10 pct. består af

Cements indhold af forskellige mineraler afhænger af fremstillingsprocessen. Tabellen angiver de væsentligste klinkermineraler med deres navn, kemiske sammensætning og cementkemiske betegnelse.

Navn	Kemisk sammensætning	Cementkemisk betegnelse	Fasebetegnelse
Tricalciumsilikat	$3CaO - SiO_2$	C_3S	Silikatfase
Dicalciumsilikat	$2CaO - SiO_2$	C_2S	Silikatfase
Tricalciumaluminat	$3CaO - Al_2O_3$	C_3A	Aluminatfase
Tetracalciumaluminoferrit	$4CaO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$	C_4AF	Ferritfase

sekundære komponenter som fri kalk, magnesiumoxid, alkalioxid og -sulfat samt et indhold på 2–5 pct. gips, tilsat under cementens formaling. Se ovenstående tabel.

De nævnte klinkermineraler bidrager forskelligt til cementens varmeudvikling. Ved fuldstændig hydratisering af klinkermineralerne C_3S, C_2S, C_3A og C_4AF udvikles der en varmemængde på henholdsvis ca. 500, 260, 900 og 300 kJ/kg. Cementer med højt indhold af C_2S og C_4AF vil sædvanligvis være lavvarmecementer. Et stort indhold af C_3S og specielt C_3A vil omvendt indicere en relativ høj varmeudvikling for en portlandcement.

Udover den kemiske sammensætning vil faktorer som cementens finhed, hærdetemperatur og *v/c*-forhold indvirke på varmeudviklingsforløbet. Varmeudviklingshastigheden forøges med øget finhed og med voksende temperatur. Et øget *v/c*-forhold vil erfaringsmæssigt medføre en mere fuldstændig hydratisering af cementen, og dermed en vis tilvækst i varmeudvikling.

Anvendelse af tilsætningsstoffer, fx til regulering af portlandcementers hærdeforløb, vil i mange tilfælde påvirke varmeudviklingsforløbet. Hærdningsaccelererende tilsætningsstoffer øger varmeudviklingshastigheden, og hærdningsretarderende tilsætningsstoffer nedsætter denne. Den totale varmeudvikling vil dog stort set forblive uændret. Plastificerende og/eller luftindblandede tilsætningsstoffer har i mange tilfælde en vis retarderende effekt. Ved anvendelse af disse stoffer kan varmeudviklingsforløbet derfor påvirkes, hvilket må indgå i planlægningen af procesforløbet.

3.4 Måling af varmeudvikling

Cementers varmeudvikling under hydratiseringen kan bestemmes ved kalorimetriske målinger. I praksis benyttes sædvanligvis én af tre målemetoder: *opløsningskalorimetri, isoterm kalorimetri eller adiabatisk kalorimetri.*

De to førstnævnte målemetoder benyttes overvejende ved bestemmelse af varmeudvikling i hærdnende cementpasta. Ved *opløsningskalorimetri* bestemmes en serie prøvers opløsningsvarme i syre til forskellige terminer. Den udviklede hydratiseringsvarme kan derefter beregnes ved subtraktion af disse værdier fra opløsningsvarmen for en uhydratiseret 0-prøve (Ḥess' lov). Ved *isoterm kalorimetri* måles varmestrømmen fra en lille prøve af cementpasta, der hærdner ved konstant temperatur. Den totale varmeudvikling bestemmes derefter ved en integration af den målte varmestrøm over tiden.

Ved *adiabatisk kalorimetri* måles temperaturstigningen i en hærdnende prøve, der ikke udveksler varme med omgivelserne. Den udviklede hydratiseringsvarme omsættes under disse betingelser til en temperaturstigning i betonen. Den målte temperaturstigning kan, med kendskab til prøvens varmefylde, omregnes til ækvivalent varmemængde. Den adiabatiske måling kan med fordel udføres på ret store prøveemner. Metoden er derfor særlig egnet til undersøgelse af beton, hvor et mindste prøvevolumen på 5–8 liter er nødvendig for at opnå repræsentativ prøveudtagning.

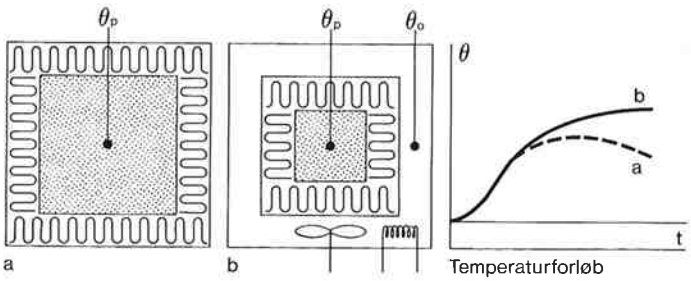
Varmeudviklingsforløb målt på cementpasta ved opløsningskalorimetri eller ved isoterm kalorimetri vil sædvanligvis give lavere værdier, end det der fås ved adiabatisk måling på beton.

3.5 Adiabatisk kalorimetri

Den adiabatiske kalorimetriske måling udnytter det forhold at en udviklet hydratiseringsvarme omsættes til en ækvivalent temperaturstigning i en prøve, der ikke udveksler varme med omgivelserne. Den fuldstændige termiske isolering af prøven kan i praksis tilnærmes på forskellig vis. Varmestrømmen fra prøve til omgivelser er proportional med temperaturforskellen og omvendt proportional med varmeledningsmodstanden mellem prøve og omgivelser. Adiabatiske forhold kan derfor tilnærmes *enten* ved at øge varmeledningsmodstanden *eller* ved at reducere temperaturforskellen mellem en prøve og dens omgivelser.

Den førstnævnte metode kan etableres i en simpel opstilling som vist i figur 12a, hvor kalorimetret består af en kraftig isoleret prøveholder. Metoden kan benyttes til simple, vejledende målinger under byggepladsforhold. Med voksende temperatur i prøven vil varmetabet dog medføre, at der optræder betydelige afvigelser fra det adiabatiske forløb. For at opnå en rimelig nøjagtig bestemmelse af varmeudviklingsforløbet, er det nødvendigt at benytte et ret stort prøvevolumen, fx 40–50 liter.

Benyttes en måleopstilling som vist i figur 12b, kan der i praksis opnås adiabatiske betingelser under målingens udførelse. Temperaturforskellen mellem prøve og omgivelser holdes til stadighed på 0 gennem en termostatstyring. Her-



Figur 12. Målopstillinger for adiabatisk kalorimetrisk bestemmelse af varmeudviklingsforløb under betonens hærdning. I figur a er vist en opstilling, hvor den adiabatiske betingelse tilnærmet er opnået ved kraftig isolering af prøven. I figur b er den adiabatiske betingelse opnået ved at placere den isolerede prøve i et kammer, der holdes på samme temperatur som prøven.

ved elimineres varmetabet fra prøven. Den målte temperaturstigning i prøven kan derefter omregnes til en udviklet, ækvivalent varmemængde. Ved anvendelse af temperaturfunktionen kan den målte varmeudvikling angives som en funktion af betonens modenhed M, og derved tjene som referencekurve for hærdeberegninger.

3.6 Varmeudviklingsforløbet

Varmeudviklingen måles hensigtsmæssigt ved adiabatisk kalorimetri. Ved denne måling bestemmes et temperaturforløb, der med kendskab til betonens vandværdi (produktet af densitet og varmefylde, $\varrho \cdot c$) kan omregnes til en ækvivalent adiabatisk varmeudviklingskurve. Se figur 13.

Ved anvendelse af temperaturfunktionen kan denne kurve afbildes som funktion af betonens modenhed M, og derved tjene som referencekurve for hærdeberegninger. Dette er illustreret i figur 14.

Ved afbildning af varmeudviklingsforløbet som funktion af modenheden M, fås i enkeltlogaritmisk afbildning en S-formet kurve som vist i figur 14. Denne kurve kan med god tilnærmelse beskrives matematisk ved tre parametre: Q_∞, τ_e og α på formen

$$Q = Q_\infty \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right] \qquad (1)$$

hvor

Q_∞ = total varmeudvikling for $M \rightarrow \infty$, kJ/kg
Q = varmeudvikling ved modenheden M, kJ/kg
M = betonens modenhed, h
τ_e = karakteristisk tidskonstant, h
α = krumningsparameter, dimensionsløs

Udtrykket (1) er af rent empirisk natur, og bør ikke opfattes som en model for hydratiseringsprocesserne.

3.7 Styrkeudviklingsforløbet

Styrkeudviklingen afhænger af betonens sammensætning samt af hærdeforløbet. Ved proportioneringen sammensættes en beton med de ønskede styrkeegenskaber. Hertil anvendes fx Bolomey's formel. Man kan herigennem tilstræbe en sammensætning, der opfylder de stillede krav til styrken efter en fastsat termin fx 14 eller 28 døgn.

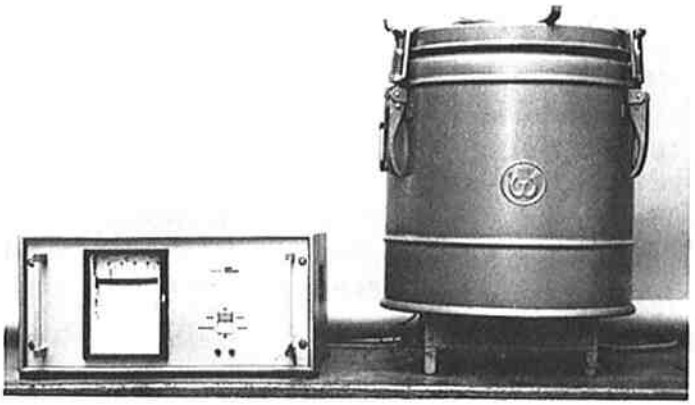
Betonens styrkeegenskaber dokumenteres normalt ved udstøbning af cylindre fra prøveblandinger. Prøvecylindrene lagres 1 døgn i form og vandlagres derefter i vandbad ved 20 °C indtil prøvningen foretages. Der udføres normalt trykprøvning, eventuelt spaltetrækprøvning, af cylindrene.

Ved afbildningen af betons trykstyrkeudvikling i en enkeltlogaritmisk afbildning med modenheden M som logaritmisk akse, fås en s-formet kurve, figur 15. Det har vist sig at denne, analogt til varmeudviklingskurven, tilnærmet kan beskrives gennem tre parametre: σ_∞, τ_e, α ved formlen

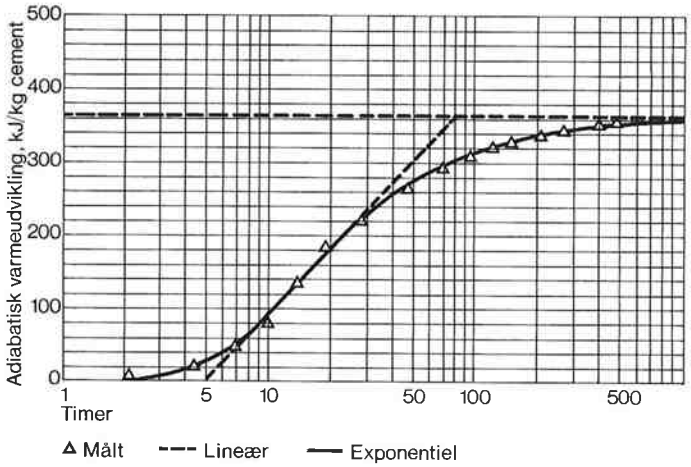
$$\sigma = \sigma_\infty \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right] \qquad (2)$$

hvor

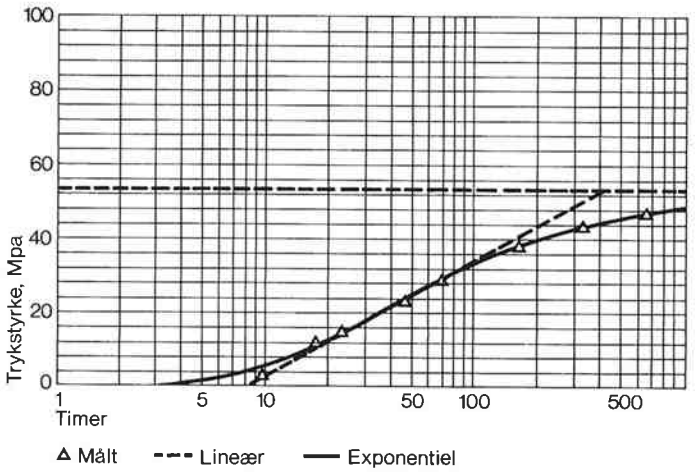
σ_∞ = potentiel slutstyrke, MPa, for $M \rightarrow \infty$
σ = styrken, MPa
M = betonens modenhed, h
τ_e = karakteristisk tidskonstant, h
α = krumningsparameter, dimensionsløs



Figur 13. Adiabatisk kalorimeter type Tonindustrie 6010 til bestemmelse af betoners varmeudvikling. Ved måling benyttes en betonprøve på 4–5 liter.



Figur 14. Det adiabatiske varmeudviklingsforløb som funktion af modenheden M benyttes som referencekurve ved hærdeberegninger. Det viste forløb er målt på en beton med 310 kg/m³ PC(R) og v/c = 0.5. Den indtegnede kurve svarer til formeludtrykket (1) for parameterværdierne: $Q_\infty = 366$ kJ/kg, $\tau_e = 13.9$ h og $\alpha = 0.97$.



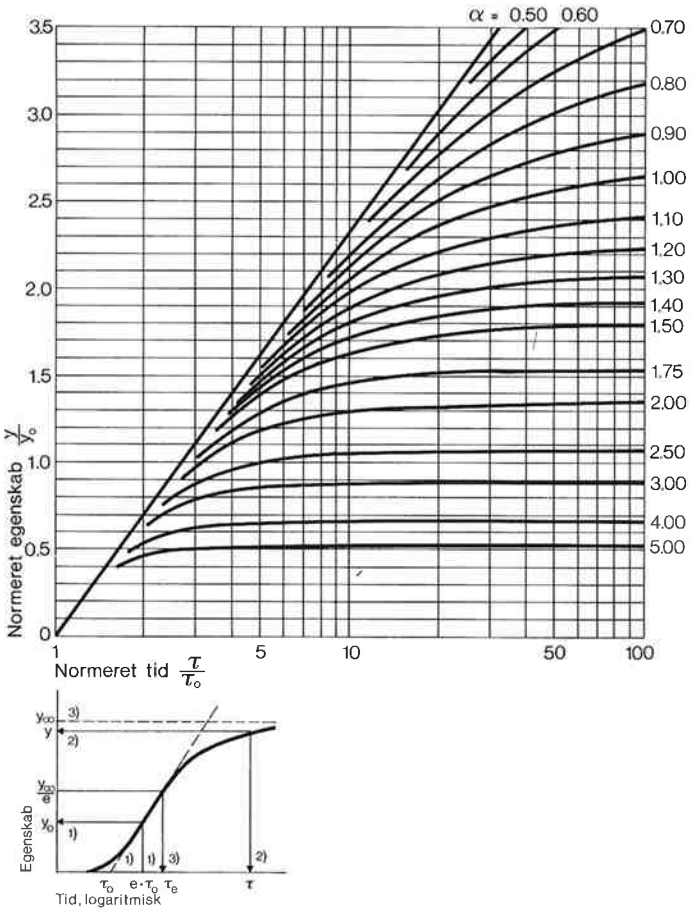
Figur 15. Trykstyrken som funktion af modenheden M for en beton med 310 kg/m³ PC(R) og v/c = 0.43. Den indtegnede kurve svarer til formeludtrykket (2) for parameterværdierne $\sigma_\infty = 52.5$ MPa, $\tau_e = 35.3$ h og $\alpha = 0.70$.

Udtrykket (2) er af rent empirisk natur. Størrelserne τ_e og α vil normalt afvige noget fra de tilsvarende værdier i udtrykket (1) for varmeudviklingsforløbet.

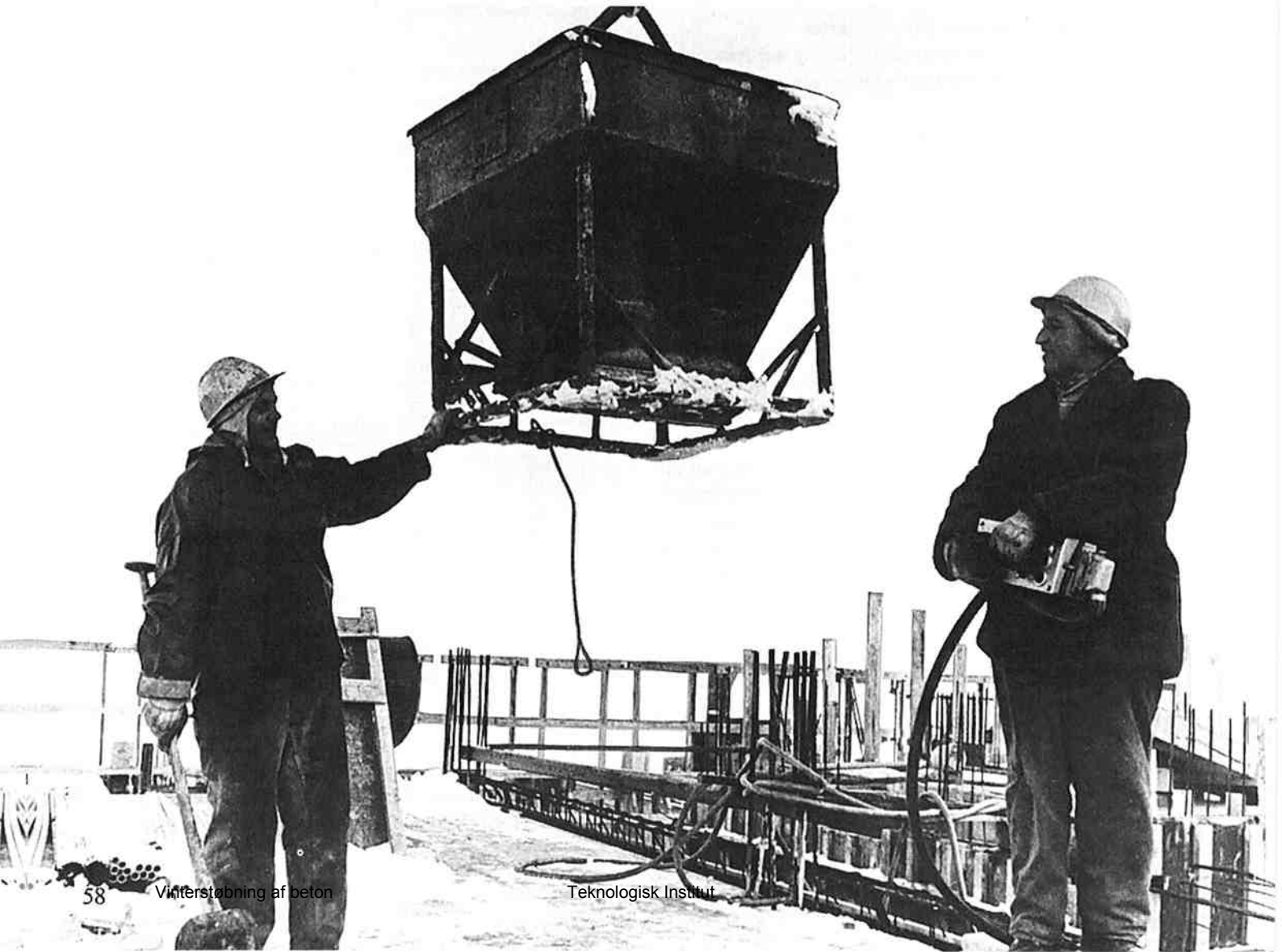
3.8 Parametre for egenskabsudvikling

Det i figur 16 viste diagram benyttes ved bestemmelse af parametre i beregningsudtrykkene (1) og (2) for betonens egenskabsudvikling. De pågældende analytiske udtryk har vist sig særligt egnede til at beskrive den tidsmæssige udvikling af betonegenskaber som fx: styrkeudvikling, stivhedsudvikling, varmeudvikling, og kan bl.a. finde anvendelse i forbindelse med beregningsopgaver såsom: interpolation og ekstrapolation af styrkedata; statistisk udjævning af forsøgsresultater; matematisk simulering af hærdeforløb.

Fremgangsmåden ved bestemmelse af parameterværdier fremgår af figur 16. En mere detaljeret beskrivelse af metoden findes bl.a. i [10].



Figur 16. Diagram til brug ved bestemmelse af parametre i formlerne (1) og (2) for betons egenskabsudvikling. Idet y er en egenskab, M er modenhed (timer) og α er krumningsparameter (der bestemmes af diagram) er den lineære model udtrykt ved $y/y_o = ln(M/\tau_o)$ og den eksponentielle model udtrykt ved $y/y_\infty = exp[-(\tau_e/M)^\alpha]$. Parametrene bestemmes således: 1) Bestem y_o og τ_o grafisk som vist i skitsen. 2) Bestem α ved hjælp af skitse og diagram. 3) Beregn y_∞ og τ_e af $y_\infty = e \cdot y_o/\alpha$ og $\tau_e = \tau_o \cdot exp(1/\alpha)$. Tallet e er grundtallet for den naturlige logaritme, og har værdien ca. 2.718.



4. Frostsikkerhed og frostbestandighed

I det følgende anskues emnet udfra en opdeling efter begreberne frostsikkerhed og frostbestandighed. *Frostsikkerhed* angiver den øjeblikkelige tilstand af en beton, at den kan fryse uden at beskadiges. *Frostbestandighed* angiver den blivende egenskab ved en beton, at den under givne brugsbetingelser kan tåle de dertil hørende frostpåvirkninger uden at beskadiges.

Frostsikkerheden vil således være bestemt af betonens øjeblikkelige hærdningsgrad og vandmætning. Frostbestandigheden er derimod betinget af samspillet mellem betonens struktur, de givne fugtpåvirkninger i brugsperioden og de derunder optrædende frostpåvirkninger.

4.1 Frostsikkerhed

Anvendelsen af særlige foranstaltninger ved betonarbejder i koldt vejr skal normalt sikre, at hærdningen kan forløbe således at betonen ikke udsættes for frysning, før den er frostsikker. I dette afsnit beskrives, hvorledes denne tilstand opnås i hærdnende cementpasta.

Når vand fryser til is, udvider det sig ca. 9 pct. For at undgå spændinger på grund af denne volumenudvidelse, skal der være et jævnt fordelt luftporevolumen i betonen, der svarer til denne volumenudvidelse.

Til bedømmelse af en betons frostsikkerhed benyttes parameteren

$$\text{Vandmætningsgraden } S = \frac{V_w}{V_p} \qquad (3)$$

hvor

V_w = volumen fordampeligt vand

V_p = totalt porevolumen

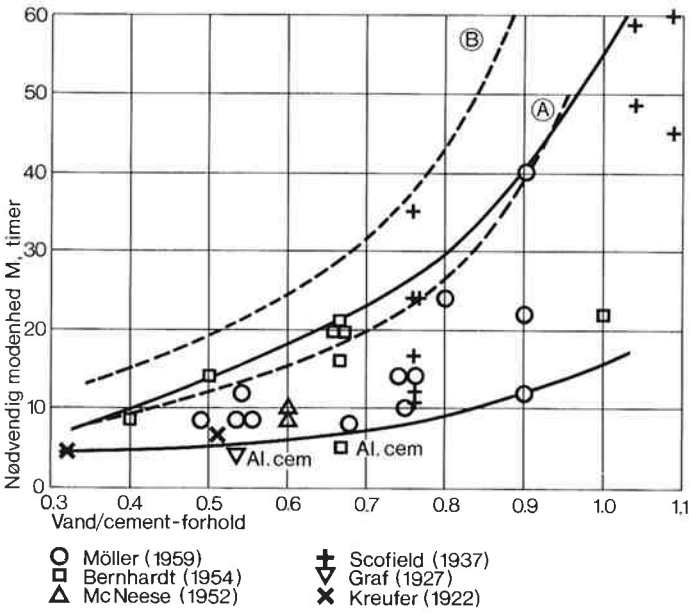
Som det fremgår af det foranstående er den teoretiske øvre grænseværdi for kritisk vandmætningsgrad S ca. 0.9. Denne værdi svarer til, at det tilgængelige luftporevolumen er jævnt fordelt i betonen. I praksis er luftporefordelingen ikke ensartet. Erfaringsmæssigt findes da også, at den kritiske vandmætningsgrad S_{krit} for opnåelse af frostsikkerhed normalt er 0.75–0.90, [11].

Når hydratiseringen sker uden tilførsel af vand til cementpastaen, vil de fremkomne porer være åbne. Hvis der kan tilføres vand fra omgivelserne under hærdningen, vil porerne fyldes med vand efterhånden som de dannes. Dette er illustreret i figur 17.

De fleste betonkonstruktioner hærdner i form inden for de første døgn. Disse forhold svarer til et lukket system. Frostsikkerheden kan derfor teoretisk opnås gennem det frie porevolumen, der fremkommer på grund af selvudtørring under cementens hydratisering.

I figur 18 er angivet sammenhængen mellem cementpastaens v/c-forhold og den nødvendige modenhed for opnåelse af frostsikkerhed. I figuren er det forudsat, at cementpastaen ikke tilføres vand under hærdningen. De teoretiske grænsekurver A og B er beregnet efter det i Appendix C angivne udtryk:

Figur 17. Hydratisering af vandmættet cementpasta i prøvekolbe. Den iagttagne sænkning af vandspejlet efter ca. ½, 1 og 4 døgn skyldes, at de dannede hydratiseringsprodukter har et mindre volumen end det reagerede faststof og vand. Efter [8].



Figur 18. Nødvendig modenhed (forhærdningstid ved 20 °C) for opnåelse af frostsikkerhed. Modenheden er angivet som funktion af vand/cement-forholdet, efter [12]. De indtegnede, stiplede kurver A og B er beregnet på grundlag af formel (4) for $\tau_e = 10$ h og 16 h, og med $\alpha = 1.0$.

$$M \geq \frac{\tau_e}{\left(-\ln\left(0.86 \cdot \frac{v}{c}\right)\right)^{\frac{1}{\alpha}}} \qquad (4)$$

for $\tau_e = 10$h henholdsvis 16h, og $\alpha = 1$

I afhængighed af betonsammensætning, udstøbning og bearbejdning vil cementpastaen kunne forekomme med forskelligt vandindhold i den udstøbte beton. Fx kan lokal bleeding medføre, at *v/c*-forholdet er betragteligt højere på undersiden af større sten, end det er forudsat ved proportioneringen. I sådanne områder opnås frostsikkerheden derfor senere, end det betonblandingens *v/c*-forhold indicerer. Tidlig frysning kan under disse omstændigheder føre til dannelse af islinser i områder med porøs, svag pasta. Undertiden iagttages islinsernes karakteristiske aftryk i cementpastaen ved kontaktfladen mellem sten og pasta. Den manglende kontaktstyrke mellem sten og mørtel fremkaldt ved tidlig frysning, vil resultere i en varig reduktion af betonstyrken [6].

Af figur 18 fremgår, at man med *v/c*-forholdet 0.55 normalt kan regne med at have opnået frostsikkerhed efter 15 modenhedstimer (hærdetimer ved 20 °C). Ved højere værdi af *v/c*-forholdet kræves en noget længere hærdetid, som det fremgår af figuren.

4.2 Frostbestandighed

Betons frostbestandighed afhænger af en række faktorer. Af væsentlig betydning for opnåelse af frostbestandighed er tilslagsmaterialernes kvalitet, betonens tæthed og luftindhold samt luftporefordelingen i betonen.

Som nævnt i foranstående afsnit er betonens frostsikkerhed bestemt af, om vandmætningsgraden S er mindre end den kritiske vandmætningsgrad S_{krit}. Afgørende for om en beton er frostbestandig er derfor, om den under brugsforhold kun udsættes for frysning på tidspunkter, hvor vandmætningsgraden $S < S_{krit}$.

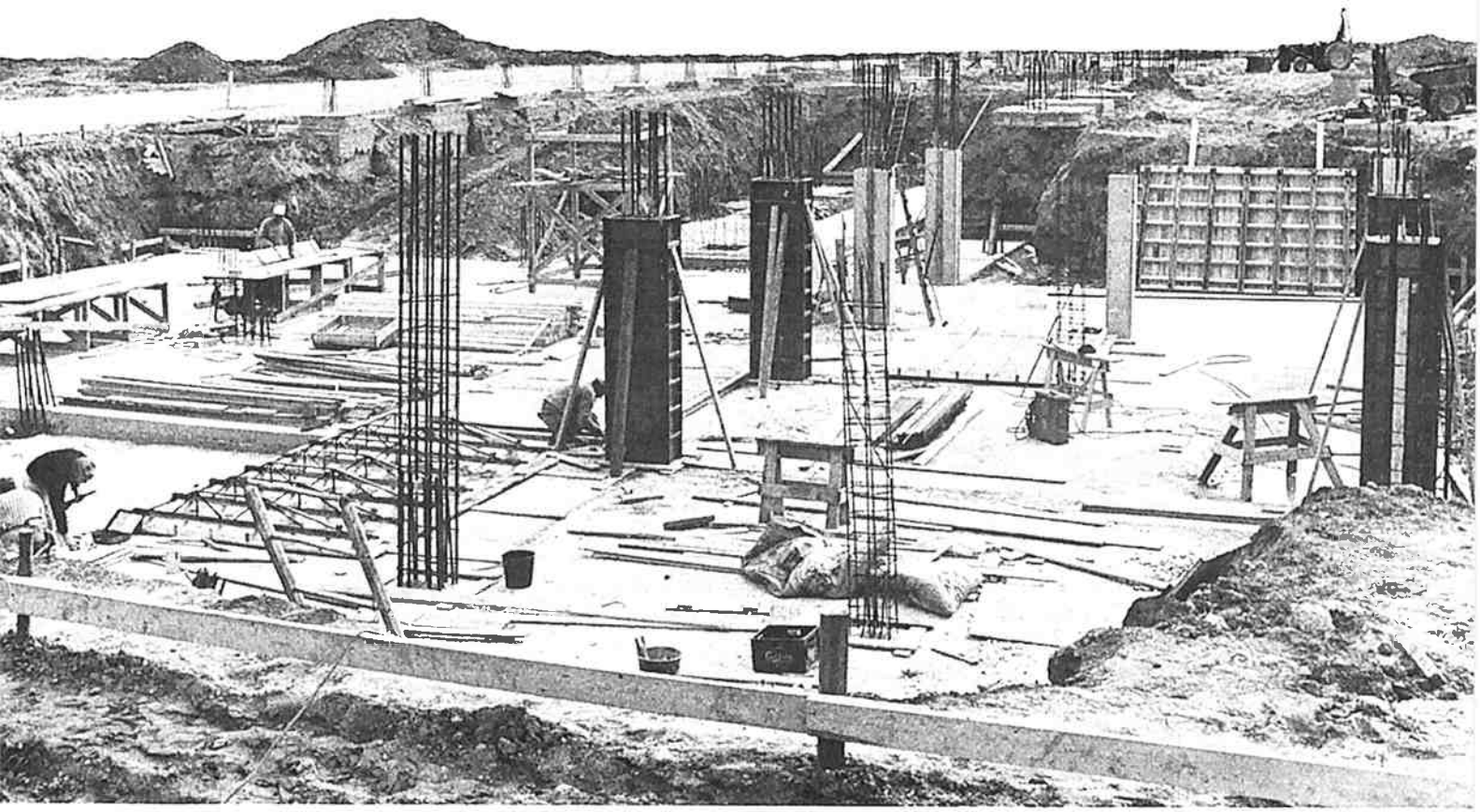
Frostbestandigheden afhænger derfor af betonens evne til at modstå vandindtrængning under de aktuelle brugsforhold. Ved at undgå eller forsinke vandindtrængning kan vandmætningsgraden, dvs. forholdet mellem vandfyldt porevolumen og totalt porevolumen, holdes under det kritiske niveau.

Normalt vil betonkonstruktioner under brugsforhold have mulighed for at udveksle vand med omgivelserne via overfladen. Vandets mulighed for at trænge ind i poresystemet er bestemt af betonens permeabilitet og kapillaritet.

Permeabiliteten er et mål for gennemstrømmelighed, når vandet trykkes gennem betonen med et ydre tryk. Ved sammenligning af forskellige materialers permeabilitet angives permeabilitetskoefficienten K. For hærdnet cementpasta er permeabilitetskoefficienten af størrelsesordenen 10^{-6}–10^{-10} m/s. Til sammenligning kan anføres, at permeabilitetskoefficienten for granit er ca. 10^{-6} m/s og for kvarts ca. 10^{-10} m/s.

Kapillariteten angiver den kapillære stighøjde som følge af de kræfter, der optræder i krumme væskeoverflader i porer med små radier. Kapillariteten øges med aftagende porestørrelse, hvorimod vandets indtrængningshastighed mindskes med porestørrelsen. Erfaringsmæssigt vil den sidstnævnte effekt dominere, således at modstanden mod vandindtrængning er størst for en tæt cementpasta med lavt *v/c*-forhold.

Den kapillære sugning kan kunstigt brydes ved at skabe lokale udvidelser af poren. Det gøres i praksis ved at anvende et luftindblandende tilsætningsstof. Herved dannes i cementpastaen luftblærer, der kan bryde kapillarvirkningen.



5. Varmebalance under hærdning

5.1 Betonens temperaturforhold under hærdningen

I midten af meget svære konstruktioner, eller i stærkt isolerede konstruktioner, er betonens varmeudveksling med omgivelserne ubetydelig i forhold til den udviklede hærdevarme. Betonens temperaturstigning vil tilnærmet være proportional med den såkaldte *adiabatiske varmeudvikling,* dvs. den varmeudvikling der måles i et adiabatisk kalorimeter, hvori en betonprøve hærdner uden varmeudveksling med omgivelserne.

Ved støbning af svære, massive betonkonstruktioner er det hyppigt et problem at bortlede den udviklede hærdevarme, uden at temperaturspændingerne overstiger den øjeblikkelige brudstyrke i betonen. Det er derfor undertiden nødvendigt at anvende køling eller at benytte cementer med lav varmeudvikling og udstøbe betonen med lav begyndelsestemperatur.

Ved støbning af spinkle betonkonstruktioner under vinterforhold er problemet det modsatte. For at opnå en rimelig hurtig styrkeudvikling, er det nødvendigt på kontrolleret vis at modvirke den naturlige afkøling af betonen, således at hærdetemperaturen bliver passende høj.

Udstøbes betonen i spinkle konstruktioner, der er svagt eller moderat isoleret, vil varmeudvekslingen med omgivelserne indvirke på betonens temperatur under hærdningen. Denne indvirkning beror på to forhold.

1. Afgives varme til omgivelserne under hærdningen, vil betontemperaturen formindskes i forhold til det adiabatiske temperaturforløb.

2. Formindskes betontemperaturen i forhold til det adiabatiske temperaturforløb, vil varmeudviklingshastigheden formindskes, og derved yderligere forstærke denne afvigelse.

Valget af isoleringsforanstaltninger har derfor afgørende indflydelse på betonens hærdeforløb. Dette forhold kan udnyttes i praksis til en styring af hærdeforløbet.

Ved forudberegning af temperaturforløb og egenskabsudvikling i hærdnende beton, er det nødvendigt at tage hensyn til temperaturens indflydelse på hærdehastigheden som angivet i afsnit 3.2.

Beregninger i forbindelse med vinterstøbningsproblemer vil hovedsageligt omfatte følgende to faser i støbearbejdets planlægning.

Fase I: Beregning af temperaturforløb i den hærdnende beton i perioden fra udstøbning til afformning/afisolering.

Fase II: Beregning af afkølingsforløb og/eller temperaturpåvirkninger i forbindelse med aftagning af form og isolering.

Omfanget af de nødvendige beregninger kan reduceres betydeligt, såfremt det forudsættes

- at der under fase I er tale om relativt velisolerede tværsnit, hvor betonens temperatur under hærdningen tilnærmet er ens overalt i konstruktionen.

- at hærdeprocessen under nedkølingen i fase II er så fremskredet, at bidrag fra hærdevarmen er ubetydelig i forhold til varmetabet.

Formsystemer opbygget af træformplader eller af 35 mm træforskalling giver i mange tilfælde en passende isoleringsevne. Hvis formens transmissionstal ikke er tilstrækkeligt til at opfylde beregningsforudsætningen om passende ensfordelt temperatur over tværsnittet, kan tildækning med presenning være en anvendelig løsning.

Ved støbning af vandrette flader er det vigtigt, at overfladen tildækkes så hurtigt som muligt efter afretningen. For at undgå for store temperaturforskelle mellem eksisterende og nystøbte konstruktionsdele er det ofte vigtigt at vælge tildækning med en passende isoleringsevne. I mange tilfælde er presenning udlagt på strøer en praktisk anvendelig løsning.

Disse forudsætninger vil i praksis være opfyldt med en acceptabel nøjagtighed for de fleste konstruktioner. Kontrol af beregningsforudsætningernes gyldighed indgår som et punkt i den beregningsrutine, der er udformet i forbindelse med hærdediagrammer og arbejdsblok. I de tilfælde, hvor ovennævnte forudsætninger eventuelt ikke er tilgodeset, kompliceres de nødvendige beregninger væsentligt. Den teoretiske behandling af disse tilfælde, der falder uden for rammerne af nærværende anvisning, kan fx findes beskrevet i [14].

I det følgende gennemgås beregningsprincipperne for fase I og fase II for konstruktioner, der opfylder de nævnte forudsætninger.

5.2 Beregning af temperaturforløb i hærdeperioden

Beregningsforudsætninger

a) Betonens temperatur er til ethvert givet tidspunkt den samme overalt i det betragtede system.

b) Den omgivende luft har overalt samme temperatur.

c) Der ses bort fra varmeakkumulering i formdele og isoleringslag under opvarmning og afkøling.

d) Betonens sammensætning, varmefylde og rumvægt er ens overalt i systemet, og ændres ikke under den betragtede proces.

e) Betonens isoterme varmeudviklingskurve ved 20 °C foreligger for den betragtede hærdeperiode.

f) Varmeudveksling mellem system og omgivelser sker alene gennem konvektiv varmetransmission.

Betingelser i systemets indre

En i et tidsinterval dt udviklet hærdevarme dQ vil give anledning til en temperaturstigning $d\theta$ i betonen bestemt ved

$$d\theta = \frac{C}{\varrho \cdot c} \cdot dQ \ ^\circ\mathrm{C}$$

hvor

θ = betontemperatur, °C
Q = hærdevarme, kJ/kg cement
C = cementindhold, kg/m³
ϱ = betonens rumvægt, kg/m³
c = betonens varmefylde, kJ/kg °C

Randbetingelser for systemet

Såfremt temperaturen i den omgivende luft θ_L er forskellig fra betonens temperatur θ, vil der i et tidsinterval *dt tilføres* systemet en varmemængde dQ proportional med transmissionstallet k, overfladearealet F og temperaturforskellen $\theta_L - \theta$. Den herved tilførte varmemængde vil give anledning til en temperaturstigning $d\theta$ i betonen bestemt ved:

$$d\theta = \frac{\Sigma(k \cdot F)}{V \cdot \varrho \cdot c} \cdot (\theta_L - \theta) \cdot dt = a \cdot (\theta_L - \theta) \cdot dt \ ^\circ\mathrm{C} \qquad (5)$$

hvor

θ = betontemperatur, °C
θ_L = lufttemperatur, °C
k = transmissionstal, kJ/m²h °C
V = systemets volumen, m³
ϱ = betonens rumvægt, kg/m³
c = betonens varmefylde, kJ/kg °C
t = tid, h
$a = \Sigma(k \cdot F)/V \cdot \varrho \cdot c$ = afkølingstal, h^{-1}

Det erindres, at varmestrømmen regnes positiv fra omgivelser til system. Er $\theta_L < \theta$ ses $d\theta$ at antage en negativ værdi, svarende til afkøling af systemet.

Begyndelsesbetingelser

Som begyndelsesbetingelse benyttes at:

for $t = 0$ er $\theta = \theta_B$ og $Q = Q_0$ (6)

således at θ_B angiver betonens udstøbningstemperatur.

Varmebalanceligningen

Udfra de givne forudsætninger kan betonens temperatur θ til et vilkårligt tidspunkt t > 0 principielt beregnes udfra:

$$\theta = \theta_B + \int_Q d\theta + \int_k d\theta \qquad (7)$$

Denne ligning udtrykker, at betontemperaturen til ethvert tidspunkt $t \geq 0$ er lig med betonens begyndelsestemperatur θ_B + temperaturstigningen fremkaldt af hærdevarmen + temperaturstigningen fremkaldt af varmetilførsel fra den omgivende luft. Det bemærkes igen, at $d\theta_k$ antager en negativ værdi, svarende til et varmetab, såfremt lufttemperaturen θ_L er lavere end betonens temperatur θ.

Beregning med dekrementfaktorer

En analytisk beregning af betonens temperaturforløb ved direkte anvendelse af betingelsen (7) er i de fleste tilfælde uhensigtsmæssig. I det følgende omskrives varmebalanceligningen derfor til en form, der er egnet til numerisk beregning af temperaturforløbet. Den angivne metode, baseret på anvendelsen af dekrementfaktorer, er især egnet til håndregning med anvendelse af store tidintervaller Δt. Grundlaget for metoden er kort omtalt i Appendix A og mere udførligt behandlet i [14].

Til et tidspunkt $t = t_1$ er et givet system karakteriseret ved betontemperaturen θ_1 og lufttemperaturen θ_L. Temperaturtilstanden til tiden $t_2 = t_1 + \Delta t$ ønskes beregnet ved anvendelse af dekrementmetoden. Forudsætningerne a) - f) forudsættes opfyldte for systemet. Beregningsforløbet er vist skematisk i figur 19 og fremgår klarest ved en opdeling i to tilfælde, nemlig adiabatisk forløb og forløb med varmetab.

Adiabatisk forløb

Dette forløb svarer til, at der ikke sker varmeudveksling med omgivelserne. En oprindelig temperaturforskel $R_1 = \theta_1 - \theta_{L.1}$ forbliver uændret over perioden Δt, som vist i figur 19a. En tilvækst $\Delta T_{1.2}$ i temperaturforskellen mellem beton og luft som følge af betonens varmeudvikling (figur 19b) vil overlejres den oprindelige forskel R_1. Det resulterende temperaturforløb (figur 19c) fremkommer under adiabatiske betingelser som summen af disse bidrag.

Vi har derfor

$$R_2 = \theta_2 - \theta_{L.2} = \Delta T_{1.2} + R_1 \qquad (8)$$

Temperaturen θ_2 kan dermed udtrykkes ved

$$\theta_2 = \Delta T_{1.2} + R_1 + \theta_{L.2} \qquad (9)$$

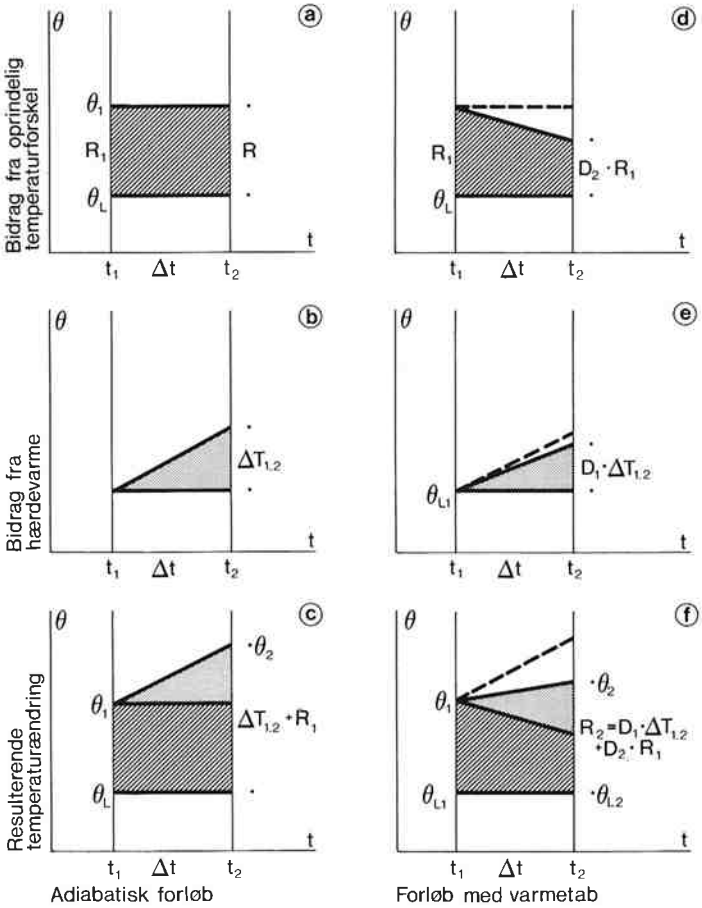
Beregningsstørrelsen R kaldes systemets response (»svar på«) på de forudgående temperaturpåvirkninger.

Forløb med varmetab

Dette forløb kan bestemmes analogt hermed, idet størrelserne R og ΔT nu påføres korrektion for varmetab i perioden Δt.

En oprindelig temperaturforskel $R_1 = \theta_1 - \theta_{L.1}$ vil ændres i tiden som følge af varmeudvekslingen med omgivelserne. Til tidspunktet $t_2 = t_1 + \Delta t$ vil R_1 være aftaget til værdien $D_2 \cdot R_1$, hvor dekrementfaktoren $D_2 = \exp(-a \cdot \Delta t)$. Forløbet er vist i figur 19d.

En lineær tilvækst $\Delta T_{1.2}$ i temperaturforskel mellem system og omgivelser fremkaldt af betonens varmeudvikling, vil på samme måde ændres på grund af varmeudvekslingen med omgivelserne. Til tidspunktet $t_2 = t_1 + \Delta t$ vil $\Delta T_{1.2}$ være ændret til $D_1 \cdot \Delta T_{1.2}$, hvor dekrementfaktoren $D_1 = (1 - D_2)/(a \cdot \Delta t)$. Se figur 19e.



Figur 19. Skematisk gengivelse af beregningsprincip ved anvendelse af dekrementmetode til beregning af temperaturforløb i hærdnende beton.
Beregningsparametrene er:

$D_1 = \frac{1-D_2}{a \cdot \Delta t}$ $\quad D_2 = exp(-a \cdot \Delta t)$

$R_1 = \theta_1 - \theta_{L.1}$ $\quad R_2 = D_1 \cdot \Delta T_{1.2} + D_2 \cdot R_1$

$\Delta T_{1.2} = (\theta_2 - \theta_{L.2}) - (\theta_1 - \theta_{L.1})$ *adiabatisk betingelse*

Det resulterende temperaturforløb (figur 19f) fremkommer nu ved addition af disse bidrag

$$R_2 = \theta_2 - \theta_{L.2} = D_1 \cdot \Delta T_{1.2} + D_2 \cdot R_1 \qquad (10)$$

Til tidspunktet t_2 kan betonens temperatur θ_2 derfor udtrykkes ved

$$\theta_2 = D_1 \cdot \Delta T_{1.2} + D_2 \cdot R_1 + \theta_{L.2} \qquad (11)$$

Beregning af temperaturforløbet i en hærdnende betonkonstruktion gennemføres ved gentagen anvendelse af formel (10).

Udtrykket for konvektiv varmetransmission (5) viser, at varmeudvekslingen mellem et system og dets omgivelser alene henføres til temperatur*forskellen* mellem system og omgivelser. En af hærdevarmen betinget tilvækst i systemets temperatur vil derfor have samme indflydelse på varmestrømmen, som en tilsvarende reduktion af omgivelsernes temperatur. Denne analogi medfører, at lineære ændringer i omgivelsernes temperatur tages eksakt i regning efter formel (10), såfremt

$$\Delta T_{1.2} = (\theta_2 - \theta_{L.2}) - (\theta_1 - \theta_{L.1}) \text{ adiabatisk} \qquad (12)$$

Grundlaget for beregning med dekrementfaktorer er nærmere beskrevet i Appendix A samt i [14].

5.3 Hærdediagrammer

Til brug ved praktiske beregninger indeholder denne anvisning hærdediagrammer over beregnede temperaturforløb for en række typiske tilfælde. Hærdediagrammerne benyttes i sammenhæng med det udarbejdede beregningsskema i arbejdsblokken. Beregningsskemaet kan dels danne grundlag for valg af udførelsesmetode, dels indgå som dokumentation af støbearbejdets udførelse.

Hærdediagrammerne er beregnede efter dekrementmetoden under de i afsnit 5.2 angivne beregningsforudsætninger.

Det udarbejdede hærdediagram-materiale omfatter tre cementtyper: hurtighærdnende, normalhærdnende og langsomhærdnende. De benyttede varmeudviklingskurver er angivet på en form, der umiddelbart tillader sammenligning med varmeudviklingsforløb, målt ved adiabatisk kalorimetri. Beregning af temperaturforløb er gennemført for følgende temperaturbetingelser, afkølingstal og cementindhold:

Udstøbningstemperatur: $\theta_B = 5 \quad 10 \quad 15 \quad 20$ °C.

Lufttemperatur: $\theta_L = -1 \quad -5 \quad -10 \quad -15$ °C.

Afkølingstal: $\alpha = 0 \quad 0.005 \quad 0.010 \quad 0.015 \quad 0.020 \quad 0.030 \quad 0.040 \quad 0.050 \quad 0.060 \quad 0.080 \quad 0.100\ h^{-1}$.

Cementindhold:
$C = 250 \quad 300 \quad 350 \quad 400\ kg/m^3$.

De målte temperaturforløb under en hærdeproces vil kunne afvige fra de i diagrammerne angivne, såfremt de gjorte forudsætninger ikke er opfyldte. De faktorer, der især indvirker på temperaturforløbet, er cementegenskaberne, betonsammensætningen og temperaturforudsætningerne.

I kapitel 6 er de enkelte beregningsparametres indflydelse på temperaturforløbet omtalt. Det anbefales at der i forbindelse med de enkelte støbeopgaver udføres kontrolmåling af de opnåede temperaturforløb (se arbejdsblokkens kontrolskema). Herigennem kan der succesivt opbygges et erfaringsgrundlag med hensyn til vurdering af beregningsforudsætninger.

5.4 Temperatur Response Diagrammet

De beregningsudtryk der er udledt i afsnit 5.2 forudsætter, at temperaturen er den samme overalt i det betragtede tværsnit. Denne forudsætning vil i praksis være opfyldt, såfremt der benyttes passende isoleringsforanstaltninger og/eller der er tale om tværsnit med små dimensioner. Kontrollen med denne forudsætnings opfyldelse gennemføres rutinemæssigt i arbejdsblokkens beregningsskema punkt 3.

Under afkøling af den hærdnende konstruktion vil man dog ofte blive nødsaget til at fjerne form og isolering af hensyn til støbearbejdets videreførelse. Afkølingstallet kan herved forøges til en værdi, hvor forudsætningen om samme temperatur overalt i tværsnittet ikke længere er tilfredsstillet. Denne tilstand, med væsentlige temperaturforskelle over betonens tværsnit, har to konsekvenser.

1) Beregning af betonens afkølingsforløb kræver anvendelse af væsentligt mere komplicerede formeludtryk, end de i afsnit 5.2 udledte.

2) Temperaturforskelle over tværsnittet fremkalder temperaturspændinger, der undertiden kan resultere i revnedannelser.

En egnet beregningsmetode til vurdering af temperaturforløb og temperaturdifferenser i tværsnit under nedkøling, findes i det såkaldte *Temperatur Response Diagram*. I dette diagram afbildes den almene løsning til Fouriers ligning for ikke-stationær endimensional varmeledning:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\lambda}{\varrho\cdot c}\cdot\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \qquad (13)$$

Den almene løsning til temperaturforløb henholdsvis temperaturdifferens ved konvektiv afkøling er af formen

$$\phi=\frac{\theta_m-\theta_L}{\theta_{mo}-\theta_L}=f(Bi,Fo) \qquad (14)$$

$$\Psi=\frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_{mo}-\theta_L}=f(Bi,Fo) \qquad (15)$$

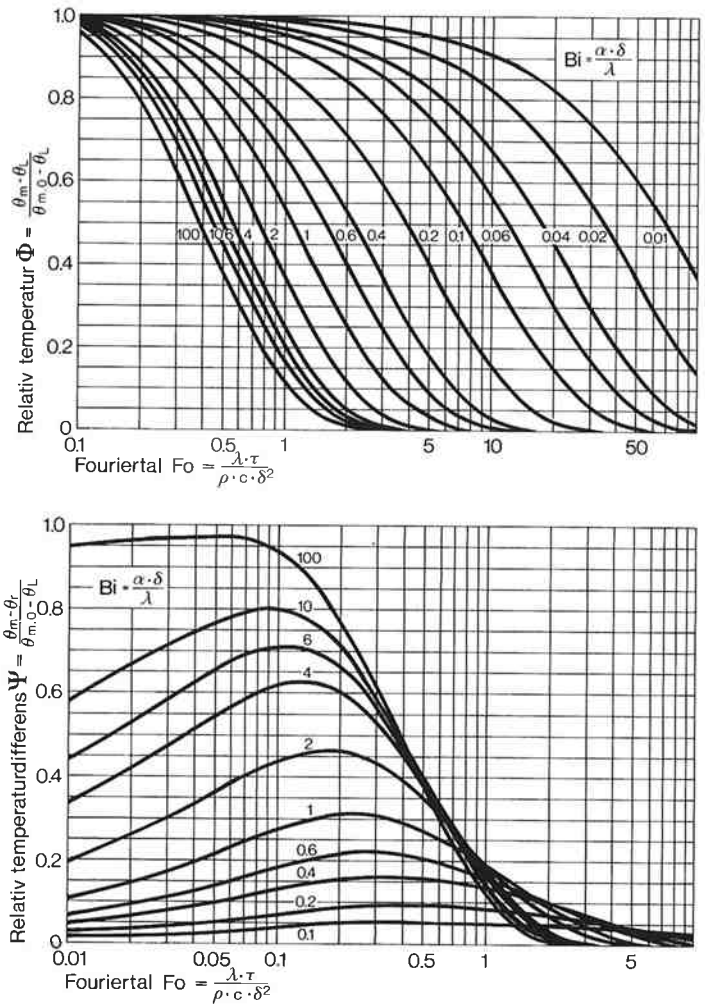
hvor

ϕ = normeret temperaturudligning
Ψ = normeret temperaturdifferens
Bi = Biottal = $k\cdot\delta/\lambda$
Fo = Fouriertal = $\lambda\cdot\tau/\varrho\cdot c\cdot\delta^2$
θ_{m0} = begyndelsestemperatur i midte af tværsnit, °C
θ_m = temperatur i midte af tværsnit, °C
θ_r = overfladetemperatur i tværsnit, °C
θ_L = lufttemperatur, °C
ϱ = rumvægt, kg/m³
c = varmefylde, kJ/kg °C
λ = varmeledningstal, kJ/m·h·°C
k = transmissionstal, kJ/m²·h·°C
τ = tid, h
δ = karakteristisk dimension af tværsnit, m

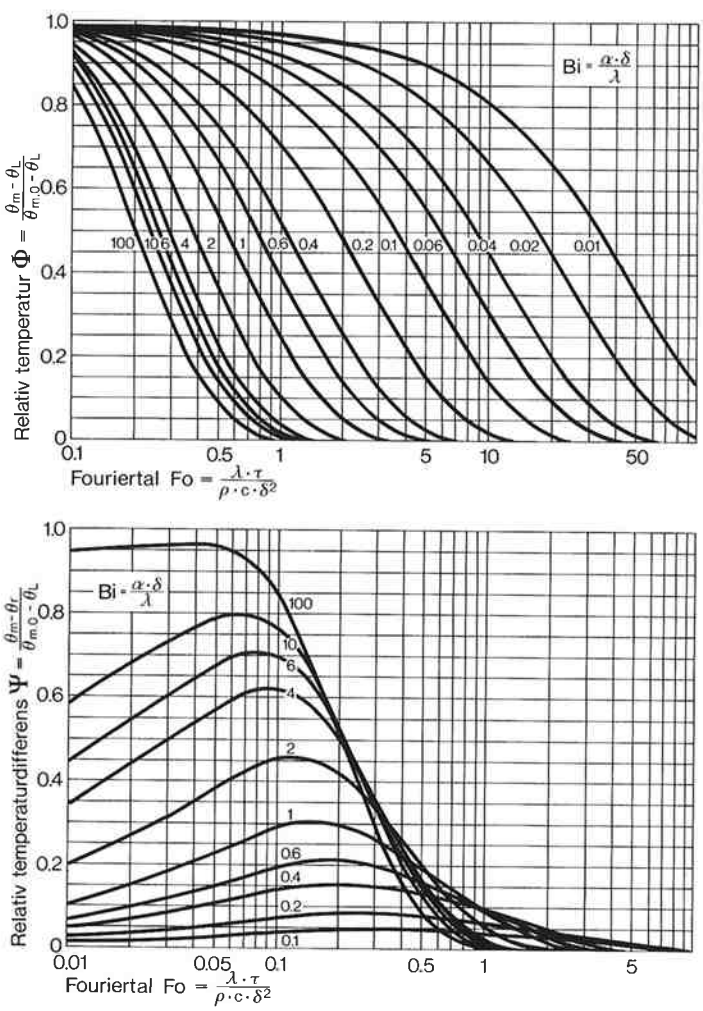
Temperatur Response Diagrammet er beregnet under følgende fem forudsætninger:

1. Betonens varmefylde c og varmeledningstal λ er konstante i tiden og ens overalt i det betragtede tværsnit.
2. Temperaturen i den omgivende luft θ_L er konstant i tiden og den samme ved alle overflader.
3. Betonens begyndelsestemperatur $\theta_{m0}=\theta_0$ er den samme overalt i tværsnittet på det tidspunkt, hvor afformningen sker.
4. Varmeudveksling mellem beton og den omgivende luft sker alene ved konvektion med konstant transmissionstal.
5. Hærdningen er så fremskredet, at bidrag fra hydratiseringsvarme er ubetydelig.

I figur 20 og 21 er for henholdsvis en plan skive og en cylinder gengivet Temperatur Response Diagrammer for temperaturforløbet i midte af tværsnit og maksimal temperaturdifferens over tværsnit under konvektiv afkøling.



Figur 20. Temperatur Response Diagram til brug ved beregning af temperaturforløb og temperaturdifferens under nedkøling af en plan, udstrakt skive.



Figur 21. Temperatur Response Diagram til brug ved beregning af temperaturforløb og temperaturdifferens under nedkøling af en cylinder.

En mere detaljeret diskussion af det teoretiske grundlag for Temperatur Response Diagrammet kan bl.a. findes i [14]. En række eksempler på diagrammernes anvendelse ved løsning af praktiske opgaver findes i [15] og [16].

5.5 Overslagsformler for temperaturdifferenser

I praksis skal der, ofte med kort varsel, tages beslutninger om afformning og eventuel efterisolering af konstruktioner. De nødvendige dispositioner må derfor kunne træffes umiddelbart på byggepladsen. I forbindelse med vinterstøbningsarbejder kan afformningen medføre væsentlige temperaturpåvirkninger af tværsnittet. Det er derfor af betydning at kontrollere nedkølingen i overensstemmelse med krav til maksimal differenstemperatur over tværsnit. Til dette formål er der i det følgende anført nogle simple overslagsformler.

I byggebeskrivelsen vil der i mange tilfælde være stillet krav til største tilladte temperaturdifferens over et tværsnit. Gennem dette krav sigtes der mod at eliminere risikoen for revnedannelse, fremkaldt af temperaturspændinger i betonen. Kravet vil som oftest være angivet som en maksimal tilladt forskel mellem temperatur i midte af tværsnit θ_m og temperatur på tværsnittets rand θ_r. For at overholde et sådant krav under betonens nedkøling, kan det i visse tilfælde være nødvendigt at benytte efterisolering eller vindbeskyttelse.

Temperaturforskellen mellem midte og rand

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_r \tag{16}$$

er under afkølingen hovedsageligt kontrolleret af *forholdet* mellem varmeledningsmodstanden inde i betonen og varmeovergangsmodstanden mellem beton og omgivelser. Dette forhold er udtrykt i den tidligere indførte parameter:

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} = \text{Biottal} \tag{17}$$

hvor

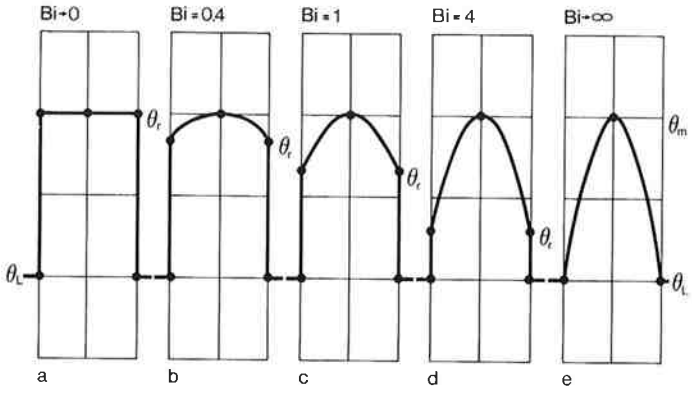
k = transmissiontal, kJ/m²·h·°C
λ = varmeledningstal, kJ/m·h·°C
δ = karakteristisk dimension, m

Bemærkes det, at den indre varmeledningsmodstand i tværsnittet $m_i = \delta/\lambda$, og varmeovergangsmodstanden mellem betonen og omgivelser $m_r = 1/k$, ses at:

$$Bi = \frac{\text{varmeledningsmodstand i tværsnit}}{\text{varmeovergangsmodstand på rand}} \tag{18}$$

Er systemets Biottal under afkølingen lille, vil den indre modstand være lav i forhold til modstanden på randen. Temperaturfaldet, der er proportional med modstanden, vil derfor relativt være lille inde i betonen og stor på randen.

Omvendt vil et stort Biottal vise, at den indre modstand er stor i forhold til modstanden på randen. Dette betyder igen, at temperaturfaldet inde i betonen er stort i forhold til temperaturfaldet på randen. I figur 22 er denne sammenhæng mellem temperaturfordeling og Biottal vist skematisk.



Figur 22. Biottallets indflydelse på temperaturfordelingen over et tværsnit under afkøling. For Bi→0, fås den i figur a viste adiabatiske randbetingelse, hvor hele temperaturfaldet ligger på randen. For Bi→∞, fås den i figur e viste isoterme randbetingelse, hvor hele temperaturfaldet ligger inde i tværsnittet. I praktiske systemer kan temperaturfordelingen bedømmes på grundlag af biottallets størrelse ud fra formel (19).

Med udgangspunkt i de analytiske løsninger for temperaturfordelingen i et tværsnit under konvektiv afkøling kan det vises (Appendix B), at følgende relation med god tilnærmelse gælder for et udviklet temperaturprofil:

$$\frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_m - \theta_L} \cong \frac{Bi}{Bi+2} \tag{19}$$

hvor

θ_m = temperatur i midte af tværsnit, °C
θ_r = temperatur på rand af tværsnit, °C
θ_L = lufttemperatur, °C
Bi = Biottal (se (17) og (18))

De praktiske anvendelsesområder for overslagsformlen (19) er detaljeret gennemgået i [17]. Læres formlerne (17) og (19) udenad, kan de mest hensigtsmæssige dispositioner i forbindelse med afformning og nedkøling fastlægges ved simple beregninger under byggepladsforhold.

For at overholde kravet

$\Delta\theta = \theta_m - \theta_r \leq \Delta\theta_{max}$

ved afformning af et tværsnit med temperaturen θ_a ved en lufttemperatur θ_L, kan der efter (17) og (19) benyttes følgende løsninger:

1. $(\theta_a - \theta_L) \leq \Delta\theta_{max}$
   Form og isolering kan fjernes. (20)
2. $(\theta_a - \theta_L) > \Delta\theta_{max}$
   2a) Efterisoler således at

$$k_a \leq \frac{2 \cdot \Delta\theta_{max}}{\theta_a - \theta_L - \Delta\theta_{max}} \cdot \frac{\lambda}{\delta} \text{ kJ/m}^2\text{·h·°C} \tag{21}$$

   2b) Afkøl i form indtil

$$\theta_a \leq \left(1 + \frac{2\lambda}{k_a \cdot \delta}\right) \cdot \Delta\theta_{max} + \theta_L \text{°C} \tag{22}$$

6. Styring af betons hærdeforløb

6.1 Styringsbegrebet

Hensigten med vinterforanstaltninger er at kontrollere betonens hærdeforløb, således at betonen beskyttes mod for tidlig frysning, samtidig med at betonens styrkeudvikling forløber på en forud valgt måde. Forløbet af betonens hærdning kan i større eller mindre grad kontrolleres gennem den valgte udførelsesteknik. I almindelighed vil det således gælde at

- *klimaforudsætninger og*
- *konstruktionsdimensioner*

er givne forudsætninger, der ikke eller kun i ringe omfang kan påvirkes af den udførende, og at

- *betontype,*
- *cementtype og*
- *cementindhold*

er forudsætninger, der i et vist omfang kan ændres af den udførende i styringsøjemed, samt at

- *udstøbningstemperatur,*
- *formtype,*
- *isoleringsniveau,*
- *afformningstidspunkt og*
- *efterisolering*

er egentlige styringsparametre i forbindelse med planlægning og udførelse af støbearbejder.

Hvilke vinterforanstaltninger, der er mest hensigtsmæssige, vil bero på forudsætninger, der kan variere fra byggeplads til byggeplads. Valget af foranstaltninger vil som oftest føre til overvejelser af økonomisk art. Tidsplaner, forsinkelser, beskæftigelse og afskrivning af materiel kan dermed blive udslaggivende. Den efterfølgende gennemgang af styringsparametre sigter på at gøre disse overvejelser mere realistiske.

6.2 Klimatiske forudsætninger

En væsentlig forudsætning for at kunne forhåndsvurdere, tilrettelægge og gennemføre betonarbejder om vinteren er, at man med rimelig sikkerhed kan bedømme vejrforholdene i byggeperioden.

Vejrforudsætninger i bestemte perioder kan fastsættes udfra klimadata, der angiver vejrgennemsnit. Klimadata udarbejdes sædvanligvis på grundlag af vejrobservationer over 30 års perioder. Disse forudsigelser kan i selve byggeperioden suppleres med vejrprognoser, der dagligt udarbejdes af Meteorologisk Institut i København og af Vejrtjenesten i Karup.

Figur 23 indeholder tabeller over 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 lokaliteter her i landet.

Statens Byggeforskningsinstitut har i en rapport udarbejdet et vejrdatasæt for tekniske beregninger [19]. I rapporten er udeklimaet beskrevet gennem 34 vejrparametre. Materialet omfatter vejrparametrenes variation gennem døgnet, gennem måneden og over året. Dette datamateriale indeholder i vidt omfang de nødvendige informationer for planlægning af støbearbejder i beton.

Danmark	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Absolut maximumstempetatur[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-maximumstemperatur[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-maximumstemperatur[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-minimumstemperatur[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-minimumstemperatur[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 minimumstemperatur[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	19	19	6,0	1,0	0,0	-	-	0,1	2,0	6,1	14
Antal blæstdøgn[4]), vindstyrke ≥ 6	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

Figur 23. Klimaforhold for områderne Danmark, Færøerne og Grønland, efter [18]. [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.

6.3 Konstruktionens afkølingstal

De benyttede beregningsudtryk i afsnit 5.2 indfører afkølingstallet som:

$$a = \frac{\Sigma(k \cdot F)}{V \cdot \varrho \cdot c} \text{ h}^{-1} \qquad (23)$$

Afkølingstallet a angiver forholdet mellem varmetabet pr. tidsenhed $\Sigma(k \cdot F)$ ved en temperaturforskel på 1 °C mellem system og omgivelser, og systemets totale varmekapacitet (»vandværdi«) $V \cdot \varrho \cdot c$. Afkølingstallet er således et mål for, hvor stor en brøkdel af en temperaturforskel $\theta_L - \theta$, der udlignes pr. tidsenhed. Øget isolering medfører at transmissionstallet k, og dermed afkølingstallet a, antager en lavere værdi, dvs. afkølingen forløber langsommere, og vice versa.

Den fysiske betydning af afkølingstallet fremgår af figur 24, der viser temperaturhenfaldet i et system uden indre varmekilde. Til tiden $t = 0$ er systemets temperatur $\theta = \theta_B$. Den omgivende luft har den konstante temperatur θ_L. Med de givne forudsætninger i afsnit 5.2 vil temperaturforløbet i systemet være bestemt ved udtrykket

$$\theta = \theta_B + (1 - \exp(-a \cdot t)) \cdot (\theta_L - \theta_B) \qquad (24)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \exp(-a \cdot t) \cdot (\theta_L - \theta_B) \Big|_{t=0} = a(\theta_L - \theta_B) \qquad (25)$$

Tangenten til temperaturkurven vil således skære linien $\theta = \theta_L$ til tiden $t = \frac{1}{a}$ h.

For at sikre overholdelse af forudsætningen om samme betontemperatur overalt i det betragtede system skal systemets Biottal være mindre end ca. 0.5; begrundelsen herfor fremgår af det følgende.

Den udviklede hærdevarme fjernes fra systemet ved en sammensat proces: *varmeledning* ud til overfladen, efterfulgt af *konvektiv varmeafgivelse* til den omgivende luft. For en given varmestrøm vil temperaturfaldet inde i betonen henholdsvis i grænselaget til omgivelserne fordele sig proportionalt med forholdet mellem de respektive varmeledningsmodstande. Overholdelse af kravet om ensartet temperatur i betonen sikres, såfremt den indre modstand $m_i = \frac{\delta}{\lambda}$ er lille i forhold til den ydre modstand $m_u = \frac{1}{k}$. Ved praktiske beregninger kan forudsætningen a) i afsnit 5.2 anses for gældende, såfremt $m_i \leq$ ca. $0.5 \cdot m_u$, hvilket efter (18) giver:

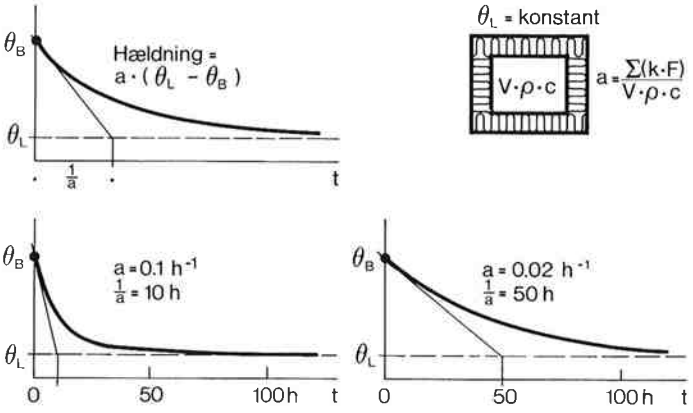
$$Bi \leq \frac{k \cdot \delta}{\lambda} = 0.5$$

Af formel (19) fremgår det, at temperaturforskellen inde i tværsnittet da forholder sig til den totale temperaturforskel på følgende måde:

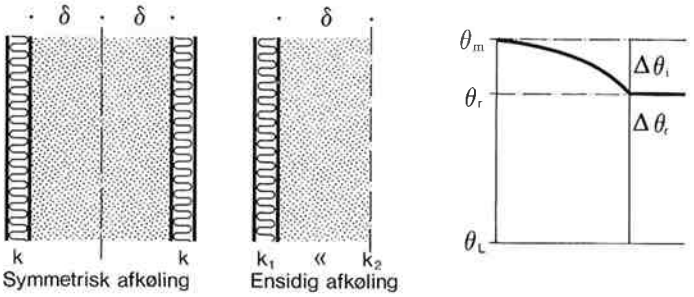
$$\frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_m - \theta_L} \cong \frac{Bi}{Bi + 2} = \frac{0.5}{0.5 + 2} = 0.2 \qquad (27)$$

dvs. at mindre end 20 pct. af forskellen mellem betontemperatur og lufttemperatur afsættes som temperaturforskel i det betragtede tværsnit. Under forhold, hvor temperaturforskellen inde i tværsnittet ikke er 0, vil den sande afkøling forløbe langsommere end den gennem (24) beregnede.

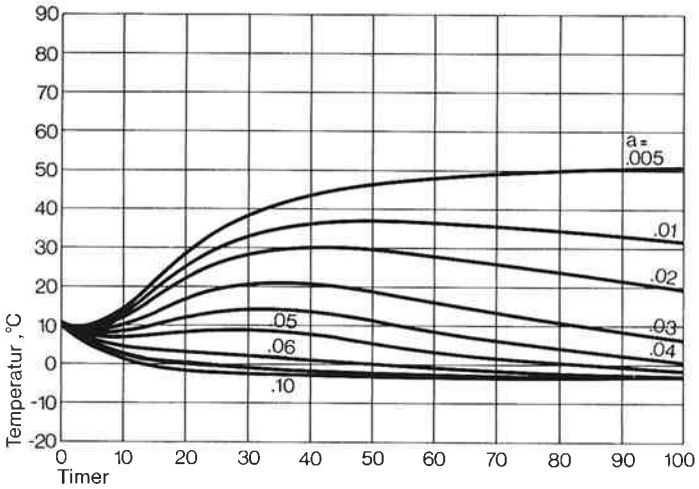
Som det fremgår af udtrykkene (23), (24) og (25) er afkølingstallet en fundamental parameter i varmebalanceproblemer. Ved hensigtsmæssigt valg af afkølingstal, kan betonens temperaturforløb i vidt omfang kontrolleres under hærdningen.



Figur 24. Afkølingstallet a er et mål for, hvor hurtigt en temperaturforskel mellem et system og dets omgivelser vil udlignes. En stor værdi af afkølingstallet a viser, at temperaturforskelle udlignes hurtigt og vice versa.



Figur 25. En rimelig overholdelse af forudsætningen om samme temperatur overalt i det betragtede tværsnit opnås ved kravet Bi < ca. 0.5, hvor Biottallet Bi = k · δ/λ.



Figur 26. Betonens temperaturforløb som funktion af hærdetiden for forskellige afkølingstal a, ved konstant ydre temperatur -5 °C. Når afkølingstallet øges, afkøles betonen hurtigere; varmeudviklingshastigheden aftager med faldende betontemperatur, og forstærker derved effekten af ændringer i afkølingstallet.

Figur 26 gengiver temperaturforløb beregnet med forskellige værdier af afkølingstallet a. Begyndelsestemperatur $\theta_B = 10$ °C, lufttemperatur $\theta_L = -5$ °C og cementindhold C = 350 kg/m³ er holdt konstante. Beregningerne er udført for en cement med varmeudvikling svarende til kurve B i figuren på side 17.

6.4 Transmissionstallet

Afkølingstallets størrelse kan varieres ved ændring af transmissionstallet k, der er et mål for det benyttede isoleringsniveau. I det følgende behandles alene transmissionstal for konvektiv varmeovergang.

Transmissionstallets størrelse er bestemt af den benyttede form, den anvendte isolering samt af det konvektive overgangstal α_k mellem system og omgivelser. Beregningsmæssigt kan transmissionstallet k bestemmes af efterfølgende ligning.

Transmissionstal

$$k = [1/\alpha_k + (e/\lambda)_{isol} + (e/\lambda)_{form}]^{-1} \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C} \quad (28a)$$

$$= (m_k + m_{isol} + m_{form})^{-1} \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C} \quad (28b)$$

Det konvektive overgangstal α_k for tvungen konvektion kan efter [20] tilnærmet beregnes som funktion af vindhastigheden v.

Konvektivt overgangstal

$$\alpha_k \cong 20 + 14\cdot v \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C for } v \le 5 \text{ m/s} \quad (29a)$$

$$\alpha_k \cong 25.6\cdot v^{0.78} \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C for } v > 5 \text{ m/s} \quad (29b)$$

hvor

α_k = konvektivt varmeovergangstal, kJ/m²·h·°C
m_k = konvektivt modstandstal = $1/\alpha_k$, m²·h·°C/kJ
v = vindhastighed ved tvungen konvektion, m/s
e = tykkelse af isolering hhv. form, m
k = transmissionstal, kJ/m²·h·°C
m = modstandstal, m²·h·°C/kJ
λ = varmeledningstal, kJ/m·h·°C

Til brug for praktiske beregninger er der i figur 27 angivet beregnede værdier for transmissionstallet k for en række hyppigt anvendte form- og isoleringstyper i afhængighed af vindhastigheden v.

Diagrammet i figur 27 og beregningsformler indregner alene bidrag fra ledning og konvektion i det angivne transmissionstal k. Der tages således ikke hensyn til bidrag fra stråling, fordampning eller kondensation. Såfremt der optræder fordampning eller kondensation af vanddamp i forbindelse med varmeovergang, kan dette influere væsentligt på transmissionstallets størrelse. Disse effekter er dog i de fleste tilfælde ubetydelige i formsatte konstruktioner under byggepladsforhold. Diagrammet er udarbejdet på grundlag af praktiske varmeledningstal λ angivet i DS 418: »Regler for beregning af bygningers varmetab«.

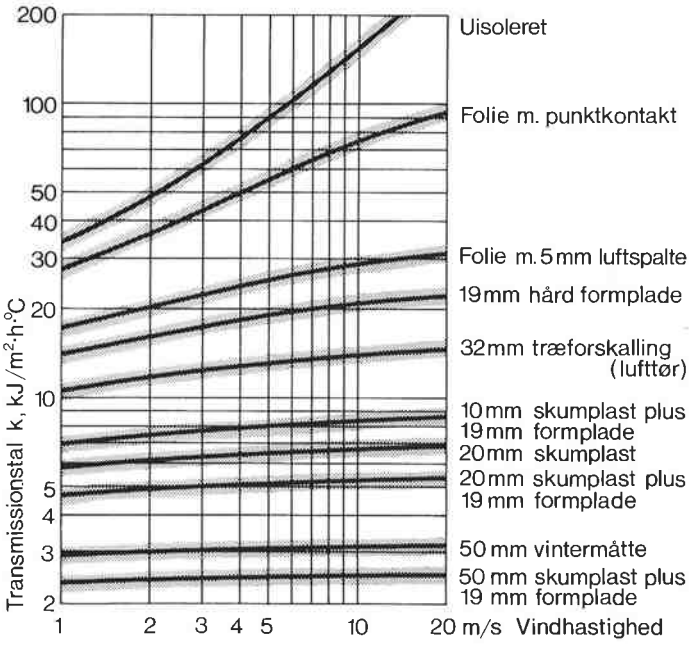
6.5 Udstøbningstemperaturen

Valg af udstøbningstemperatur θ_B er en særlig vigtig faktor ved planlægningen af et støbearbejde under vinterforhold. Dette beror på, at udstøbningstemperaturen er en kontrollerbar parameter, der har væsentlig indflydelse på betonens hærdeforløb.

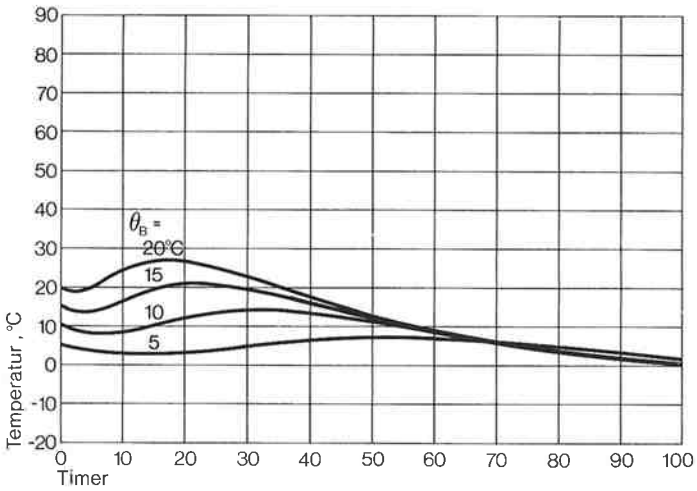
Omsætningshastigheden mellem cement og vand øges med voksende temperatur. En høj udstøbningstemperatur vil derfor medføre at hærdevarmen frigives hurtigt. Omvendt vil en lav udstøbningstemperatur resultere i en langsommere varmeudvikling og styrketilvækst. Denne forskel uddybes yderligere, såfremt der under hærdningen afgives varme til omgivelserne.

I figur 28 er der vist eksempler på udstøbningstemperaturens indflydelse på det opnåede temperaturforløb. De angivne kurver er beregnet for konstant afkølingstal $a = 0.03 \text{ h}^{-1}$, konstant udetemperatur $\theta_L = -5$ °C og cementindhold $C =$ 350 kg/m³. Beregningerne er udført for en cement med en varmeudvikling svarende til kurve B i figuren på side 17.

Den højere hærdetemperatur og hurtigere styrkeudvikling, der opnås med øget udstøbningstemperatur, sikrer at betonen tidligere opnår frostsikkerhed. Samtidig hermed vil frysningen sædvanligvis indtræffe på et senere tidspunkt. Begge de nævnte forhold vil formindske risikoen for frostskader på betonen. På samme måde indses, at den tid der forløber, inden betonen har opnået en given modenhed, vil formindskes med voksende udstøbningstemperatur. Udstøbningstemperaturen θ_B er derfor en vigtig parameter for styring af hærdeprocessens forløb.



Figur 27. Diagram over størrelsen af det beregningsmæssige transmissionstal k for typiske form- og isoleringstyper.



Figur 28. Betonens temperaturforløb for udstøbningstemparaturer $\theta_B = 5$, 10, 15 og 20 °C. Som det fremgår af figuren, vil en øget begyndelsestemperatur fremskynde hærdeprocessen. Den maksimale betontemperatur øges markant, og indtræffer på et tidligere tidspunkt. Ved lavere udstøbningstemperaturer reagerer cementen langsomt, og temperaturforløbet bestemmes i højere grad af varmetabet til omgivelserne.

Den friske betons temperatur θ_B umiddelbart efter blandingen afhænger af de benyttede delmaterialers mængde, varmefylde og temperatur.

Cementen kan, afhængigt af lagringsmåde og forbrugets omfang, have temperaturer fra lufttemperatur op til 50–60 °C. Tilslagets temperatur vil som regel følge luftens temperatur, medmindre der anvendes særlige foranstaltninger som tildækning og opvarmning. En del af betonblandingens vandindhold stammer fra fugten i tilslaget, specielt fra sandfraktionen, der normalt indeholder 4–6 pct. af sandets tørvægt. Dette vand tilsættes således blandingen med samme temperatur som tilslaget. Den øvrige del af blandevandet kan med passende foranstaltninger reguleres til temperaturer i området 0–80 °C. Normalt vil vandets temperatur være ca. 8 °C ved tapning fra ledningshane.

Betonens blandingstemperatur kan udtrykkes ved formlen:

$$\theta_B = \frac{\Sigma(w_d \cdot c_d \cdot \theta_d)}{\Sigma(w_d \cdot c_d)} \qquad (30a)$$

hvor

w_d er delmaterialets vægt, kg

c_d er delmaterialets varmefylde, kJ/kg · °C

θ_d er delmaterialets temperatur, °C

θ_B er betonens blandingstemperatur, °C

I efterfølgende tabel er angivet typiske værdier for varmefylder af de materialer, der indgår i beton, samt smeltevarme for is:

Varmefylde for		kcal/kg·°C	kJ/kg·°C
Beton	c_B	0.26	1.09
Tilslagsmaterialer	c_t	0.20	0.84
Cement	c_c	0.17	0.71
Vand	c_w	1.00	4.19
Is	c_{wi}	0.49	2.05
Is, smeltevarme	s_{wi}	80 kcal/kg	334.9 kJ/kg

Udfra disse talværdier kan betonens blandingstemperatur beregnes ved anvendelse af udtrykket (30a). Et simpelt beregningsudtryk, der med god tilnærmelse bestemmer blandingstemperaturen θ_B i afhængighed af blandevandets temperatur θ_w, kan udledes under følgende forudsætninger:

1. Tilslagsmaterialer og cement har før blanding samme temperatur θ_T.

2. Ved blandingen tilsættes, udover det i tilslaget indeholdte vand, w kg/m³ blandevand ved en temperatur θ_w.

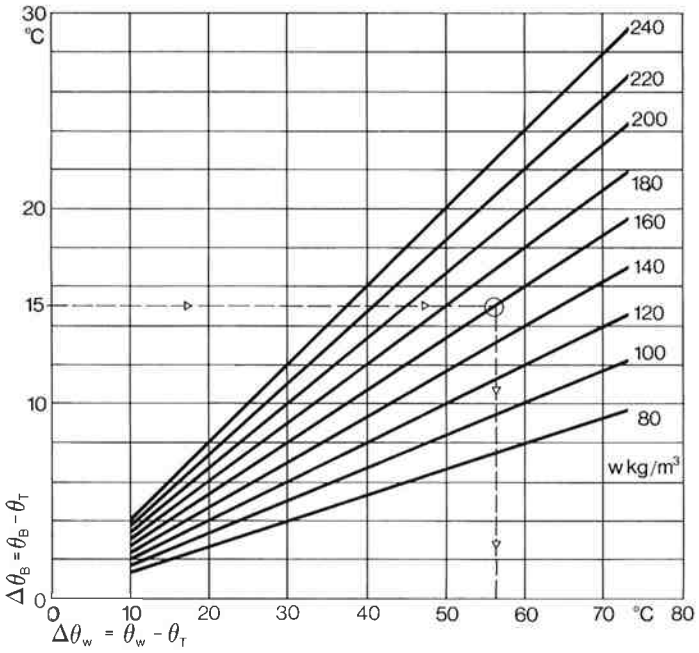
Blandingstemperaturen θ_B vil dermed opfylde betingelsen:

$$(\theta_w - \theta_T) \cdot c_w \cdot w = (\theta_B - \theta_T) \cdot c_B \cdot \varrho_B$$

Idet vandværdien for normalbeton $c_B \cdot \varrho_B$ erfaringsmæssigt med god tilnærmelse kan ansættes til værdien 2500 kJ/m³ · °C, og vandets specifikke varmefylde $c_w \cong 4.2$ kJ/kg · °C, vil følgende tilnærmelsesudtryk gælde:

$$\frac{\Delta\theta_w}{\Delta\theta_B} = \frac{\theta_w - \theta_T}{\theta_B - \theta_T} \cong \frac{600}{w} \qquad (30b)$$

Det gælder med andre ord, at *i forhold til tilslagets temperatur vil vandets overtemperatur $\Delta\theta_w$ og betonens overtemperatur $\Delta\theta_B$ tilnærmet forholde sig som 600/w, hvor w angiver det tilsatte blandevand i kg/m³.*



Figur 29. Diagram til skøn over betonens blandingstemperatur θ_B ved anvendelse af varmt blandevand (formel 30b). Eksempel:

Tilsat vand ..... $w = 160$ kg/m³
Temperatur af tilslag og cement ..... $\theta_T = 5$ °C
Ønsket betontemperatur ..... $\theta_B = 20$ °C
Diagramaflæsning for ..... $\Delta\theta_B = (20-5) = 15$ °C
Diagramaflæsning af ..... $\Delta\theta_w \cong 57$ °C
Blandevandets temperatur ..... $\theta_w \cong 57 + 5 = 62$ °C

Udfra det simple udtryk (30b) kan blandetemperaturen θ_B ved anvendelse af varmt blandevand hurtigt skønnes. Figur 29 viser en grafisk afbildning af udtrykket (30b).

Betonens blanding

Blandingen udføres ved at blande cement og tilslag sammen og derefter tilsætte blandevandet. Herved begrænses eventuelle problemer med hydratisering ved høj temperatur, såfremt der benyttes opvarmet vand.

6.6 Lufttemperaturen

Den konvektive varmeafgivelse fra et betonlegeme er proportional med temperaturforskellen mellem betonen og den omgivende luft. For en given konstruktionsdel vil afkølingen til 0 °C ske desto hurtigere jo lavere den ydre temperatur er under 0 °C. Den hærdningsgrad betonen har opnået på frysetidspunktet, vil tilsvarende blive mindre, jo lavere den ydre temperatur er under 0 °C. Denne effekt er vist i figur 30, øverst på side 70.

6.7 Cementindholdet

Den totalt udviklede varmemængde i et givet betonrumfang er proportional med cementindholdet C i kg/m³. Ved fuldstændig hydratisering udvikler dansk portlandcement typisk 400–500 kJ/kg. Den udviklede varmemængde er i praksis noget lavere, 350–400 kJ/kg, idet cementen ikke hydratiserer fuldt ud inden for en overskuelig årrække. Se figur 31 på side 70.

Ved betonstøbning om vinteren kan det under visse omstændigheder være en fordel at benytte et højere cementindhold end normalt, da dette bidrager til at hæve temperaturen under hærdningen. I spinkle konstruktioner er effekten på

temperaturforløbet dog af begrænset betydning. Det vil derfor i almindelighed være mere økonomisk at påvirke temperaturniveauet under hærdningen gennem ændring af isoleringsniveau eller udstøbningstemperatur.

6.8 Cementtyper

Såvel størrelsen af den udviklede hærdevarme, som den hastighed, hvormed hærdevarmen udvikles, kan inden for visse rammer kontrolleres produktionsteknisk under cementens fremstilling.

Ved justering af cementens kemiske sammensætning kan der således fremstilles cementer med særlig lav eller særlig høj varmeudvikling. Lav og langsom varmeudvikling opnås i cementer med højt indhold af C_2S og C_4AF. Høj og hurtig varmeudvikling opnås i cementer med højt indhold af C_3S og i særdeleshed C_3A.

Varmeudviklingshastigheden afhænger herudover i betydelig grad af cementens formalingsgrad. Jo finere en given cement formales, desto hurtigere forløber hærdeprocessen.

Begge de her nævnte forhold vil influere på hærdeforløbet i en udstøbt betonkonstruktion. I figur 32 er gengivet temperaturforløb beregnet for de på side 17 angivne varmeudviklingsforløb A, B og C. Beregningerne er gennemført for $\theta_B = 10$ °C, $\theta_L = -5$ °C, afkølingstal $a = 0.03$ h^{-1} og et cementindhold $C = 350$ kg/m^3.

6.8 Vand/cement-forholdet

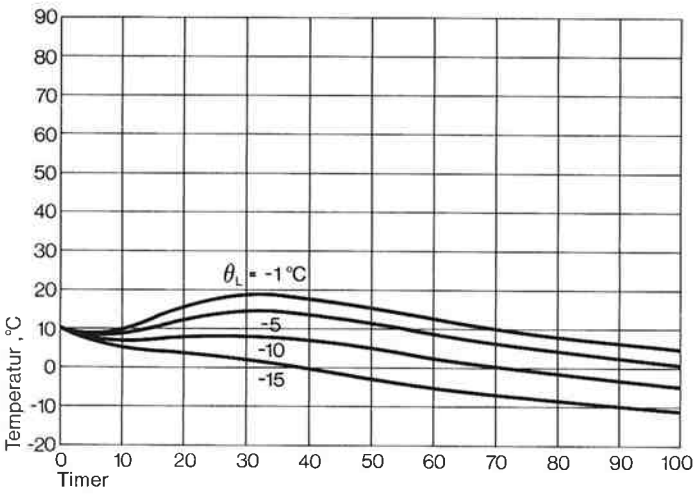
Laboratorieforsøg viser, at varmeudviklingshastigheden normalt øges lidt med voksende *v/c*-forhold. Ved beregning af temperaturforløb i hærdnende beton, vil denne effekt komme til udtryk gennem varmeudviklingsforløbet. Størrelsen af denne effekt er dog meget begrænset inden for det normale variationsområde for *v/c*-forhold. Forsøg viser, at *v/c*-forholdet især påvirker den senere del af varmeudviklingen, således at den totalt opnåede varmeudvikling reduceres noget ved lave *v/c*-forhold. Der foreligger dog ikke en systematisk, kvantitativ beskrivelse af sammenhængen mellem *v/c*-forhold og varmeudviklingshastighed for markedsførte danske cementer. De udarbejdede hærdediagrammer er derfor baseret på varmeudvikling målt ved et fastholdt *v/c*-forhold på 0.5.

6.10 Varmekapaciteten

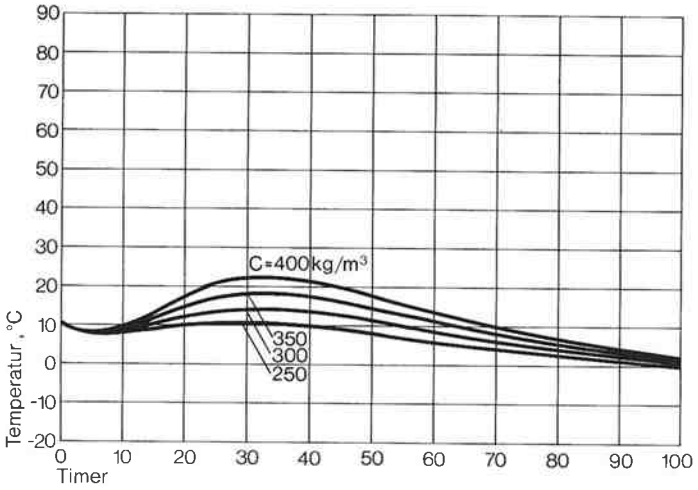
Af definitionen på afkølingstallet fremgår, at afkølingstallet a formindskes med voksende værdi for produktet af betonens rumvægt ϱ kg/m^3 og varmefylde c kJ/kg · °C. Betonens varmefylde c aftager svagt under hærdningen. Erfaringsmæssigt kan man dog ved praktisk beregning benytte følgende værdi for varmekapaciteten for normalbeton

$$\varrho \cdot c \cong 2500 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{°C}$$

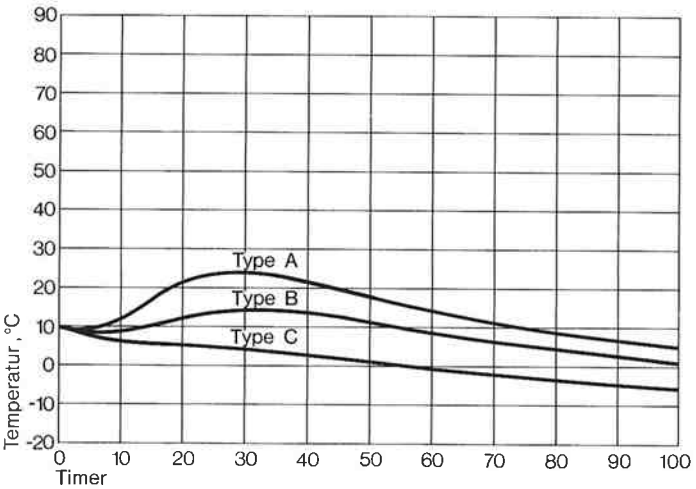
Ved beregning af temperaturforløb i konstruktioner udstøbt med specialbetoner, bør varmekapaciteten bestemmes udfra den aktuelle betons rumvægt og varmefylde.



Figur 30. Betonens temperaturforløb i afhængighed af udetemperaturen. Ved lave udetemperaturer dominerer varmetabet til omgivelserne, således at hærdevarmen ikke fører til en egentlig temperaturstigning i betonen. Figuren gælder for afkølingstal $a = 0.03$ h^{-1}, udstøbningstemperatur $\theta_B = 10$ °C, cementindhold $C = 350$ kg/m^3, varmeudvikling svarende til kurve B i figuren på side 17.



Figur 31. Betonens temperaturforløb i afhængighed af cementindholdet C kg/m^3. Et øget cementindhold vil hæve temperaturniveauet under hærdningen, men den opnåede effekt er dog ret begrænset for spinkle konstruktioner. Figuren gælder for afkølingstal $a = 0.03$ h^{-1}, udstøbningstemperatur $\theta_B = 10$ °C, lufttemperatur $\theta_L = -5$ °C, varmeudvikling svarende til kurve B i figuren på side 17.



Figur 32. Betonens temperaturforløb i afhængighed af varmeudviklingsegenskaberne for den benyttede cement. De refererede varmeudviklinger A, B og C svarer til de på side 17 angivne kurver.

7. Temperaturmåling i beton

Kendskabet til temperaturforløb og temperaturfordeling i den hærdnende beton giver den udførende mulighed for at styre betonens hærdning på en sikker og hensigtsmæssig måde. Ud fra temperaturmålinger er det muligt at træffe de nødvendige beslutninger om afformning, opspænding af kabler, efterisolering mv., således at de stillede krav i arbejdsbetingelserne bliver overholdt på en økonomisk måde.

Ved måling af betonens temperaturforløb og temperaturfordeling er det nødvendigt at træffe beslutning om: målemetode, placering af målesteder, aflæsningsintervaller, registrering af måleresultater og behandling af måleresultater.

Disse beslutninger vil i meget høj grad være bestemmende for såvel målingens kvalitet som for de omkostninger, der er forbundet med målingens udførelse.

I det følgende gennemgås nogle af de praktiske forhold, der kan være bestemmende for valget af udstyr og for målingernes praktiske udførelse.

7.1 Målemetode

Valget af temperaturføler til måling i beton vil normalt være udtryk for et kompromis mellem følgende, tilstræbte egenskaber hos føleren:

1. Føleren skal være mekanisk robust, og den skal kunne operere sikkert i et vådt, stærkt basisk miljø.
2. Følerens varmekapacitet og varmeledningsevne skal være passende lav, således at den ikke påvirker temperaturforholdene mærkbart på målestedet.
3. Følerens tidskonstant skal være så kort, at de hurtigst forekommende temperaturvariationer, fx ved afformning, registreres korrekt.
4. Føleren skal, før eller efter betonens udstøbning, være let at placere i de ønskede målepositioner.
5. Føleren skal give en reproducerbar og passende nøjagtig temperaturbestemmelse ved en simpel aflæseprocedure.
6. Føleren skal være billig i brug, og det skal være let at fremskaffe erstatningsdele i tilfælde af svigt.

Af tilgængelige følertyper, der i større eller mindre grad opfylder disse krav, har især to vist sig egnede ved temperaturmåling i beton, nemlig *passive følere af modstandstypen* og *aktive følere af termoelementtypen.*

Inden for gruppen af passive følere af modstandstypen, er det især følere af typen Pt-100 og NTC, der har fundet anvendelse.

Pt-100 er en trådviklet, glasindstøbt modstand med en veldefineret ændring af modstanden som funktion af temperaturen. Modstandstråden er lavet af platin Pt. Angivelsen Pt-100 refererer til, at føleren har en modstand på 100 ohm ved 0 °C. Pt-100 føleren er passiv, og kræver derfor en hjælpespænding ved målingen. Føleren er forholdsvis dyr. Den finder derfor kun anvendelse i genanvendelige indstiksfølere, med følerelementet indstøbt i en beskyttelseskappe af stål eller lignende.

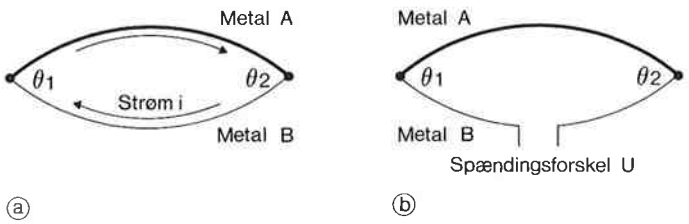
NTC er en halvledermodstand med særlig stor ændring i modstanden som funktion af temperaturen. Betegnelsen NTC refererer til, at halvlederen har *N*egative-*T*emperature-*C*oefficient, dvs. at modstanden aftager med voksende temperatur. En NTC-modstand betegnes også Termistor. NTC-føleren kræver, som Pt-100, en hjælpespænding ved målingen. Dens karakteristik er exponentiel. Både modstanden ved 0 °C R_o og karakteristikken kan variere fra føler til føler. Det er derfor nødvendigt, *enten* at kalibrere den enkelte NTC-modstand inden brugen, *eller* at benytte udsorterede NTC-modstande med garanteret karakteristik og R_o-værdi. I begge tilfælde bliver følerens værdi ret høj. NTC-føleren er derfor mest egnet som indstiksføler, der kan genanvendes et stort antal gange.

Inden for gruppen af aktive følere er det især termoelementer af typen *kobber/konstantan* og *jern/konstantan,* der finder anvendelse ved måling i beton.

Måling af temperaturen ved hjælp af termoelementer baserer sig på den såkaldte *Seebeck-effekt:* I et kredsløb dannet af to tråde af forskellige metaller, der er sammenloddet i enderne, vil der løbe en strøm, såfremt der er en temperaturforskel mellem de to loddesteder. Kredsløbet virker med andre ord som en aktiv elektricitetskilde, der genererer en *elektromotorisk kraft.* Afbrydes kredsløbet, fx ved overklipning af den ene metaltråd, vil der som følge af Seebeck-effekten opstå en spændingsforskel mellem de to trådender. Denne spændingsforskel, der øges med temperaturforskellen mellem de to loddesteder, udnyttes til temperaturbestemmelse i det såkaldte *termoelement.*

Termospændingen U er en funktion af temperaturforskellen mellem de to loddesteder i kredsløbet. Med kendskab til denne funktion, dvs. termoelementets karakteristik, kan temperaturforskellen bestemmes ud fra en spændingsmåling. Kendes ydermere temperaturen i det ene loddested, referencen, kan den absolutte værdi af temperaturen i det andet loddested beregnes. Se figur 33.

I standardudstyr til temperaturmåling med termoelement etableres denne reference normalt i selve måleinstrumentet. Dette kan enten ske ved indbygning af en termostat, eller ved en kompensationskreds, der korrigerer for temperaturændringer i referencepunktet. Der vil herudover i standardudstyr normalt ske en bearbejdning af den registrerede signalspænding, således at resultatet vises eller udskrives digitalt som en målt temperatur i følerens loddested.



Figur 33. Seebeck-effekt i et kredsløb, der er dannet ved sammenlodning af to metaller A og B. En temperaturforskel mellem de to loddesteder vil generere en elektromotorisk kraft i kredsløbet. Er kredsløbet sluttet (figur a), vil temperaturforskellen fremkalde en strøm i, i kredsløbet. Er kredsløbet åbent (figur b), vil en temperaturforskel generere en spændingsforskel U over terminalerne.

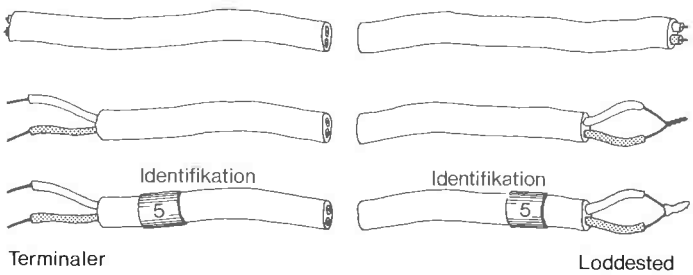
Termoelementledere til temperaturmåling markedsføres i en række forskellige typer. De mest anvendte metalpar til temperaturmåling i beton er *jern/konstantan* og *kobber/konstantan*. Konstantan er en legering af nikkel og kobber. Inden for disse to metalpar fås ledere med forskellige trådtykkelser og trådisoleringer. Den benyttede plast-isolering har ofte en farvekode, således at typen kan identificeres. Farvekoderne for de nævnte metalpar er eksempelvis: blå for jern/konstantan og brun for kobber/konstantan.

Tildannelse af et loddested foregår enkelt og hurtigt, og kan om nødvendigt udføres på målestedet. Se figur 34.

Som det fremgår af det foranstående, er termoelementets føler, dvs. loddestedet, billigt og robust. Da de benyttede måleledninger endvidere markedsføres til en rimelig pris, kan man med fordel benytte termoelementer som engangsfølere, der indstøbes i betonen. Efter målingens afslutning klippes trådene ved betonens overflade, og nye loddesteder tildannes.

Sammenlignes de nævnte føleres egnethed til temperaturmåling i beton under byggepladsforhold, fås den i figur 35 viste, vejledende tabel.

Som det fremgår af tabellen i figur 35, besidder termoelementet en række egenskaber, der gør denne følertype særlig egnet til temperaturmåling i beton.



Figur 34. Tildannelse af loddested på termoelement. Trådender afisoleres, snos sammen og loddes. Målingen kan principielt udføres med de sammensnoede, ikke loddede trådender. Dette medfører dog risiko for svigtende kontakt som følge af korrosion i trådenes kontaktzoner. Trådenderne bør derfor altid loddes straks efter afisoleringen. Endvidere bør der anbringes en tydelig nummer- eller farveidentifikation, både ved loddested og ved terminaler.

Egnethed mht.	Pt-100 (med kappe)	NTC (med kappe)	Termoelement
Robusthed	+	+	+
Korrosionsbest.	+	+	+
Varmekapacitet	0/+	0/+	+
Varmeledning	0/+	0/+	+
Tidskonstant	0/+	0/+	+
Monterbarhed	-/0	-/0	+
Målenøjagtighed	+	+	0/+
Anskaffelsespris	0	0	+

+ egnet 0 kan anvendes - ikke egnet

Figur 35. Sammenligning mellem forskellige føleres egnethed.

7.2 Placering af målesteder og montering af følere

Valget af målestedernes antal og placering har stor betydning såvel for udbyttet af, som for omkostningerne ved in situ måling af betontemperaturer. Det bør altid tilstræbes at udføre den enkelte måling med få, velplacerede målesteder. Forøges antallet af målesteder, forøges informationsmængden fra, men ikke nødvendigvis udbyttet af en måling.

I det følgende påpeges nogle af de forhold, der har betydning for valget af målesteder ved kontrol af hærdeforløb.

Ved valg af målesteder bør man normalt først udsøge de steder i konstruktionen, hvor der kan forventes laveste/højeste temperaturer under hærdningen, største temperaturspændinger under hærdningen eller største betonspændinger efter afformningen.

1. Laveste temperaturer under hærdningen

Disse områder vil dels være mest udsatte for frostbeskadigelse ved tidlig frysning, dels repræsentere den langsomste modenhedsudvikling i betonen. De laveste hærdetemperaturer vil normalt optræde i tyndvæggede tværsnit, i udkragede konstruktionsdele som kanter og hjørner, samt i områder med svag isolering, eventuelt kombineret med kuldebroer til omgivelserne. Specielt bør man være opmærksom på temperaturforholdene i støbeskel, hvor den hærdnende beton støbes op mod en, eventuelt kold, hærdnet beton.

2. Højeste temperaturer under hærdningen

Områder med den højeste hærdetemperatur repræsenterer den hurtigste modenhedsudvikling i betonen. Temperaturfordelingen omkring disse zoner er hyppigt bestemmende for de temperaturspændinger, betonen udsættes for. Hertil kommer, at der i mange arbejdsbeskrivelser er indført begrænsninger mht. den størst tilladte betontemperatur under hærdningen. De højeste hærdetemperaturer vil normalt optræde centralt i konstruktionsdele med størst dimension. Er konstruktionen asymmetrisk eller uens isoleret, kan området med største temperaturer dog forrykkes mod de isolerede overflader.

3. Største temperaturspændinger under hærdningen

De maksimale temperaturspændinger i betonen vil især optræde i følgende sammenhæng:

a. Ved afformning af varme konstruktionsdele. Under den påfølgende afkøling kan der opstå kritiske trækspændinger i betonens overflade. Som kontrolpunkter kan fx vælges temperaturen i tværsnittets midte og i tværsnittets overflade.

b. Den udstøbte konstruktion har stærkt varieret tværsnitsdimension. Under hærdningen og i forbindelse med afformningen kan der opstå betydelige temperaturforskelle mellem konstruktionsdele med forskellig tværsnitsdimension. Dette kan give anledning til revnedannelse i betonen. Som kontrolpunkter kan fx vælges midttemperaturen i de enkelte konstruktionsdele.

c. Konstruktionen sammenstøbes med hærdnet beton. Under hærdningen kan der opstå kritiske spændinger som følge af temperaturforskelle mellem den udstøbte og den hærdnede beton. Problemet giver hyppigt anledning til alvorlige, gennemgående revnedannelser ved støbeskel i konstruktioner. Som kontrolpunkter kan fx vælges midttemperaturen i den hærdnede beton, i støbeskel og i den hærdnende beton.

Forholdene omkring temperaturspændinger i hærdnende beton er af meget kompliceret natur. Med den eksisterende viden er det ikke muligt at angive eksakte grænser for de temperaturforskelle, der kan accepteres over de foreslåede kontrolpunkter. Erfaringsmæssigt bør man dog i almindelighed tilstræbe at overholde følgende grænser for temperaturbelastninger.

Tilfælde a: maximal differens ca. 20 °C.
Tilfælde b: maximal differens 10–20 °C.
Tilfælde c: maximal differens 10–20 °C.

I tilfældene b og c kan der under visse betingelser tillades større differenstemperaturer end angivet, idet relaksationer i den hærdnende beton kan reducere temperaturspændingerne. Behandlingen af dette problem falder dog uden for rammerne af nærværende SBI-anvisning.

4. Største betonspændinger efter afformningen

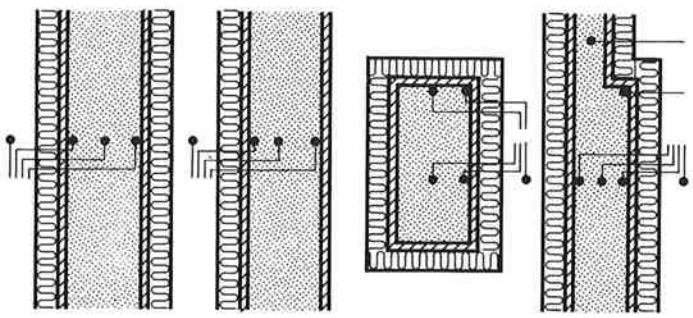
Vælges afformningstidspunktet på grundlag af en kontrol af betonens modenhedsudvikling, bør denne kontrol principielt henføres til de områder i konstruktionen, hvor forholdet mellem påvirkning og styrke er størst umiddelbart efter afformning. De nødvendige kontrolpunkter for temperaturmåling må i dette tilfælde fastlægges individuelt, bl.a. ud fra en vurdering af konstruktionens opbygning. Mere operationelt er det dog at foreskrive en mindste, tilladelig modenhedsværdi på afformningstidspunktet. Kontrollen henføres da til de områder i konstruktionen, der har den laveste temperatur under hærdningen. Her bør man især være opmærksom på temperaturforholdene i støbeskel, hvor den hærdnende beton støbes op mod en, eventuelt kold, hærdnet beton.

Etablering af målepunkter

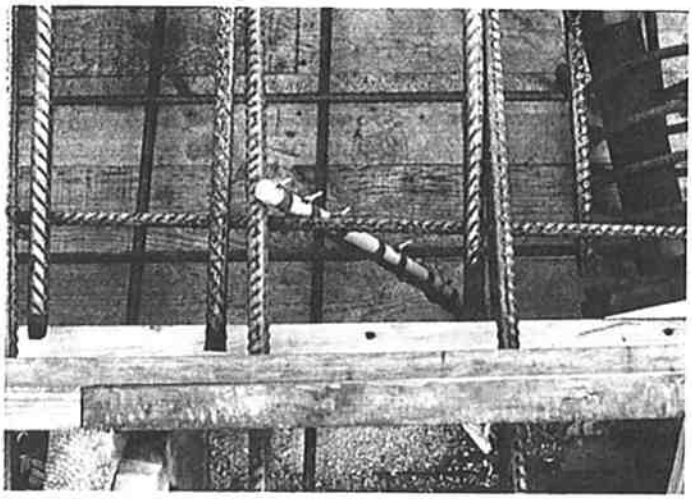
Erfaringer fra byggepladsmålinger viser, at kontrollen af de foran nævnte punkter 1 til 4 kan baseres på indlægning af relativt få målepunkter i konstruktionerne. I figur 36 er der vist eksempler på hensigtsmæssige målepunktsplaceringer i en række konstruktionstværsnit.

Efter at de nødvendige målesteder i konstruktionen er fastlagte, kan der træffes beslutning om montering af følere. I forbindelse hermed er der en række praktiske forhold at tage hensyn til.

Skal målingen udføres med termoelementer, vil det i de fleste tilfælde være hensigtsmæssigt at montere alle følere inden støbningen udføres.



Figur 36. Eksempler på hensigtsmæssig placering af målepunkter ved kontrol af hærdeforløbet i udstøbte betonkonstruktioner.



Figur 37. Måling af betonens temperatur under hærdningen udføres mest hensigtsmæssigt med termoelementer. Billedet viser en række termoelementer fastgjort i et elektrikerrør, som er bundet til armeringen i et brodæk.

I armerede betonkonstruktioner kan tilledningen monteres på armeringen med tape, og følerens loddested kan derefter bukkes fri af armeringen på det ønskede målested. Ved måling af betonens overfladetemperatur føres tilledningen gennem en forboring i formen, bukkes og fastgøres på formens inderside.

En særlig simpel og effektiv montering af termoelementer kan opnås ved brug af elektrikerrør i plast. Skal temperaturfordelingen fx bestemmes over et vægtværsnit, tilskæres elektrikerrøret i væggens mål. Der bores tværgående huller i røret, hvor målestederne ønskes placeret. Tilledningerne stikkes gennem hullerne, og loddestederne fastholdes ca. 1 cm fri af røret. Tilledningerne kan enten føres frem langs rørets yderside, fastgjort med tape, eller føres frem inde i selve røret. Det klarlagte elektrikerrør med monterede termoelementer kan derefter under ét fastgøres til armeringen med bindetråd. Se figur 37.

Inden den endelige placering af følere er det vigtigt, at *samtlige* måleledninger er tydeligt mærket med nummer eller farvekode i *begge* ender. Efter placeringen kontrolleres den enkelte følers nummer eller kode, og indføres på en målskitse i arbejdsblokkens kontrolskema. Denne kontrol og skriftlige registrering af følerens placering bør udføres med omhu; upræcise »nøgler« til målestedernes placering er kilde til hyppige og tilbagevendende fejl i måleprogrammer.

7.3 Aflæsningsintervaller

Aflæsningernes hyppighed ved temperaturmålinger i beton bør afpasses efter hærdeprocessens forløb. I perioder med hurtige temperaturændringer i betonen, bør temperaturbestemmelsen ske relativt hyppigt. Dette er fx tilfældet i perioder, hvor der tilføres varme, eller i forbindelse med aftagning af form og isolering.

I de perioder, hvor betonens temperaturforløb overvejende er bestemt af en jævnt udviklet hærdevarme, kan kontrol af hærdeforløbet ske på grundlag af relativt få temperaturbestemmelser.

Det er ikke muligt at opstille generelle retningslinier for, hvor hyppigt der bør foretages aflæsninger. De følgende forslag til aflæsningsintervaller bør derfor kun opfattes som vejledende størrelser ved håndaflæsning.

Aflæsning umiddelbart før udstøbning.
Aflæsning umiddelbart efter udstøbning.
Aflæsning i egentlig hærdeperiode: 2 til 4 gange pr. arbejdsdag.
Aflæsning umiddelbart efter afformning eller afisolering: 2 til 4 gange pr. time.
Aflæsning i periode med varmetilførsel: 2 til 4 gange pr. time.

Benyttes automatisk registrerende måleudstyr, er intervallængden af mindre betydning. Det kan da være en fordel at øge målehyppigheden noget, ud over det her angivne. Under alle forhold bør man dog søge at begrænse målingernes omfang til et rimeligt niveau.

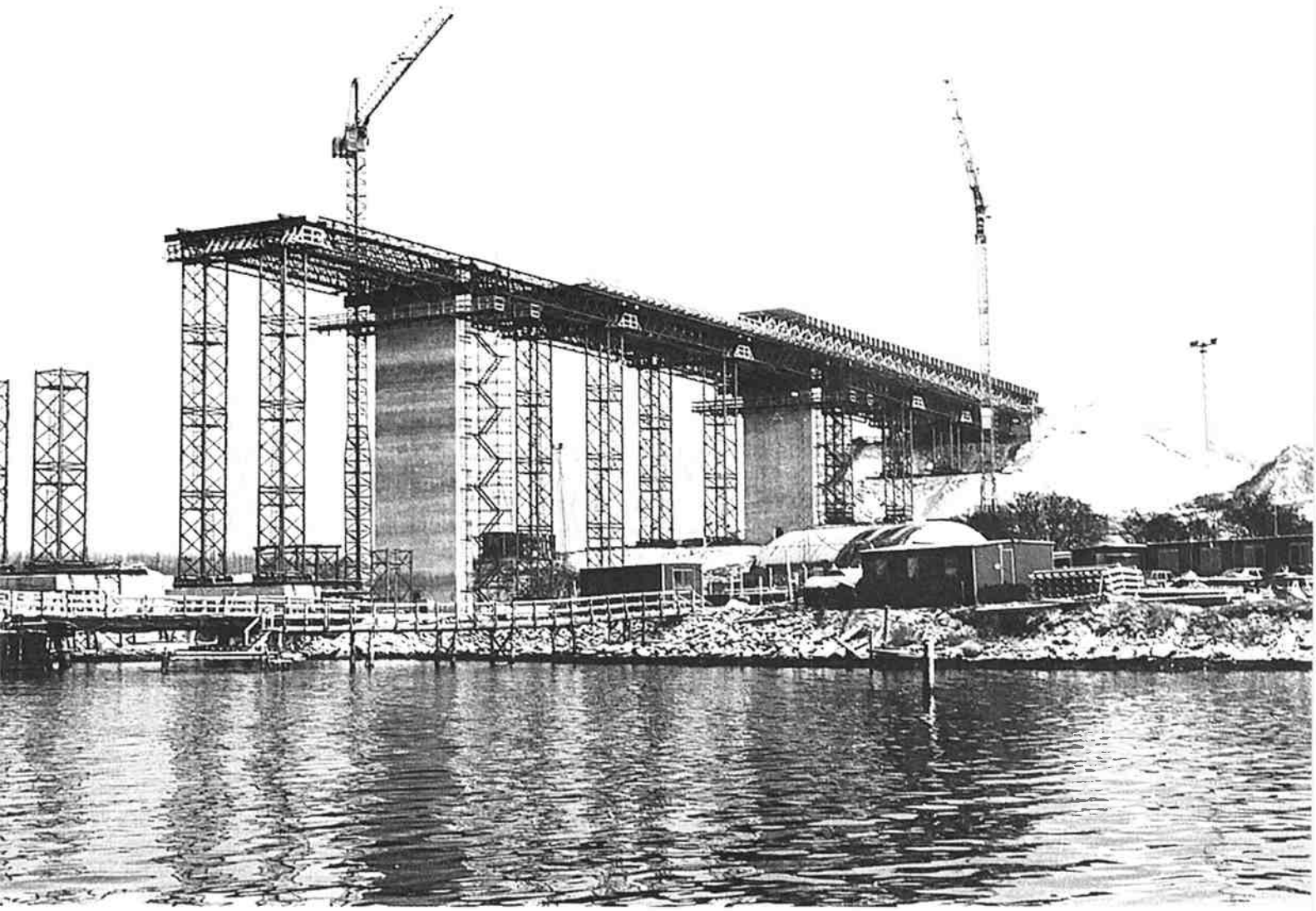
7.4 Registrering og behandling af måleresultater

Benyttes håndaflæsning af temperaturen, kan resultaterne indføres på arbejdsblokkens kontrolskema. Benyttes automatisk temperaturregistrering, kan resultatet heraf vedlægges som dokumentation til sagen. I dette tilfælde bør man være omhyggelig med at notere de nødvendige informationer om målingen på hvert enkelt registreringsark.

Bearbejdningen af måleresultaterne vil i nogen grad afhænge af det formål, målingen har haft. Der vil normalt være tale om en løbende kontrol af hærdningens forløb med henblik på fx:

Sikring mod tidlig frysning.
Overholdelse af afformningstidspunkt.
Kontrol af maksimal hærdetemperatur.
Kontrol af temperaturbelastninger.
Valg af opspændingstidspunkt for kabler.
Valg af efterisolering.

Det vil derfor være hensigtsmæssigt efter hver aflæsning at vurdere resultatet, og om nødvendigt gribe korrigerende ind i hærdeforløbet.



APPENDIX A

Dekrementfaktorer

Uden indre varmekilde

Betragtes et system uden indre varmekilde, der overholder de i afsnit 5.2 angivne beregningsforudsætninger, vil afkølingshastigheden jvf. (25) være bestemt ved

$$\frac{d\theta}{dt} = a \cdot (\theta_L - \theta)$$

$$\theta = \theta_B \neq \theta_L \quad \text{for } t = 0$$

Den analytiske løsning for θ_L = konstant er bestemt ved

$$\int_{\theta_B}^{\theta} \frac{d\theta}{(\theta_L - \theta)} = a \cdot \int_0^t dt$$

Ved integration fås, i overensstemmelse med (24), løsningen på formen

$$(\theta - \theta_L) = (\theta_B - \theta_L) \cdot \exp(-a \cdot t)$$

En oprindelig temperaturforskel $(\theta_B - \theta_L)$ vil således aftage eksponentielt i tiden med tidskonstanten $1/a$. Ønskes dette analytiske udtryk benyttet ved numerisk fremregning med tidstilvæksten Δt, kan det omskrives på formen

$$(\theta - \theta_L) = (\theta_B - \theta_L) \cdot \exp(-a \cdot n \cdot \Delta t) = (\theta_B - \theta_L) \cdot \exp(-a \cdot \Delta t)^n$$
$$t = n \cdot \Delta t$$

hvor n angiver antallet af tidstilvækster Δt.

Defineres dekrementfaktoren D_2 udfra det givne afkølingstal a og den valgte tilvækst Δt ved

$$D_2 = \exp(-a \cdot \Delta t)$$

ses en fremregning af temperaturforløbet at svare til en gentagen multiplikation med D_2

$$(\theta - \theta_L) = (\theta_B - \theta_L) \cdot D_2^n$$

$$t = n \cdot \Delta t$$

En numerisk beregning efter dette princip er eksakt, uanset størrelsen af den valgte tilvækst Δt.

Med indre varmekilde

For systemer med indre varmekilde kan en beregning af temperaturforløbet principielt gennemføres ved anvendelse af ovenstående udtryk. Tilnærmes den kontinuerte temperaturtilvækst med en række diskrete tilvækster $\Delta\theta_i$ til tidspunkterne t_i, fås ved superposition en resulterende temperaturtilvækst til tidspunktet t bestemt ved

$$\Delta\theta_r = \sum_{i=1}^{k} \Delta\theta_i \cdot \exp[-a \cdot (t - t_i)]$$

$$t = \sum_{i=1}^{k} \Delta t_i$$

For at opnå en rimelig beregningsnøjagtighed er det imidlertid nødvendigt at gøre Δt lille. Omfanget af det manuelle regnearbejde bliver derfor uhensigtsmæssigt stort. Omskrives udtrykket til formen

$$\Delta\theta_r = \sum_{i=1}^{k} \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t_i} \cdot \exp[-a \cdot (t - t_i)] \cdot \Delta t_i$$

fører summationen i grænsetilfældet $k \to \infty$ og $\Delta t_i \to 0$ over i Duhamels superpositionsintegral

$$\Delta\theta_r = \int_0^t \dot{\theta}(t) \cdot \exp[-a \cdot (t - x)] \cdot dx$$

Forudsættes $\dot{\theta}(t)$ konstant inden for de enkelte tidsintervaller Δt, vil integration af dette udtryk føre til følgende resultat

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta \cdot (1 - \exp(-a \cdot \Delta t))/(a \cdot \Delta t)$$

En lineær temperaturtilvækst $\Delta\theta$ over et tidsinterval Δt vil derfor give anledning til en resulterende temperaturtilvækst $\Delta\theta_r$ bestemt ved

$$\Delta\theta_r = D_1 \cdot \Delta\theta \text{ hvor } D_1 = (1 - D_2)/(a \cdot \Delta t)$$

Med dette udtryk tilnærmes det kontinuerte temperaturbidrag med sekanter over intervalbredden Δt. Beregningen af bidrag fra betonens hærdevarme kan derfor udføres med anvendelse af ret store intervaller Δt (5–10 timer). Herved opnås en væsentlig reduktion af beregningernes omfang, set i forhold til det først opstillede udtryk.

Overslagsformler for temperaturdifferenser

Udstrakt skive

En uendelig udstrakt homogen skive med tykkelsen 2δ har i begyndelsestilstanden en given temperaturfordeling $\theta(x,0)$ over tværsnittet. Til tidspunktet $t=0$ anbringes skiven i omgivelser med den konstante temperatur θ_L. Varmeovergangen mellem skivens overflade og det omgivende medie sker ved konvektion. Temperaturforløbet i skiven skal opfylde følgende betingelser:

Differentialligningen for systemets indre $-1 < \frac{x}{\delta} < 1$

$$\frac{\partial\theta(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\varrho c}\cdot\frac{\partial^2\theta(x,t)}{\partial x^2}$$

Begyndelsesbetingelse for systemets indre

$$\theta(x,0) = \theta_0(x) + \theta_L$$

Konvektiv randbetingelse

$$\lambda\cdot\frac{\partial\theta(-\delta,t)}{\partial x} - \alpha[\theta(-\delta,t)-\theta_L] = 0$$

$$\lambda\cdot\frac{\partial\theta(\delta,t)}{\partial x} + \alpha[\theta(\delta,t)-\theta_L] = 0$$

Forudsættes konstant temperatur overalt i tværsnit til tiden $t=0$, dvs. $\theta_0(x)=\theta_0=$ konstant, findes løsningen efter [21]

$$\theta(x,t)-\theta_L = \theta_0\cdot\sum_{n=1}^{\infty} A_n\cdot\cos(\mu_n\cdot\frac{x}{\delta})\cdot\exp(-\mu_n^2\cdot Fo)$$

hvor

$A_n = 2\cdot\sin(\mu_n)/[\mu_n+\sin(\mu_n)\cdot\cos(\mu_n)]$

μ_n = n'te egenværdi til $\mu/Bi = \cot(\mu)$

For det udviklede temperaturprofil vil bidrag fra led af 2. og højere orden være negligerbare [14]. Idet temperaturen i midte af tværsnit $\theta_m=\theta(0,t)$ og temperaturen på rand $\theta_r=\theta(\delta,t)$ fås nu

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_r} = \frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_r-\theta_L} = \frac{1-\cos(\mu_1)}{\cos(\mu_1)}$$

Ved rækkeudvikling af $\cos(\mu_1)$ fås tilnærmet at

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_r} \cong \frac{1-(1-\frac{1}{2}\mu_1^2)}{1-\frac{1}{2}\mu_1^2} = \frac{\mu_1^2}{2-\mu_1^2}$$

Af relationen mellem Bi og μ fås tilsvarende ved rækkeudvikling at

$$Bi = \frac{\mu_1\cdot\sin(\mu_1)}{\cos(\mu_1)} \cong \frac{\mu_1^2}{1-\frac{1}{2}\mu_1^2} = 2\cdot\frac{\mu_1^2}{2-\mu_1^2}$$

hvoraf følger

$$\frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_r-\theta_L} \cong \frac{1}{2}Bi, \qquad \frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_m-\theta_L} \cong \frac{Bi}{Bi+2}$$

i overensstemmelse med formel (19).

Lang cylinder

En uendelig lang homogen cylinder med radius R har i begyndelsestilstanden en given symmetrisk temperaturfordeling $\theta(r,0)$ over tværsnittet. Til tidspunktet $t=0$ anbringes cylinderen i omgivelsen med den konstante temperatur θ_L. Varmeovergangen mellem cylinderens overflade og det omgivende medie sker ved konvektion. Temperaturforløbet i cylindertværsnit skal opfylde følgende betingelser

Differentialligningen for systemets indre $0 \le \frac{r}{R} < 1$

$$\frac{\partial\theta(r,t)}{\partial t} = a\cdot\left(\frac{\partial^2\theta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\theta(r,t)}{\partial r}\right)$$

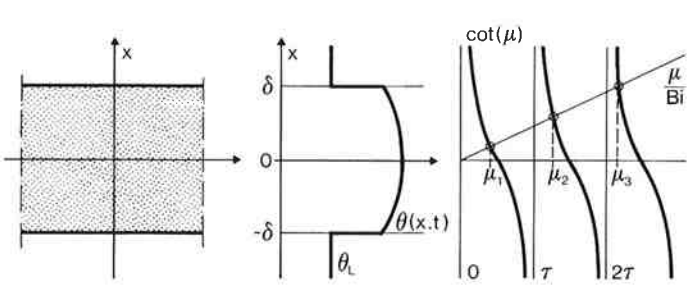
Begyndelsesbetingelse for systemets indre

$$\theta(r,0) = \theta_0(r) + \theta_L$$

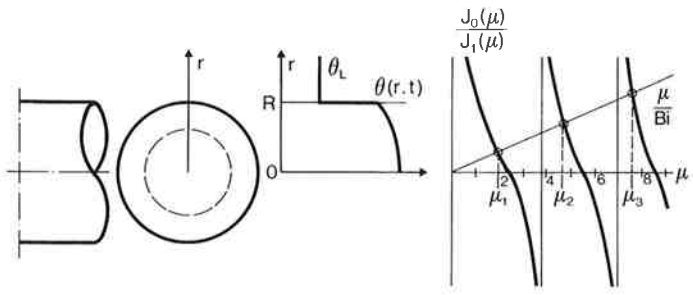
Konvektiv randbetingelse

$$\lambda\cdot\frac{\partial\theta(R,t)}{\partial r} + \alpha\cdot(\theta(R,t)-\theta_L) = 0$$

$$\frac{\partial\theta(0,t)}{\partial r} = 0$$



Systemdefinition og grafisk betydning af egenværdistørrelserne μ_n for skive.



Systemdefinition og grafisk betydning af egenskabsstørrelserne μ_n for cylinder.

Forudsættes konstant temperatur overalt i tværsnit til tiden $t=0$, dvs. $\theta_0(r)=\theta_0=$konstant, findes løsningen efter [21]

$$\theta(r,t)-\theta_L=\theta_0\cdot\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cdot J_0(\mu_n\cdot\frac{r}{R})\cdot\exp(-\mu_n^2\cdot Fo)$$

hvor

$A_n=2\cdot J_1\cdot(\mu_n)/\ \{\mu_n\cdot[J_0^2\cdot(\mu_n)+J_1^2(\mu_n)]\}$
μ_n = n'te egenværdi til $\mu/Bi=J_0(\mu)/J_1(\mu)$

hvor J_0 og J_1 angiver Bessels Funktioner af 0'te og 1'ste orden [22]. For det udviklede temperaturprofil vil bidrag fra led af 2. og højere orden være negligerbare [14]. Idet temperatur i midte af cylinder $\theta_m=\theta(0,t)$ og temperatur på rand $\theta_r=\theta(R,t)$ fås nu

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_r}=\frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_r-\theta_L}=\frac{1-J_0(\mu_1)}{J_0(\mu_1)}\cong\frac{\mu_1^2}{4-\mu_1^2}$$

hvor den sidste tilnærmede omskrivning er udført ved benyttelse af rækkeudviklingen for $J_0(\mu)$. Af relationen mellem Bi og μ følger tilsvarende at

$$Bi=\frac{\mu_1\cdot J_1(\mu_1)}{J_0(\mu_1)}\cong 2\cdot\frac{\mu_1^2}{4-\mu_1^2}$$

og dermed i overensstemmelse med (19) at

$$\frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_r-\theta_L}\cong\tfrac{1}{2}Bi,\quad\frac{\theta_m-\theta_r}{\theta_m-\theta_L}\cong\frac{Bi}{Bi+2}$$

Ved anvendelse af rækkeudvikling for ovenstående funktioner er det forudsat, at en acceptabel tilnærmelse opnås med ét led. En praktisk efterprøvning viser, at denne forudsætning er tilstrækkeligt opfyldt for det Biot-talområde der er af interesse. Hosstående tabel viser afvigelsen mellem formel (19) og den eksakte løsning for et plant tværsnit.

$\theta_m=100$ °C $\quad\theta_L=0$ °C

$Bi=$	0.01	0.1	1	10
$\Delta\theta_{max}=$	0.5	4.8	33.3	83.3 °C udfra (19)
$\Delta\theta_{max}=$	0.5	4.8	30.7	79.8 °C analytisk løsning

Det bemærkes endvidere, at afvigelser ved brug af tilnærmelsesudtryk er på den sikre side.

APPENDIX C

Frostsikkerhed af hærdnende cementpasta

Når vand fryser til is udvider det sig ca. 9 pct. i forhold til sit begyndelsesvolumen. En nødvendig forudsætning for at undgå spændinger i cementpastaen på grund af vandets volumenudvidelse ved frysning er derfor, at der er et jævnt fordelt porevolumen, der svarer til ca. 9 pct. af det fryselige vand.

Det antages, at kun kapillarvandet omdannes til is under frysningen. Den relative volumenandel af kapillarvand og porer under hydratisering af en oprindelig luftfri cementpasta kan efter [8] udtrykkes ved

$v_k = p - 1.4 \cdot (1-p) \cdot \alpha$ kapillarvand
$v_p = 0.2 \cdot (1-p) \cdot \alpha$ porer

hvor
α = hydratiseringsgrad
p = porøsitet af udgangsblanding.

Det forudsættes at hydratiseringen sker uden vandtilførsel fra omgivelserne.

For en hærdnende oprindelig luftfri cementpasta gælder da, at der skal være udviklet et porevolumen af størrelsen $v_p \geq 0.09 \cdot v_k$, før cementpastaen kan tåle frysning. Efter ovenstående udtryk svarer dette til kravet

$$\alpha \geq 0.276 \cdot \frac{p}{1-p}$$

Idet sammenhængen mellem porøsiteten p og v/c-forholdet for en cement-densitet 3.10 åbenbart er bestemt ved

$$\frac{p}{1-p} = 3.10 \cdot \frac{v}{c}$$

kan ovenstående betingelse omskrives til

$$\alpha \geq 0.86 \cdot \frac{v}{c}$$

Forudsættes proportionalitet mellem varmeudvikling under hærdning og hærdningsgrad, kan hærdningsgraden α udtrykkes ved et eksperimentelt bestemt varmeudviklingsforløb efter formel (1), hvormed:

$$\alpha \cong \frac{Q}{Q_\infty} = \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha'}\right] \leq 0.86 \cdot \frac{v}{c}$$

hvor:
Q_∞ = total varmeudvikling for M→∞, kJ/kg
Q = varmeudvikling ved modenheden M, kJ/kg
M = modenhed, h
τ_e = karakteristisk tidskonstant, h
α' = krumningsparameter, dimensionsløs

Den teoretisk nødvendige modenhed M, for opnåelse af frostsikkerhed under hærdning af en oprindelig luftfri cementpasta, er dermed bestemt af

$$M \geq \frac{\tau_e}{\left[-\ln\left\{0.86 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)\right\}\right]^{\frac{1}{\alpha'}}}$$

Med kalorimetriske målinger findes tidskonstanten τ_e sædvanligvis at være af størrelsen 10–15 h. Krumningsparameteren α' antager normalt en talværdi meget nær 1.

Relationen mellem modenhedskrav for frostsikkerhed og v/c-forhold indeholder to fysisk relevante grænsetilfælde. For voksende værdier af v/c-forholdet vil det logaritmiske led i nævneren gå mod 0, når størrelsen $0.86 \cdot v/c$ går mod 1. Dette betyder, at modenhedskravet for frostsikkerhed vil gå mod uendelig. Der opstår med andre ord en tilstand, hvor frostsikkerhed ikke kan opnås ved det kemiske svind under hydratiseringsreaktionerne. For aftagende værdier af v/c-forholdet vil det logaritmiske led i nævneren gå mod uendelig, når v/c-forholdet går mod 0. Dette indicerer, at modenhedskravet for frostsikkerhed vil gå mod 0.

I praktiske systemer vil det frie kapillarvand indeholde en række opløste salte. Dette medfører en vis frysepunktsdepression, hvorfor ovenstående udtryk må forventes at være lidt på den sikre side.

Beregningseksempler

I det følgende er den praktiske anvendelse af det teoretiske stof illustreret med en række korte eksempler. I hvert eksempel er der henvisning til de formeludtryk eller afsnit, hvor beregningsgrundlaget er behandlet.

1. Sammenligning af hærdehastigheder

Hvor meget øges hærdehastigheden, såfremt temperaturen øges fra 35 °C til 80 °C?

Ved aflæsning i diagram over temperaturfunktionen i figur 11, side 55, findes

$H(35\ °C) = 2.0 \quad H(80\ °C) = 10.5$

Regnet i forhold til hastigheden ved 35 °C vil hærdningen ved 80 °C forløbe ca. 10.5/2.0 = 5.3 gange hurtigere.

2. Beregning af relativ hastighed for hærdeproces

Beregn ud fra det analytiske udtryk den relative hastighed H(12 °C) ved 12 °C i forhold til hastigheden ved 20 °C.

Først bestemmes den beregningsmæssige størrelse for aktiveringsenergien E ved 12 °C. Af figur 11, side 55, findes

$E(12\ °C) = 33500 + 1470 \cdot (20-12) = 45260\ \text{J/mol}$

Ved indsætning findes derefter den relative hastighed

$$H(12\ °C) = \exp\left[\frac{45260}{8.314} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+12}\right)\right] = 0.59$$

Hærdehastigheden ved 12 °C er således ca. 60 pct. af hastigheden ved 20 °C.

3. Sammenligning af hærdeprocessers varighed

Ved prøvestøbning af en beton har man fundet, at cylindertrykstyrken er ca. 14 MPa efter 1 døgns hærdning ved 25 °C. *Hvor mange timer vil den pågældende beton være om at opnå den samme styrke på 14 MPa, såfremt hærdningen sker ved 5 °C.*

Ved beregningen benyttes, at varigheden af en proces er omvendt proportional med processens hastighed. Ved aflæsning i figur 11, side 55, fås

$H(25\ °C) = 1.3 \quad H(5\ °C) = 0.3$

Ved 5 °C kan den ønskede cylindertrykstyrke på 14 MPa således forventes opnået efter $24 \cdot (1.3/0.3) =$ ca. 104 h.

4. Sammenligning af cementers varmeudvikling

Der foreligger kemiske analysedata for to cementer (1 og 2), der kan leveres til støbning af massive fundamenter. Analyseresultaterne fremgår af efterfølgende tabel.

	C_3S pct.	C_2S pct.	C_3A pct.	C_4AF pct.	Blaine m^2/kg
Cement 1	48.5	29.4	3.3	14.9	300
Cement 2	58.6	18.8	8.5	10.2	300

Idet der forventes problemer med temperaturpåvirkning af betonen under hærdningen, ønskes der benyttet en cement med relativ lav varmeudvikling. *Hvilken af de foreliggende cementtyper er bedst egnet til det aktuelle støbearbejde, såfremt der alene tages hensyn til cementernes varmeudvikling?*

Benyttes det i afsnit 3.3 nævnte forhold, at der ved fuldstændig hydratisering af klinkermineralerne C_3S, C_2S, C_3A og C_4AF udvikles en varmemængde på ca. 500, 260, 900 hhv. 300 kJ/kg, kan cementernes potentielle varmeudvikling bedømmes af

$Q(1) \cong 0.485 \cdot 500 + 0.294 \cdot 260 + 0.033 \cdot 900 + 0.149 \cdot 300 =$ 393 kJ/kg

$Q(2) \cong 0.586 \cdot 500 + 0.188 \cdot 260 + 0.085 \cdot 900 + 0.102 \cdot 300 =$ 449 kJ/kg

Idet de to cementer er formalet til den samme finhed, ca. 300 m^2/kg, vil forskelle i varmeudviklingsegenskaber i første række bero på forskelle i den kemiske sammensætning. Alt andet lige må det derfor forventes, at cement 2 vil have en større varmeudvikling end cement 1. Forskellen vil være af størrelsesordenen $100 \cdot (449-393)/393 \cong 14$ pct.

Såfremt andre forhold ikke taler imod, bør cement 1 anbefales til fundamentsstøbningen på grund af den relativt lave varmeudvikling.

Af de givne analysedata fremgår det endvidere, at cement 1 har et ret lavt indhold af C_3S og C_3A. Det må derfor forventes, at en beton med cement 1 vil have den langsomste styrkeudvikling.

5. Parameterbestemt varmeudviklingsforløb

Ved adiabatisk kalorimetri er der bestemt basiskurve for en cements varmeudvikling. Følgende parameterværdier er angivet

$Q_\infty = 400\ \text{kJ/kg} \quad \tau_e = 12\ \text{h} \quad \alpha = 0.95$

Hvor mange kJ/kg cement kan der forventes at være udviklet i en beton efter en hærdetid på 48 timer ved en konstant betontemperatur på $\theta_B = 10$ °C?

Af figur 11, side 55, kan betonens modenhed M bestemmes efter 48 timers hærdning ved 10 °C

$M = H(10\ °C) \cdot \Delta\tau = 0.5 \cdot 48 = 24\ \text{h}$

Ud fra formel (1), side 57, findes dernæst

$$Q \cong 400 \cdot \exp\left[-\left(\frac{12}{24}\right)^{0.95}\right] = 238\ \text{kJ/kg}$$

Efter 48 timers hærdning ved 10 °C kan det derfor forventes, at cementen har udviklet ca. 240 kJ/kg.

6. Parameterbestemt styrkeudviklingsforløb

Ved prøvestøbning har man bestemt styrkeudviklingsegenskaberne for en beton. Resultatet af prøvningen foreligger som parameterværdier for cylindertrykstyrken

$\sigma_\infty = 42$ MPa $\quad \tau_e = 32$ h $\quad \alpha = 0.90$

Hvilket modenhedskrav M_a skal der stilles ved afformning, såfremt der ønskes en cylindertrykstyrke på mindst 10 MPa på afformningstidspunktet?

Udtrykket for styrkeudvikling som funktion af modenhed (2), side 57, er

$$\sigma = \sigma_\infty \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right)$$

Gøres dette udtryk eksplicit i modenheden M fås

$$M = \tau_e / \left[-\ln(\sigma/\sigma_\infty)\right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

Indsættes heri de givne talværdier fås

$$M_a = 32 / \left[-\ln(10/42)\right]^{\frac{1}{0.90}} = 21.4 \text{ h}$$

Modenhedskravet for afformning bør derfor være, at afformning først udføres, når betonens modenhed er 22 h eller derover.

7. Bestemmelse af parametre ved diagrammetode

I forbindelse med prøvestøbninger er der målt trykstyrkeudvikling for en beton. Der er undersøgt i alt tre satse med den samme beton. Resultaterne foreligger således:

Sats A	τ =	5.2	13.2	24.2	31.8	72.3	366	672	h
	σ =	0.2	4.3	12.4	15.6	25.1	38.6	43.8	MPa
Sats B	τ =	10.1	20.8	28.8	51.0	168	504	672	h
	σ =	2.2	9.7	14.6	20.5	34.9	43.1	43.3	MPa
Sats C	τ =	6.0	16.8	25.0	40.8	95.0	336	672	h
	σ =	0.6	7.1	13.5	18.8	28.7	40.7	43.7	MPa

Prøvningerne er udført under laboratorieforhold. Betonens hærdning er sket ved 20 °C.

Parameterværdierne σ_∞, τ_e og α for betonens trykstyrkeudvikling ønskes fastlagt ved diagrammetoden.

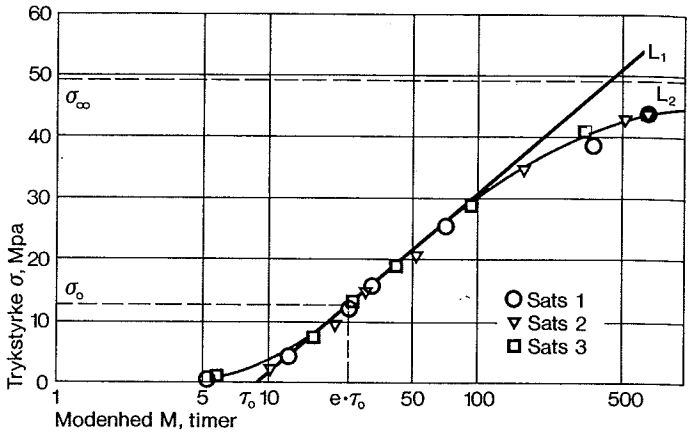
Samtlige måleresultater indtegnes i en semilogaritmisk afbildning σ, ln(M) svarende til figur 15, side 57. Idet hærdningen er forløbet ved 20 °C, vil de angivne prøvningsterminer være identiske med modenheden M på prøvningstidspunktet.

Der optegnes en linie (L_1) gennem styrkeudviklingsforløbets retlinede område; liniens skæringspunkt τ_0 med aksen $\sigma = 0$ aflæses. Hermed findes værdien $\tau_0 =$ ca. 9.0 h.

Den optegnede linies hældningskoefficient σ_0 bestemmes som liniens ordinat for $M = e \cdot \tau_0 = 2.72 \cdot 9.0 \cong 24.5$ h. Herved findes $\sigma_0 \cong 13$ MPa.

Med kendskab til hjælpestørrelserne τ_0 og σ_0 kan krumningsparameteren α bestemmes ud fra diagrammet figur 16, side 58. Fremgangsmåden er som følger

- der udvælges et styrkedatasæt (σ, M) fra den krumme del af styrkekurven til højre for den optegnede rette linie. Vælges fx middelværdien af de tre målinger ved 672 h fås (σ, M) = (43.6 MPa, 672 h).



Bestemmelse af parametre ved diagrammetode. Først indtegnes måleresultaterne fra de tre satse 1, 2 og 3 i et semilogaritmisk diagram som vist i figuren. Dernæst indtegnes den rette linie L_1 gennem styrkeudviklingens retlinede område. Liniens akseafskæringer τ_0 og σ_0 bestemmes ved den viste konstruktion. Ud fra disse to hjælpestørrelser kan beregningsparametrene σ_∞, τ_e og α bestemmes ved brug af diagrammet i figur 16, side 58. Med kendskab hertil fastlægges den parameterbeskrevne styrkeudvikling L_2 ved brug af formel (2) i kapitel 3, side 57.

- den søgte krumningsparameter α aflæses i diagrammet figur 16 for indgangsværdierne (σ/σ_0, M/τ_0) = (43.6/13, 672/9.0) = (3.35, 75). Aflæsningen viser at

$\alpha \cong 0.72$

Til slut fastlægges beregningsparametrene σ_∞ og τ_e som angivet i formeloversigten i figur 16. Med de givne talværdier fås

$\sigma_\infty = e \cdot \sigma_0/\alpha \cong 2.72 \cdot 13/0.72 = 49.1$ MPa
$\tau_e = \tau_0 \cdot \exp(1/\alpha) \cong 9.0 \cdot \exp(1/0.72) = 36.1$ h

Det opmålte styrkeudviklingsforløb kan dermed udtrykkes ved parameterfremstillingen

$$\sigma(M) = \sigma_\infty \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right] \cong 49.1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{36.1}{M}\right)^{0.72}\right] \text{ MPa}$$

8. Frostsikkerhedskravets relation til v/c-forholdet

Ved adiabatisk kalorimetri er varmeudviklingsegenskaberne bestemt for to betoner med vand/cement-forhold på 0.45 hhv. 0.65. Varmeudviklingsparametrene er bestemt i overensstemmelse med formel 1, side 57. Følgende værdier fremgår af målingerne

vand/cement-forhold 0.45

$Q_\infty = 390$ kJ/kg $\quad \tau_e = 14$ h $\quad \alpha = 1.05$

vand/cement-forhold 0.65

$Q_\infty = 400$ kJ/kg $\quad \tau_e = 16$ h $\quad \alpha = 1.20$

Der ønskes gennemført en beregning af den teoretisk nødvendige modenhed for opnåelse af frostsikkerhed for de to betoner, idet der ses bort fra eventuel indflydelse af indblandet luft.

Vurdering af frostsikkerhedskravet kan ske ud fra formel 4, side 59. Ved indsætning af talværdier fås

vand/cement-forhold 0.45

$M \geq 14/(-\ln(0.86 \cdot 0.45))^{\frac{1}{1.05}} \cong 15$ h

vand/cement-forhold 0.65

$M \geq 16/(-\ln(0.86 \cdot 0.65))^{\frac{1}{1.20}} \cong 25$ h

De opnåede regningsmæssige værdier er overensstemmende med det velkendte forhold, at frostsikkehed opnås desto senere, jo højere vand/cement-forholdet er, og jo langsommere en cement der er tale om.

9. Temperatur Response Diagrammet

En massiv 0.40 m tyk støttemur er udstøbt i en stærkt isoleret form. Efter 3 døgns hærdning er betonens temperatur overalt i tværsnittet $\theta_B = 68$ °C. Den omgivende luft har en temperatur $\theta_L = -2$ °C. Følgende informationer foreligger:

Karakteristisk dimension *)	$\delta = 0.20$ m
Betonens rumvægt	$\varrho = 2300$ kg/m³
Betonens varmefylde	$c = 1.09$ kJ/kg·°C
Betonens varmeledningstal	$\lambda = 7.5$ kJ/m·h·°C

Der kan ses bort fra hærdevarmebidrag.

I den beskrevne situation fjernes form og isolering, og væggen henstår ubeskyttet ved et transmissionstal $k = 150$ kJ/m²·h·°C.

Ved brug af Temperatur Response Diagrammet ønskes bestemt, hvor mange timer der forløber inden temperaturen i væggens midte er aftaget til 30 °C. Det ønskes endvidere bestemt, hvor mange timer der forløber inden de maksimale temperaturdifferenser optræder i væggen, og hvilken størrelse disse får.

Beregningerne udføres ved brug af Temperatur Response Diagram for skive vist i figur 20, side 64. Først bestemmes Biottallet *Bi* for væg under afkøling, samt omregningsfaktoren mellem Fouriertallet *Fo* og tiden τ. Med de opgivne tal fås

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} = \frac{150 \cdot 0.20}{7.5} = 4.0$$

$$Fo = [\lambda/(\varrho \cdot c \cdot \delta^2)] \cdot \tau = [7.5/(2300 \cdot 1.09 \cdot 0.20^2)] \cdot \tau = 0.075 \cdot \tau$$

Nedkøling af vægmidte til 30 °C svarer til en relativ nedkøling ϕ bestemt ved

$$\phi = \frac{\theta_m - \theta_L}{\theta_{mo} - \theta_L} = \frac{30-(-2)}{68-(-2)} = \frac{32}{70} = 0.46$$

Af diagram for temperaturforløb i figur 20, side 64, bestemmes det hertil svarende Fouriertal *Fo* ved aflæsning for $\phi = 0.46$ og $Bi = 4.0$. Herved findes $Fo \cong 0.61$. Benyttes den foran beregnede omregningsfaktor kan den dertil svarende tid bestemmes af

$\tau = Fo/0.075 \cong 0.61/0.075 =$ ca. 8 h

*) Det bemærkes, at den karakteristiske dimension δ er den halve tykkelse ved tosidet, symmetrisk afkøling. Ved ensidig afkøling er δ den fulde tværsnittykkelse.

Af diagrammet for temperaturdifferenser i figur 20 ses, at de største relative differenser ψ ved et Biottal på 4 bliver ca. 0.63 ved et Fouriertal på ca. 0.15. De største temperaturdifferencer vil derfor optræde ved

$\tau \cong 0.15/0.075 =$ ca. 2 h

Størrelsen af disse temperaturdifferencer er bestemt af $\max(\theta_m - \theta_r) = \max(\psi) \cdot (\theta_{mo} - \theta_L) \cong 0.63 \cdot [68-(-2)] =$ ca. 44 °C

10. Overslagsformel for temperaturdifferenser

En massiv 0.40 m tyk støttemur er udstøbt i en stærkt isoleret form. Betonens temperatur er 68 °C overalt, og lufttemperaturen er -2 °C. Betonens varmeledningstal $\lambda = 7.5$ kJ/m·h·°C.

Ved brug af overslagsformlen ønskes der gennemført en tilnærmet beregning af de største temperaturdifferenser, der vil opstå i væggen, såfremt form og isolering fjernes, og afkølingen sker ved et transmissionstal $k = 150$ kJ/m²·h·°C.

Størrelsen af temperaturdifferenserne kan vurderes ud fra formel (19), side 65. Først bestemmes væggens Biottal i afkølingsperioden ud fra formel (17), side 65. Ved indsætning af talstørrelser fås

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} = \frac{150 \cdot 0.20}{7.5} = 4.0$$

idet den karakteristiske dimension ved tosidet symmetrisk afkøling er den halve vægtykkelse. Af formel (19) fås nu

$$(\theta_m - \theta_r) \cong (\theta_m - \theta_L) \cdot \frac{Bi}{Bi+2} = \left[68-(-2)\right] \cdot \frac{4.0}{4.0+2} = 46.7 \text{ °C}$$

Der kan således forventes en største temperaturdifferens på ca. 47 °C over tværsnittet under afkølingen.

Sammenlignes det fundne resultat med den korrekte analytiske løsning til samme problem, beskrevet i det foranstående eksempel 9, ses det, at overslagsformlen giver en mindre overestimering af temperaturpåvirkningen. For praksis vil dette være en »sikker« estimering.

11. Kontrolleret afkøling af varmt tværsnit

En massiv 0.40 m tyk støttemur er udstøbt i en stærkt isoleret form. Betonens temperatur er 68 °C overalt, og lufttemperaturen er -2 °C. Betonens varmeledningstal er 7.5 kJ/m·h·°C. Transmissionstal for fri overflade kan ansættes til $k = 150$ kJ/m²·h·°C.

Der ønskes udarbejdet forslag til en afformningsprocedure der sikrer, at tværsnittet under afkølingen ikke udsættes for større temperaturdifferenser end ca. 20 °C.

Valg af afformningsprocedure kan ske på grundlag af formlerne (20), (21) og (22), side 65. Af de opgivne tal fremgår det ved indsætning i (20) at

$(\theta_a - \theta_L) = [68-(-2)] = 70 > \Delta\theta_{max} = 20$ °C

således at afformningen ikke kan gennemføres uden særlige foranstaltninger. De nødvendige foranstaltninger kan da fx bestå i, at der *umiddelbart* efter afformningen etableres en efterisolering. Efter formel (21) skal det herunder sikres, at transmissionstallet k opfylder følgende betingelser

$$k \leq \frac{2 \cdot \Delta\theta_{max}}{\theta_a - \theta_L - \Delta\theta_{max}} \cdot \frac{\lambda}{\delta} = \frac{2 \cdot 20}{68-(-2)-20} \cdot \frac{7.5}{0.20} \cong 30 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

hvilket, jvf. figur 27, side 68, kan opnås med presenning eller folieafdækning, der friholdes fra betonens overflader, fx ved hjælp af en træramme.

En alternativ fremgangsmåde ville være, at lade væggen afkøle i form indtil temperaturen er ukritisk ved afformning. Den nødvendige nedkøling kan bestemmes af formel (22). Den betragtede væg skal afkøles i form indtil betonens temperatur.

$$\theta_a \leq (1+\frac{2\lambda}{k\cdot\delta})\cdot\Delta\theta_{max}+\theta_L=(1+\frac{2\cdot 7.5}{150\cdot 0.20})\cdot 20+(-2)=28\ ^\circ C$$

Sammenhold i øvrigt de opnåede beregningsresultater med de to foranstående eksempler 9 og 10, hvor det samme tværsnit er undersøgt.

12. Beregning af afkølingsforløb ud fra afkølingstallet

En massiv 0.40 m tyk støttemur er isoleret til et transmissionstal $k = 3$ kJ/m²·h·°C. Betontemperaturen er 68 °C, og luftens temperatur er -2 °C. Der kan ses bort fra hærdevarmebidrag, og betonens temperatur forudsættes at være den samme over hele tværsnittet. Betonens rumvægt er $\varrho = 2300$ kg/m³ og betonens varmefylde er $c = 1.09$ kJ/kg·°C.

Der ønskes gennemført en vejledende beregning af væggens afkølingsforløb ved anvendelse af afkølingstallet.

Under de givne forudsætninger med samme temperatur overalt i tværsnittet kan afkølingsforløbet beregnes ud fra formel (24), side 67.

Først betemmes afkølingstallets størrelse ud fra formel (23), side 67. Ved indsætning fås:

$$a=\frac{\Sigma(k\cdot F)}{V\cdot\varrho\cdot c}=\frac{3\cdot 1+3\cdot 1}{1\cdot 0.40\cdot 2300\cdot 1.09}=0.0060\ h^{-1}$$

Med en begyndelsestemperatur $\theta_B = 68$ °C og en lufttemperatur $\theta_L = -2$ °C fås afkølingsforløbet beskrevet ved indsætning i formel (24)

$$\theta(t)=\theta_B+[1-\exp(-at)]\cdot(\theta_L-\theta_B)$$

$$\theta(t)=68+[1-\exp(-0.0060\cdot t)]\cdot[(-2)-68]$$

$$\theta(t)=70\cdot\exp(-0.0060\cdot t)-2\ ^\circ C$$

Ved indsætning af tiden t i timer kan der nu beregnes en tabel over afkølingsforløbet.

t =	0	24	48	72	96	120	144	168	192	216 h
θ =	68	59	50	43	37	32	28	24	20	17 °C

Som det fremgår, er afkølingen af stærkt isolerede betontværsnit en meget langsom proces. Sammenhold eventuelt resultatet med det foranstående eksempel 11, hvor samme tværsnit er vurderet. I dette eksempel bestemtes den nødvendige afkøling i form til 28 °C, hvilket må forventes at tage ca. 6 døgn efter den beregnede tabel.

13. Beregning af transmissionstal for formsystemer

En konstruktion er formsat med en 4 mm stålplade pålimet et 50 mm tykt isoleringslag. Stålets varmeledningstal λ er 209 kJ/m·h·°C, og det benyttede isoleringsmateriale har et varmeledningstal λ på 0.12 kJ/m·h·°C.

Formsystemets transmissionstal k ønskes fastlagt for vindhastighederne 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s og 20 m/s.

Transmissionstallet kan bestemmes ud fra formel (28a), side 68. I denne beregning indgår størrelsen af det konvektive overgangstal α_k, der kan estimeres ud fra formel (29a) og (29b), side 68.

For de anførte vindhastigheder fås følgende værdier for det konvektive overgangstal α_k ud fra (29)

$v = 0$ m/s $\quad \alpha_k \cong 20+14\cdot 0 \quad \alpha_k \cong 20$ kJ/m²·h·°C

$v = 5$ m/s $\quad \alpha_k \cong 20+14\cdot 5 \quad \alpha_k \cong 90$ kJ/m²·h·°C

$v = 10$ m/s $\quad \alpha_k \cong 25.6\cdot 10^{0.78} \quad \alpha_k \cong 154$ kJ/m²·h·°C

$v = 20$ m/s $\quad \alpha_k \cong 25.6\cdot 20^{0.78} \quad \alpha_k \cong 265$ kJ/m²·h·°C

De søgte værdier kan nu bestemmes ved successivt at benytte formel (28a). Det bemærkes, at talstørrelserne skal indsættes i afstemte SI-enheder. Tykkelsen af form og isolering angives derfor i m. For vindhastigheden 0 m/s fås

$$k=[1/\alpha_k+(e/\lambda)_{isol}+(e/\lambda)_{form}]^{-1} \quad \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

$$k=[1/20+(0.050/0.12)+(0.004/209)]^{-1} \quad \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

$$k = 2.1\ \text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

Beregnes på tilsvarende måde transmissionstallet for de øvrige vindhastigheder, fås den søgte tabel for formsystemets transmissionstal

v =	0	5	10	20 m/s
k =	2.1	2.3	2.4	2.4 kJ/m²·h·°C

To karakteristiske forhold bør bemærkes. For det første ses det, at stålformen har en helt negligerbar transmissionsmodstand, idet værdien 0.004/209 kun udgør ca. 0.05 promille af den samlede overgangsmodstand i formsystemet. For det andet ses det af tabellen, at transmissionstallet for det isolerede formsystem er næsten uafhængig af vindhastigheden. Dette beror igen på, at den egentlige transmissionsmodstand, ca. 97 pct. af formsystemets totale transmissionsmodstand, er konstant og ligger i isoleringslaget.

14. Blandingstemperatur for beton

En beton blandes af følgende materialer, der umiddelbart før blandingen har de angivne temperaturer

Cement	325 kg	$\theta = 5$ °C
Sten	1110 kg	$\theta = 5$ °C
Sand	745 kg	$\theta = 5$ °C
Vand	170 kg	$\theta = 35$ °C

Betonens blandetemperatur ønskes beregnet ud fra delmaterialernes vægtmængde, temperatur og varmefylde.

Blandingens temperatur kan beregnes ud fra formel (30a), side 69. Delmaterialernes varmefylder kan aflæses af tabellen, side 69. Indsætning i (30a) giver følgende beregningsmæssig blandetemperatur

$$\theta_B=\frac{325\cdot 0.71\cdot 5+1110\cdot 0.84\cdot 5+745\cdot 0.84\cdot 5+170\cdot 4.19\cdot 35}{325+1110+745+170}$$

$$\cong 14\ ^\circ C$$

Anvendes diagrammetoden i figur 29, side 69, til at skønne blandingens temperatur, benyttes følgende indgangsdata

$\Delta\theta_w = \theta_w - \theta_T = 35 - 5 = 30$ °C
$w = 170$ kg/m^3

Aflæsning i diagrammet, figur 29, giver $\Delta\theta_B = \theta_B - \theta_T \cong 8.5$ °C, således at der skønnes en blandetemperatur $\theta_B \cong \Delta\theta_B + \theta_T = 8.5 + 5 = 13.5$ °C $\cong 14$ °C. De to metoder giver således rimeligt overensstemmende talværdier.

15. Behandling af resultater fra temperaturmåling

I forbindelse med byggepladskontrol af et hærdeforløb er der udført temperaturmåling i overfladen og i midten af en 0.96 m tyk kajmur. Under hærdningen har kajmuren været formsat i træforskalling, og afkølingsforholdene har været ens på begge sider af muren. Lufttemperaturen har konstant været ca. -5 °C. De optagne måleresultater er angivet i følgende tabel.

τ =	0	6	12	18	24	36	48	72	96	timer efter støbning
θ_m =	12	12	17	25	31	38	38	33	27	°C midte
θ_r =	12	9	11	16	21	25	25	21	17	°C rand
θ_L =	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	°C luft

Der er benyttet en betonsammensætning, der kan anses for at være frostsikker ved en modenhed på ca. 15 timer. Afforskalling af kajmuren tillades, når modenheden i tværsnittet er større end eller lig med 42 timer.

Ud fra de foreliggende temperaturmålinger ønskes følgende forhold vurderet:
a) På hvilket tidspunkt har tværsnittet opnået en frostsikker tilstand?
b) Hvornår har afformningen tidligst kunnet finde sted?
c) Hvilken værdi har Biottallet Bi haft i hærdeperioden?
d) Hvilket transmissionstal har det benyttede formsystem haft under de herskende vindforhold?
e) Hvor store temperaturdifferenser måtte der forventes over tværsnittet, såfremt afformningen gennemføres tidligst muligt uden brug af efterisoleringsforanstaltninger?
f) Hvilket transmissionstal bør sikres gennem efterisolering, såfremt afformningen gennemføres tidligst muligt?
g) Hvilken praktisk foranstaltning kunne foreskrives for at opnå den ønskede beskyttelse af betonen?

Det bemærkes først, at både kravet til frostsikkerhed og kravet til modenhed ved afformning er minimumskrav. Det vil derfor være tilstrækkeligt at beregne betonens modenhedsudvikling i kajmurens overflade, hvor temperaturen er lavest.

Ved beregning af modenhedsudviklingen benyttes hastighedsfaktoren $H(\theta)$, der angiver den relative hærdehastighed i forhold til hastigheden ved 20 °C. Hastighedsfaktoren kan enten aflæses i introduktionens tabel 3, side 12, eller bestemmes af diagrammet i figur 11, side 55. Ved brug af programmerbar lommeregner kan hastighedsfaktoren dog med fordel bestemmes direkte ud fra det analytiske udtryk for $H(\theta)$ angivet side 55.

Ved beregning fås fx ved brug af hastighedsfaktoren fra tabel 3 følgende resultat:

τ =	0	6	12	18	24	36	48	72	96 h
θ_r =	12	9	11	16	21	25	25	21	17 °C
$\bar{\theta}$ =	11	10	14	19	23	25	23	19	°C
$H(\theta)$ =	0.54	0.50	0.70	0.95	1.1	1.3	1.1	0.95	-
$\Delta\tau$ =	6	6	6	6	12	12	24	24	h
ΔM =	3.2	3.0	4.2	5.7	13.2	15.6	26.4	22.8	h

M =	0	3.2	6.2	10.4	16.1	29.3	44.2	71.3	94.1 h
τ =	0	6	12	18	24	36	48	72	96 h

Fremgangsmåden ved beregning af modenhedsudviklingen svarer til det gennemregnede eksempel i introduktionen.

Af resultatet fremgår det, at betonen i kajmurens overflade kan forventes at være frostsikker efter ca. 24 timers hærdning. Afformningskravet på minimum 42 modenhedstimer kan forventes opnået efter ca. 48 timers hærdning.

Af måleresultaterne fremgår det, at de største temperaturdifferenser i kajmuren

$\theta_m - \theta_r \cong 38 - 25 = 13$ °C

har optrådt på det tidspunkt, hvor temperaturforskellen mellem midte og luft har antaget sin største værdi

$\theta_m - \theta_L \cong 38 - (-5) = 43$ °C

Med et tilnærmet fuldt udviklet temperaturprofil vil det da gælde, at

$$\frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_m - \theta_L} \cong \frac{13}{43} \cong \frac{Bi}{Bi+2}$$

hvoraf størrelsen af Biottallet under hærdningen bestemmes til

$Bi \cong 0.9$

Ansættes varmeledningstallet λ for den hærdnende beton til 8 kJ/m·h·°C, kan transmissionstallet k under hærdningen estimeres som følger

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} \cong \frac{k \cdot 0.48}{8} = 0.06\, k$$

$0.06 \cdot k \cong 0.9$
$k \cong 15$ kJ/m^2·h·°C

Det må således forventes, at Biottallet har været ca. 0.9 og transmissionstallet k ca. 15 kJ/m^2·h·°C under kajmurens hærdning.

Skønnes en vindhastighed på ca. 5 m/s ved afformning, vil transmissionstallet k for den frie overflade, jvf. formel 29a, side 68, være

$k \cong 20 + 14 \cdot 5 = 90$ kJ/m^2·h·°C

svarende til at Biottallet Bi for fri overflade er

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} \cong \frac{90 \cdot 0.48}{8} = 5.4$$

Den maksimale temperaturdifferens, der vil opstå ved afformning uden efterbeskyttelse, kan da skønnes ud fra overslagsformel (19), side 65.

$$\theta_m - \theta_r \cong (\theta_m - \theta_L) \cdot \frac{Bi}{Bi+2} \cong (38 - (-5)) \cdot \frac{5.4}{5.4+2} = 31 \text{ °C}$$

Det største transmissionstal, der bør tillades efter afformning ved maksimal betontemperatur, kan bestemmes ud fra formel 21, side 65. Indsætning giver

$$k \leq \frac{2 \cdot 20}{38-(-5)-20} \cdot \frac{8}{0.48} \cong 29 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot °\text{C}$$

Sammenholdes dette krav med diagrammet over transmissionstal figur 27, side 68, fremgår det at afdækning med presenning eller folie på strøer vil sikre afkøling med $\theta_m - \theta_r <$ ca. 20 °C.

Af beregningerne fremgår det, at tidlig afformning uden samtidige efterisoleringsforanstaltninger formentlig vil medføre, at de største temperaturdifferenser bliver ca. 31 °C. For at reducere de største temperaturdifferenser til ca. 20 °C er det nødvendigt at efterisolere til et transmissionstal $k \leq$ ca. 29 kJ/m$^2 \cdot h \cdot$ °C. Denne efterisolering kan praktisk gennemføres ved tildækning med fx presenninger på strøer. Denne tildækning bør etableres umiddelbart efter afformningen.

Symbolliste

a	Afkølingstal, enhed »pr. time«, [h^{-1}]. Afkølingstallet er et mål for, hvor hurtigt en temperaturforskel mellem konstruktion og omgivelser udlignes. $a = \Sigma\ (k \cdot F)/(V \cdot \varrho \cdot c)$.
Bi	Biottal, dimensionsløs. Biottallet angiver forholdet mellem varmeledningsmodstanden inde i et tværsnit og varmeovergangsmodstanden til omgivelserne. Biottallet er en vigtig parameter for beskrivelsen af temperaturfordelinger i tværsnit. $Bi = (k \cdot \delta)/\lambda$.
c	Varmefylde eller specifik varme, enhed [kJ/kg · °C]. Varmefylden c er et mål for, hvor stor en energimængde der medgår til at opvarme 1 kg af et stof 1 °C. Varmefylden er en materialekonstant.
c_d	Varmefylde af et delmateriale d, enhed [kJ/kg · °C].
c_w	Varmefylde af vand, ca. 4.2 kJ/kg · °C.
c_{wi}	Varmefylde af is, ca. 2 kJ/kg · °C.
C	Cementindhold, enhed [kg/m³].
D	Dekrementfaktor, dimensionsløs. Dekrementfaktorer benyttes ved beregning af temperaturforløb i hærdnende betonkonstruktioner. $D_2 = \exp(-a \cdot \Delta t)$ angiver henfaldet af en temperaturforskel i løbet af tiden Δt. $D_1 = (1 - D_2)/(a \cdot \Delta t)$ angiver henfaldet af en lineær temperaturtilvækst over Δt.
$\exp(x)$.	Eksponentialfunktionen af x. Skrives også e^x.
e	Lagtykkelse af delmateriale i form og isolering, enhed [m].
e	Grundtal for den naturlige logaritme, $e = 2.718$.
E	Aktiveringsenergi, enhed [J/mol]. Aktiveringsenergien E er et mål for temperaturens indflydelse på hastigheden af kemiske reaktioner. Jo større aktiveringsenergi en kemisk reaktion har, desto mere øges hastigheden for en given temperaturstigning. Bemærk, at aktiveringsenergien *ikke* er et mål for, hvor hurtigt en reaktion forløber, men alene for, hvor stor indflydelse temperaturen har på reaktionshastigheden.
F	Areal, enhed [m²].
Fo	Fouriertal, dimensionsløs. Fouriertallet Fo er en generaliseret tidsvariabel, der benyttes ved beskrivelse af systemers opvarmnings- og afkølingsforløb. $Fo = (\lambda \cdot t)/(\varrho \cdot c \cdot \delta^2)$.
H	Hastighedsfaktor, dimensionsløs. Hastighedsfaktoren H er en funktion af temperaturen θ, og angiver hærdeprocessens hastighed i forhold til hastigheden ved 20 °C. Hastighedsfaktoren H benyttes ved beregning af betoners modenhedsudvikling. $H = \exp\ [(E/R)/(1/293 - 1/(273 + \theta))]$.
i	Elektrisk strømstyrke, enhed [A].
$J_0(x)$ ..	Besselfunktion af 0'te orden.
$J_1(x)$ ..	Besselfunktion af første orden.
k	Transmissionstal, enhed [kJ/m² · h · °C]. Transmissionstallet k er et mål for den varmeoverføring, der kan ske mellem konstruktion og omgivelser. Jo større transmissionstallet k er, desto større vil varmeoverførslen være for en given temperaturforskel. $k = (m_{form} + m_{isol} + 1/\alpha_k)^{-1}$.
K	Permeabilitetskoefficient; enhed afhænger af det benyttede drivende potentiale. K er et mål for vandgennemtrængelighed.
$\ln(x)$ ..	Naturlig logaritme af x.
m	Varmeledningsmodstand, enhed [m² · h · °C/kJ] .
m_{form} .	Varmeledningsmodstand i en form, enhed [m² · h · °C/kJ]. $m_{form} = (e_{form}/\lambda_{form})$.
m_i	Indre varmeledningsmodstand i et betontværsnit, enhed [m² · h · °C/kJ]. $m_i = \delta/\lambda$.
m_{isol} ..	Varmeledningsmodstand i et isoleringslag, enhed [m² · h · °C/kJ]. $m_{isol} = (e_{isol}/\lambda_{isol})$.
m_r	Varmeovergangsmodstand på rand, enhed [m² · h · °C/kJ]. $m_r = 1/k$.
M	Modenhed, enhed timer [h]. Angiver den hærdetid ved 20 °C, der ville give samme hærdningsgrad.
p	Udgangsporøsitet af en cementpasta, dimensionsløs. Størrelsen p angiver den volumenandel af udgangsblandingen, der består af vand + eventuel luft.
Q	Varmemængde, enhed [kJ].
Q	Specifik varmeudvikling for cement, enhed [kJ/kg].
Q_∞ ...	Specifik varmeudvikling for cement for $M \rightarrow \infty$, enhed [kJ/kg]. Q_∞ er en beregningsparameter i den egenskabsudviklingsmodel, der beskriver varmeudviklingen som funktion af modenheden. $Q = Q_\infty \cdot \exp\ (-(\tau_e/M)^\alpha)$.
r	Radius, enhed [m].
R	Gaskonstanten, enhed [J/mol · °K]. Gaskonstantens værdi: $R \cong 8.314$ J/mol · °K.
R	Radius af cylindrisk tværsnit, enhed [m].
R_i	Temperaturresponse, enhed [°C].
s_{wi}	Smeltevarme for is, enhed [kJ/kg].
S	Vandmætningsgrad, dimensionsløs. Vandmætningsgraden S angiver volumenindholdet V_w af fordampeligt vand i forhold til det totale porevolumen V_p. Vandmætningsgraden er en beregningsparameter, der benyttes ved bedømmelse af betoners frostsikkerhed. $S = V_w/V_p$.
S_{krit} ..	Kritisk vandmætningsgrad, dimensionsløs. S_{krit} angiver den vandmætningsgrad, der netop er nødvendig for at fremkalde beskadigelse af betonen ved frysning.
t	Tid, enhed [h] eller [s].
T	Temperaturpotentiale, enhed [°C]. Temperaturpotentialet T benyttes ved beregning af temperaturforløb efter dekrementmetoden.

U	Elektrisk spændingsforskel, enhed [V].
v	Vindhastighed, enhed [m/s].
v_k	Volumenandel kapillarvand i en cementpasta, dimensionsløs.
v_p	Volumenandel luftfyldte porer i en cementpasta, dimensionsløs.
v/c ...	Vægtforholdet mellem vand og cement i en cementpasta, vand/cement-forholdet, dimensionsløs.
V	Volumen, enhed [m³].
V_p	Totalt porevolumen, enhed [m³].
V_w	Volumen af fordampeligt vand, enhed [m³].
w	Vægtmængde vand, enhed [kg/m³].
w_d	Vægtmængde delmateriale, enhed [kg].
x	Stedkoordinat, enhed [m].

α	Hærdningsgrad, hydratiseringsgrad, dimensionsløs. Hærdningsgraden α angiver, hvor stor en del af den oprindelige cementmængde der er omdannet ved reaktion med vand.
α	Krumningsparameter. Konstant der indgår i beregningsudtryk for egenskabsudvikling af hærdnende beton. Konstanten α fastlægger formen af det S-formede forløb, der er karakteristisk for egenskabsudviklingen. Værdien af α bestemmes eksperimentelt.
α_k	Konvektivt overgangstal, enhed [kJ/m² · h · °C].
δ	Karakteristisk dimension af konstruktionstværsnit, enhed [m]. Den karakteristiske dimension δ benyttes ved beregning af temperaturforløb i simple tværsnit. For en plan, udstrakt væg er δ den halve tykkelse. For et cylindrisk tværsnit er δ lig med tværsnittets radius.
Δ	betegner »tilvækst i« eller »forskel af«, fx Δt = tilvækst i tid, tidinterval.
$\Delta\theta_i$ ...	Temperaturforskel i tværsnit, enhed [°C]. $\Delta\theta_i = \theta_m - \theta_r$.
$\Delta\theta_r$ ...	Temperaturforskel mellem rand og omgivelser, enhed [°C]. $\Delta\theta_r = \theta_r - \theta_L$.
θ	Temperatur, enhed [°C].
$\bar{\theta}$	Middeltemperatur, enhed [°C].
$\dot{\theta}$	Temperaturændring pr. tidsenhed, $d\theta/dt$, enhed [°C/h].
θ_a	Temperatur ved afformning, enhed [°C].
θ_B	Betonens udstøbningstemperatur, enhed [°C].
θ_L	Lufttemperatur, enhed [°C].
θ_m	Temperatur i midte af simpelt tværsnit, enhed [°C].
$\theta_{m.0}$ ..	Temperatur i midte af simpelt tværsnit til $t = 0$, enhed [°C].
θ_r	Randtemperatur, dvs. temperatur i overfladen, enhed [°C].
θ_T	Temperatur af tilslag, enhed [°C].
θ_w	Temperatur af blandevand, enhed [°C].
λ	Varmeledningstal, enhed [kJ/m · h · °C]. Varmeledningstallet λ er en materialeparameter.
μ_n	n'te egenværdi i ligningen $\mu/Bi = \cot(\mu)$.
ϱ	Betonens massefylde (densitet), enhed [kg/m³].
σ	Betonstyrke, enhed [MPa].
σ_∞	Betonstyrke for $M \to \infty$, enhed [MPa]. σ_∞ er en beregningsparameter i den egenskabsudviklingsmodel, der beskriver betonstyrken som funktion af modenheden. $\sigma = \sigma_\infty \cdot \exp[-(\tau_e/M)^\alpha]$.
τ	Tid, enhed [h].
τ_e	Tidskonstant, enhed [h]. Tidskonstanten τ_e indgår i beregningsmodellen for egenskabsudvikling. τ_e angiver det antal timer der forløber, inden egenskaben har opnået ca. 37 pct. ($= 1/e$) af slutværdien for $M \to \infty$.
ϕ	Relativ temperatur, dimensionsløs. $\phi = (\theta_m - \theta_L)/(\theta_{m.0} - \theta_L)$.
Ψ	Relativ temperaturdifferens, dimensionsløs. $\Psi = (\theta_m - \theta_r)/(\theta_{m.0} - \theta_L)$.

Leksikale stikord

Accelerator (af latinsk *accelerare* ile). Et tilsætningsstof til beton, der fremskynder hærdningen. Tilsætningsstoffer med accelererende virkning benyttes i begrænset omfang ved vinterstøbningsopgaver for at opnå en hurtigere hærdning og dermed tidligere frostsikkerhed. Mest benyttet er stoffet Calciumclorid, $CaCl_2$. Tilsætningen af Calciumclorid til beton kan øge risikoen for armeringskorrosion.

Adiabatisk kalorimetri (fra græsk *adiabatos* uigennemtrængelig og latinsk *calor* varme). Målemetode til bestemmelse af betoners varmeudviklingsegenskaber under hærdningen. Ved adiabatisk kalorimetri hærdner en betonprøve uden varmetab til omgivelserne. Den udviklede hærdevarme omsættes derved til en temperaturstigning i prøven. Måles denne temperaturstigning, kan den dermed ækvivalente varmemængde beregnes, såfremt betonens varmefylde kendes. Den adiabatiske betingelse opnås ved at isolere prøven i et lukket rum, hvor lufttemperaturen fastholdes på samme værdi som betonens temperatur. Herved elimineres varmetabet fra den hærdnende prøve.

Adiabatisk varmeudvikling. Hærdner beton under adiabatiske betingelser, dvs. uden varmeudveksling med omgivelserne, vil den udviklede hærdevarme omsættes til en temperaturstigning i betonen. Da hærdeprocessens hastighed øges med stigende temperatur, vil adiabatiske procesforløb derfor være selvaccelererende med hurtig varmeudvikling og temperaturstigning. Med passende kontrollerede udgangsbetingelser kan dette forhold udnyttes til styring af hærdeprocessens forløb.

Afformningsstyrke. Betegner den krævede betonstyrke på afformningstidspunktet. Under hærdningen vil temperaturen i en konstruktion kun undtagelsesvis være den samme overalt i konstruktionen. Det kan derfor være nødvendigt at specificere styrkekravet som et minimumskrav for hele konstruktionen eller for særligt belastede områder i konstruktionen. Afformningsstyrken kan bestemmes direkte ved måling på betonen, eller indirekte gennem kontrol af betonens modenhedsudvikling.

Afkølingstal, enhed [h^{-1}]. En beregningsstørrelse der angiver, hvor stor en del af en temperaturforskel, der udlignes pr. tidsenhed ved konvektiv afkøling af et tværsnit. Afkølingstallet $a = \Sigma(k \cdot F)/(V \cdot \varrho \cdot c)$, hvor $\Sigma(k \cdot F)$ angiver transmissionstabet pr. tidsenhed for en temperaturforskel på 1 °C, og $V \cdot \varrho \cdot c$ angiver varmekapaciteten, dvs. den varmemængde der skal tilføres eller fjernes for at ændre temperaturen 1 °C. Forudsætningen for beregning af temperaturforløb ud fra afkølingstallet a er bl.a., at der er en ensfordelt temperatur i det afkølede tværsnit. Dette svarer til et lavt Biottal for tværsnittet.

Aktiveringsenergi. En beregningsstørrelse der angiver temperaturens indflydelse på kemiske reaktioners hastighed. Jo større aktiveringsenergien er for en kemisk reaktion, desto mere øges hastigheden ved en given temperaturstigning. Aktiveringsenergien er således ikke et mål for, hvor hurtigt en reaktion forløber, men alene et mål for hastighedens ændring med temperaturen. Aktiveringsenergien E har enheden [J/mol].

Biottal. Et dimensionsløst klassificeringstal der angiver forholdet mellem den indre varmeledningsmodstand og den konvektive overgangsmodstand i et system. Biottallet $Bi = k \cdot \delta/\lambda$, hvor k angiver transmissionstallet, δ den karakteristiske dimension og λ varmeledningstallet. Biottallet, der er opkaldt efter den franske fysiker Biot, er en fundamental parameter for beskrivelsen af konvektive varmebalancefænomener.

Bleeding (af engelsk *bleed* bløde). Betegnelse for det separationsfænomen, hvor en frisk beton udskiller vand på overfladen.

Bolomeys formel. En empirisk relation mellem betoners styrke og det benyttede vand/cement-forhold i betonblandingen. Relationen er opstillet af den schweiziske ingeniør J. Bolomey i 1926, og har formen: $\sigma = k_1 \cdot [1/(v/c) - k_2]$, hvor k_1 og k_2 er konstanter. I en modificeret form, Bolomeys udvidede formel, fremsat af civilingeniør Ervin Poulsen i 1954, tages der hensyn til luftindblanding i betonen. I Bolomeys udvidede formel: $\sigma = 0.9 \cdot k_1 \cdot [C/(v+1) - 0.5 \cdot k_2]$ indgår cementmængden i kg, og vand- og luftmængden i liter. Konstanten k_2 ansættes normalt til værdien 0.5.

Cementgel (fra latinsk *gelare* fryse). Betegnelsen gel benyttes almindeligt om en stivnet, elastisk, kolloid masse. Med cementgel betegnes det kolloide system, der fremkommer ved udfældning af calcium-silikat hydrater under cementens hydratisering. De udfældede hydrater har form af nåle- og pladeformede partikler af kolloid dimension. Som følge heraf har de dannede hydrater en meget stor overflade pr. vægtenhed. Ved målinger har man fundet, at cementgelen har en overflade på ca. 200.000 m^2 pr. kg. Det er bl.a. denne store frie overflade i cementgelen, der er årsagen til krybnings- og svindfænomener.

Cementpasta. Blanding af cement og vand. I beton og cementmørtler tjener cementpastaen som den udfyldende og styrkegivende kitmasse mellem tilslaget. I daglig tale benyttet begrebet undertiden om såvel den friske, pastaagtige blanding, som om den faste, hærdnede cementpasta.

Ekstrapolation (af latinsk *extra* udenfor, *polire* glatte, polere). Matematisk metode til bestemmelse af ubekendte funktionsværdier, der ligger uden for en serie funktionsværdier, der er kendte. Kendes en betons trykstyrke fx til terminerne 3, 7, 14 og 28 døgn, kan man ved ekstrapolation bestemme den forventelige trykstyrke ved 30 døgn. Ekstrapo-

lation kan udføres ved forskellige grafiske eller analytiske metoder.

Empirisk (af græsk *empeiria* erfaring). En erfaringsbetinget viden. Udtrykket benyttes hyppigt om matematiske udtryk, der angiver eksperimentelt bestemte sammenhæng mellem de indgående størrelser. Som eksempel kan anføres Bolomey's formel, der empirisk beskriver sammenhængen mellem vand/cement-forholdet og den opnåede styrke for en beton.

Enkeltlogaritmisk afbildning. En todimensional grafisk afbildning, hvor den ene koordinatakse har lineær inddeling, og den anden koordinatakse har logaritmisk inddeling. Enkeltlogaritmiske afbildninger er egnede til afbildning af eksponentielle funktioner, idet disse ved passende aksevalg kan beskrives ved et ret linie.

Fouriertal. En generaliseret, dimensionsløs parameter der benyttes ved beskrivelsen af det tidsmæssige forløb af temperaturændringer i et system. Fouriertallet $Fo = (\lambda \cdot \tau)/(\varrho \cdot c \cdot \delta^2)$ angiver forholdet mellem tiden τ og systemets tidskonstant $(\varrho \cdot c \cdot \delta^2)/\lambda$.

Frostbestandig. Angiver den blivende egenskab ved en beton, at den under givne brugsbetingelser bevares intakt uden frostbeskadigelser. Frostbestandigheden er således betinget af et givet samspil mellem betonens struktur, og de fugt- og frostpåvirkninger den udsættes for i bygværket.

Frostfarlig. Betegnelse for en jordart der hæver under frysning som følge af islinsedannelse. Forudsætningerne for dannelse og vækst af islinser er, dels at der kan føres vand til frysezonen ved kapillarsugning, dels at vandet kan tilføres med en rimelig hastighed. Det første forhold er betinget af, at der er tale om en finkornet jordart med stor kapillær stigehøjde. Det andet forhold er betinget af, at jordarten har en rimelig permeabilitet, dvs. at jordarten ikke er for finkornet. Som følge heraf vil frostfarlige jordarter typisk have kornstørrelser i området 0.002 til 0.2 mm.

Frosthævning. Benævnelse for de hævninger af jordoverfladen der fremkommer ved islinsedannelse i frostfarlige jordarter. Fænomenet forekommer i visse jordarter med karakteristiske permeabilitets- og kapillaritetsegenskaber. Forudsætningen for dannelse af islinser, og dermed for frosthævning, er, at vand fra dybereliggende jordlag kan opsuges til frysezonen ved kapillarvirkning med en rimelig hastighed.

Frostsikker. Angiver den øjeblikkelige egenskab ved en beton, at den kan fryse uden at beskadiges. Frostsikkerheden er bestemt af betonens øjeblikkelige hærdningsgrad, porestruktur og vandmætningsgrad. Frostsikkerhed er således ikke en blivende egenskab ved en beton, men en tilstand der kan ændres, fx ved befugtning til kritisk vandmætning.

Gaskonstant. Proportionalitetskonstant der benyttes ved beskrivelse af tilstandsændringer i ideale luftarter. For ét grammol af en ideal luftart gælder det, at produktet af volumen (v) og tryk (p) divideret med den absolutte temperatur T er lig med den såkaldte gaskonstant R, dvs. $(p \cdot v)/T = R$. Den absolutte temperatur T i grader Kelvin svarer til temperaturen i °C + 273. Gaskonstanten R har værdien 8.314 J/mol · °Kelvin.

Hastighedsfaktor. En beregningsstørrelse der angiver den relative hastighed af en hærdeproces i forhold til hærdehastigheden ved 20 °C. Benyttes ved beregning af modenhedsudviklingen i en beton, der hærdner ved en temperatur forskellig fra 20 °C. Tilvæksten i modenhed bestemmes som produktet af hastighedsfaktorens værdi ved den aktuelle temperatur og det betragtede tidsintervals længde. Hastighedsfaktoren $H(\theta)$ er dimensionsløs.

Hydrat. Betegnelse for en kemisk forbindelse af vand og et andet stof. Ved kemiske reaktioner mellem cement og vand dannes der en række hydrater, der udfældes som det styrkegivende bindemiddel i den hærdnede cementpasta. Denne proces, hvorunder der dannes hydrater, kaldes hydratisering.

Hydraulisk tryk. Betegner almindeligt et af vand fremkaldt tryk. Ifølge Powers vil der ved frysning af vand i hærdnet beton dannes is i poresystemet, men betonens trækstyrke vil forhindre dannelsen af islinser. Vandets ekspansion ved omdannelse til is vil derfor medføre, at vandet presses ind i betonen i samme retning som frostfronten trænger frem. Da hærdnet beton har en meget lav permeabilitet, kan der herved opstå et betydeligt hydraulisk tryk i porevandet. Dette tryk kan ifølge Powers fremkalde revner i betonen, såfremt betonen ikke indeholder et passende system af fintfordelte luftporer, hvor det hydrauliske tryk kan udlignes.

Hærdevarme. Betegnelse for den varme der frigøres under de kemiske reaktioner mellem cement og vand under hærdningen. Hærdevarmens størrelse vil i nogen grad afhænge af cementens kemiske sammensætning. Cementer med højt indhold af klinkermineralerne C_3S og C_3A har en relativ stor varmeudvikling under hærdningen. Cementer med højt indhold af klinkermineralerne C_2S og C_4AF har en relativ lav varmeudvikling under hærdningen. Dette sidste forhold udnyttes ved fremstilling af de såkaldte lavvarmecementer. For en typisk portlandcement udvikles der 350–400 kJ/kg cement under hærdningen.

Hærdning. Den proces, hvorunder frisk beton, cementmørtel eller cementpasta størkner og opnår mekanisk styrke og stivhed. Hærdningen sker som følge af kemiske reaktioner mellem cement og vand. Ved disse reaktioner udfældes et stift skelet af calcium-silikat hydrater, den såkaldte cementgel, der sammenkitter det benyttede tilslag.

Hærdningsgrad. Et udtryk for, hvor stor en del af den oprindelige cementmængde der til et givet tidspunkt har reageret med vand. Hærdningsgraden α er således 0 for en udgangsblanding af cement og vand, og den er 1 for en fuldstændigt hydratiseret cement. Som et mål for hærdningsgraden benyttes i praksis størrelser som: mængden af kemisk bundet vand, udviklet hærdevarme eller opnået styrke.

Ikke-fordampeligt vand. Betegnelse for det vandindhold i en cementpasta, der ikke kan fordampes under visse specificerede udtørringsbetingelser, fx udtørring ved 105 °C. Ved passende valg af udtørringsbetingelser fås derved et mål for indholdet af kemisk bundet vand.

In situ (af latinsk *in* på + *situs* beliggenhed). Betegnelsen in situ angiver, at arbejdet udføres på stedet, fx støbning af en betonkonstruktion.

Interpolation (af latinsk *inter* imellem + *polare* glatte, polere). Matematisk metode til bestemmelse af ubekendte funktionsværdier ud fra omkringliggende kendte værdier. Kendes en betons trykstyrke fx til terminerne 1 døgn og 3 døgn, kan man ved interpolation bestemme den forventelige trykstyrke ved 2 døgn. Interpolation kan udføres ved forskellige grafiske eller analytiske metoder.

Islinse. Betegnelse for flade, linseformede massive isdannelser, der kan opstå ved frysning af visse jordarter. Islinserne vil normalt dannes i frysezonen noget under jordoverfladen. Dannelse af islinser medfører frosthævning af den overliggende jord. Islinser opstår især ved frysning af jordarter, hvor der ved kapillær stigning til stadighed kan føres vand frem til frysezonen fra de dybereliggende jordlag. Disse jordarter kaldes frostfarlige.

Isoterm kalorimetri (fra græsk *isos* samme, ens og latinsk *calor* varme). Målemetode til bestemmelse af hærdnende cementers varmeudviklingsegenskaber ved konstant hærdetemperatur. Ved isoterm kalorimetri måles varmestrømmen fra prøve til omgivelser, og den udviklede varmemængde beregnes ved integration over tiden. For at sikre en konstant og ensartet temperaturfordeling i de undersøgte prøveemner må disse være ret små. Isoterm kalorimetri finder derfor hyppigst anvendelse med måling på prøver af cementpasta.

Kalorimeter (af latinsk *calor* varme). Apparat til måling af varmemængder. Måling af cementens varmeudvikling under hydratiseringen kan udføres ved adiabatisk eller ved isoterm kalorimetri. I førstnævnte tilfælde udføres målingen på en prøve, der ikke udveksler varme med omgivelserne, og den udviklede varmemængde beregnes på grundlag af den målte temperaturstigning. Ved isoterm kalorimetri holdes prøvens temperatur konstant, og varmestrømmen fra prøve til omgivelser måles.

Kapillaritet (af latinsk *capillus* hår). Betegnelse for den hårrørsvirkning, hvorved væsker kan opsuges i finporøse stoffer. Kapillariteten er dels bestemt af porernes størrelse dels af væskens overfladespænding og befugtningsegenskaber over for det faste stof. Den kapillære stighøjde angiver den maksimale opsugningshøjde.

Kemisk bundet vand. Betegnelse for vand, der efter reaktion med cementen indgår i de dannede kemiske forbindelser, kaldet hydrater. Det kemisk bundne vand i hydrater har egenskaber, der afviger betydeligt fra det frie vands egenskaber. Calcium-silikat hydrat, der er bindemidlet i hærdnet portlandcement, afgiver således først det kemisk bundne hydratvand ved opvarmning til temperaturer fra 100–500 °C. Mængden af kemisk bundet vand i en cementpasta benyttes undertiden som et mål for den opnåede hærdningsgrad.

Klimadata. Betegnelse for gennemsnitlige vejrtilstande over en periode. Her i landet udarbejdes klimadata sædvanligvis på grundlag af vejrobservationer over 30 års perioder.

Klinkermineraler. Fællesbetegnelse for de reaktive hovedkomponenter i portlandcement. Ved brændingen af ler- og kalkholdige udgangsmaterialer, dannes der under sintring ved ca. 1500 °C en række mineralske forbindelser mellem kalcium Ca, silicium Si, aluminium Al og jern Fe. Sintringen, dvs. den delvise smeltning, bevirker samtidig, at materialerne danner karakteristiske runde klinker. Betegnelsen klinkermineraler benyttes hyppigst om de fire vigtigste mineralforbindelser der dannes under sintringen: Tricalciumsilikat $(CaO)_3(SiO_2)$, dicalciumsilikat $(CaO)_2(SiO_2)$, tricalciumaluminat $(CaO)_3(Al_2O_3)$ og tetracalciumaluminoferrit $(CaO)_4(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$. Disse betegnelser forkortes ofte til: C_3S, C_2S, C_3A og C_4AF.

Kondensation. Fortætning af luftart til væskeform. Fænomenet er mest kendt fra kondensation af vanddampe i luften som tåge eller på faste overflader som dug. I forbindelse med kondensationen frigøres der en varmemængde, svarende til stoffets fordampningsvarme. Ved kondensation af 1 kg vanddamp frigøres således ca. 2500 kJ. Kondensationsprocessen er derfor forbundet med en betydelig varmetoning. Dette forhold udnyttes bl.a. i forbindelse med damphærdning af beton, og til opvarmning af beton under blandingen.

Kontaktstyrke. Betegnelse for vedhængsstyrken mellem betonens faste tilslag og den omgivende mørtel eller cementpasta. Kontaktstyrken kan i visse tilfælde have afgørende betydning for betonens styrkeegenskaber. Kontaktstyrken afhænger bl.a. af det benyttede tilslags art og overfladetextur. I betoner med uhensigtsmæssig sammensætning kan der optræde lokale bleedingsfænomener omkring tilslaget, hvorved kontaktstyrken bliver stærkt forringet. En lav kontaktstyrke vil oftest medføre, at brudrevner i en beton fortrinsvis følger overfladen af større tilslagspartikler.

Kontrolleret nedkøling. Et nedkølingsforløb for et hærdnende betontværsnit, hvorunder temperaturspændingerne i betonen begrænses til et ukritisk niveau gennem passende isoleringsforanstaltninger.

Konvektion (af latinsk *convetrere* føre sammen). En varmeoverførsel der er knyttet til bevægelse af stof, hvorved der sker en opblanding af stof med forskellige temperaturer. Varmeudveksling ved konvektion er knyttet til væsker og luftarter. Er der tale om konvektion fremkaldt af en temperaturbetinget forskel i massefylde, benævnes fænomenet *naturlig konvektion.* I modsat fald taler man om *tvungen konvektion,* fx ved en overflade der udveksler varme med en forbistrømmende luftmasse.

Kornkurve. En kurve der angiver en kornhobs, sædvanligvis et tilslagsmateriales, sammensætning mht. kornstørrelse.

Fordelingen af kornstørrelser bestemmes normalt ved sigtning gennem en række sigter med successivt aftagende lysvidde. Kornkurven angiver da gennemfaldet i vægtprocent som funktion af kornstørrelse. Kornstørrelser afsættes normalt på en logaritmisk akse, fordi kurveforløbet i området med fine korn ellers bliver meget stejlt for de tilstræbte kornfordelinger.

Kvalitativ (af latin *qualitas* beskaffenhed). Benyttes bl.a. om matematiske udtryk, der angiver naturen eller beskaffenheden af relationer mellem størrelser, uden at disse kan tilskrives talværdier (kvantificeres).

Leveringstemperatur. Betegner betonens temperatur ved levering fra betonværk. Leveringstemperaturen vil, specielt under vinterforhold, sjældent svare til den temperatur betonen har efter udstøbningens afslutning. Som led i kontrollen af betonens hærdning, bør betontemperaturen derfor altid måles efter udstøbning. Det er den herved bestemte udstøbningstemperatur θ_B der refererer til anvisningens hærdediagram-system.

Lukket system. Betegner at en beton eller en cementpasta hærdner uden udveksling af vand med omgivelserne. Denne forudsætning vil tilnærmet være opfyldt for betoner i det indre af massive konstruktioner, samt for beton der udstøbes i vandtætte forme af fx stål.

Maturity (engelsk *modenhed*). Hyppigt benyttet udtryk for en betons modenhedstilstand, dvs. den ækvivalente hærdetid ved 20 °C. Se *Modenhed.*

Modenhed. En betons modenhed M angiver den nødvendige hærdetid ved 20 °C for opnåelse af samme hærdningsgrad, fx udtrykt som betonstyrke. Enhed for modenhed er [h]. Modenhedsbegrebet er grundlaget for beskrivelsen af hærdeprocesser, der forløber under varierede tid-temperaturbetingelser, idet det muliggør reference til egenskabsudviklinger målt ved konstant temperatur under laboratoriebetingelser. I daglig tale benyttes hyppigt den tilsvarende engelske betegnelse *maturity* for modenhed.

Naturligt luftindhold. Betegnelse for det luftindhold der naturligt opstår i en beton under blandeprocessen, når der ikke er tilsat luftindblandende tilsætningsstoffer. Det naturlige luftindhold vil typisk udgøre ½–2 volumenprocent af betonen, lavest i betoner med blød konsistens og højest i stive betoner.

Opløsningskalorimetri. Metode til bestemmelse af varmeudviklingsdata for hærdnende cementpasta. Ved opløsningskalorimetri bestemmes opløsningsvarmen for en hærdnet cementpasta, idet prøven opløses i en egnet syre. Bestemmes dernæst opløsningsvarmen for samme mængde uhydratiseret cement, vil forskellen mellem de målte varmemængder netop være et mål for den udviklede hærdevarme i prøven.

Permeabilitet (af latinsk *permeare* trænge igennem). Betegnelse for et stofs gennemtrængelighed, fx et porøst stofs gennemtrængelighed for væsker eller gasser.

Påfuglespor. Populær betegnelse for de karakteristiske aftryk af nåleformede isdannelser, der hyppigt ses i jord eller frisk beton, der har været udsat for frysning. Under visse forudsætninger kan sådanne isdannelser udvikles til egentlige islinser.

Referencekurve. Betegnelse for en kurve, der angiver egenskabsudvikling som funktion af modenhed. Referencekurver benyttes ved beregning af temperaturforløb og egenskabsudvikling i hærdnende betonkonstruktioner. Korrespondancen mellem tilstanden i den hærdnende konstruktion og referencen fremkommer ved den såkaldte modenhedstransformation, der korrigerer for temperaturens indflydelse på hærdehastigheden. Som eksempler på referencekurver kan nævnes styrkeudvikling, stivhedsudvikling og varmeudvikling som funktion af modenhed.

Response (af latinsk *responsum* svar, genklang). Et systems reaktion på en påvirkning. Begrebet benyttes bl.a. i sammenhængen Temperatur Response Diagram, der grafisk afbilder det tidsmæssige forløb af de temperaturændringer, der opstår i et system udsat for en ydre temperaturpåvirkning.

Retarder (af latinsk *retardare* sinke). Et tilsætningsstof til beton der forhaler tidspunktet for betonens afbinding og hærdning. Retarderende tilsætningsstoffer benyttes i et vist omfang til at forlænge den periode, hvor betonen kan transporteres og udstøbes. De mest benyttede retardere er baseret på lignosulfonater eller hydroxy-carboxylater. En del plastificerende og luftindblandende tilsætningsstoffer virker samtidigt retarderende på betonens hærdning.

Selvudtørring. Benævnelse for den ændring i indhold af frit vand, der sker i en beton som følge af de kemiske reaktioner under hærdningen. Selvudtørringen kan give anledning til svindfænomener og revnedannelser på samme måde, som det kendes ved udtørringssvind. Den relative luftfugtighed i poresystemet i det indre af betontværsnit kan ved selvudtørring aftage til 80–90 pct. under hærdningen. Selvudtørringen overlejres af et særligt fænomen: kemisk svind. Det kemiske svind beror på, at det specifikke volumen af vand, der er kemisk bundet i hydrater, er mindre end af frit vand. Dette fænomen bevirker, at indholdet af luftfyldte porer vil øges under hærdningen.

Sekundære komponenter. Fællesbetegnelse for en række stoffer i portlandcement, der normalt kun forekommer i små mængder. Disse stoffer er sekundære i forhold til hovedkomponenterne, der udgøres af klinkermineralerne C_3S, C_2S, C_3A og C_4AF. Som sekundære komponenter i portlandcement regnes fx gips $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, fri kalk CaO, magnesiumoxid MgO samt alkalierne natriumoxid Na_2O og kaliumoxid K_2O.

Smeltevarme. Betegnelse for den varmemængde der skal tilføres 1 kg af et fast stof ved smeltepunktet for at omdanne det til flydende fase ved samme temperatur. Et stofs smeltevarme er et mål for den ekstra bevægelsesenergi molekylerne har i væsketilstanden, i forhold til bevægelsesenergien i fast

form. For vand er smeltevarmen ca. 335 kJ/kg. For at omdanne 1 kg is ved 0 °C til 1 kg vand ved 0 °C skal der således tilføres 335 kJ. Omvendt gælder det også, at der frigøres en varmemængde der svarer til smeltevarmen, når en flydende fase »fryser« og går over til fast form. Ved frysning af vand frigøres der derfor også ca. 335 kJ pr. kg.

Temperaturfordeling. Beskrivelse af temperaturens stedafhængige værdi i et tværsnit til et givet tidspunkt. Temperaturfordelingen kan beskrives ved en tabel over sammenhørende værdier af temperatur og stedkoordinat, eller fremstilles grafisk ved en kurve. Temperaturfordelingen refererer hyppigt til en snitlinie i en konstruktionsdel; ved passende perspektivisk afbildning kan fordelingen over en snitflade dog også gengives grafisk.

Temperaturforløb. Beskrivelse af temperaturens tidsmæssige ændring i et givet punkt i en hærdnende betonkonstruktion. Temperaturforløbet kan beskrives ved en tabel med sammenhørende værdier af temperatur og tid, eller fremstilles grafisk ved en kurve.

Temperatur Response Diagram. Grafisk afbildning af det tidsmæssige forløb af de temperaturændringer der fremkommer i et system, der udsættes for en ydre temperaturpåvirkning. Indgangsparametrene i et Temperatur Response Diagram er sædvanligvis generaliserede, dimensionsløse størrelser. Et simpelt konvektivt opvarmnings- eller afkølingsforløb beskrives således ved den relative temperaturudligning som funktion af Fouriertallet *Fo* og Biottallet *Bi*.

Tilstandsform. Afhængig af tryk og temperatur kan de fleste stoffer eksistere i tre forskellige tilstandsformer. Et velkendt eksempel herpå er vand, der kan have tilstandsformerne: Is (fast fase), vand (væskefase) og vanddamp (gasfase). Almindeligt gælder det, at ændringer i et stofs tilstandsform kræver energiudveksling med omgivelserne. Ved omdannelse af 1 kg is til vand optages der således ca. 335 kJ som smeltevarme. Ved fordampning af 1 kg vand optages der ca. 2500 kJ som fordampningsvarme. Omvendt frigives de samme energimængder ved hhv. frysning eller kondensation.

Transmissionstal (af latinsk *transmissio* overføring). En beregningsstørrelse der angiver den varmeoverførende egenskab af et givet formsystem, incl. den konvektive varmeovergang til den omgivende luft. Transmissionstallet k har enheden [kJ/m^2·h·°C]. Jo større transmissionstallet er, desto større vil varmeoverførslen være for en given temperaturforskel.

Udstøbningstemperatur. Betegner betonens temperatur umiddelbart efter udstøbning i form. Det er udstøbningstemperaturen θ_B, der skal benyttes som udgangsværdi i anvisningens hærdediagrammer. Specielt ved udstøbning af varm beton i spinkle tværsnit kan udstøbningstemperaturen blive væsentligt lavere end betonens leveringstemperatur.

Vand/cement-forhold. Angiver vægtforholdet mellem vand og cement i en cementpasta. En blanding af 1 kg vand og 2 kg cement giver således en cementpasta med vand/cement-forholdet 0.5. Vand/cement-forholdet angives hyppigt ved forkortelsen *v/c*.

Vandmætningsgrad. Beregningsstørrelse S der angiver forholdet mellem volumen V_w af det fordampelige vand og det totale porevolumen V_p i en beton eller mørtel: $S = V_w/V_p$. Vandmætningsgraden S benyttes ved vurdering af betonens frostsikkerhed. Er vandmætningsgraden mindre end en given kritisk værdi S_{krit}, antages det, at vandets udvidelse ved frysning kan optages i det frie porevolumen, der er $V_p - V_w$.

Varmefylde. En stofkonstant der angiver den energimængde, der skal tilføres 1 kg af stoffet for at opvarme det 1 °C. Enheden for varmefylde er [kJ/kg·°C]. Hærdnende beton vil typisk have en varmefylde på 1.1. kJ/kg·°C. Der skal således tilføres ca. 1.1 kJ til 1 kg beton for at opnå en temperaturstigning på 1 °C.

Varmekapacitet. Et systems varmekapacitet er et mål for evnen til at optage varme. Varmekapaciteten er den varmemængde, der skal tilføres for at opvarme systemet 1 °C. Beregningsmæssigt kan varmekapaciteten for et homogent system bestemmes af produktet $V \cdot \varrho \cdot c$, dvs. systemets volumen V multipliceret med rumvægten ϱ og varmefylden c. I daglig tale betegnes varmekapaciteten ofte som systemets vandværdi. Denne benævnelse er indarbejdet i forbindelse med anvendelsen af kcal som energienhed; i dette enhedssystem svarer varmekapacitetens talværdi til den vægtmængde vand, der har samme varmekapacitet.

Varmeledning. Overførsel af termisk energi fra områder med højere til områder med lavere temperatur. I homogene faste stoffer sker energioverførslen ved forplantning af molekylær bevægelsesenergi og, specielt for metaller, overførsel af frie elektroner. I porøse materialer dækker begrebet varmeledning over den sammensatte varmetransport, der både omfatter varmeledning i det faste stofskelet, samt konvektion og stråling i porer og hulrum. I porøse materialer vil der hyppigt optræde varmeoverførende fugttransporter i forbindelse med varmeledningen. Talmæssigt beskrives et stofs varmeledningsevne ved varmeledningstallet λ, der har enheden [kJ/m·h·°C].

Varmeledningsmodstand. En beregningsstørrelse der udtrykker forholdet mellem det drivende potentiale $\Delta\theta$ og den resulterende varmestrøm dq/dt over et tværsnit. Beregningsmæssigt er varmeledningsmodstanden $m = e/\lambda$, hvor e angiver den karakteristiske dimension og λ angiver varmeledningstallet. Varmeledningsmodstanden m har enheden [m^2·h·°C/kJ].

Varmestrøm. Varmestrømmen gennem en flade angiver den varmeenergi, der passerer fladen pr. tidsenhed. Varmestrømmen udtrykkes i enheden [kJ/h] eller i [W].

Varmestråling. Overførsel af energi i form af elektromagnetiske bølger. Fra alle stofoverflader udsendes til stadighed energi i form af stråling til omgivelserne, ligesom der til stadighed modtages energi fra indfaldende stråling. Udbredelse af varmestråling er ikke afhængig af et varmeoverførende

medium; denne form for varmetransport kan derfor også ske i vakuum, hvor ledning og konvektion er udelukket.

Vejrdata. Betegnelse for aktuelle vejrparametres variation i tiden. Som eksempler på vejrparametre kan nævnes temperatur, tryk, vindhastighed og -retning, luftfugtighed, solstråling.

Viskositet (fra latinsk *viscosus* klæbrig). En målestørrelse for væskers og gassers flydeegenskaber. Viskositeten afhænger af stoffernes indre friktion; jo højere viskositeten er, desto mere tyktflydende er et stof. Et stofs dynamiske viskositet udtrykkes i størrelsen Poise.

Ækvivalent alder. Den ækvivalente alder for en hærdnende beton angiver den nødvendige hærdetid ved 20 °C for opnåelse af samme hærdningsgrad. Talmæssigt svarer den ækvivalente alder til betonens modenhed.

APPENDIX G

Enheder for fysiske størrelser

Handelsministeriets bekendtgørelse nr. 320 af 21. maj 1977 omhandler indførelse af det internationale enhedssystem (SI) for mål og vægt. Systemet er baseret på syv grundenheder, hvoraf nedennævnte fem er benyttet i denne SBI-anvisning.

Størrelse	SI-grundenhed	Enhed
Længde	meter	[m]
Masse	kilogram	[kg]
Tid	sekund	[s]
Termodynamisk temperatur	kelvin	[K]
Stofmængde	mol	[mol]

Hvor det har praktisk betydning, kan SI-systemet benyttes sammen med tidsenhederne: minut [min], time [h] og døgn [d] samt med volumenenheden: liter [l]. Disse supplerende enheder er benyttet i anvisningen.

Ud fra SI-systemets grundenheder kan der afledes nye enheder til brug ved beskrivelsen af særlige fysiske fænomener. Af disse afledede enheder er følgende benyttet i anvisningen:

Størrelse	SI-enhed	Enhed	Relationer
Kraft	newton	[N]	$1N = 1\ kg \cdot m/s^2$
Tryk, spænding	pascal	[Pa]	$1Pa = 1N/m^2$
Energi, varmemængde	joule	[J]	$1J = 1N \cdot m$
Effekt	watt	[W]	$1W = 1J/s$

Det bemærkes dog, at effektenheden af praktiske grunde benyttes på den omregnede form [kJ/h], således at resultater af beregninger baseres på tidsenheden time [h]. Omregningen sker med relationen: 1 W = 3,6 kJ/h.

Multipla af SI-enheder dannes ved at foranstille præfikser til enhederne. Nedennævnte præfikser er benyttet i anvisningen.

Faktor	Præfiks	Betegnelse
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ

Omregning af enheder

Under det praktiske arbejde med hærdeteknologiske problemer vil man hyppigt få brug for at omsætte talstørrelser og enheder til SI-systemet. Til brug herfor er der i det følgende udarbejdet tabeller over de hyppigst forekommende omregninger.

Længde

SI-grundenhed: meter [m].

Definition: En meter er defineret som længden af 1 650 763.73 bølgelængder i det tomme rum af strålingen fra krypton-86 atomet ved overgang mellem niveauerne $2p_{10}$ og $5d_5$.

Ved omregning fra	til [m] multipliceres med
inch	$2.540 \cdot 10^{-2}$
ft	0.3048
cm	$1.0 \cdot 10^{-2}$
μm	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Å (Ångström)	$1.0 \cdot 10^{-10}$

Areal

Afledt SI-enhed, $[m^2]$.

Ved omregning fra	til $[m^2]$ multipliceres med
$inch^2$	$6.452 \cdot 10^{-4}$
ft^2	$9.290 \cdot 10^{-2}$
cm^2	$1.0 \cdot 10^{-4}$

Volumen

Afledt SI-enhed, $[m^3]$.

Ved omregning fra	til $[m^3]$ multipliceres med
$inch^3$	$1.639 \cdot 10^{-5}$
ft^3	$2.832 \cdot 10^{-2}$
gallon (US)	$3.785 \cdot 10^{-3}$
cm^3	$1.0 \cdot 10^{-6}$
l (liter)	$1.0 \cdot 10^{-3}$

Masse

SI-grundenhed, kilogram [kg].

Definition: Et kilogram er defineret som massen af den internationale kilogramprototype i Sèvres ved Paris.

Ved omregning fra	til [kg] multipliceres med
pound	0.4536
ounce	$2.835 \cdot 10^{-2}$
g	$1.0 \cdot 10^{-3}$

Massefylde

Afledt SI-enhed, $[kg/m^3]$.

Ved omregning fra	til $[kg/m^3]$ multipliceres med
$pound/ft^3$	16.02
$pound/inch^3$	$2.768 \cdot 10^4$
pound/gallon (US)	119.83
g/cm^3	$1.0 \cdot 10^3$

Kraft
Afledt SI-enhed, newton [N].
Definition: Kraften 1N er fastlagt som den kraft, der giver massen 1 kg en acceleration på 1 m/s^2.

Ved omregning fra	til [N] multipliceres med
pound-force	4.448
kilopond	9.807
dyn	$1.0 \cdot 10^{-5}$

Tryk/spænding
Afledt SI-enhed, pascal [Pa].

Ved omregning fra	til [MPa] multipliceres med
atmosfære	0.1013
bar	0.1000
mm Hg	$0.1333 \cdot 10^{-3}$
kp/cm^2	0.0981
dyn/cm^2	$1.0 \cdot 10^{-7}$
$pound/inch^2$ (psi)	$6.894 \cdot 10^{-3}$

Energi/arbejde
Afledt SI-enhed, joule [J].
Definition: Arbejdet 1J er fastlagt som det arbejde kraften 1N udfører ved en bevægelse på 1 m i kraftens retning.

Ved omregning fra	til [kJ] multipliceres med
Btu	1.054
cal	$4.186 \cdot 10^{-3}$
kcal	4.186
erg	$1.0 \cdot 10^{-10}$
J	$1.0 \cdot 10^{-3}$
Hkh	$2.685 \cdot 10^{3}$
kpm	$9.807 \cdot 10^{-3}$
kWh	$3.6 \cdot 10^{3}$

Effekt/varmestrøm
Afledt SI-enhed, watt [W] = [J/s].

Ved omregning fra	til [kJ/h] multipliceres med
Btu/h	1.054
cal/s	15.07
Hk	$2.685 \cdot 10^{3}$
W	3.600
kW	$3.600 \cdot 10^{3}$

Varmeledningstal
Afledt SI-enhed, [kJ/m·h·°C].

Ved omregning fra	til [kJ/mh°C] multipliceres med
Btu/ft·h·°F	6.228
kcal/m·h·°C	4.186
cal/cm·s·°C	$1.507 \cdot 10^{3}$
J/m·s·°C	3.600
W/m·°C	3.600

Transmissionstal
Afledt SI-enhed, $[kJ/m^2 \cdot h \cdot °C]$.

Ved omregning fra	til $[kJ/m^2h°C]$ multipliceres med
$Btu/ft^2 \cdot h \cdot °F$	20.45
$kcal/m^2 \cdot h \cdot °C$	4.186
$cal/cm^2 \cdot s \cdot °C$	$1.507\ 10^{5}$
$J/m^2 \cdot s \cdot °C$	3.600
$W/m^2 \cdot °C$	3.600

Varmefylde
Afledt SI-enhed, [kJ/kg·°C].

Ved omregning fra	til [kJ/kg°C] multipliceres med
Btu/pound·°F	4.186
cal/g·°C	4.186
J/g·°C	1.000
J/kg·°C	$1.0 \cdot 10^{-3}$

Temperatur
SI-grundenhed, Kelvin [K].
Definition: En Kelvin er defineret som brøkdelen 1/273.16 af vands tripelpunkts termodynamiske temperatur.

Foruden den termodynamiske temperatur T udtrykt i Kelvin, benyttes også celciustemperatur θ med enheden [°C]. Celciustemperaturen er defineret ved: $\theta = T - 273.16$.

Ved omregning fra	til [°C] benyttes
°F Fahrenheit	$°C = \frac{5}{9} \cdot (°F - 32)$
°K Kelvin	°C = °K − 273.16
°R Reaumur	$°C = \frac{5}{4} \cdot (°R)$

Diverse tabeller

Rumvægte (densitet)

Materiale	ϱ kg/m³
Jern/stål	ca. 7900
Aluminium	ca. 2600
Beton	ca. 2300
Asbestcement	ca. 1900
Stampet ler	ca. 1400
Tørt sand	ca. 1700
Fugtig jord	ca. 1900
Ral/skærver	ca. 1500
Bløde træfiberplader	ca. 300
Hårde spånplader	ca. 650
Fyr/gran	ca. 500
Bøg	ca. 700
Ekspanderet polystyren	ca. 40

Praktiske varmeledningstal

Materiale	λ kJ/m·h·°C
Jern/stål	ca. 200
Alumunium	ca. 800
Hærdnende beton	ca. 8
Hærdnet beton	ca. 6
Hærdnet letbeton	ca. 3
Træ, udendørs	ca. 0.7
Træ, indvendigt	ca. 0.5
Fugtig jord	ca. 9
Tørt sand	ca. 2
Stampet ler	ca. 3
Isoleringsmateriale	ca. 0.15

Varmefylde

Materiale	*c* kJ/kg·°C
Jern/stål	ca. 0.5
Aluminium	ca. 0.9
Hærdnende beton	ca. 1.1
Hærdnet beton	ca. 0.8
Træ, udendørs	ca. 1.8
Træ, indvendigt	ca. 1.2
Tørt sand	ca. 0.8
Plast	ca. 1.4
Glas	ca. 0.7

Vindstyrker og vindhastigheder

Beaufort skala	Betegnelse	Vind-hastighed m/s	Virkning
0	Stille	0 - 0.2	Røg stiger lige op.
1	Svag luftning	0.3- 1.5	Røgens drift viser vindens retning.
2	Svag brise	1.6- 3.3	Løv rasler, vimpler løftes og vinden kan mærkes.
3	Let vind	3.4- 5.4	Blade og kviste i bevægelse, vimpler og flag løftes.
4	Jævn vind	5.5- 7.9	Smågrene bevæger sig, papirstykker løftes.
5	Frisk vind	8.0-10.7	Små løvtræer svajer.
6	Kuling eller blæst	10.8-13.8	Store grene bevæges, telefontråde synger.
7	Stiv kuling	13.9-17.1	Større træer bevæger sig.
8	Hård kuling	17.2-20.2	Kviste og grene brækker af træer.
9	Storm	20.8-24.4	Træstammer svajer, store grene brækker af.
10	Stærk storm	24.5-28.4	Træer rives op, betydelige skader på huse.
11	Orkanagtig storm	28.5-32.6	Mange ødelæggelser, svært at gå.
12	Orkan	32.7-	Voldsomme ødelæggelser.

APPENDIX H

Litteratur

[1] Axel Kofoed. Vinterforholdsregler ved anlægs- og byggearbejder. Arbejdsministeriets vinterkonsulenttjeneste, Byggecentrum, København 1980.

[2] Beton-Bogen, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor 1979.

[3] DS 411, Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner.

[4] Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, CtO, Beton-Teknik.

[5] Kaplar, C. W. Phenomenon and Mechanism of Frost Heaving. Highway Research Record, No. 304. Highway Research Board. Washington 1979.

[6] Bergström, S. G. Influence of Frost on the Physical and Mechanical Properties of Concrete. CBI-Report 3:76. Stockholm 1976.

[7] Freiesleben Hansen, P. & Pedersen, E. J. Måleinstrument til kontrol af betons hærdning. Nordisk Betong 1:1977, p. 21–25.

[8] Freiesleben Hansen, P. Hærdeteknologi-1, Portlandcement. Aalborg Portland, bkf-centralen 1978.

[9] Beton-Teknik 1/01/78. Portlandcement. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, 1978.

[10] bkf-centralen. Egenskabsudvikling. Diagramblad nr. B7. bkf-centralen 1978.

[11] Fägerlund, G. The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete. Materiaux et constructions, juli–aug. 1977, nr. 58, p. 217–229.

[12] Möller, G. Materialproblem ved vinterbetongarbeten, tidlig frysning av betong. Utredninger nr. 5. Svenska Forskningsinstituttet för cement och betong vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm, 1962.

[13] Bruere. Fundamental Actions of Air-Entraning Agents. Rilem 1967.

[14] Freiesleben Hansen, P. Hærdeteknologi-2, Dekrementmetoden. Aalborg Portland. bkf-centralen 1978.

[15] bkf-centralen. Temperatur Response Diagram, Skive. Diagramblad nr. B2. bkf-centralen 1978.

[16] bkf-centralen. Temperatur Response Diagram, Cylinder. Diagramblad nr. B3. bkf-centralen 1978.

[17] bkf-centralen. Temperaturdifferenser, overslagsformler. Diagramblad nr. B1. bkf-centralen 1978.

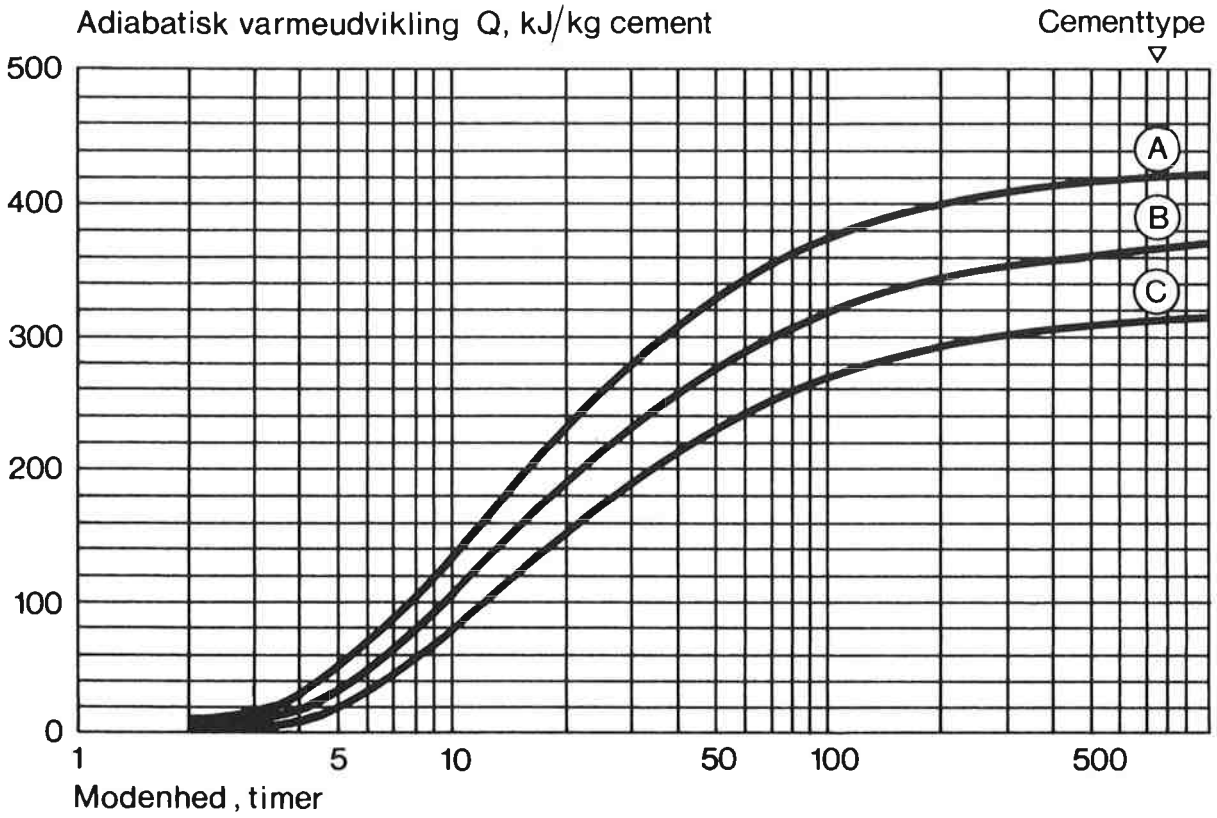
[18] Statistisk Årbog, 1971.

[19] Vejrdata for VVS-tekniske beregninger, Referenceår. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-rapport 89, København 1974.

[20] Mandry, W. Über das kühlen von Beton. Springer Verlag. Berlin 1961.

[21] Luikov, A. U. Analytical Heat Diffusion Theory. Academic Press. New York 1968.

[22] Andersen, A. F. & Bohr, H. & Petersen, R. Lærebog i matematisk analyse, III. Gjellerups Forlag. København 1962.



Ovenstående diagram gengiver den adiabatiske varmeudvikling for de tre cementtyper A, B og C, der er benyttet ved beregning af anvisningens hærdediagrammer. Diagrammets dimensioner svarer til de dokumentationsblade, der her i landet benyttes i forbindelse med laboratoriebestemmelse af betoners adiabatiske varmeudviklingsdata. Et dokumentationsblad for adiabatisk varmeudvikling for en aktuel beton kan derfor sammenlignes med de tre nævnte cementtyper A, B og C ved at placere bladet under transparenten. Man vil herefter direkte kunne se, hvilken af de tre cementtyper, der bedst repræsenterer den aktuelle beton.

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Gregersensvej
DK-2630 Taastrup
Telefon 72 20 20 00
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk