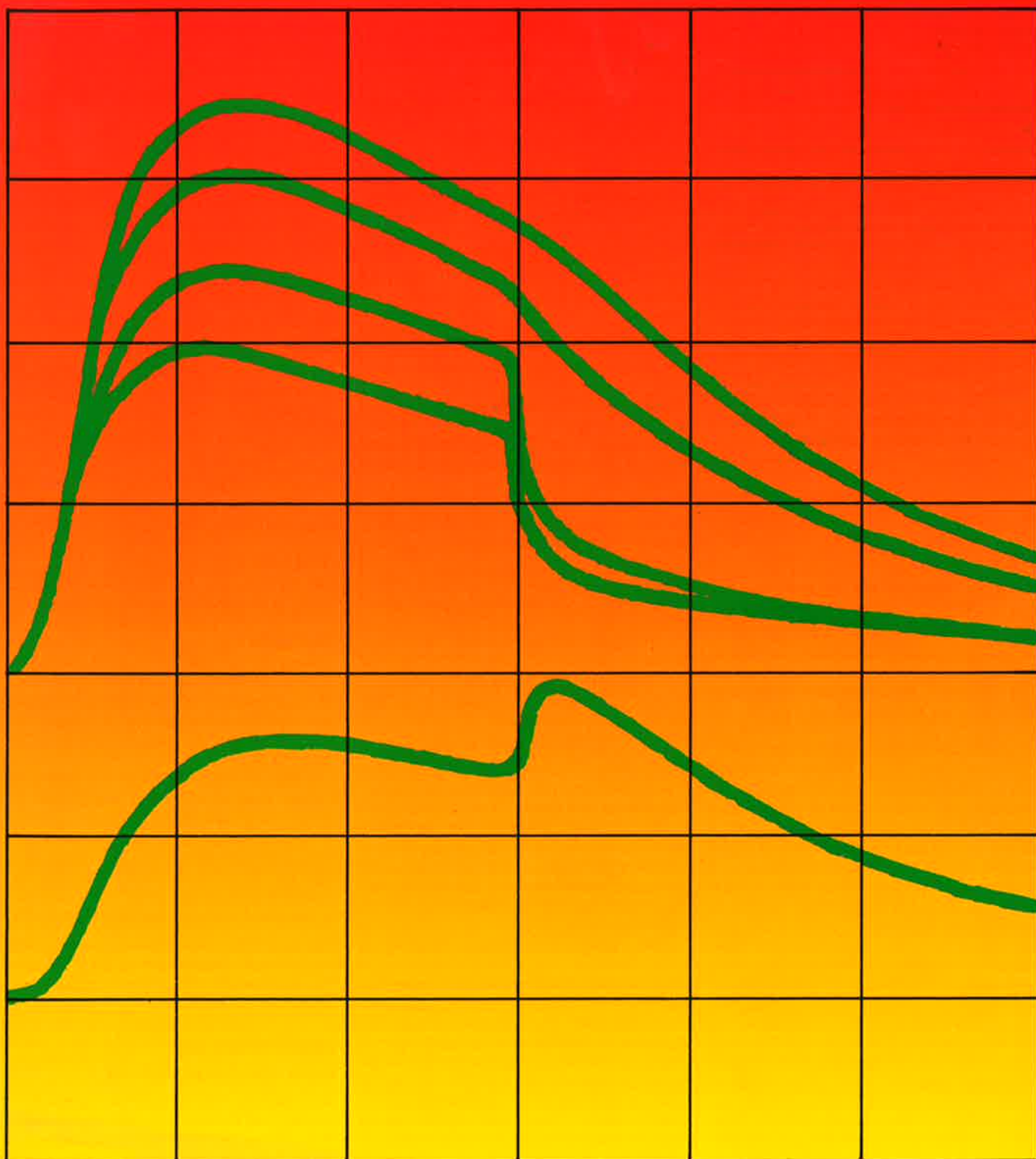


Hærdeteknologi

Af Thorkild H. Rasmussen og Torben Andersen.

Emneord: Hærdning, varmeudvikling, egenskaber, modenhed, temperaturforskelle, frysning, planlægning, styring.

BETON-TEKNIK



Hærdeteknologi omhandler viden og værktøj, som gør det muligt at beskrive og planlægge hærdforholdene for betonkonstruktioner.

Hærdforholdene er et samspil mellem fugt- og temperaturforhold (evt. tryk), og det er især forholdene i de første døgn, der har betydning for kvaliteten af den hærdnede beton.

Der er således tale om forholdsvis kortvarige foranstaltninger, som kan have afgørende betydning for betonens kvalitet og holdbarhed.

Nærværende publikation vedrører temperaturforholdene, og fugtforholdene er alene omtalt, hvor de har relation til temperaturen.

For en nærmere beskrivelse af fugtforholdene henvises til f.eks. [1].

Grundlaget for hærdeteknologi, som den kendes i Danmark i dag, blev lagt i 1970'erne på Aalborg Portlands Betonforskningslaboratorium i Karlstrup af akademiingeniør P. Freiesleben Hansen.

Dette arbejde er senere videreudviklet på Beton- og Konstruktionsinstituttet, således at der i dag findes en række velfungerende og brugervenlige værktøjer til behandling af de komplicerede problemstillinger, som hærdeteknologien rummer.

Internationalt set bør vi i al beskedenhed betragte Danmark som værende i første række på dette område.

Formålet med nærværende publikation er dels at belyse de praktiske muligheder, som for rådgivere og entreprenører ligger i dette værktøj, dels at orientere om den materialeteknologiske og fysiske baggrund for værktøjet.

Det er væsentligt at bemærke, at anvendelsen af værktøjet ikke nødvendigvis forudsætter et dybtgående kendskab til denne baggrund.

Problemstilling

Problemstillingen ved vurdering af en hærdproces mht. temperaturforholdene vil sædvanligvis vedrøre et eller flere af følgende forhold:

- Vurdering af egenskabsudvikling (f.eks. styrke) med henblik på afformning, opspænding af kabler, ibrugtagning m.v.
- Vurdering af risiko for frysning inden betonen kan modstå dette.
- Vurdering af risiko for temperaturbetingede revner opstået som følge af temperaturforskelle.

De to førstnævnte problemstillinger er nøje knyttet til begrebet modenhed (Maturity), som omtales i det efterfølgende afsnit.

Risikoen for temperaturbetingede revner relateres sædvanligvis til de temperaturforskelle, som optræder i konstruktionen. Dette skyldes bl.a., at temperaturen er en størrelse, som i modsætning til spændinger, er let at måle. Geometriske forhold, deformationsmuligheder m.v. vil også influere på forholdene.

Temperaturen i betonen vil afhænge af en række parametre, jf. afsnittet: »Betydende parametre«, men en meget væsentlig parameter er betonens »hærdvarme«, som kan medføre betydelige temperaturstigninger, hvis varmen ikke kan slippe væk.

Til indledningsvis at belyse den praktiske anvendelse af hærdeteknologien er der i eksempel 1 behandlet et par af disse problemstillinger.

Eksempel 1. Planlægning.

Ved støbning af en 40 cm tyk væg i moderat miljøklasse er entreprenøren, i henhold til Basisbetonbeskrivelsen, blevet stillet overfor følgende krav:

Krav til varighed af udtørningsbeskyttelse: 36 modenhedstimer.

Krav til maksimal tilladelig temperaturforskel: 20°C.

Entreprenøren ønsker at afforme efter 1 døgn af hensyn til genanvendelsen af formen.

Begrebet modenhed er indført for at tage højde for det forhold, at temperaturen har indflydelse på hærdningshastigheden.

Kravet til temperaturforskellen er indført for at undgå termorevner.

Disse forhold er nærmere uddybet i efterfølgende afsnit.

Forudsætningerne er som følger:

Miljøklasse: Moderat.

Cementindhold: 290 kg Rapid-Cement pr. m³ beton.

v/c-forhold: 0,52.

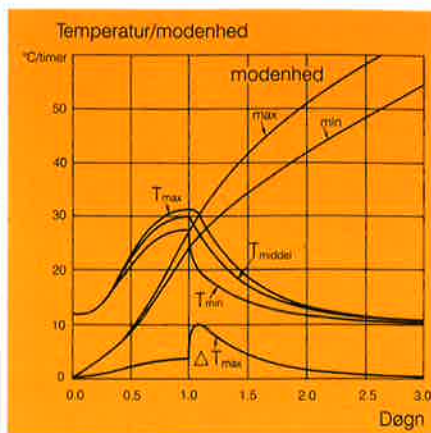
Udstøbningsstemperatur: 12°C.

Formmateriale: 19 mm finer.

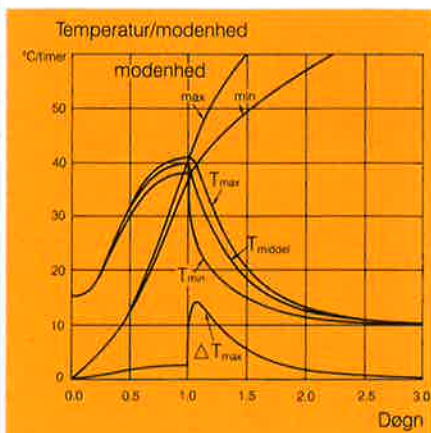
Lufttemperatur: 10°C.

Vindhastighed: 5 m/sek.

En forudgående temperatursimulering har indikeret et forventet temperaturforløb som vist i figur 1. Det fremgår heraf, at modenheden i overfladen efter 1 døgn kun vil være ca. 24 modenhedstimer. Der vil tilsyneladende ikke være problemer med at overholde kravet til temperaturforskellen. Entreprenøren har flere alternativer at vælge mellem for at sikre modenhedskravet på 36 timer overholdt.



Figur 1. Simulering af temperaturforløb og modenhedsudvikling. Betonens udstøbningsstemperatur er 12°C og formen er uisolaret.



Figur 2. Simulering af temperaturforløb og modenhedsudvikling. Betonens udstøbningsstemperatur er 16°C og formen er isoleret.

Alternativ 1

Der kan vælges at foretage en efterfølgende afdækning med presenning eller lignende.

Alternativ 2

Der kan vælges at investere i en ekstra form og forlænge formtiden til 2 døgn.

Alternativ 3

Der kan vælges en beton med et v/c-forhold under 0,45. Modenhedskravet reduceres herved til 24 timer, jf. BBB, hvilket vil kunne opnås efter 1 døgn.

Alternativ 4

Der kan etableres en ekstra isolering af formen med 10 mm polystyrenplader og anvendes en varmere beton med udstøbningsstemperatur 16°C. Hermed vil 36 modenhedstimer kunne opnås i løbet af 1 døgn, jf. temperatursimuleringen i figur 2. Som det fremgår heraf, vil den maksimale temperaturforskel ikke overstige 20°C.

Det endelige valg vil bero på en samlet vurdering af økonomien og de praktiske/tekniske fordele og ulemper ved de 4 alternativer.

Modenhed og egenskabsudvikling

Beton er et materiale, hvis egenskaber udvikler sig i takt med de kemiske reaktioner mellem cement og vand (hydratisering). Som for en række andre kemiske

processer er den hastighed, hvormed hydratiseringen foregår, afhængig af den aktuelle temperatur. Hydratiseringen forløber hurtigere ved høje temperaturer end ved lave temperaturer.

Egenskabsudviklingen kan derfor ikke entydigt beskrives som funktion af tiden, hvilket er baggrunden for indførelsen af begrebet modenhed, som sammenholder tid og temperatur til ækvivalent hærdetid ved 20°C.

Der er gennem tiderne udviklet forskellige modenhedsfunktioner med det formål at beskrive temperaturrens indflydelse på hydratiseringshastigheden, jf. [2].

Rastrups model, som tidligere blev anvendt i Danmark, var primært udviklet med henblik på en beskrivelse af temperaturområdet 0–20°C, og den bør ikke anvendes ved temperaturer over 20°C.

Når begrebet modenhed i dag optræder i dansk sammenhæng, er det som regel underforstået, at der er tale om modenhed i henhold til den Arrheniske temperaturfunktion. I en række andre europæiske lande benyttes andre modeller.

Arrhenius's model beskriver temperaturen T_k 's indflydelse på reaktionshastigheden H ved følgende sammenhæng:

$$H = \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_k}\right)$$

hvor

E = Aktiveringsenergi, [J/mol].

R = Gaskonstanten = 8,314 J/mol°C.

T_k = Absolut temperatur, [K].

Ved at anføre hastigheden relativt til hastigheden ved 20°C (referencetemperatur) gøres modellen operationel.

$$H_{20}(T) = \exp\left(\frac{E(T)}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right)$$

hvor

$H_{20}(T)$ = Relativ hastighed ved temperaturen T .

$E(T)$ = Empirisk aktiveringsenergi

$$E(T) = \begin{cases} 33500 \text{ J/mol for } T \geq 20^\circ\text{C.} \\ 33500 + 1470 \cdot (20-T) \text{ J/mol} \\ \text{for } T < 20^\circ\text{C.} \end{cases}$$

R = Gaskonstanten = 8,314 J/mol°C.

T = Temperatur, [°C].

Aktiveringsenergien er fastlagt på grundlag af en omfattende forsøgsserie, jf. [3]. Temperaturfunktionen er afbildet i figur 3. Modenheden (ækvivalent hærdetid ved 20°C) til tiden τ kan herefter beregnes som:

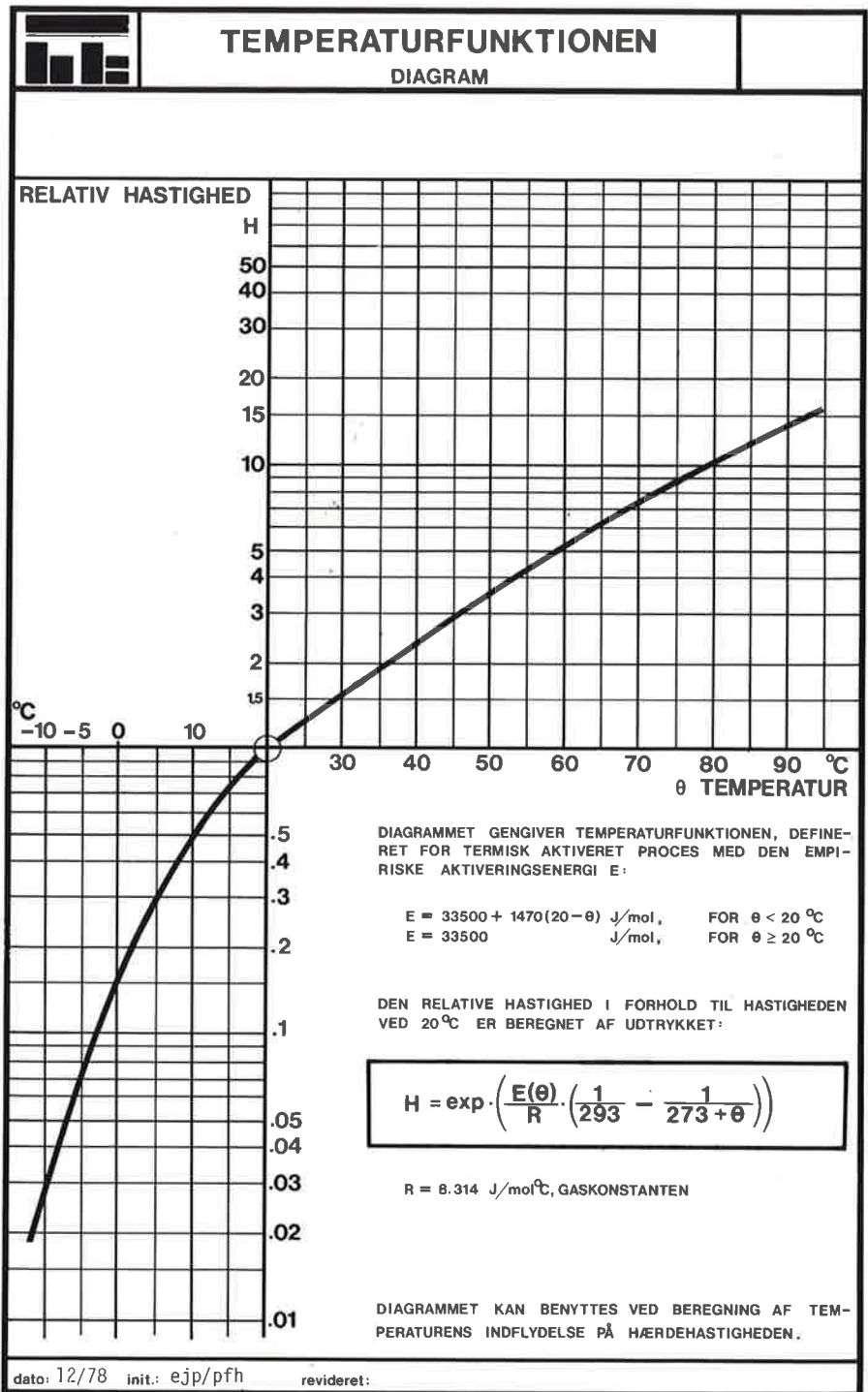
$$M_{20} = \int_0^\tau H_{20}(T) \cdot dt$$

I praksis foretages beregningen af M_{20} (eller blot M) som en numerisk integration.

Ved at sammenholde modenheden med f.eks. styrkeudvikling ved 20°C kan det øjeblikkelige styrkeniveau vurderes.

Den Arrheniske modenhedsfunktion giver en langt bedre beskrivelse af forholdene end andre kendte modenhedsfunktioner, men også denne model har visse begrænsninger.

Blandt fordelene bør især fremhæves, at modellen beskriver et meget stort temperaturområde, som dækker fra vinterstøbning til intensiv varme hærdning. Endvidere gælder det, at de kritiske tidspunkter



Figur 3. Temperaturfunktion til fastlæggelse af relativ hærdhastighed. Fra [4].

(frostsikkerhed, afformning, opspænding) kan vurderes med god nøjagtighed.

Reaktionsforløbet for puzzolaner (mikrosilica og flyveaske) har vist sig at påvirkes anderledes af hærdetemperaturen end portlandcementer, og for beton indeholdende puzzolaner giver modellen derfor en mindre korrekt beskrivelse af de virkelige forhold. Dette er især udtalt ved langvarig hærdning ved temperaturer, som afviger meget fra 20°C.

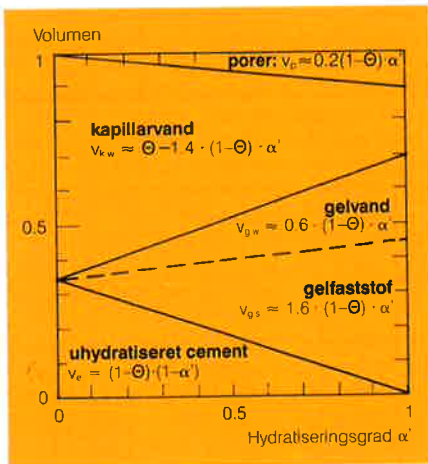
Ved anvendelse af tilsætningsstoffer, som virker retarderende, gælder det endvidere, at temperaturens indflydelse på retarderingsperioden ikke beskrives præcist ved anvendelse af modenhedsfunktionen.

Der synes at være en tendens til, at temperaturens indflydelse på puzzolanreaktioner er større end beskrevet ved modellen, mens det modsatte synes at være til-

fældet for de processer, som forløber under en retardering.

En nærliggende antagelse vil være, at der blot er tale om andre processer, som beskrives med andre aktiveringsenergi. Disse er imidlertid ikke fastlagt, og der er på nuværende tidspunkt næppe grundlag for mere end den anførte kvalitative vurdering. Erfaringer fra praksis tyder dog på, at den fejl, som dette medfører, er uden praktisk betydning.

Man skal endvidere være opmærksom på, at andre temperaturbetingede forhold kan spille ind. Slutstyrken vil som regel være lavere ved høje hærdetemperaturer end ved lave hærdetemperaturer. En grovere porestruktur anføres ofte som hovedårsagen, men termiske spændinger mellem pasta og tilslag må formodes også at influere på styrken. Det er især hærdetemperaturen i de første timer, som har betydning, jf. f.eks. [5].



Figur 4. Schematisk gengivelse af stofmængdesætning ved hydratisering af cementpasta i lukket system. Figuren viser volumenforholdene under hydratiseringsforløbet. Θ angiver således volumen af vand. $(1-\Theta)$ er tilsvarende cementvolumenet. α' er hydratiseringsgraden. Figuren viser forholdene for $v/c = 0,60$. Fra [6].

Et sidste, men meget vigtigt forhold er, at modenhedsbegrebet er et indirekte mål for egenskabsudviklingen, og hvis betonen tørrer ud eller ødelægges af tidlig frysning, vil den naturligvis ikke opnå de forventede egenskaber, selv om modenheden fortsat udvikles.

Tidlig frysning

Hærdnet beton, som er fremstillet med et passende luftindhold og v/c -forhold samt med frostbestandigt tilslag, vil udvise god frostbestandighed.

Under betonens tidligste hærkning, er der imidlertid en kritisk periode, hvor betonen endnu ikke er frostbestandig (frost-sikker). Dette skyldes, at betonens indhold af frysbart vand endnu er så stort, at ekspansionen i tilfælde af frysning ikke vil kunne optages i betonens luftporesystem.

Cementpastaens styrke er i denne periode så lav, at den ikke kan skabe det modhold, som er nødvendigt for at istrykket kan aflastes til de indblandede luftporer. Den indblandede luft regnes derfor for inaktivt i denne periode.

Under betonens hærkning bindes en stadig større del af vandet kemisk i reaktionsprodukterne, eller som ikke frysbart vand på overfladerne af disse. Endvidere opstår der, som følge af det kemiske svind, fint fordelte luftporer i cementpastaen, jf. figur 4.

Betonen antages sædvanligvis at være frostsikker, når volumen af disse porer netop svarer til den ekspansion, der vil optræde, når det tilbageværende kapillarvand fryser.

Det er naturligvis en forudsætning for denne model, at der ikke udveksles vand med omgivelserne.

På grundlag af de volumenmæssige sammenhænge i figur 4, kan kriteriet formuleres som et krav til hydratiseringsgraden α' :

$$\alpha' \geq 0,86 \cdot v/c$$

Det er forudsat, at ekspansionen ved frysning af vand udgør 9%, samt at cements korndensitet er $3,10 \text{ g/cm}^3$.

Formlen afspejler det forhold, at en stærk beton hurtigere opnår frostsikkerhed end en svag beton.

Som et mål for hydratiseringsgraden benyttes ofte cementens varmeudvikling karakteriseret ved parametrene: Q_∞ , τ_e og α , jf. afsnittet: »Kalorimetri«.

Kravet kan herefter omformuleres til et modenhedskrav:

$$M \geq \frac{\tau_e}{(-\ln(0,86 \cdot v/c \cdot Q_{TOT}/Q_\infty))^{1/\alpha}}$$

Q_{TOT} betegner den totale varmeudvikling svarende til, at cementen er fuldstændig hydratiseret ($\alpha' = 1,0$). Forholdet Q_{TOT}/Q_∞ korrigerer for, at Q_∞ er en teoretisk slutvarme, som sædvanligvis er lavere end den totale varmeudvikling. Q_{TOT} kan, med kendskab til cementens sammensætning, estimeres på grundlag af figur 7, se herom i eksempel 6.

Oftest sættes $Q_{TOT}/Q_\infty = 1$, se f.eks. [7], hvilket har vist tilfredsstillende overensstemmelse med resultater fra frostforsøg. Dette skyldes sandsynligvis en vis medvirken fra det indblandede luftporesystem.

For beton, som ikke er luftindblandet, bør faktoren Q_{TOT}/Q_∞ principielt medtages, jf. eksempel 2, som belyser anvendelsen af formelen.

Eksempel 2. Frostsikkerhed.

En beton med Rapid-Cement og et v/c -forhold på 0,45 ønskes vurderet mht. nødvendig modenhed for opnåelse af frostsikkerhed.

Varmeudviklingens parametre: Q_∞ , τ_e og α er bestemt til 376 kJ/kg, 11,2 timer og 1,00, hvilket resulterer i følgende krav:

$$M \geq \frac{11,2}{(-\ln(0,86 \cdot 0,45))^{(1/1,00)}} = 11,8 \approx 12 \text{ timer.}$$

For Lavalkali Sulfatbestandig Cement er parametrene tilsvarende bestemt til 338 kJ/kg, 15,1 timer og 0,92, hvilket for samme v/c -forhold resulterer i følgende krav:

$$M \geq \frac{15,1}{(-\ln(0,86 \cdot 0,45))^{(1/0,92)}} = 16 \text{ timer.}$$

Hvis betonen ikke er luftindblandet, bør faktoren Q_{TOT}/Q_∞ medtages. For Lavalkali Sulfatbestandig Cement kan Q_{TOT} på grundlag af tabel 3 og figur 7 beregnes til ca. 430 kJ/kg cement (efter 1 år), og modenhedskravet kan, med hensyntagen hertil, beregnes som:

$$M \geq \frac{15,1 \text{ timer}}{(-\ln(0,86 \cdot 0,45 \cdot 430/338))^{(1/0,92)}} = 22 \text{ timer}$$

De i eksempel 2 beregnede tider kan umiddelbart synes lette at overholde, men da der er tale om modenhedstimer, kan det ved lave temperaturer være flere døgn, det drejer sig om.

Puzzolaner reagerer kun i begrænset omfang i det første modenhedsdøgn, og deres bidrag til kemisk binding af vand, og dermed opnåelse af frostsikkerhed, vil være begrænset. Puzzolanernes bidrag til v/c -forholdet bør derfor i denne sammenhæng sættes til nul. Tilsvarende overvejelser vil være relevante for Standard-Cement, som typisk indeholder 22% flyveaske.

Der henvises i øvrigt til [7], som giver en omfattende behandling af forholdene omkring tidlig frysning af beton.

Temperaturbetingede revner – termorevner

Beton, som opvarmes, vil i lighed med de fleste andre materialer reagere med en termisk udvidelse, som karakteriseres ved betonens varmeudvidelseskoefficient β .

Til de fleste praktiske formål regnes betons varmeudvidelseskoefficient at være ca. $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, men der vil dog være en vis afhængighed af hærkningsgraden og betonsammensætningen, især tilslagsmængder og tilslagstyper, se herom i f.eks. [8].

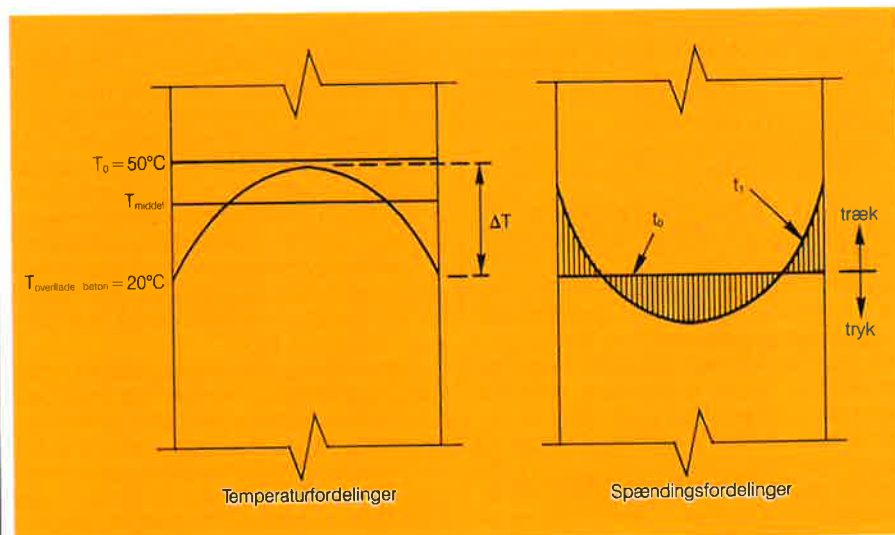
Temperaturfordelingen under betonens hærkning vil sjældent være homogen, og der vil derfor optræde temperaturforskelle, som jf. det forrige vil resultere i differensdeformationer. Under uheldige forhold kan disse antage en sådan størrelse, at betonens bruddeformationsevne eller brudstyrke overskrides. Konsekvensen heraf vil være revnedannelse, såkaldte termorevner.

Forholdene kan dels betragtes som et spørgsmål om deformation og bruddeformation, eller som et spørgsmål om spænding og brudspænding.

Der skelnes sædvanligvis mellem temperaturforskelle inden for en konstruktionsdel og temperaturforskelle mellem tilstødende konstruktionsdele. De to problemstillinger er belyst i eksempel 3 og 4.

Eksempel 3. Termorevner, type 1.

En væg er udstøbt i en velisoleret form og har opnået en temperatur på ca. 50°C over hele tværsnittet.



Figur 5. Principielle temperatur- og spændingsfordelinger i symmetrisk tværsnit. T refererer til temperatur, t refererer til tid.

Efter afformningen sker der en hurtig afkøling af overfladen til 20°C. Den sammentrækning, som dette ville medføre, hindres delvis af væggenes indre, som endnu ikke er blevet afkølet. Den resulterende sammentrækning vil svare til ændringen i væggenes middeltemperatur, mens der i væggenes overflade og midte vil optræde trækspændinger hhv. trykspændinger, jf. figur 5.

Temperaturfordelingen kan med god tilnærmelse antages at være parabelformet, og med kendskab til varmeudvidelseskoefficient og elasticitetsmodul vil spændingerne kunne beregnes.

Revnerne vil, hvis de opstår, være karakteristiske ved, at de danner et netværk af overfladerovner, som vil være åbne under afkølingen og derefter lukkede, når temperaturen er blevet ens over hele tværsnittet.

Revnerne vil dog fortsat være til stede, og vil med tiden kunne åbne sig og forringe betonens holdbarhed.

Forholdene kompliceres til en vis grad af forhold som krybning og relaksation, som især for ung beton kan være betydelig.

Teoretiske overvejelser på grundlag af aktuelle materialedata samt praktiske forsøg [9] har vist, at revnedannelse typisk optræder, hvis forskellen mellem midtemperatur og overfladetemperatur overskrider ca. 20°C. Dette afspejles også i BBB's krav til denne type af temperaturforskelle [10].

Hvis temperaturfordelingen ikke er symmetrisk, hvilket ofte gælder ved støbning af dæk og plader, vil konstruktionen forsøge at krumme, og der kan derfor optræde et ydre modhold stammende fra tilstødende konstruktioner, egenvægt etc. I disse tilfælde vil den kritiske temperaturforskelle ikke nødvendigvis være 20°C.

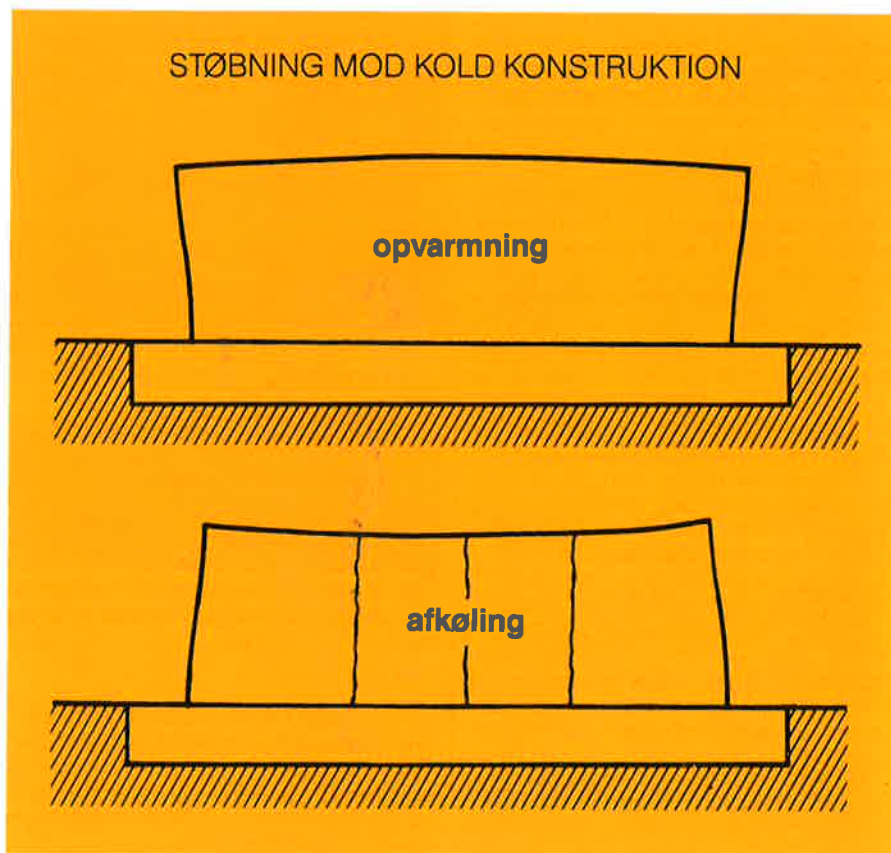
Temperaturforskelle inden for en konstruktionsdel kan i vid udstrækning kontrolleres ved passende valg af formmaterialer og afdækning med isolerende materialer. Temperaturforskelle mellem gamle og nyudstøbte konstruktionsdele, som illustreret i eksempel 4, kan være langt vanskeligere at kontrollere.

Eksempel 4. Termorevner, type 2.

En væg er udstøbt på et pladefundament og opnåede en temperatur på ca. 50°C, mens fundamentets temperatur kun var ca. 10°C. Under væggenes opvarmning (hærdning) er der gradvist etableret vedhæftning til det kolde fundament. Under den efterfølgende afkøling vil der ske en sammentrækning af væggen, men det massive fundament, som ikke udsættes for de samme temperaturændringer, vil udgøre et ydre modhold mod bevægelserne. Resultatet vil blive, at der opstår trækspændinger i væggen, og med de anførte temperaturer vil dette efter al sandsynlighed medføre revnedannelse, jf. figur 6.

Med kendskab til geometri og egenkabsudvikling for betonen vil der kunne gennemføres overslagsmæssige beregninger af forholdene, men de er langt mere komplicerede og usikre end for termorevner af type 1, som er omtalt i eksempel 3.

Revnerne vil, hvis de opstår, være karakteristiske ved, at de er gennemgående, og ofte optræder med en indbyrdes afstand, som er 1,5–3,0 m. Tidspunktet for



Figur 6. Revner opstået som følge af for store temperaturforskelle mellem ny og gammel beton.

revnedannelsen vil hænge sammen med afkølingsforløbet, og revnerne vil i modsætning til type 1 revner forblive åbne.

Krav til maksimalt tilladelige temperaturforskelle mellem ny og gammel beton har tidligere typisk været 15°C, men forholdenes kompleksitet afspejles bl.a. i BBB's formulering af kravet [10].

En detaljeret gennemgang af disse forhold ligger uden for rammerne af nærværende publikation, men er behandlet i f.eks. [11].

Hydratiseringssvind og udtørringssvind vil medføre lignende påvirkninger af konstruktionen, men revnerne vil, hvis disse faktorer er dominerende, være karakteriseret ved en betydelig større revneafstand. De vil endvidere opstå på et senere tidspunkt.

Plastisk svind, som bør undgås ved afdækning i den plastiske periode, vil ligeledes medføre trækspændinger, men plastiske svindrevner er karakteristiske ved, at de optræder meget tidligt.

I praksis vil alle de nævnte svindmekanismer optræde.

Ved støbning af konstruktioner med varierende tværsnit, f.eks. dobbelt T-plader, vil der kunne optræde temperaturforskelle mellem pladen og kroppen, som til en vis grad svarer til problemstillingen i eksempel 4. En balanceret isolering af tykke og tynde tværsnit vil være en praktisk løsning på dette problem.

Der er i eksemplerne 9 og 10 behandlet typiske problemstillinger vedrørende termorevner.

Betydende parametre

Temperaturforløbet under hærdningen vil afhænge af flere faktorer, hvoraf de væsentligste er nævnt i det følgende:

- Betonens udstøbningsstemperatur.
- Cementmængde og -type (hydratiseringsvarme).
- Indhold af puzzolaner (hydratiseringsvarme).
- Konstruktionens geometri.
- Formmateriale (evt. isolering).
- Omgivelserne (temperatur, vindhastighed).

Herudover er der en række andre parametre, som i mindre grad vil påvirke temperaturforløbet.

Vand/cement-forholdet har således en vis betydning for hydratiseringsvarmen, og anvendelsen af tilsætningsstoffer kan ligeledes ændre varmeudviklingsforløbet.

Endvidere vil betonens varmeledningsevne og varmefyldte kunne variere med betonsammensætningen og hærdningsgraden. Betydningen af de enkelte parametre fremgår af de følgende afsnit.

Varmefyldte

Når et materiale får tilført varmeenergi, stiger temperaturen. Temperaturstigningens størrelse er materialeafhængig, og er fastlagt ved materialets varmefyldte, c . Enheden for c er: $J/g^{\circ}C$ eller ofte $kJ/kg^{\circ}C$ i forbindelse med hærdeteknologi. Vand har ved 20°C varmefylden 4,19 $kJ/kg^{\circ}C$, hvilket betyder, at temperaturen stiger 1°C, hvis 1 kg vand får tilført 4,19 kJ. For de fleste andre materialer, som indgår i beton (tilslag, cement, puzzolaner) er

varmefylden ca. 0,85 kJ/kg/°C. Varmefylden er temperaturafhængig. Den friske betons varmfylde kan udregnes efter en simpel blandingsmodel, jf. eksempel 5.

Eksempel 5. Varmefylde.

For en beton med 300 kg cement, 150 kg vand og 1850 kg tilslag pr. m³, kan varmfylden af den friske beton beregnes som:

$$c = \frac{150 \cdot 4,19 + 2150 \cdot 0,85}{2300} = 1,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Se eksempel 6, samt tabel 1 vedrørende anvendelse heraf.

Betonens varmfylde ændres med hærdningsgraden, hvilket hænger sammen med, at vandet bindes som faststof og derved får en lavere varmfylde. Følgende talværdier kan erfaringsmæssigt anvendes for almindelig beton:

- Frisk beton: 1,0–1,1 kJ/kg/°C.
- Hærdnet beton: 0,8–1,0 kJ/kg/°C.
- Letbeton: 1,0–1,3 kJ/kg/°C.

I [12] og [13] er redegjort for omfattende studier af betons varmfylde, og af metoder til estimering af denne.

Til de fleste praktiske formål vil det ovenfor anførte dog give tilstrækkelig nøjagtighed. Dette skyldes bl.a., at varmfylden benyttes til beregning af varmeudviklingen på grundlag af temperaturstigninger ved adiabatisk kalorimetri, se herom senere, hvorefter den atter indgår som reciprok værdi ved beregning af temperaturstigninger på grundlag af de beregnede varmeudviklingsdata. Herved ophæves eventuelle fejl.

Varmeledningsevne

Et materiales varmeledningsevne λ angiver et materiales evne til at lede termisk energi. Enheden for λ er: W/m/°C eller sædvanligvis kJ/m/h/°C.

Varmeledningsevnen angiver den varmemængde, der i løbet af 1 time passerer 1 m² af en 1 m tyk skive, når temperaturforskellen mellem de to sider er 1°C. Varmeledningsevnen kan ikke på samme måde som varmfylden beregnes ved en simpel blandingsmodel.

For beton vil den primært afhænge af rumvægten og fugtindholdet, og man kan til praktiske formål regne med følgende talværdier:

- Beton, frisk: 7,5–8,4 kJ/m/h/°C.
- Beton, hærdnet: 5,9–7,5 kJ/m/h/°C.
- Letbeton: 2,1–3,3 kJ/m/h/°C.

I praksis benyttes sædvanligvis værdierne 8 kJ/m/h/°C for frisk beton og 6 kJ/m/h/°C for hærdnet beton.

Der er i [12] og [13] redegjort for metoder til estimering af varmeledningsevnen.

Udstøbningsstemperatur

Betonens udstøbningsstemperatur er et samspil mellem delmaterialernes temperatur, og blandingstemperaturen kan udregnes som vist i eksemplet i tabel 1.

Der vil udvikles en vis varme under blandingen, og udstøbningsstemperaturen vil sædvanligvis være 2–4°C højere end beregnet.

I praksis vil udstøbningsstemperaturen være let at måle, og beregningsmodellen vil især finde anvendelse til vurdering af

	Mængde, M, kg/m ³	Varmefylde, c, kJ/kg/°C	Varmekapacitet, M·c, kJ/°C/m ³	Temperatur, T, °C	Energi, M·c·T, kJ/m ³ (nulpunkt = 0°C)
Cement	300	0,85	255	40	10200
Tilslag	1850	0,85	1572,5	15	23588
Vand	150	4,19	628,5	60	37710
Total	2300		2456		71498
Beregnet	$c_{\text{beton}} = \frac{2456}{2300} = 1,07$		$T_{\text{beton}} = \frac{71498}{2456} = 29$		

Tabel 1. Eksempel på beregning af blandingstemperatur, T_{beton} på baggrund af betonsammensætning og materialetemperaturer.

	Varmefylde, kJ/kg/°C	Smeltevarme, kJ/kg	Fordampningsvarme, kJ/kg
Is	2,20	333	
Vanddamp	2,00		2260

Tabel 2. Termiske materialekonstanter for is og vanddamp. Som det fremgår er is og især vanddamp meget effektive til at fjerne henholdsvis tilføre energi til den friske beton.

ændringer i betontemperaturen, f.eks. ved tilsætning af varmt blandevand, damp, is o.l.

I praksis vil en del af vandet findes i tilslaget, og vil følgelig skulle indgå med den aktuelle temperatur.

For is og vanddamp kan materialekonstanterne i tabel 2 benyttes, og som det fremgår heraf, er damp en meget effektiv måde at tilføre energi på.

Beton vil under transport og udstøbningsudveksle varme med omgivelserne, og den reelle udstøbningsstemperatur er den temperatur, betonen har, når den er udstøbt.

Udover udstøbningsstemperaturens direkte betydning for temperaturforholdene vil der, som følge af temperaturens indflydelse på reaktionshastigheden, opstå en indirekte virkning.

Udstøbningsstemperaturen er en meget vigtig parameter, som der i vid udstrækning er mulighed for at variere.

Varmeudvikling

Cement

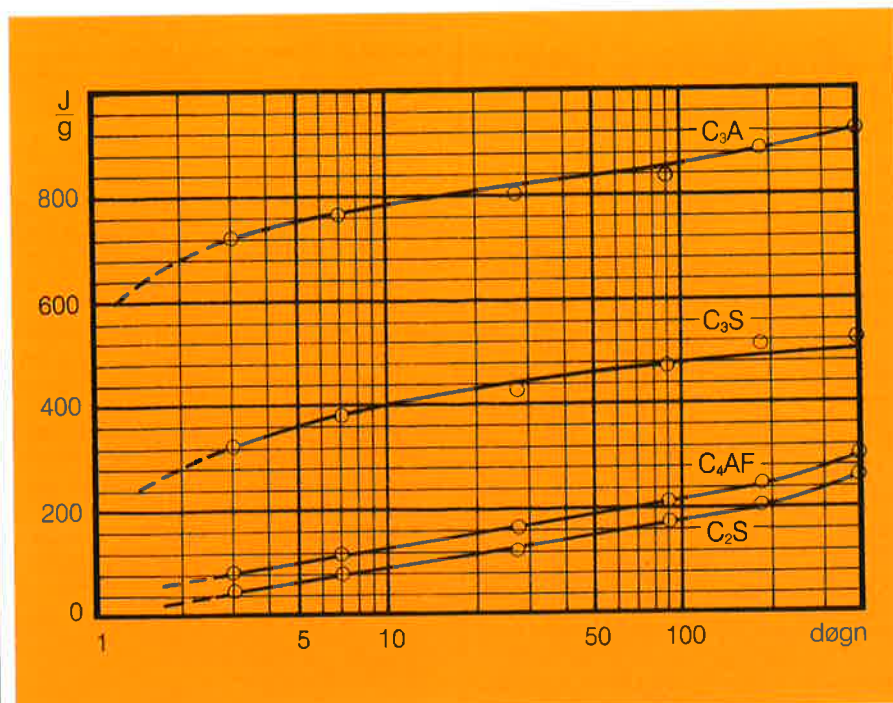
Cements reaktion med vand er en eksoterm kemisk proces, hvilket vil sige, at der udvikles varme ved processen (hydratiseringsvarme).

Den varmemængde, der udvikles, er afhængig af cementens indhold af de enkelte klinkerminerale: C₃S, C₂S, C₃A og C₄AF.

De forskellige klinkermineralers varmeudvikling fremgår af figur 7.

De fire klinkerminerale har forskellige karakteristika, og de forskellige cementtyper fremkommer ved, at der i produktionen styres mod et bestemt blandingsforhold mellem de enkelte klinkerminerale. De cementtyper, Aalborg Portland fremstiller, har typiske sammensætninger som vist i tabel 3.

Til et groft skøn, f.eks. ved sammenligning af forskellige cementtyper, kan den



Figur 7. Hydratiseringsvarme for de fire klinkerminerale ved 23°C, et vand/cementforhold på 0,45 og en Blaineoverflade på 310 m²/kg, fra [14].

Cementnavn	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Na ₂ O-ækv.	CaSO ₄	Flyveaske
Standard-Cement	55	18	8	9	0,5-0,7	3,0-5,0	20-25
Rapid-Cement	55	18	8	9	0,5-0,7	3,0-5,0	<5
Lavalkali Sulfatbestandig Cement	55	26	4	8	0,3-0,4	2,5-3,0	spor
Hvid Portland-Cement	66	20	4	1	0,2	2,0-3,0	0

Tabel 3. Cementens kemiske sammensætning angives sædvanligvis som dens beregnede indhold af klinkerminerale: C₃S, C₂S, C₃A og C₄AF. Ud over disse klinkerminerale indeholder cementen alkaliforbindelser samt gips og eventuelt flyveaske tilsat under formalingen.

	Aktivitetsfaktor		
	Varmeudvikling	Vand/cement-forhold	Trykstyrke
Mikrosilica	0,8-1,2	2,0	3-5
Flyveaske	0,3-0,6	0,5	0,3-0,6

Tabel 4. Vejledende aktivitetsfaktorer med hensyn til varmeudvikling, vand/cement-forhold og 28 døgns trykstyrke. Aktivitetsfaktoren for varmeudvikling refererer til Rapid-Cement.

varmemængde, der vil udvikles, beregnes som vist i eksempel 6.

Eksempel 6. Varmeudvikling.

På grundlag af tabel 3 samt figur 7 kan varmeudviklingen efter 28 døgn beregnes som:

Rapid-Cement,

$$Q_{28} = 0,55 \cdot 420 + 0,18 \cdot 125 + 0,08 \cdot 805 + 0,09 \cdot 170 = 333 \text{ kJ/kg.}$$

Lavalkali Sulfatbestandig Cement,

$$Q_{28} = 0,55 \cdot 420 + 0,26 \cdot 125 + 0,04 \cdot 805 + 0,08 \cdot 170 = 309 \text{ kJ/kg}$$

For betonen i eksempel 5 vil det, hvis varmen ikke slipper væk, medføre følgende temperaturstigninger:

Rapid-Cement:

$$\Delta T_{28} = \frac{300 \cdot 333}{2300 \cdot 1,07} \approx 41^\circ\text{C}$$

Lavalkali Sulfatbestandig Cement:

$$\Delta T_{28} = \frac{300 \cdot 309}{2300 \cdot 1,07} \approx 38^\circ\text{C}$$

Det er en forudsætning for anvendelsen af figur 7, at der er tilstrækkeligt vand til hydratiseringsprocessen.

For fint formalede cementer, som har en stor overflade, vil reaktionerne forløbe hurtigere end for groft formalede cementer. Varmeudviklingshastigheden, og dermed varmeudviklingen til et givet tidspunkt, vil derfor, alt andet lige, være størst ved de fint formalede cementtyper.

Cementens sekundære komponenter, alkalier, gips m.v., har endvidere en vis indflydelse på varmeudviklingsforløbet, og det er derfor ikke muligt præcist at beregne de forskellige cementtypers varmeudvikling og den hastighed, hvormed det sker. Dette må fastlægges ved målinger på den aktuelle cementtype. Relevante målemetoder omtales i et efterfølgende afsnit.

Aalborg Portland foretager løbende målinger på beton med forskellige cementtyper og publicerer resultaterne i Beton-Teknik »Fra CtO's arbejdsmark«. Disse data kan anvendes til overslagsmæssige beregninger.

Puzzolaners varmeudvikling

Puzzolaner som flyveaske og mikrosilica bidrager til varmeudviklingen, men da disse er mindre reaktive end cement, bliver varmebidraget fra puzzolanerne tidsmæssigt forrykket i forhold til cementens. Især flyveaske udviser et væsentligt langsommere og lavere varmeudviklingsforløb end cement.

På nuværende tidspunkt er puzzolanernes indflydelse på betons varmeudvikling ikke fuldt belyst, og forholdene kompliceres i nogen grad af en ikke uvæsentlig vekselvirkning mellem cement og puzzolan. Et givet puzzolanmateriales varmeudvikling vil således afhænge af cementtype og doseringsniveau.

Herudover er der nogen usikkerhed omkring temperaturens indflydelse på puzzolanreaktioner, idet den sædvanlige modenhedsfunktion synes at undervurdere temperaturindflydelsen.

Resultater fra foreløbige undersøgelser tyder dog på, at man ved overslagsberegninger kan benytte aktivitetsfaktorer efter de samme principper, som har været anvendt med hensyn til trykstyrke og beregning af v/c-forhold, jf. tabel 4.

Mikrosilica bidrager, jf. tabellen, mindre til varmeudviklingen, end den gør til styrke og v/c-forhold. Beton med mikrosilica vil derfor udvikle mindre varme end en »tilsvarende« beton uden mikrosilica.

I flyveaskebeton er der derimod ikke den samme fordel, idet aktivitetsfaktorerne er næsten ens.

Under forhold, hvor temperaturen i konstruktionen ikke bliver særlig høj, har flyveaske dog vist sig at kunne medvirke til en reduktion af temperaturen.

Der er som nævnt tale om en kompliceret vekselvirkning mellem cement, puzzolaner og andre tilsætningsstoffer, og for en mere nøjagtig fastlæggelse af varmeudviklingen må der foretages målinger, som beskrevet i det følgende.

Kalorimetri

Flere af de materialer, der indgår i en betonblanding, har som nævnt indflydelse på hærdningen og varmeudviklingen. Tilsætningsstoffer kan enten accelerere eller retardere udviklingen, og de forskellige typer bindemiddel har hver deres varmeudvikling.

Ved planlægning af arbejder med konstruktioner, hvor det er afgørende, at beregningsforudsætningerne er i bedst mulig overensstemmelse med virkeligheden, er det derfor nødvendigt at foretage en måling af varmeudviklingen for den betonblanding, der påtænkes anvendt til det aktuelle byggeri.

Sådanne målinger kan enten ske ved adiabatisk kalorimetri eller ved såkaldt hokasse-kalorimetri.

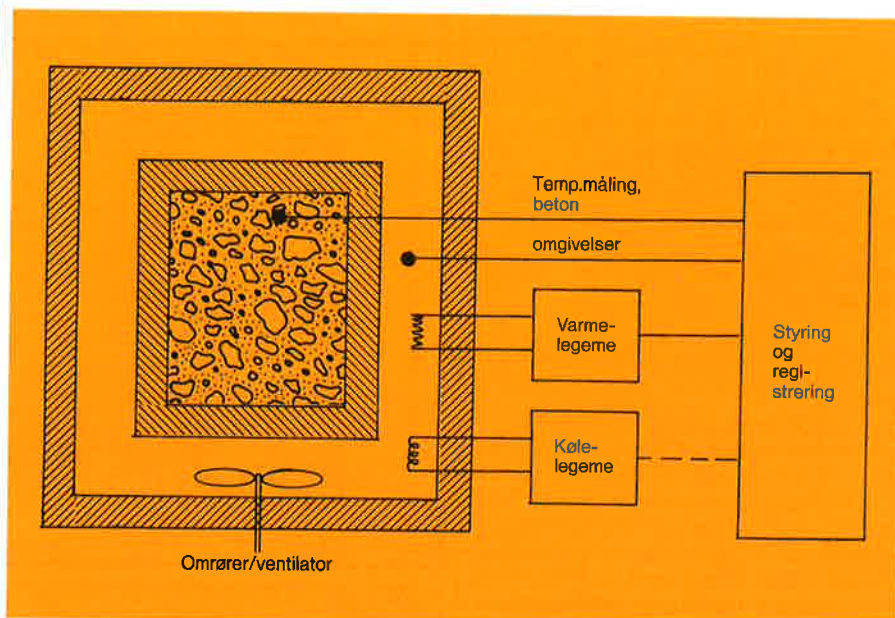
Ledningskalorimetri og opløsningskalorimetri er andre metoder, men disse udføres sædvanligvis kun på cementpasta.

Adiabatisk kalorimetri

Adiabatisk betyder, at der ikke sker nogen varmeudveksling med omgivelserne. Den varme, der udvikles, forbliver således inde i betonen og resulterer i en temperaturstigning.

Et adiabatisk kalorimeter er i princippet opbygget som vist i figur 8.

Styringen skal sikre, at temperaturen i det yderste kammer nøje følger betonprøvens temperatur, således at varmeudveksling mellem prøve og omgivelser ikke



Figur 8. Adiabatisk kalorimeter, principskitse.

Systematisk afvigelse °C/døgn	Q_{∞} kJ/kg	τ_e Timer	α
-0,5	293	13,1	1,00
-0,2	305	13,7	0,95
0,0	313	14,1	0,91
+0,2	321	14,5	0,88
+0,5	333	15,2	0,84

Tabel 5. Effekt af systematisk afvigelse fra adiabatisk forhold. Beton med 310 kg Lavalkali Sulfatbestandig Cement pr. m³.

finder sted. Dette lyder enkelt, men stiller meget store krav til styringen, og rutinemæssige check af kalorimeteret må anbefales. I praksis vil det være vanskeligt at opnå ideelle adiabatisk forhold.

Et simpelt check af kalorimeteret kan gennemføres ved at undersøge stabiliteten af en passiv betonprøve, som opvarmes før den anbringes i kalorimeteret. Stabiliteten bør være bedre end $\pm 0,1-0,5^\circ\text{C/døgn}$, afhængig af målingernes anvendelse.

Vedrørende målemetoden samt problemerne med denne henvises til [15] og [16].

Under målingen registreres temperaturen som funktion af tiden. Måleresultaterne kan herefter, med kendskab til betonens rumvægt, varmeyfyde og cementindhold, omregnes til udviklet varmemængde pr. kg cement som funktion af tiden efter formlen:

$$Q_r = \frac{(T_r - T_s) \cdot c \cdot \rho}{CIH}$$

hvor

Q_r = Udviklet varmemængde til tiden τ , [kJ/kg cement].

T_r = Temperatur til tiden τ , [°C].

T_s = Starttemperatur, [°C].

c = Betonens varmeyfyde, [kJ/kg/°C].

ρ = Betonens densitet, [kg/m³].

CIH = Betonens cementindhold, [kg/m³].

Hvis der indgår puzzolaner, udregnes varmeudviklingen sædvanligvis på grundlag af kg cement og kg puzzolan (uden aktivitetsfaktorer). Ved den efterfølgende brug af resultaterne, er det vigtigt at benytte samme grundlag. Betonens varmeyfyde er som nævnt ikke konstant i hærdeperioden, men det er almindelig praksis at benytte en konstant værdi udregnet efter blandingsforholdet. Når dette også gøres ved efterfølgende temperatursimuleringer, ophæves fejlen. Resultaterne transformeres endvidere til modenhestimer jf. afsnit herom.

De adiabatisk måleresultater kan herefter anføres som udviklet varmemængde som funktion af modenhed. Benyttes der en logaritmisk tidsakse, får varmeudviklingsforløbet udseendet i figur 9.

En sådan kurve kan tilnærmes med udtrykket:

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}\right), [\text{kJ/kg cement}]$$

hvor

Q_{∞} = Slutvarme, [kJ/kg cement].

τ_e = Tidskonstant, [timer].

α = Krængningsparameter.

M = Modenhed, [timer].

Parametrene: Q_{∞} , τ_e og α fastlægges sædvanligvis ved mindste kvadraters metode, men der findes også grafiske metoder, som ikke kræver et stort regnearbejde, se f.eks. [4].

En systematisk afvigelse fra adiabatisk forhold vil influere kraftigt på modellens parametre, især Q_{∞} , jf. tabel 5.

Modellen er velegnet til brug ved simulering af temperaturforløb i hærden betonkonstruktioner, og finder også anvendelse til beskrivelse af f.eks. styrkudviklingsforløb.

Høkkasse-kalorimetri

Der er de seneste år udviklet et kalorimeter, som baserer sig på en kombination af et adiabatisk kalorimeter og et ledningskalorimeter.

Dette kalorimeter består af en kraftig isoleret beholder, hvori prøven anbringes.

Varmeudviklingen registreres dels ved omregning af temperaturstigningen i prøven, dels ved en registrering af den varmemængde, systemet mister til omgivelserne. Kalorimeteret er dermed ikke afhængig af en meget krævende styring, hvilket gør det mere robust til praktisk brug.

Rutinemæssig kalibrering vil dog også være påkrævet for denne kalorimetertype.

Der er ikke tale om ideelle adiabatisk forhold, men da temperaturforløbet i betonkonstruktioner aldrig vil forløbe adiabatisk har høkkasse-kalorimeteret derfor ofte mere lighed med de virkelige forhold end det adiabatisk kalorimeter.

Varmeudveksling med omgivelserne

Varmeudvekslingen (ofte varmetabet) med omgivelserne vil afhænge af betonens temperatur, omgivelsernes temperatur og den isolering, som form og afdækning giver konstruktionen.

Varmetabet ved konvektion kan beregnes som:

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T$$

hvor

\dot{Q} er varmestrømmen, [W] eller ofte [kJ/h].

A er fladens areal, [m²].

ΔT er temperaturforskellen mellem betonoverflade og omgivelser, [°C].

k er transmissionstallet eller overgangstallet, [W/m²/°C] eller ofte [kJ/m²/h/°C].

Transmissionstallet k afhænger af form-system samt vindhastighed. Beregning af k kan ske efter følgende formel:

$$k = \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}$$

hvor m 'erne er transmissionsmodstandene i de enkelte lag, som indgår i form-systemet.

Varmeovergangen fra en overflade til luften er behæftet med en overgangsmodstand, som afhænger af vindhastigheden:

$$m = \begin{cases} \frac{1}{20 + 14 \cdot v} & \text{for } v \leq 5 \text{ m/sek,} \\ & [\text{kJ/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}]. \\ \frac{1}{25,6 \cdot v^{0,78}} & \text{for } v > 5 \text{ m/sek,} \\ & [\text{kJ/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}]. \end{cases}$$

hvor v er vindhastigheden i m/sek. Beregning af transmissionstal er vist i eksempel 7.

Eksempel 7. Transmissionstal.

Et formsystem af 19 mm finer samt 20 mm polystyren vil have et transmissionstal, som med en vindhastighed på 5 m/sek kan beregnes som:

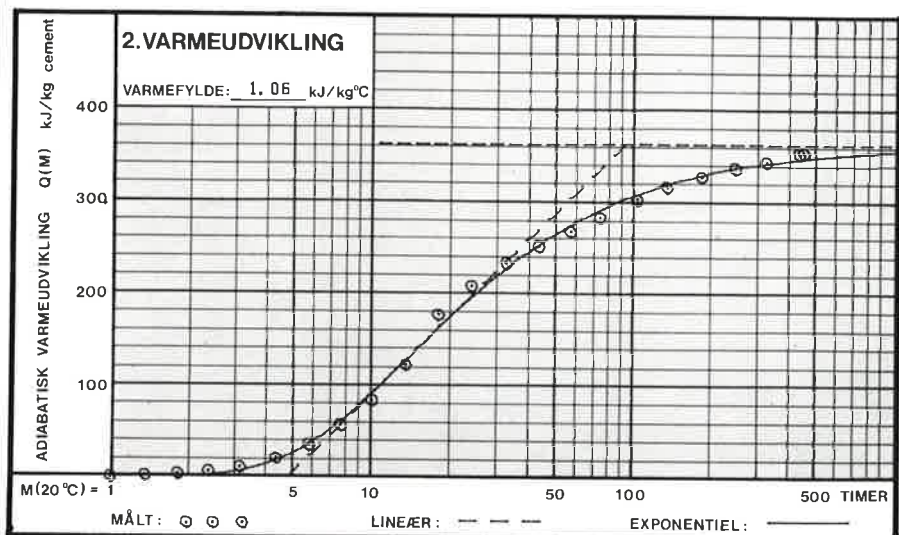
$$k = \frac{1}{\frac{0,019}{0,7} + \frac{0,02}{0,15} + \frac{1}{20 + 14 \cdot 5}}$$

$$= 5,8 \text{ kJ/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$$

Varmeledningsevnen for træ henholdsvis polystyren er fundet i tabel 6.

Nomogrammet i figur 10 fra [4] viser transmissionstallet for en række form- og afdækningsmaterialer.

Hvis der er tale om en afdækning, som



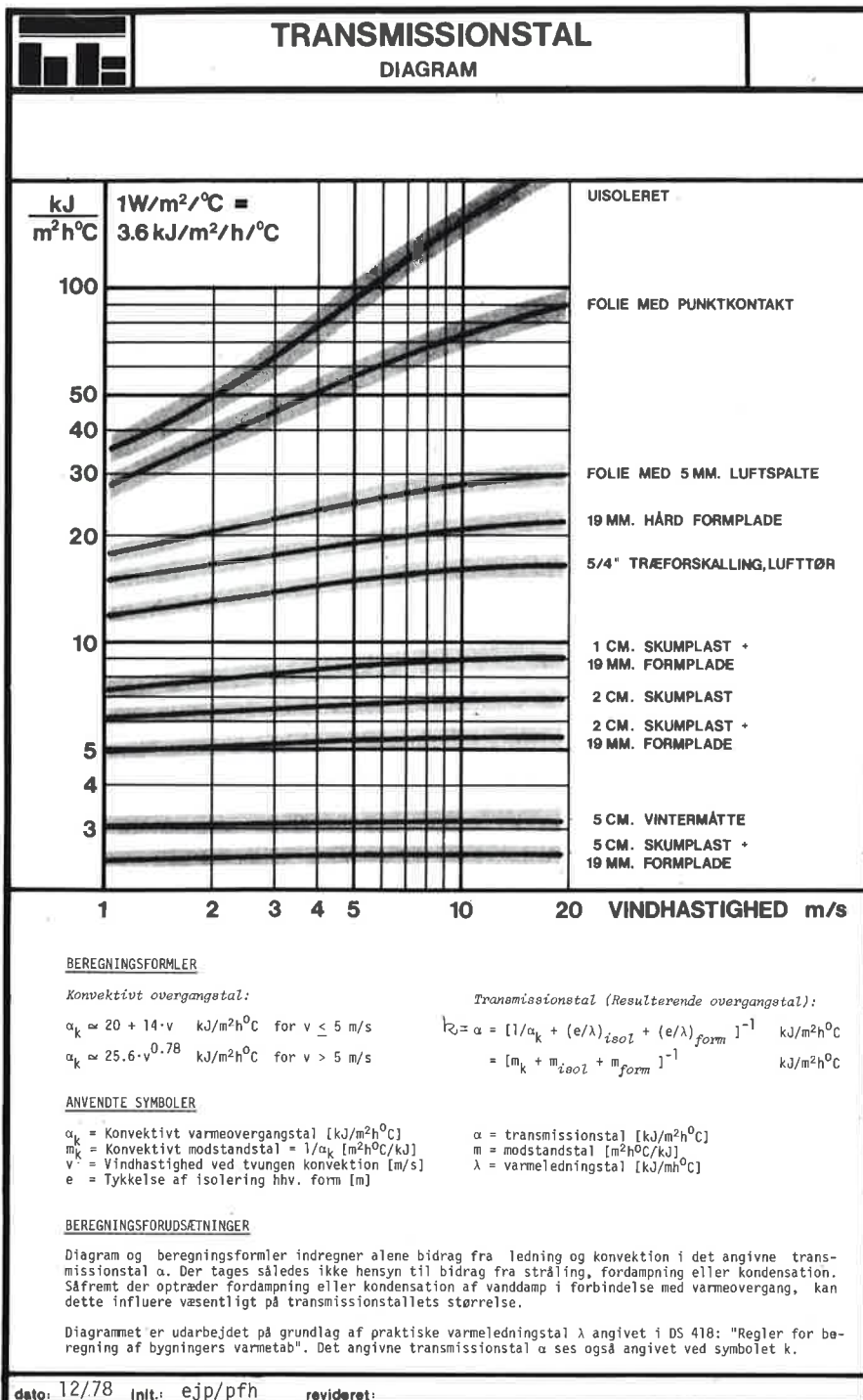
Figur 9. Varmeudviklingsforløb, målt ved adiabatisk kalorimetri, $Q(M) = 361 \cdot \exp\left(-\left(\frac{13,7}{M}\right)^{0,92}\right)$, [kJ/kg cement]

Materiale	Praktisk varmeledningstal, λ kJ/m/h°C
Jern/stål	ca. 200
Aluminium	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

Tabel 6. Praktiske varmeledningstal for forskellige materialer. Fra [7].

ikke ligger tæt mod betonoverfladen, vil der være en betydelig usikkerhed ved fastlæggelsen af transmissionstallet. I vand vil det konvektive overgangstal være af størrelsesordenen 2.000–40.000 kJ/

m²/h°C, hvilket i praksis vil betyde, at overfladen antager vandets temperatur. Varmeudvekslingen vil endvidere ske ved stråling, men dette bidrag tages som regel ikke i regning. I tilfælde, hvor den var-



Figur 10. Nomogram til fastlæggelse af transmissionstallet. Fra [4].

me overflade er ubeskyttet og omgivet af kolde overflader eller vender mod en klar nattehimmel, kan varmetabet dog blive betydeligt. Tilsvarende kan beton opvarmes ved strålevarme.

Endelig vil der i tilfælde af fordampning fra en overflade kunne fjernes betydelige varmemængder, men det er vanskeligt at vurdere, hvor stor fordampningen vil være i forbindelse med afformning.

I [17] er foretaget en rapportering af de hidtidige resultater fra et projekt, som skal belyse disse forhold nærmere.

Konstruktionens geometri

Den varme, som udvikles i betonen, vil ledes ud til overfladen, hvor den afgives til omgivelserne. Modstanden mod den indre varmetransport afhænger af materialets varmeledningsevne samt af transportvejen. For store dimensioner er transportvejen lang, og modstanden vil derfor være stor, og varmen have svært ved at slippe bort.

Varmetabet vil især foregå ad den vej, som har den mindste varmeledningsmodstand, og det vil derfor sædvanligvis være den mindste dimension (f.eks. tykkelsen af en væg), som vil være bestemmende for temperaturforholdene.

Geometriens betydning er yderligere belyst i det efterfølgende afsnit.

Varmebalancen i konstruktionen

Temperaturforløbet i en betonkonstruktion vil fremkomme, som en balance mellem varmeudvikling, varmeledning og varmeudveksling med omgivelserne.

Hvis en af disse processer er markant langsommere end de to øvrige, vil det primært være denne proces, der bestemmer temperaturforløbet.

Dette er illustreret i figur 11, som viser tre principielle temperaturfordelinger i en væg.

I praksis vil det som regel være kombinationer af tilfælde B og C, som vil være interessante at kunne vurdere, men der vil dog også, f.eks. under vinterforhold, kunne opstå problemer, hvor tilfælde A foreligger.

Forholdet mellem varmeledningen og varmeafgivelsen kan karakteriseres ved forholdet mellem den indre modstand mod varmeledning, δ/λ , og den ydre modstand mod varmeafgivelse $1/k$. Dette forhold betegnes Biot-tallet, og er givet ved:

$$Bi = \frac{\delta/\lambda}{1/k} = \frac{k \cdot \delta}{\lambda}, \quad \text{[dimensionsløs]}$$

hvor

k = Transmissionstal, [kJ/m²h°C].

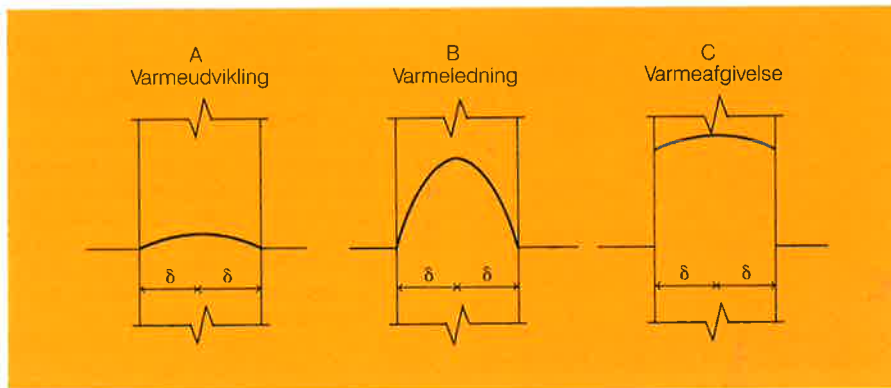
δ = Karakteristisk dimension, [m].

λ = Betonens varmeledningsevne, [kJ/mh°C].

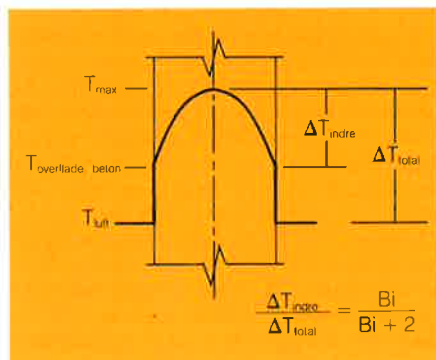
Hvis Biot-tallet er stort (≥ 1) er forholdene som vist i tilfælde B i figur 9, og hvis Biot-tallet er lille ($\ll 1$), foreligger tilfælde C.

Biot-tallet er et klassifikationstal, som udtrykker noget om temperaturfordelingens principielle udseende, men det fortæller ikke noget om temperaturniveauet i konstruktionen.

Under forudsætning af en parabolisk tem-



Figur 11. Principielle temperaturprofiler i en hærdnende betonvæg. Den langsomste af de 3 processer: A, B og C vil primært bestemme temperaturprofilen.



Figur 12. Formel til beregning af temperaturforskelle.

temperaturfordeling, kan følgende formel udledes, jf. figur 12.

$$\frac{\Delta T_{\text{indre}}}{\Delta T_{\text{total}}} = \frac{Bi}{Bi + 2}$$

Formlen kan anvendes på flere måder, hvoraf en er illustreret i eksempel 8.

Eksempel 8. Biot-formel.

En entreprenør ønsker inden afformning af en væg at vurdere den temperaturforskel, som vil optræde i væggen, når formen er fjernet.

Væggen er 0,60 m tyk, og temperaturen i midten af væggen vides at være 50°C (målt, eller beregnet). Lufttemperaturen er 10°C, og vindhastigheden er ca. 5 m/sek (let vind).

$$\delta = 0,30 \text{ m}, \lambda = 8 \text{ kJ/m/h}^\circ\text{C}, k = 20 + 14 \cdot 5 = 90 = \text{kJ/m}^2/\text{h}^\circ\text{C}.$$

$$Bi = \frac{k \cdot \delta}{\lambda} = \frac{90 \cdot 0,30}{8} = 3,4$$

$$\frac{\Delta T_{\text{indre}}}{(50 - 10)^\circ\text{C}} = \frac{3,4}{3,4 + 2} = >$$

$$\Delta T_{\text{indre}} = 0,63 \cdot 40^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$$

Entreprenøren kan altså forvente en temperaturforskel i væggen på 25°C efter afformning, og kan sammenholde dette med eventuelle krav til tilladelige temperaturforskelle.

Hvis temperaturniveauet i væggen er faldende (vil ofte være tilfældet efter 1 døgn), vil metoden være lidt på den sikre side. Omvendt hvis temperaturen i væggen er stigende.

Varmeudviklingsprocessen er væsentligt mere kompliceret end de to andre processer, og det er ikke muligt at opstille til-

svarende simple formeludtryk, som tilfældet er med Biot-tallet.

Afkølingsforløbet kan beskrives ved Fourier-tallet:

$$Fo = \frac{\lambda \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot \delta^2}, \text{ [dimensionsløs]}$$

hvor

λ = Betonens varmeledningsevne, [kJ/m/h°C].

τ = Tid, [timer].

ρ = Rumvægt, [kg/m³].

c = Betonens varmekapacitet, [kJ/kg°C].

δ = Karakteristisk dimension, [m].

Et meget væsentligt forhold, som kommer til udtryk i Fo-tallet er, at konstruktionens karakteristiske dimension δ indgår i anden potens. Dette vil med andre ord sige, at hvis en væg gøres **dobbelt** så tyk, vil det være fire gange så lang tid at slippe af med den udviklede varme.

Der er udviklet metoder, som på basis af Fo-tal og Bi-tal fastlægger temperaturstigningen og afkølingsforløbet i en konstruktion, men den stigende anvendelse af EDB har gjort det muligt at foretage egentlige simuleringer af temperaturforholdene under hærdningen.

Temperatur-simulering

Med det formål at kunne vurdere hærdforholdene på forhånd er der udviklet forskellige metoder til forudsigelse af temperaturen under hærdningen.

De første metoder, som blev udviklet, var baseret på nomogrammer og temperaturresponskort, men i takt med den stigende anvendelse af EDB er behovet for disse metoder blevet stadig mindre. Temperatursimuleringsprogrammer giver således langt flere muligheder end nomogram-metoderne.

SBI's vinterstøbningsanvisning [7] kan dog med fordel anvendes til vurdering af risiko for frysning etc.

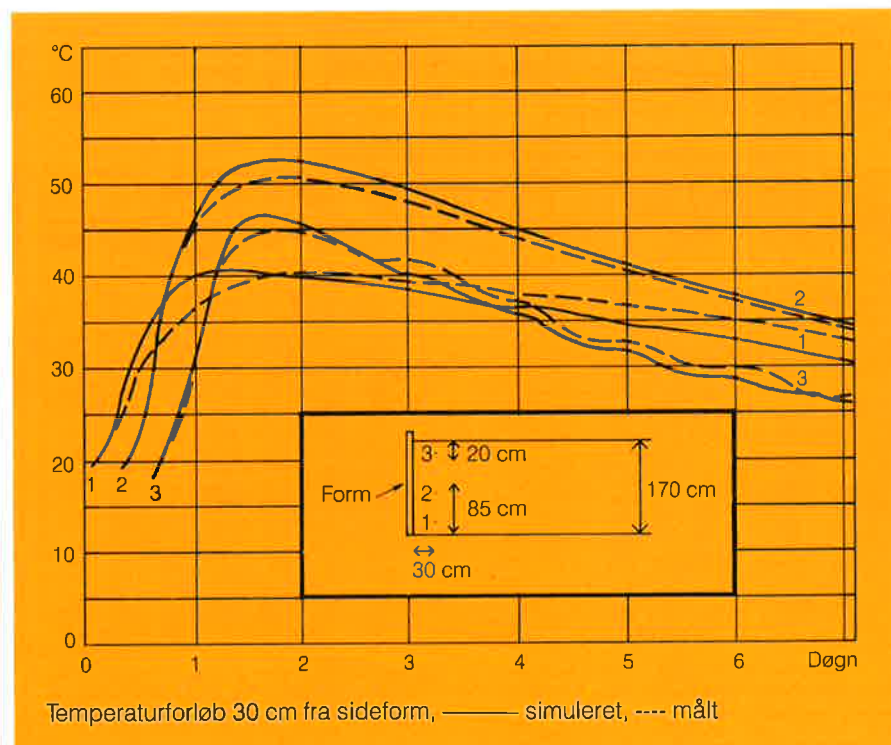
Temperatursimuleringsprogrammer kan opbygges efter forskellige numeriske beregningsprincipper, men det ligger uden for denne publikations rammer at gennemgå disse.

Dekrementmetoden [18] adskiller sig fra disse metoder ved at være bygget op omkring en analytisk løsning af Fouriers varmeledningsgligning, og metoden udmærker sig ved et begrænset beregningsarbejde, som vil kunne gennemføres ved brug af lommeregner. Metoden forudsætter, at der er tale om et symmetrisk tværsnit, hvilket i praksis begrænser anvendelsesområdet.

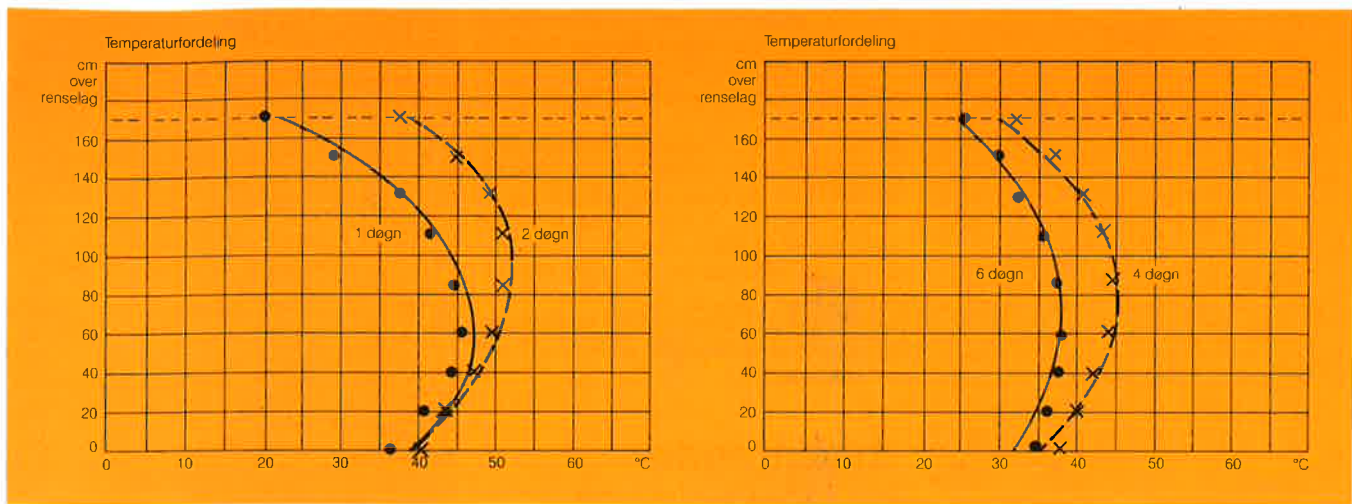
De fleste programmer omhandler endimensionale forhold, som vægge, dæk, pladefundamenter, men der findes dog også programmer, som kan behandle mere komplicerede systemer, som f.eks. bjælker.

I [19] er beskrevet et »hærdeteknologi-system«, som omfatter program til planlægning, udførelse og kontrol (PUK) af hærdforholdene for betonkonstruktioner.

Hvis forudsætningerne for simuleringen er i god overensstemmelse med de virkelige forhold, vil de simulerede temperaturforhold også være det, se f.eks. figur 13 og 14.



Figur 13. Målte og simulerede temperaturforløb i pladefundament.



Figur 14. Målte og simulerede temperaturprofiler i pladefundament. Temperaturfordeling i lodret snit 30 cm fra sideform efter 1, 2, 4 og 6 døgn. Kurverne er simulerede fordelinger og punkterne er målte værdier.

Usikkerheden kan dels skyldes manglende evne til at spå om f.eks. vejforholdene på udstøbningsdagen. Dette bør principielt imødegås ved at foretage simuleringer for en række forskellige forudsætninger, så konsekvenserne af f.eks. uventet nattefrost kan vurderes på forhånd. En anden type af usikkerhed hidrører fra upræcise data for indgående materialer. En række forudsætninger skønnes f.eks. ud fra tabeller m.v., og disse forudsætninger kunne principielt have været fastlagt med større præcision ved målinger, eller leverandørplysninger, forud for støbningen.

Eksempler herpå er formsystemets transmissionstal og betonens varmeudvikling. Endelig vil der være en usikkerhed, som skyldes manglende overensstemmelse mellem simuleringens matematiske forudsætninger og de virkelige forhold, f.eks. endimensionel varmeledning, lokal varmeledning i armeringsjern, varmekapacitet af form og armering m.v. Det vil normalt være muligt at opnå god nøjagtighed for svære konstruktioner (figur 13 og 14), hvorimod der for meget slanke konstruktioner vil være større følsomhed for eventuelle usikkerheder i beregningsgrundlaget.

Der er i de efterfølgende eksempler benyttet et temperatursimuleringsprogram til at belyse typiske, praktiske problemer,

Eksempel 9. Temperaturforskelle.

En 40 cm tyk væg skal udstøbes på en kraftig bundplade. Temperaturforskellen mellem midte og overflade må ikke overstige 20°C. Temperaturforskellen mellem væggenes middeltemperatur og bundpladens middeltemperatur må ikke overstige 15°C.

Forudsætninger:
 Væg: 310 kg Lavalkali Sulfatbestandig Cement.
 Udstøbningsstemperatur 15°C.
 19 mm finerform.

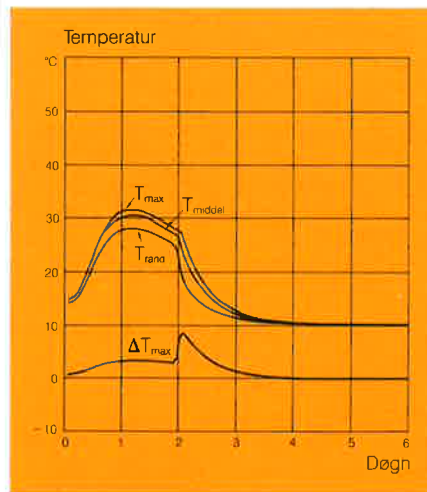
Omgivelser:
 Lufttemperatur 10°C.
 Vindhastighed 5 m/sek.
 Fundamentstemperatur 10°C.

Temperaturforløbet i figur 15 må forventes, og der vil være problemer med at overholde kravet til temperaturforskel mellem væg og fundament.

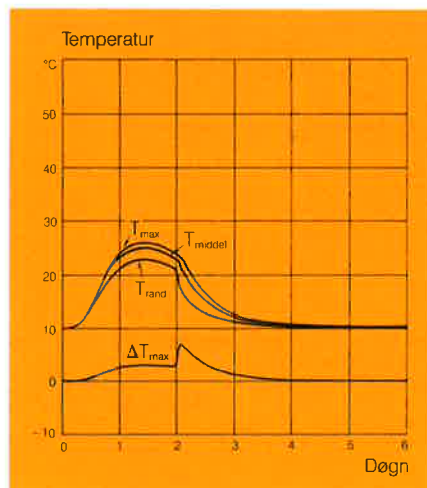
Hvis udstøbningsstemperaturen reduceres til f.eks. 10°C, vil temperaturforholdene i stedet blive som vist i figur 16, og kravene vil dermed kunne overholdes: Entreprenøren kan alternativt vælge at opvarme fundamentet lokalt til ca. 17°C, eller at køle væggen ved indstøbning af kølerør, jf. f.eks. [20].

Eksempel 10. Temperaturforskelle.

En 100 cm tyk broplade skal under hærdningen sikres mod temperaturforskelle større end 20°C.



Figur 15. Simulerede temperaturforløb for eksempel 9, tilfælde 1.



Figur 16. Simulerede temperaturforløb for eksempel 9, tilfælde 2.

Forudsætninger:

Broplade: 350 kg Lavalkali Sulfatbestandig Cement pr. m³.
 Udstøbningsstemperatur 20°C,
 5/4" træform.
 Overside afdækket med bobleplast.

Omgivelserne:

Lufttemperatur 20°C.
 Vindhastighed 5 m/sek.

Hvis afdækning og form fjernes efter 3 døgn, kan temperaturforskellen begrænses til knap 20°C, jf. figur 17. Der vil lokalt ved kanter o.l. kunne opstå problemer, hvorfor disse bør isoleres med f.eks. vintermåtter.

De termiske bevægelser, som vil optræde under hærdningen, skal naturligvis kunne optages i lejer og dilatationsfuger.

Eksempel 11. Frostsikkerhed.

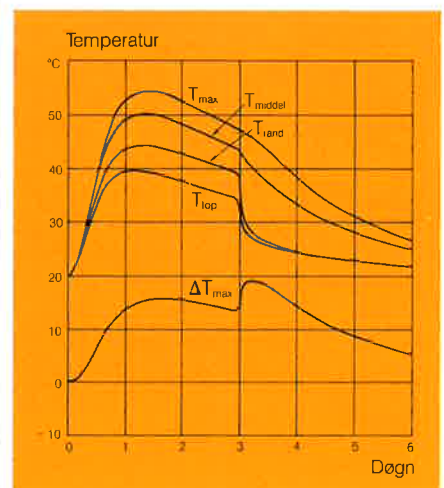
Ved støbning af en 40 cm tyk væg ønskes risikoen for tidlig frysning vurderet.

Forudsætninger:

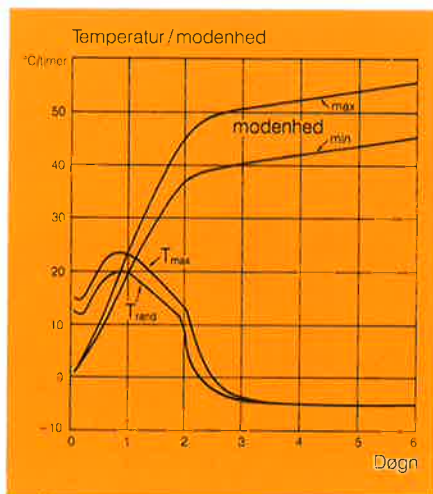
Væg: 270 kg Rapid-Cement pr. m³.
 $v/c = 0,55$.
 Udstøbningsstemperatur 15°C.
 5/4" træform, fjernes efter 2 døgn.

Omgivelserne:

Lufttemperatur -5°C.
 Vindhastighed 5 m/sek.



Figur 17. Simulerede temperaturforløb for eksempel 10.



Figur 18. Simulerede temperaturforløb og modenhedsudvikling for eksempel 11.

Ved temperatursimulering findes temperaturforløbet i figur 18, som viser, at der ved frysning vil være opnået en modenhed på ca. 40 modenhetstimer. Ved et vand/cement-forhold på 0,55 vil frostsikkerhed jf. eksempel 2, være opnået efter:

$$M \geq \frac{11,2}{(-\ln(0,86 - 0,55))^{(0,1,00)}} = 15 \text{ timer.}$$

Der vil altså ikke være problemer, og der kunne formodentlig også uden problemer have været anvendt en udstøbnings-temperatur på 10°C.

Eksempel 12. Styrkeudvikling.

Med henvisning til eksempel 1 valgte entreprenøren alternativ 4, og han ønsker nu at vurdere, hvilken trykstyrke betonen har på afformningstidspunktet. Entreprenøren har fra betonleverandøren fået oplyst følgende trykstyrker:

- 1 døgn: 12 MN/m²
- 7 døgn: 32 MN/m²
- 28 døgn: 40 MN/m²

Ved optegning af styrkeresultaterne, som vist i figur 19, kan styrken aflæses for en given modenhed.

I figur 2 i eksempel 1 kan modenheden på afformningstidspunktet aflæses til 38–40 modenhetstimer, hvilket ifølge figur 19 vil være ensbetydende med en trykstyrke på ca. 17 MN/m².

Af hensyn til en efterfølgende oplægning af dækelementer på væggen ønsker entreprenøren en trykstyrke på mindst 20 MN/m². Dette vil, jf. figur 19, være opnået efter ca. 50 modenhetstimer. Ifølge figur 2 vil dette være opnået i væggen efter ca. 1,5 døgn.

Entreprenøren vælger derfor at påbegynde elementmontagen på andendagen efter støbningen.

Afsluttende bemærkninger

Hærdeforholdene er en af mange faktorer, som bestemmer betonens kvalitet. I modsætning til mange af de øvrige faktorer kan man ikke intuitivt vide, hvilke konsekvenser en ændring af hærdebetingelserne vil få for det endelige resultat.

Valg af bedre sten kvalitet eller lavere vand/cement-forhold må således forventes at give en bedre beton kvalitet, hvorimod man ikke på forhånd kan vide, om en bedre isolering af formen eller en lavere udstøbnings-temperatur vil forbedre eller forværre hærdebetingelserne.

Med hensyn til udtørring gælder dog, at jo længere tid betonen beskyttes mod udtørring, jo bedre beton kvalitet vil man opnå.

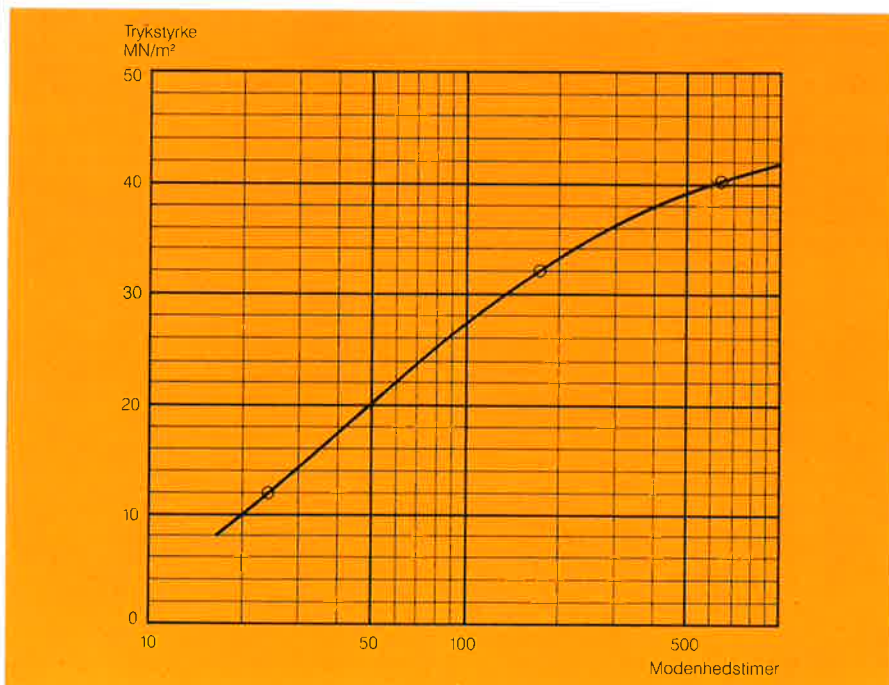
For temperaturforholdene er det derimod et spørgsmål om at vælge en passende kombination af udstøbnings-temperatur, formsystem, afformningstidspunkt, cementtype etc., således at man undgår problemerne, som er beskrevet i det foregående. Temperatursimuleringsprogrammer er et nyttigt/nødvendigt værktøj for at kunne foretage de rigtige valg, og anvendelsen af dette værktøj bliver da også mere og mere udbredt.

© Løssalgspis kr. 50,- incl. moms.

Litteratur

- [1] Beton-Teknik "Efterbehandling af beton", 6/14/1988, CtO
- [2] Freiesleben Hansen, P. og Pedersen, E.J.: "Måleinstrument til kontrol af betonhærdning", Nordisk Betong 1977: 1 p. 21/23.
- [3] Freiesleben Hansen, P.: "Kalibrering og afprøvning af Maturity-computer", Forsøgsresultater. BFL-intern rapport nr. 436, 1977.
- [4] Hærdeteknologi-kompodium: "BKI-murstensblade", Beton- og Konstruktionsinstituttet, BKI, 1984.
- [5] Alexanderson, J.: "Strength Losses in Heat Cured Concrete", CBI-Handlingar nr. 43, 1972.
- [6] Freiesleben Hansen, P.: "Hærdeteknologi 1, Portlandcement", BKF-centralen, Aalborg Portland, 1978.
- [7] Freiesleben Hansen, P. og Pedersen, E.J.: "Vinterstøbning af beton", SBI-anvisning 125, Statens Byggeforskningsinstitut 1982.
- [8] Browne, R.D.: "Thermal movement of concrete", Concrete 6 1972:11.
- [9] SSB-Forundersøgelse, BKF-centralen, rapport nr. 94, 1979.
- [10] Basisbetonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner 1986, Byggestyrelsen, marts 1987.
- [11] Grodtkjær, E.: "Termo-viskoelastisk spændingsanalyse af tre-dimensionale konstruktioner". BKI-rapport B 3545, sept. 1986.
- [12] US Dep. Int., Bureau of Reclamation: Boulder Canyon Project Final Reports, P. VII, Bull. 1, Denver Colorado, 1940.
- [13] Kjær, Ulla: "Termiske egenskaber af beton", Beton- og Konstruktionsinstituttet, Rapport nr. 103, 1980.
- [14] Gronow, H.E.: "Die Erhärtungswärme von Portlandzement, unter besonderer Berücksichtigung der physikalisch-chemischen Natur des im Erhärteten Zementmörtel gebundenen Wasser", Tonindustrie-Zeitung, 86(1962): 10, p. 219-222.
- [15] Beton-Teknik "Betons Hærdevarme", 3/10/1981, CtO.
- [16] Rasmussen, Thorkild H.: "Adiabatisk kalorimetri", Dansk Beton nr. 1 1989.
- [17] Olesen, S.Ø. og Kronholm, F.L.: "Fugt-tabsbeskyttelse af hærdnende beton", Beton- og Konstruktionsinstituttet, BKI, marts 1989.
- [18] Freiesleben Hansen, P.: "Hærdeteknologi 2, Dekrementmetoden", BKF-centralen, Aalborg Portland, 1978.
- [19] Kjær, Ulla: "Computer Interactive Maturity System", Nordic Concrete Research, No. 6, 1987.
- [20] Beton-Teknik "Fra CtO's arbejdsmark", 10/31/1989, CtO.

Beton- og Konstruktionsinstituttet, BKI, hed før 1982 BKF-centralen.



Figur 19. Styrkeudvikling optegnet på grundlag af betonleverandørens oplysninger.

CtO Cementfabrikkernes
tekniske Oplysningskontor
Rørdalsvej 44
Postboks 165
9100 Aalborg
Telf. 98 16 77 77

**AALBORG
PORTLAND**

