



VALG AF
CEMENT VED BETONSTØBNING
OM VINTEREN

POUL NERENST

Civilingeniør

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

ex. 4
20 JULI 1988

00778 P

Ved det kursus i vinterbyggeri som Statens Byggeforskningsinstitut i efteråret 1949 afholdt i Dansk Ingeniørforening, holdt civilingeniør *N e r e n s t* et foredrag om ovenstående emne.

Selv om instituttets viden herom endnu er ufuldkommen, indeholdt dette foredrag dog så meget nyt i sammenligning med den i efteråret 1948 udsendte foreløbige vejledning i betonstøbning om vinteren, at det indtil den endelige vejledning om ca. et år kan udkomme, sikkert vil kunne være til nytte for en større kreds.

N i e l s M. P l u m.

Forskningsleder, civilingeniør, m.ing.f.

I det følgende skal foretages en gennemgang af de her i landet anvendte cementer og deres karakteristiske egenskaber, og på grundlag heraf angives deres egnethed ved støbning om vinteren.

A. Cement.

1. Cementens bestanddele.

De i Danmark anvendte cementer er næsten udelukkende af portlandtypen. De indeholder klinkermaterialerne trikalciumsilikat C_3S , dikalciumsilikat C_2S , trikalcialuminat C_3A og tetra-kalciumaluminatferrit C_4AF . Desuden findes små mængder af fri kalciumilte CaO . Endelig er der tilsat cementen en vis procentdel gips for at regulere størkningstiden (44 C 2)¹⁾.

Af de 4 førstnævnte klinkermaterialer er det trikalciumsilikatet, der har størst indflydelse på styrkeudviklingen indenfor de første 28 døgn, mens dikalciumsilikatet C_2S kun har ringe indflydelse i dette tidsrum, men bidrager meget væsentligt til betonens

styrkeforøgelse efter 28 døgn. Normalt er summen af C_3S og C_2S nogenlunde konstant mellem 70—80 %, og ved at variere forholdet mellem disse to komponenter kan man ændre styrkeudviklingens forløb. En cement med et højt C_3S indhold giver en hurtigt hærdnende cement med kraftig varmeudvikling, mens den omvendte kombination: lavt C_3S og højt C_2S -indhold giver langsom styrkeudvikling og lavere varmeudvikling (44 C 2) (42-2).

2. Finmaling.

Et andet forhold, som har indflydelse på styrkeudviklingen, er finheden. Jo finere cementen er formalet, desto hurtigere fås styrketilvæksten. Dette er ganske naturligt, idet den overflade, hvor vandet kan gå i kemisk forbindelse med cementen, forøges med finmalingen. Hvis cementens finhed udtrykkes ved cementkornenes overflade i kvadratcentimeter pr. gram cement, synes der endda indenfor et vist område at være proportionalitet mellem overflade og styrke under forudsætning af, at alle andre forhold er identiske. En vidtdreven finmaling af ce-

¹⁾ Disse tal refererer til litteraturfortegnelsen på sidste side.

menten medfører imidlertid en række praktiske vanskeligheder under fremstillingsprocessen, som fordyrer cementen, og også af rent tekniske grunde er man blevet betænkelig ved at anvende meget finmalede cementer.

F. H. Jackson har i en artikel »The durability of concrete in service« (46 J1) omtalt, at en række betonkonstruktioner, der var udført før 1930, var mere modstandsdygtige overfor skiftende frost og tø end senere udførte konstruktioner. Da arbejdsmetoderne og betonkontrollen er blevet stærkt forbedret siden dette år, mener man, at denne nedsættelse i frostbestandigheden skyldes cementkvaliteten og specielt, at man anvender mere finmalet cement. Man mener, at den grovere cements indhold af store korn af svovlsyreanhydrid SO_3 er af stor betydning for frostbestandigheden.

En amerikansk kommission foretog efter krigens afslutning en rejse gennem Tyskland for at studere de tyske motorveje. I kommissionens rejserapport blev der givet udtryk for beundring for den gode tilstand, betonbanerne udviste til trods for, at de anvendte cementer i sammenligning med amerikanske cementkvaliteter skulle være ret ringe. De anvendte cementer var således ret groft formalede. Det er dog muligt, at forklaringen også bør søges i, at der ved arbejdets udførelse anvendtes tørrere konsistenser, end hvad der er almindeligt i U.S.A. (48 J1).

Der haves så vidt vides ikke lignende dårlige erfaringer med danske hurtighærdnende cementer.

3. Danske cementer.

Den mest anvendte cement i Danmark er Portland-cementen, der er den billigste, og som under normale forhold giver en både god og bestandig beton.

Siden begyndelsen af 30'erne har de danske cementfabriker sendt en hur-

tigt hærdnende cement på markedet under navnet »Rapid-cement«. Et tilsvarende produkt fremstilles af Andelscementfabriken under navnet »Record«. De er af portlandtypen og udmærker sig først og fremmest ved deres hurtige styrkeudvikling.

I de allerseneneste år har de danske cementfabriker sendt en cementtype på markedet under navnet »Super-rapid«. Den er ligeledes af portlandtypen, men den udvikler store tidlige styrker endnu hurtigere end Rapid-cementen.

Under krigen kneb det med at fremskaffe brændsel, og der blev da fremstillet en cementtype »S-cement«, hvor en del af de aktive cementklinker var erstattet med inaktive fillermaterialer, hovedsagelig kvartssand. Denne cement tilfredsstillede Dansk Materialprøvningsforbunds cementnormer. På grund af den noget ringere varmeudvikling under hærdningsprocessen er den ikke særlig velegnet til vinterstøbning, men da den, så vidt vides, ikke fremstilles mere, vil man kun undtagelsesvis komme ud for at skulle anvende denne cementtype.

Udover de allerede nævnte cementer anvendes her i landet visse specialcementer som lavvarmecement, havvands cement og hvid cement. De er alle af portlandtypen, men finder kun ringe anvendelse indenfor boligbyggeriet, og skal ikke nærmere behandles i denne forbindelse.

Aluminatcementen, der ikke er af portlandtypen, er karakteristisk ved meget hurtig styrkeudvikling og en betydelig varmeudvikling, selv ved lave temperaturer. På grund af den ret høje pris i sammenligning med de andre cementtyper har den ikke vundet større udbredelse her i landet. Dens anvendelse kræver en række forsigtighedsforanstaltninger og der henvises til Statens Byggeforskningsinstituts anvisning nr. 2, hvor disse forhold er nærmere behandlet (48—78).

B. Betonens størkning og hærdning.

Når betonens bestanddele blandes, vil vandet begynde at reagere med cementen så snart vandet er tilsat. Denne reaktion mellem vand og cement falder i to forskellige faser, som det er meget vigtigt at skelne fra hinanden. Under den første fase, der kaldes størkningen eller afbindingen, sammenkittes kornene, og massen går fra plastisk til stiv tilstand. Først når størkningen er afsluttet, begynder betonens egentlige styrkeudvikling eller hærdning. Denne proces strækker sig over adskillige uger under forudsætning af, at betonen holdes tilstrækkelig våd.

1. Størkningstiden.

Størkningstiden er afhængig af betonens temperatur, cementens alder og vandcementtallet.

1.1. Temperatur.

Ved 18°C påbegyndes størkningen 4—6 timer efter at vandet er tilsat, og størkningen er afsluttet efter 10—15 timers forløb. Hvis temperaturen er lavere, bliver størkningstiden længere. Ved +1°C påbegyndes størkningen først efter 10—18 timers forløb og afsluttes 20—30 timer efter blandingen. Ved temperatur under frysepunktet kan størkningen overhovedet ikke komme i gang. Temperaturen indflydelse på størkningstiden er således betydelig, og da størkningstiderne er nogenlunde uafhængige af, om man bruger almindelig Portland-cement eller hurtigt hærdnende cementer, vil det forstås, at fordelen ved de hurtigt hærdnende cementer først kommer til udtryk efter størkningstidens afslutning.

Når man opvarmer støbebandet og betonens temperatur stiger over +18°C, vil størkningstiderne blive kortere end ved denne temperatur. Almindeligvis spiller dette forhold ikke

større rolle, idet man ved de fleste arbejder alligevel har rigelig tid til at transportere, udlægge og komprimere betonen, inden størkningen finder sted. Er vandets temperatur meget høj, er der chance for, at der indtræffer et fænomen, der kaldes »falsk afbinding«, på engelsk kaldes det »flash set«, hvilket efter min mening er meget betegnende, idet der ganske pludseligt sker en størkning, der imidlertid kan ophæves ved ny blanding eller bearbejdning af betonen. Der kræves dog yderligere vandtilsætning for at få samme konsistens, som den man havde før den falske afbinding fandt sted. Af hensyn til denne risiko er der angivet nogle maksimale temperaturer for betonen i blandemaskinen. Da chancen for falsk afbinding er større jo mere finmalet cementen er, er der taget hensyn til dette ved fastsættelse af disse maksimumstemperaturer, der i anvisning nr. 2 for Portland-cement er opgivet til +40°C og for Rapid-cement til +25°C. Erfaringerne fra den forløbne vinter og fra nogle forsøg på Statsprøveanstalten viser, at man som regel kan gå højere end disse temperaturer uden større risiko.

Det har ret stor betydning at kunne nøjes med opvarmning af støbebandet alene, da opvarmning af sand og sten kræver en del ekstra materiale. Det er desuden vanskeligt at realisere en ensartet opvarmning af gruset, og udgifterne er i det hele taget ret store. Når man opvarmer støbebandet til høje temperaturer må det tilrådes at foretage størkningsprøver, inden man foretager den egentlige udstøbning. Vedrørende udførelse af størkningsprøven henvises til anvisning nr. 2, side 60.

1.2 v/c-forholdet.

Når vandcementtallet forøges fra 0,40 til 1,20, bliver størkningstiden fordoblet. Det vil heraf forstås, at

størkningstiden kan gøres kortere ved at spare på vandet, og at grovbeton har længere størkningstid end konstruktionsbeton.

1.3. Lagret cement.

En tredje faktor, der har indflydelse på størkningstiden, er cementens alder, idet det dog er afhængigt af, under hvilke forhold cementen har været opbevaret efter fremstillingen. Hvis cementen igennem længere tid lagres i fugtig luft, vil den op-suge fugtighed, og der dannes på cementpartiklernes overflade hydrationsprodukter, der normalt ikke trænger ret dybt ind i cementkornene. Efter denne proces vil der efter vandtilsætningen gå længere tid, inden vandet kan komme i kontakt med de ikke hydratiserede dele af cementkornene, og størkningstiden vil blive forlænget. Desuden vil en del af cementens egenvarme være udviklet, inden den bliver anvendt og kan således ikke komme til nytte under hærtningsprocessen. Hvis cementen i længere tid har været lagret i fugtigheds-mættet luft, kan denne hydrationsproces bevirke, at cementpartiklerne kites sammen i klumper. En sådan stenløben cement har en endnu længere størkningstid og bør kun undtagelsesvis anvendes ved vinterstøbning, selv om klumperne sigtes fra.

Også ved anvendelsen af lagret cement bør der udføres størkningsprøve, for at være sikret mod for lang størkningstid.

Resumé.

Som et resumé af dette afsnit kan det fastslås, at størkningstiden bør gøres kort:

- 1) Ved at størkningstemperaturen holdes tilstrækkeligt højt.
- 2) Ved at arbejde med så lavt vand-cement forhold som muligt.
- 3) Ved at anvende så frisk cement, som muligt.

2. Hærdningen.

2.1. Styrkeudvikling:

Styrkeudviklingen er meget afhængig af betonmassens temperatur. Dette fremgår klart af fig. 1 i anvisning nr. 2, hvor der er indtegnet kurver, der viser hvilke styrker man kan opnå ved de forskellige temperaturer. Styrken er udtrykt i procent af den normale 28 døgns styrke ved 20° normal lagring. På figuren er indtegnet, hvorledes man kan beregne styrkeudviklingen i en konstruktion, hvor betontemperaturen har varieret under hærdningen. De angivne kurver skal anvendes med forsigtighed og kun til orientering. Det må tilrådes, at man udfører prøvelegemer, der lagres under de samme forhold, som den øvrige konstruktion, og at man bestemmer styrken af disse, inden afformningen finder sted. Den i kurverne viste sammenhæng mellem styrkeudviklingen og temperaturen kan anskueliggøres på en anden måde.

Den tid, der medgår til at opnå samme styrke, som der opnås efter 28 døgns hærdning ved 20°C andrager ved 10°C ca. 60 døgn, d.v.s. en fordobling, og ved 0° kræves der ca. 200 døgn. Forudsætningen er, at betonen de første 1½ døgn har været + 20°. For hurtigt at opnå normal styrke, kræves der således en tilførsel af varme udefra, når der støbes om vinteren. Da det er dyrt at etablere en sådan opvarmning af bygværket efter udstøbningen, gælder det om at gøre denne opvarmningsperiode så kort som muligt, og det er derfor af betydning at vælge cementer, der så hurtigt som muligt giver styrkeudvikling. Der er dog også andre faktorer, der har indflydelse på styrkeudviklingen, og de vil kort blive omtalt i det følgende.

2.2. Varmetoning.

Efter at vandet er tilsat cementen, begynder de kemiske processer, og

herved udvikles der varme. Denne varmemængde er særlig stor i begyndelsen af hærdningen og aftager i den følgende tid. Den varme, man kan tilføje betonen, inden udstøbningen vil som regel i forbindelse med cementens egenvarme være i stand til at holde betonen frostfri, og det er derfor af stor betydning, at cementen til støbning om vinteren udvikler megen varme og at størkningstiden er kort, så varmeudviklingen hurtig kommer i gang. I anvisning nr. 2, side 61 er vist varmetoning og gramkalorier pr. gram cement i afhængighed af tiden. Man vil af figuren bemærke, at hurtighærdnende cementer indenfor de første 48 timer ikke alene udvikler en større total varmemængde, men at også største delen af varmemængden udvikles i løbet af de 2 første døgn. Da der er proportionalitet mellem den udviklede varmemængde og den udviklede styrke, kan man alene ud fra varmetoningen i de første døgn bedømme cementernes egnethed til vinterstøbning. Det må dog her atter understreges, at forskellen mellem de hurtighærdnende og almindelige portlandcementer først kommer til udtryk, når størkningen har fundet sted.

2.3. Cementmængdens betydning.

Da varmeudviklingen pr. m³ beton er proportional med cementmængden, kan man forøge den udviklede varmemængde ved at forøge cementmængden. Hertil kommer, at de fede blandinger normalt når relativt større styrke end de magre indenfor samme tidsrum. Det vil altså forstås, at det er fordelagtigt i koldt vejr at bruge federe blandinger. Af hensyn til svind må det dog frarådes at øge cementmængden udover 400 kg/m³. Som regel vil det også vise sig, at det er mere økonomisk at bruge en hurtighærdnende cement fremfor at øge cementmængden.

2.4. Vandmængdens betydning.

Det er kendt fra den almindelige betonteknologi, at vand-cementforholdet har indflydelse på betonens slutstyrke, men også på de mellemliggende stadier vil man opnå højere værdier ved at spare på vandet. Ved støbning om vinteren opstår der let vanskeligheder på dette punkt. For at betonen kan opnå den nødvendige begyndelsestemperatur, opvarmes støbevandet, og først når man ikke kan klare sig med denne forholdsregel, opvarmes grus og sten. Dette skyldes, at vandets varmfylde er 5 gange så stor som grusmaterialerne, og teoretisk kan man hæve blandingens begyndelsestemperatur ved at forøge vandmængden. Dette er dog absolut forkasteligt, og man bør kun anvende den nødvendige vandmængde og i stedet for opvarme den til en tilsvarende højere temperatur. Når betonen opvarmes, må man ved fastsættelsen af vandindholdet erindre fordampningen, der kan blive meget betydelig, samt at plasticiteten formindskes, når betonmassens temperatur bliver højere end normalt. Dog vil det vand, der fordamper fra betonen, inden komprimeringen er afsluttet, ikke have nogen indflydelse på styrken, idet det er vand-cementforholdet umiddelbart efter komprimeringen, der betinger slutstyrken.

C. »Frosthård styrke« kontra afformningsstyrke.

Ved støbning om vinteren må der skelnes mellem 2 forskellige formål. Ved visse konstruktionsdele, som fundamenter, kældermure etc., er det tilstrækkeligt, at betonen når en sådan styrke, at den ikke beskadiges ved nogle få frysninger, og man kan, når dette er opnået, vente på at omgivelsernes temperatur stiger, så at resten af styrkeudviklingen kan finde sted. Når betonen kan tåle frysning, siges den at være frosthård, og der er i an-

visning nr. 2 regnet med, at den frosthårde styrke udgør 25 % af den normale 28 døgn styrke, dog ikke under 35 kg/cm².

Ved frit-bærende konstruktioner, der kræver megen forskalling, er man interesseret i at opnå så stor styrke, at afformning kan finde sted så hurtigt som muligt. Afformningsstyrken andrager for vandret underflade ca. 200 kg/cm² i trykstyrke og for lodrette sideflader 50—100 kg/cm². For vandrette underflader ligger afformningsstyrken således væsentligt over den frosthårde styrke, mens afformningsstyrken for lodrette sideflader er omtrent sammenfaldende med den frosthårde styrke. Mens man for at opnå frosthård styrke vil kunne klare sig med en passende begyndelsestemperatur for betonen og isolation efter udstøbningen, kræves der som regel tilførsel af ekstra varme under hærdningen for at opnå afformningsstyrken indenfor en rimelig tid. I første tilfælde er det dog således, at jo hurtigere den pågældende cement udvikler varme og styrke, i samme grad vil man kunne spare på tilførslen af varme under blandingen og spare isolationsmateriale. I det andet tilfælde betyder anvendelsen af en hurtighærdende cement, at opvarmnings-tiden kan afkortes.

D. Valg af cementtype.

Efter C.T.O.'s oplysninger, kan styrkeudviklingen for henholdsvis almindelig Portland-cement, Rapid-cement og Superrapid-cement sammenlignes ved at undersøge styrken efter 1 døgn. Hvis denne sættes til 100 % for almindelig Portland-cement, vil Rapid-cementen have udviklet 150 % og Superrapid-cementen næsten 300 %.

Dette kan anskueliggøres på en anden måde, som vist i nedenstående tabel. Der er her angivet, hvor hurtigt Rapid- og Super-rapidcement opnår samme styrke som Portland-cement.

Portland	Rapid	Superrapid
3 døgn	2 døgn	1 døgn
7 døgn	3 døgn	2 døgn
28 døgn	7 døgn	3 døgn
	28 døgn	7 døgn

Af denne tabel fremgår det, at Superrapid-cementen har den hurtigste styrkeudvikling. Ved valg af cementtype må der tages hensyn til konstruktionsdelens dimensioner. Jo mere massiv konstruktionen bliver, destomindre påkrævet bliver det at anvende de hurtighærdende cementer. I visse tilfælde må det endog frarådes, idet de hurtighærdende cementers kraftige egenvarmeudvikling kan give anledning til så store temperaturstigninger, at der opstår fare for egenspændinger og deraf følgende temperaturrevner i konstruktionen.

Ved en række temperaturmålinger ved opførelsen af en bro opnåedes en maksimumstemperatur på +38° efter 2 døgn forløb. Målingerne udførtes i en pille, der havde dimensionerne 1,2 × 4,9 × 4,8 m. Cementindholdet var 350 kg Portland-cement pr. m³, og målingen skete i 25 cm dybde. Betonen havde en temperatur på 18°, da den blev anbragt i formen, og ydertemperaturen svingede mellem +4° og -4°.

Det vil forstås, at det ville have været ganske forkert at anvende en hurtighærdende cement i stedet for Portland-cement i dette tilfælde. Udover hensyn til størrelsesforholdet ved den pågældende konstruktion, bør der også foretages økonomiske overvejelser, da de hurtighærdende cementer er dyrere i indkøb. Almindelig Portland-cement koster ca. kr. 17,50, Rapid-cement ca. kr. 18,50 og Superrapid-cement ca. 25,50. Alle priser er opgivet pr. tønde.

Hvis den beton, der skal udstøbes, har et cementindhold på 300 kg/m³, bliver merudgifterne ved anvendelse af Rapid-cement ca. 1,75 pr. m³ og

ved anvendelse af Superrapid-cement ca. kr. 14,50 pr. m³.

Disse merudgifter skal så stilles i forhold til udgifterne til isolering og kunstig opvarmning i de enkelte tilfælde, og hvorledes disse udgifter vil fordele sig, afhænger af:

- 1) Antallet af m², der skal isoleres, pr. m³ beton.
- 2) Den ydre temperatur.
- 3) Om det er frosthårdhed eller normal afformningsstyrke, man vil opnå.

Disse forhold er det svært at sige noget generelt om, og man må i de enkelte tilfælde foretage en analyse.

Såfremt man kun vil opnå frosthårdhed, kan man ved de fleste konstruktioner og temperaturforhold relativt let opnå dette ved opvarmning af betonen og en passende isolering uden at anvende Superrapid-cement. Ved visse konstruktioner med et ringe cementindhold pr. rumenhed, som f. eks. hultensdæk, vil det sikkert være en fordel at anvende Rapid-cement og måske Superrapid-cement, da hultensdækkene ved luft-temperaturer under frysepunktet kræver opvarmning efter udstøbningen blot for at opnå frosthårdhed. Dette forhold træder tydeligt frem, hvis man tilmed ønsker at opnå afformningsstyrken, da opvarmnings-tiden her kan nedsættes meget væsentligt, og der kan på denne konto spares beløb, der langt overstiger merudgifterne ved anvendelse af de hurtigere cementer.

For et 15 cm Baumadæk uden overbeton vil merudgiften pr. m² andrage 7 øre ved anvendelse af Rapid-cement og 50 øre ved anvendelse af Superrapid-cement, d.v.s. ca. ¼ % og ca. 2 % af dækkets pris.

Som tidligere omtalt, må anvendelsen af hurtighærdende cementer ikke medføre, at man undlader at opvarme vandet. Det er først, når størkningen er overstået, at styrkeudviklingen kommer i gang. Man har erfaring for, at Rapid-cement, der er anvendt om vinteren, uden at betonen har været opvarmet, har haft endnu længere størkningstid end Portland-cement.

Litteraturliste.

- (42-2) Moderne betontechnik.
Cement
Poul Skjoldborg
Dansk Ingeniørforening
København 1942.
- (44 C 2) Concrete Manual
Christiani & Nielsen. (Niels M. Plum)
Copenhagen 1944
253 Pages.
- (46 J 1) The Durability of Concrete in Service.
F. H. Jackson
Proc. ACI.
Detroit, October 1946.
Vol. 43. Pages 165—180.
(Journal ACI, Vol. 18. No. 2).
- (48 J 1) Concrete Pavements on the German Autobahnen.
F. H. Jackson and Harold Allen.
Proc. ACI.
Detroit, June 1948.
Vol. 44.
Pages 933—976.
- (48-78) Foreløbig vejledning i betonstøbning om vinteren.
DIF's arbejdsgruppe for beton og Jernbeton.
Statens Byggeforskningsinstitut. Anvisning nr. 2.
København 1948.