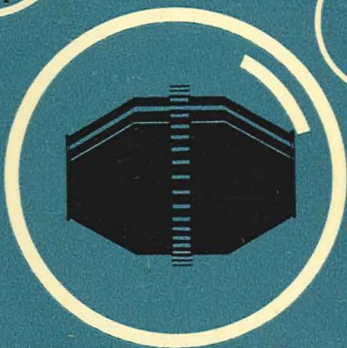
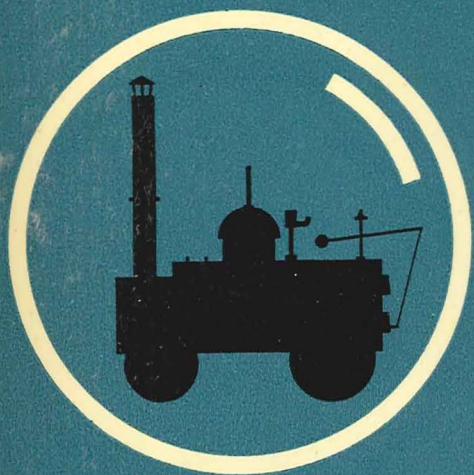


Bibliotekseksemplar

BETONSTØBNING OM VINTEREN



ANVISNING 17

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1953

PUBLIKATIONER

FRA

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

Anvisninger

er praktiske vejledninger, beregnet på direkte brug i det daglige arbejde ved projektering, fabrikation eller byggeri. De kan være udfærdiget dels på grundlag af Institutets egne arbejder, dels ud fra andres undersøgelser fra ind- eller udland. De søges tilpasset efter de stedlige og aktuelle forhold og holdt i en ikke-videnskabelig udtryksform, tilgængelig for de pågældende faglige kredse. Fortegnelsen omfatter kun de ved denne publikations fremkomst endnu ikke udsolgte publikationer.

- Nr. 3: *Akustisk regulering af gymnastiksale*, Poul Becher. 1950. 4 s. A₄. Kr. 1,-.
Nr. 5: *Bedre varmeisolering er billigere*. 1950. 47 s. A₄. Kr. 3,-.
Nr. 6: *Fugt i nye huse* (plakat til ophængning). 1949. A₄. Kr. 5,- pr. 100 expl.
Nr. 7: *Fugt og isolering*, Poul Becher og Vagn Korsgaard. 1951. 107 s. A₅. Kr. 4,-.
Nr. 8: *Brug og valg af betonblandere*, Niels H. Krarup og K. Malmstedt-Andersen. 1951. 66 s. A₅. Kr. 3,-.
Nr. 10: *Kunstig belysning på byggepladser*, Jens Thorsen og Mogens Voltelen. 1953. 2. udgave. 20 s. A₅. Kr. 2,-.
Nr. 11: *Omsætningsmål for trædimensioner*. 1952. 1 s. A₄. (Gratis).
Nr. 12: *Valg af dæk*, Fleming Nielsen. 1952. 48 s. A₅. Kr. 2,-.
Nr. 13: *Byggeprisens bestanddele beregnet ved et 3-etagers boligbyggeri i provinsen i april 1951*. 1952. 28 s. A₅. Kr. 2,-.
Nr. 14: *Forbedring af stalde, varmeisolering og ventilering*, Poul Becher og Vagn Korsgaard. 1952. 44 s. A₅. Kr. 2,-.
Nr. 17: *Betonstøbning om vinteren*, Poul Nerenst, Erik Rastrup og G. M. Idorn. 1953. 108 s. A₅. Kr. 8,-.
Nr. 18: *Maling af eternit*. 1953. 15 s. A₅. Kr. 1,50.
Nr. 23: *Vinterbyggeri*. 1953. 16 s. A₅. 1 stk.: kr. 1,-. 100 stk.: kr. 50,-.

Andre publikationsserier

Instituttet udgiver endvidere følgende publikationsserier:

Rapporter,
Studier,
Særtryk,
Årsberetninger.

En komplet fortegnelse over alle udgivne publikationer kan fås ved henvendelse til instituttet.

Alle publikationerne kan købes gennem boghandlerne eller hos Teknisk Forlag, Vester Farimagsgade 31, København V.

Abonnement på en eller flere serier kan tegnes hos Teknisk Forlag. Herved opnås 25% rabat, som fradrages, når betalingen opkræves ved hvert års udløb. For kr. 2,- om året kan man endvidere samme sted abonnere på de »Forhåndsmeddelelser«, som udsendes ca. 3 uger før hver publikations fremkomst.

BETONSTØBNING OM VINTEREN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

Lx.7

19 JULI 1988

BETONSTØBNING OM VINTEREN

P. Nerenst, E. Rastrup og G. M. Idorn

Denne anvisning afløser anvisning nr. 2 »Foreløbig vejledning i betonstøbning om vinteren«. Den henvender sig fortrinsvis til teknikere, der er beskæftiget med det mere komplicerede beton- og jernbetonbyggeri og er baseret på de i årene 1948-53 gjorte arbejdsplads- og laboratorieerfaringer.

Vedrørende udførelse af murerarbejde samt støbning af simple betonkonstruktioner om vinteren, se SBI anvisning nr. 23.

ANVISNING NR. 17

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

I kommission hos TEKNISK FORLAG, København 1953

P. Nerenst, civilingeniør 1942, ansat ved Statens Byggeforskningsinstitut 1948
E. Rastrup, civilingeniør 1942, ansat ved Carlsberg Bryggerierne 1946
G. M. Idorn, civilingeniør 1943, ansat ved Statens Byggeforskningsinstitut 1953

Trykt i 4000 eksemplarer

Trykt hos *P. Hansen's Bogtrykkeri*, København

Clicheer fra

F. Hendriksens Reproduktions-Atelier, København

Tutein & Koch, Grafisk Etablissement, København

Illustrationer og lay-out:

P. Abrahamsen, arkitekt, M. A. A.

Steffen Hein, arkitekt

Henning Holmsted, arkitekt

Eftertryk tilladt, men kun efter nærmere aftale med Statens Byggeforskningsinstitut, da meningen og resultaternes rækkevidde kan forflygtiges, hvis enkelte figurer eller dele af teksten tages ud af den almindelige sammenhæng.

Indholdsfortegnelse

Forord	7
Oversigt over anvisningens indhold og brug	11

TEORETISK DEL

Frysning af jord	13
Jordens vandindhold	13
Frostens virkninger i jorden	14
Frosthævnings virkninger på bygværker	18
Frysning af beton	21
Betonteknologisk oversigt	21
Frysning af frisk beton	24
Frysning af afbundet beton	25
Tidens indflydelse	28
Konklusion	30
Beregning af betonegenskabernes ændring under hærdeningen	31
Hærdningsgrader	31
Hærdeningen som funktion af betontemperaturen	32
Opstilling af ligninger	34
Teoriens anvendelse	43

DIAGRAMMER

Diagrammernes forudsætninger	49
Vejledning i diagrammernes brug	50
Diagrammernes benyttelse ved planlægningen	60
Vinterens temperaturforhold	60
Valg af beredskab	61
Kontrol med hærdeningen	62

PRAKTISK DEL

Valg af materialer	67
Jordarbejde	70

(fortsættes)

(fortsat)

Arbejdspladsindretning og støbearbejdets udførelse	73
Oplagring af materialer	73
Opvarmning af materialer	77
Blanding	78
Transport fra blander til støbested	79
Udstøbning	79
Komprimering	80
Betonens tildækning	81
Betonens efterbehandling	82
Afformning	83
Betonkontrol	84
Materiel ved opvarmning	87
Dampanlæg	88
Opvarmning af bygværket	91
TILLÆG	
Beregning af betonens blandingsstemperatur	97
Støbning af hulstensdæk	103
Litteraturliste	107

Forord

Indenfor byggeindustrien er der efterhånden opstået en stærk interesse i at overvinde hindringerne for vinterbyggeri, dels fordi byggeriet har taget flere og flere mekaniske hjælpemidler i brug, som det er uøkonomisk at ligge stille med i flere måneder, dels fordi arbejdskraften er blevet mere og mere specialiseret og derfor dårligere kan finde beskæftigelse andetsteds i vintermånederne. På baggrund heraf og i forbindelse med den meget vanskelige bolig- og arbejdskraftsituation, der var opstået lige efter den anden verdenskrig, var det naturligt, at Statens Byggeforskningsinstitut (i det følgende benævnt SBI) umiddelbart efter sin oprettelse i 1947 tog spørgsmålet om vinterbyggeri op til nærmere undersøgelse for om muligt bl. a. ad den vej at indhente boligmangelen og samtidig skabe jævnere beskæftigelse for byggefagenes arbejdere. Da betonstøbningen forventedes at give en række særlige vanskeligheder for vinterbyggeriet, foranledigede SBI og Dansk Ingeniørforening i december 1947 nedsat et udvalg vedrørende betonstøbning om vinteren. Udvalget, der i tidens løb har suppleret sig med en række medlemmer, har nu følgende sammensætning:

Johs. Andersen, afdelingsingeniør, cand. polyt., Statsprøveanstalten.
 H. Dührkop, civilingeniør, laboratoriefach, Kalk- og teglværkslaboratoriet, Aarhus.
 Ole Glarbo, laboratorieingeniør, cand. polyt.
 K. G. Hauer, civilingeniør, Entreprenørforeningen.
 M. Holst Jensen, civilingeniør, De danske Betonfabrikker A/S.
 A. Jeppesen, afdelingsingeniør, cand. polyt., Danske Statsbaner.
 Aage Magnussen, murermester, Københavns Murer- og Stenhuggerlaug.
 Erik V. Meyer, civilingeniør, dr. techn. C. t. O.
 Sigurd Nicolajsen, Jord- og Betonarbejdernes Fagforening.
 Christoffer Nielsen, næstformand, Dansk Tømmerforbund.
 M. P. Nielsen, entreprenør, ingeniør, Ingeniørsammenslutningen.
 Knud Otterstrøm, civilingeniør, formand for D. I. F.s betonsektion.
 Adolf Petersen, formand, Formandsforeningen.
 Niels Munk Plum, civilingeniør, SBI (udvalgets formand).
 P. Møller Sørensen, civilingeniør, Frb. Kommunes tekniske forvaltning (udvalgets sekretær).
 A. Taumose, afdelingsingeniør, cand. polyt., Kbhvns. Magistrat, 4. Afd.

Udvalget udarbejdede i 1947/48 »Foreløbig vejledning i betonstøbning om vinteren«, som i oktober 1948 udsendtes som SBI anvisning nr. 2. Denne anvisning blev benyttet som grundbog ved de under SBI's kontrol i 1947/50 udførte 75 byggepladsforsøg og har fået udstrakt anvendelse ved det almindelige vinterbyggeri, idet det hurtigt blev nødvendigt at udsende et andet oplag, som nu også er udsolgt.

Siden udsendelsen af anvisning nr. 2 er der gjort en lang række erfaringer, som har gjort det nødvendigt at revidere denne foreløbige vejledning. Omfattende forsøg udført på Portland Cement Association's laboratorier i U. S. A. i løbet af de sidste 15 år, men først afsluttet fornylig, har givet en langt klarere forståelse af cementpastaens struktur og af de faktorer, der bestemmer betonens modstandsevne overfor frost.

Fremkomsten af luftindblandingsmidler har endvidere nu gjort det muligt at fremstille beton, der selv under de mest ugunstige forhold vil være i stand til at tåle en lang række frysninger og optøninger. En teoretisk tilfredsstillende forklaring på den indblandede lufts virkemåde blev givet i 1951 af T. C. Powers, og det har været muligt ved udarbejdelsen af den foreliggende vejledning at benytte hans teorier til opstilling af beregninger af, hvornår beton med en given sammensætning er nået så langt i hærdningsprocessen, at den vil være frostsikker.

Powers' teori, hvis gyldighed er bekræftet ved forsøg, har nødvendiggjort en ændring af det i anvisning nr. 2 opstillede frosthårdhedskriterium, der var opstillet som funktion af betonens trykstyrke. Ændringen er så omfattende, at der udtrykkelig må advares mod fortsat benyttelse af diagrammerne i den foreløbige vejledning, som i mange tilfælde ikke vil give den nødvendige sikkerhed, når betonen ikke indeholder indblandet luft.

Når betonstøbning om vinteren efter anvisning nr. 2 alligevel i langt de fleste tilfælde er gået godt, skyldes det en række forhold, som er nærmere omtalt i teksten side 28.

Efter udsendelsen af anvisning nr. 2 er udført laboratorieforsøg på Statsprøveanstalten til bestemmelse af betons modstandsevne overfor frost kort tid efter støbningen. På F. L. Smidths laboratorium og Laboratoriet for Bygningsteknik på Danmarks Tekniske Højskole er udført forsøg til bestemmelse af hærdningsprocessens afhængighed af hærdningstemperaturen. De ved forsøgene indhøstede erfaringer er benyttet i den foreliggende vejledning. Selvstændige rapporter, der giver en detaljeret beskrivelse af den anvendte forsøgsmetodik og en oversigt over opnåede forsøgsresultater, er under udarbejdelse og vil udkomme i nær fremtid.

Ikke blot på det teoretiske område er der sket en udvikling, som har nødvendiggjort en revision af den oprindelige anvisning, men på de mange byggepladser, hvor man i de sidste 5 år har gennemført betonstøbning om vinteren, har bl. a. Danske Statsbaner og Statens Byggeforskningsinstitut samt en række af udvalgsmedlemmerne samlet en hel del praktiske erfaringer, som er benyttet i denne vejledning.

Da forsøgsresultaterne i foråret 1953 var gjort foreløbigt op, påbegyndte SBI efter aftale med det af Håndværkerforeningen nedsatte sæsonudjævningsudvalg arbejdet med den foreliggende udgave.

De indsamlede erfaringer samt de bearbejdede forsøgsresultater har været forelagt det førnævnte udvalg vedrørende betonstøbning om vinteren. Udvalget har endvidere bidraget med råd og kritik under udarbejdelsen af denne udgave, hvis manuskript er godkendt ved udvalgets sidste møde den 19. august 1953. Samtidig er udsendt en populær anvisning nr. 23 »Vinterbyggeri«, der er en revideret udgave af SBI's tidligere anvisning nr. 9 »Vinterbyggeriets ABC«.

Instituttet benytter lejligheden til at takke de nævnte laboratorier og udvalg, Boligministeriets konsulenter i vinterbyggeri arkitekt N. Jacobsen, Gredstedbro, arkitekt Ove Gerner Hansen, København, og arkitekt P. Lorenzen, Aarhus, samt civilingeniør P. Gunst Hansen, København, der har været SBI's konsulent i varmetekniske spørgsmål, for et ualmindeligt godt samarbejde og for den beredvillighed, hvorved man har stillet erfaring og vejledning til vor disposition.

Statens Byggeforskningsinstitut.

August 1953.

Niels Munk Plum.

Oversigt over anvisningens indhold og brug

Anvisningen er delt i 3 dele samt 2 tillæg og omfatter:

1. del teori
2. del diagrammer (blå blade)
3. del praksis

Tillæg I betonens begyndelsestemperatur

Tillæg II hulstensdæk

Teoretisk del. Heri gives en oversigt over de faktorer, der påvirker materialeegenskaberne ved frysning af jord og frysning af frisk og hærdenende beton. På grundlag af laboratorieforsøgene opstilles ligninger, der gør det muligt at følge hærdenings fremadskriden med tiden ved varierende temperatur. Den teoretiske del afsluttes med en diskussion af de faktorer, der påvirker temperaturforløbet og hærdeningsprocessen ved støbning af spinkle betonkonstruktioner i koldt vejr.

Diagrammerne (blå blade). I anvisning nr. 2 fandtes diagrammer til bestemmelse af den nødvendige begyndelsestemperatur for at opnå »frosthård« beton under givne omstændigheder.

Erfaringen har imidlertid vist, at betonens temperatur ved blandingen i praksis ligger nogenlunde fast, idet den fortrinsvis bestemmes af det valgte sæt foranstaltninger. I overensstemmelse hermed er diagrammerne udarbejdet under forudsætning af 3 faste begyndelsestemperaturer svarende til uopvarmet beton og beton fremstillet med enten varmt vand, eller varmt vand og varmt grus. Hver af disse sæt foranstaltninger kan suppleres med opvarmning af betonen efter udstøbningen.

Diagrammerne benyttes *ved planlægningen* til bestemmelse af den mest hensigtsmæssige kombination af cementtype, begyndelsestemperatur for den friske beton og isolation for at opnå, at betonen bliver frostsikker, inden den er afkølet til 0° C.

Når frostsikkerhed er opnået, er det et økonomisk spørgsmål, hvorvidt man vil lade hærdeningen fortsætte ved lav temperatur, indtil den er så fremskreden, at afformning kan finde sted, eller om man vil fremme hærdeningen ved opvarmning af bygværket.

Der angives metoder til *under arbejdets gang* at kontrollere, om den virkelig opnåede hærdening er tilstrækkelig til, at betonen har opnået frostsikkerhed eller til, at den kan afformes.

Praktisk del. Heri beskrives den rent praktiske gennemførelse af jordarbejde og betonstøbning om vinteren og det nødvendige materiel til sikring af vandedninger mod frost, opvarmning af betons delmaterialer og eventuel opvarmning af bygværket for at fremme hærdningsprocessen.

Tillæg I. Heri gennemgås beregningsgrundlaget for bestemmelse af betonens temperatur ved blandingen ud fra delmaterialernes temperatur.

Tillæg II. Støbning af hulstøbdæk om vinteren har hidtil frembudt mange vanskeligheder. På grundlag af de indhøstede erfaringer og ved anvendelse af de opstillede ligninger er der udarbejdet et diagram til bestemmelse af, hvilke typer hulstøbdæk, der kan udstøbes under givne ydre temperaturforhold.

Det tilrådes at gennemlæse det teoretiske afsnit omhyggeligt, før diagrammerne og de praktiske afsnit benyttes i det daglige arbejde.

Frysning af jord

På de følgende sider er der for at give en baggrund for de praktiske forholdsregler, som i et senere kapitel er omtalt ved jordarbejder i forbindelse med støbning om vinteren, og som indledning til det følgende afsnit om frysning af beton, givet en summarisk oversigt over nogle fysiske egenskaber ved jordarter med henblik på deres forhold ved frysning.

Jordens vandindhold

Vandet findes i jorden under forskellige former som vist skematisk på fig. 1. Vandets egenskaber, og navnlig dets overfladespænding, viskositet og frysepunktet varierer og bliver dermed bestemmende for hvilke fysiske egenskaber jordmassen som helhed får. (37 H 5). 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 svagere eller stærkere *fysiske bundne vand*, adsorptions- og kapillarvand, har derimod lavere frysepunkt, større overfladespænding og højere viskositet end frit vand.

Adsorptionsvandet sidder som en film omkring hver fast partikel. Nærmest ved den faste partikel har vandet fast form, udad nærmer egenskaberne sig det frie vands. Tiltrækningskraften mellem det bundne vand og de faste partikler er stærkere end tyngdekraften, og indtil filmen er blevet så tyk, at der er ligevægt mellem jordpartiklernes tiltrækning og tyngdekraften, vil hele vandmængden findes som film eller hinder omkring de enkelte partikler. Mellemrummene mellem hindernes overflader vil på grund af partiklernes form være luftfyldte. Tilføres mere vand til jordmassen, vil dette udfylde mellemrummene, *enten* som kapillært bun-



Fig. 1. Skematisk afbildning af jordens vandindhold (37 H 5) *)

Fig. 2. Vandets forekomster i jordlag.

*) Betegnelsen i parentes her og i det følgende refererer til litteraturfortegnelsen bagest i bogen.

det vand – hvis partikelafstanden er tilstrækkelig lille til at kapillarvirkning kan være til stede –, eller som frit vand.

Kapillarvand hæves ved vandets adhæsiionskræfter 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 skematisk illustreret på fig. 2.

Ved jordens *permeabilitet* forstås den lethed, hvormed luft, vand eller andre vædske kan gennemtrænge jordmassen. Permeabiliteten vokser med jordens porøsitet. For enskornede jordarter vil permeabiliteten vokse med kornstørrelsen. For jordarter med uenskornt sammensætning vil fordelingen af partiklerne – kornkurven – have stor indflydelse på permeabiliteten. Når vandet forsvinder fra den øverste del af den kapillære zone, enten på grund af fordampning eller ved dannelse af islinser, bliver permeabiliteten afgørende for, om tilførslen af vand kan holde trit med de fjernede mængder.

Frostens virkninger i jorden

Når frosten trænger ned i jorden, og en større eller mindre del af jordens vandindhold bliver til is, ændres de fysiske egenskaber for jordmas-

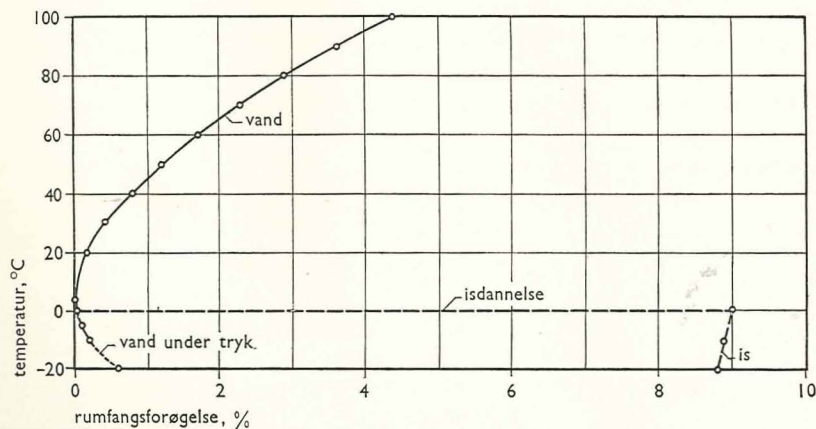


Fig. 3. Vands rumfang ved varierende temperatur. (47 P 4).

Ved afkøling indtil $+4^{\circ}\text{C}$ formindskes vandets rumfang. Ved 0°C forøges rumfanget med ca. 9% ved isdannelse, med mindre vandet udsættes for tryk; i så fald kan isdannelse undgås, og rumfangsudvidelsen vil da være væsentlig mindre.

sen som helhed ikke alene ved vandets overgang til fast form, men også som følge af den forøgelse af vandets rumfang, der sker samtidig.

Som angivet på figur 3 er vandets rumfang mindst (dets vægtfyldte størst) ved 4°C . Ved 0°C udvides vandets rumfang ved isdannelse med ca. 9% som angivet med punkteret linie på figuren. Udsættes vandet for overtryk, kan det dog, som det fremgår af figuren, afkøles under 0°C uden at blive til is, og i så fald er rumfangsførogelsen kun ubetydelig. Disse forhold har indflydelse på frysningfænomener i jord, da vandindholdet netop forekommer dels som frit vand og dels som bundet vand.

Det er iøvrigt karakteristisk for frysning af jord, at rumfangsudvidelsen hovedsagelig sker i samme retning, som varmen afgives fra jord til luft – se fig. 6–8, s. 18–20 – og man taler derfor om frosthævninger i jorden. Frosthævningernes størrelse er foruden af de klimatiske forhold bestemt af jordartens fysiske egenskaber, dens permeabilitet og kapillaritet, d. v. s. af kornstørrelser og kornstørrelsesfordeling. I afhængighed heraf karakteriseres jordarter som *frostsikre* eller *frostfarlige*.

Frysning af frostsikker jord

Når jorden er grovkornet, således at dens permeabilitet er stor og dens kapillære stighøjde er tilsvarende ringe, findes en del af vandindholdet som frit vand, der fryser ved 0°C . Er jorden ikke helt vandmættet, vil rumfangsudvidelsen ved isdannelsen blot bevirke, at en del af de hidtil luftfyldte porer og hulrum udfyldes med is. Der sker følgelig ingen hævnning af jordoverfladen.

Frysning af frostfarlig jord

I jord, der er finkornet, er frysningprocessen mere kompliceret. Det frie vand i større porer eller hulrum fryser ved 0°C . Kapillarvand og adsorptionsvand fryser først ved lavere temperaturer. Under forløbet af frysningen tiltrækkes kapillarvand fra omgivende porer til isdannelserne i frostområdet og fryser i tilslutning til allerede dannet is. Herved fremkommer de karakteristiske fænomener for frysning af frostfarlig jord: isdannelserne formes som lag eller »boller«, de såkaldte islinser, med største udstrækning vinkelret på frostens indtrængningsretning, og den samlede vandmængde forøges væsentligt ud over jordens oprindelige vandindhold i ufrosen tilstand. Frosthævningerne bliver derfor langt større end den oprindelige vandmængdes udvidelse ved frysningen. Fig. 4 illustrerer skematisk, hvorledes islinsedannelser udvikles i jorden.

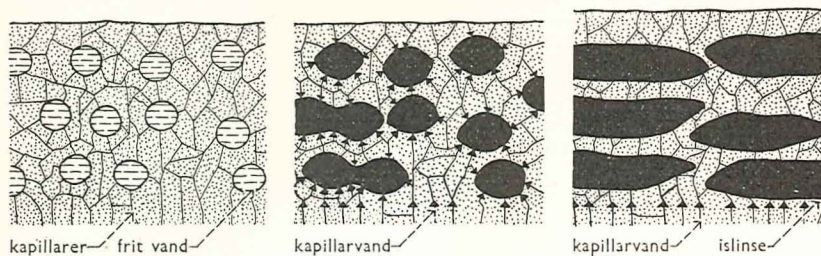


Fig. 4. Islinsedannelser i jord. (37 H 5).

Ved frit vands omdannelse til is i større porer og hulrum tiltrækkes kapillarvand fra omgivende jord, og islinsedannelse påbegyndes. Er der mulighed for fortsat kapillær sugning fra grundvand, vokser islinserne, og der optræder frosthævninger.

Jordartens betydning for frostfarligheden

Afgørende for frosthævningens omfang er den vandmængde, som kapillarvirkningen kan tilføre fra grundvandspejlet i løbet af en vis tid, og dette afhænger af produktet af kapillaritet og permeabilitet.

Fig. 5 viser, hvorledes frostsikkerhed og -farlighed er bestemt af jordarternes kornstørrelsesforhold. A. Casagrande angiver, at frosthævninger

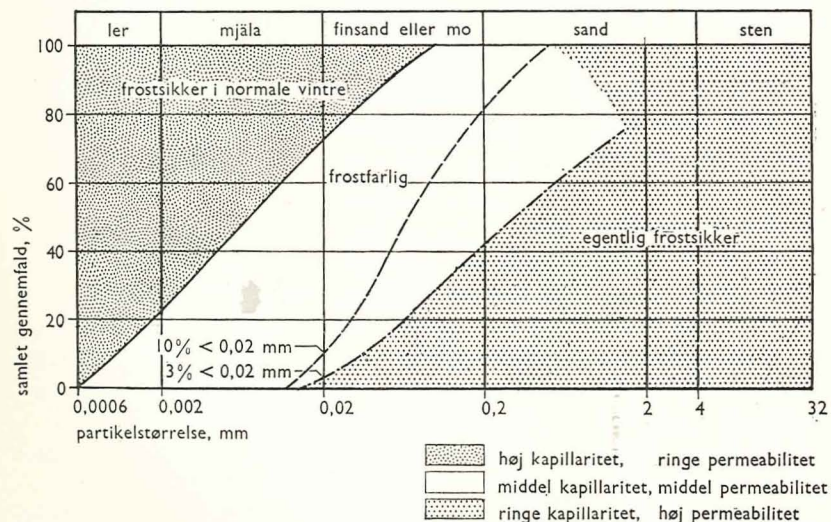


Fig. 5. Afhængighed mellem kornstørrelsesforhold og frostfarlighed. (48 K 17).

De mest finkornede jordarter er på grund af ringe permeabilitet kun frostfarlige i lange og strenge vintre. Mindre finkornede jordarter med uensartede kornstørrelser er udpræget frostfarlige. De grovkornede jordarter er egentlig frostsikre.

må forventes i jord med uensartede kornstørrelser, når mere end 3 % af partiklerne er mindre end 0,02 mm, og i jord med nogenlunde ensartede kornstørrelser, når mere end 10 % af partiklerne er mindre end 0,02 mm. Jord med mindre end 1 % partikler med diameter under 0,02 mm kan betragtes som frostsikker (48 K 17).

Det ses iøvrigt af fig. 5, at de egentlig frostsikre jordarter er de grovkornede, karakteriseret ved stor permeabilitet og ringe kapillaritet. Her i landet svarer dette til, at rent grus og sand er frostsikre materialer.

De meget finkornede jordarter (fedt plastisk ler, el. lign.) er i normale vintre frostsikre på grund af ringe permeabilitet. Deres kapillaritet er imidlertid meget stor. Selv med dybtliggende grundvandspejl kan der derfor i lange og strenge vintre være tale om frostfarlighed.

Finkornede jordarter med uensartede kornstørrelser er på grund af en uheldig kombination af permeabilitet og kapillaritet udpræget frostfarlige. Til denne jordbundstype må en væsentlig del af de danske moræneaflejringer henregnes.

Klimaforholdenes betydning

Frostens strenghed og varighed, vekslinger mellem frost og tøs samt nedbørsmængden er naturligvis ligesom jordartens egenskaber bestemmende både for den maksimale dybde, til hvilken frosten trænger ned, og for omfanget af frostens skadelige virkninger.

Under normale vinterforhold, som her i landet er karakteriseret ved hyppig vekslen mellem frost og tøs, er det almindeligt, at der sker en delvis optøning af de øverste jordlag, medens underliggende lag stadig er frosset. Under sådanne forhold bliver nedsivende vand standset af det frosne jordlag, og ved fornyet frysning fra oven bliver frosthævningen væsentligt forøget.

Optøningens virkninger på frossen jord

Når temperaturen stiger uden at nå over frysepunktet, kan optøning af frossen jord foregå ved varmetilførsel fra underliggende jordlag. Optøning på denne måde kan føre til, at kun et tyndt øverste lag bevares i frossen tilstand. Ved færdsel på dette kan det bryde sammen, fordi de underliggende jordlag ved optøningen formindskes til deres oprindelige rumfang. Når luftens temperatur stiger over frysepunktet, foregår jordens optøning både fra neden og fra oven, indtil al isen er smeltet.

I frostfarlig jord bevirker optøning sætninger af samme størrelsesorden som frosthævningerne, samt at det forøgede vandindhold ændrer jordmassens konsistens til plastisk eller flydende.

Frosthævningens virkninger på bygværker

De følgende figurer viser nogle eksempler på, hvorledes dannelse af islinser i frostfarlig jord bevirker beskadigelser på bygværker, dels under arbejdsudførelsen, dels på færdige bygværker.

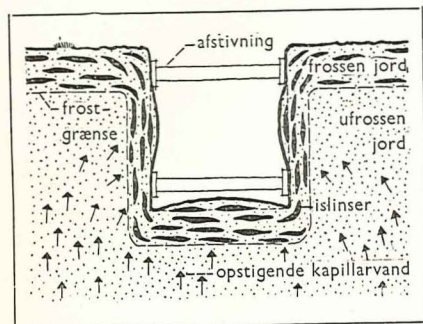


Fig. 6. Frostens virkning i afstivet byggegrube. (48 K 17).

Den frosne jord udvider sig ind i byggegruben. Det tryk, der opstår herved, ødelægger afstivningstømmeret.

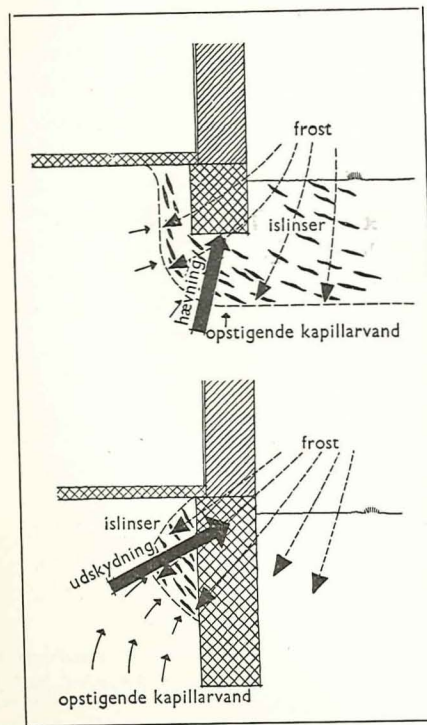


Fig. 7. Frostens virkning på fundamenter. (48 K 17).

En uensartet kuldepåvirkning på et fundament kan bevirke, at fundamenterne hæves eller trykkes udad, idet rumfangsforøgelsen i jorden ved islinsedannelse sker imod kuldens indtrængningsretning.

Fig. 8. Frosthævning af forskallingsstolper (48 K 17).

En del af et bygværk med færdig ydermur, funderet i frostfri dybde og med etageadskillelse, hvis forskalling er understøttet af stolper, der står på frostfarlig bund.

Ved islinsedannelse i jorden hæves stolperne. Herved kan enten stolperne knækkes, etageadskillelsen ødelægges, eller større eller mindre dele af murværket løftes op med forskalling og dæk.

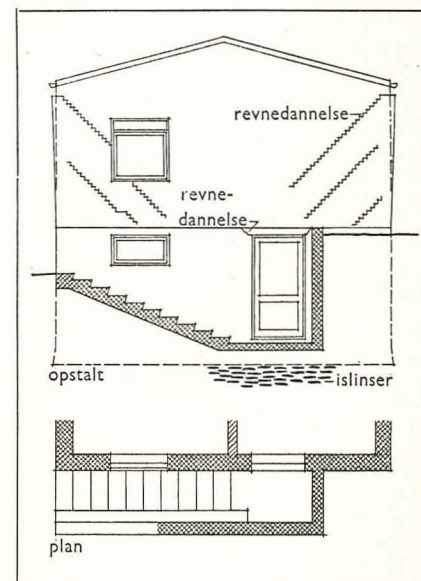
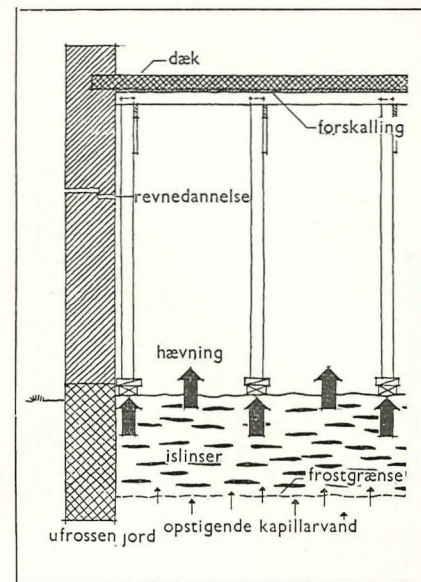


Fig. 9. Underfrysning ved kældernedgang. (42 S 10).

Ring fundamentedybde ved kældernedgangen har medført frysning under selve bygningen og revner i gavlmuren, samt udskydning af facademurerne.

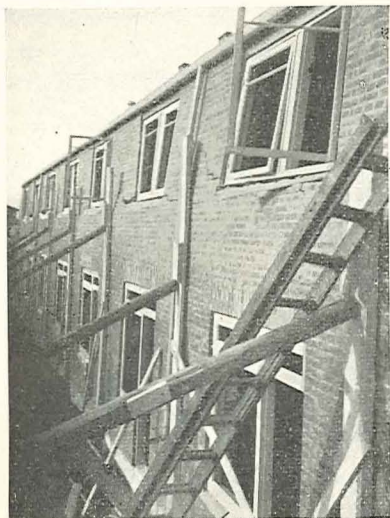


Fig. 10. Udskydning af facade som følge af underfrysning af tværskillerum. (42 S 10).

Ydermurene er skudt ud indtil 20 cm afstand fra normal beliggenhed i højde med 1. sals vinduesbrystninger.

De anførte eksempler, som naturligvis kunne suppleres med mange andre, illustrerer alle, at årsagen til frostbeskadigelserne er jordlagenes udvidelse som følge af islinsedannelserne i frostfarlig jord.

Skader som de viste skyldes ofte, at arbejdet er gået i stå ved frostens indtræden, hvorefter bygningerne vinteren igennem har været uden beskyttelse mod frostens virkninger.

Frysning af beton

I hærdningsprocessens indledende faser påvirkes betonen af frysning på samme måde som frostfarlig jord. Ved frysning senere under hærdningen opstår der hydrauliske tryk i de kapillære porer i betonen, og dette kan forårsage revnedannelser. Redegørelsen for disse forhold indledes med en kortfattet oversigt over de betonteknologiske definitioner og begreber, som er benyttet i de følgende afsnit.

Betonteknologisk oversigt

Når vand og cement ved blanding kommer i indbyrdes kontakt, indledes en hærdningsproces. På fig. 11 er givet en skematisk fremstilling af de forskellige trin i hærdningsprocessen, der her omfatter hele perioden fra vandets tilsætning, til hærdningen er afsluttet.

Betonens *cementpasta* i den friske beton omfatter de uhydrerede cementkorn og vandet. I den hærdnende og hærdnede beton omfatter cementpastaen alt, som i frisk beton udfyldes af cement og vand.

Under hærdning dannes en *cementgel* på cementkornenes overflade som følge af reaktionerne mellem cement og vand. En del af det herved bundne vand kaldes *ikke-fordampeligt vand*, w_n .¹⁾ I cementgelen findes desuden gelvand i porer med en radius af størrelsesordenen 20–40 Ångstrøm.²⁾ På grund af den ringe porediameter kan gelvandet først fryse, når temperaturen falder langt under 0° C. Ved –30° C er mindre end halvdelen af gelvandet frosset, og først ved –78° C fryser det sidste gelvand.

Mellem de uhydrerede cementkorn i den friske beton findes mellemrum – de kapillære porer – der er fyldt med *kapillar-vand*. Under hærdning tiltager tykkelsen af cementgelen omkring cementpartiklerne, hvorved diameteren i de kapillære porer aftager, men den forbliver dog selv i hærdnet cementpasta mange gange større end diameteren i cementgelens porer. Fig. 12 giver en skematisk fremstilling af cementpastaens opbygning, og fig. 15, side 29, viser, hvorledes mængden af ikke-fordampeligt vand og gelvand vokser under hærdningsprocessen, samtidig med at mængden af kapillar-vand aftager.

¹⁾ Det ikke-fordampelige vand bestemmes i laboratoriet ved tørring af cementpasta over en desiccator med nærmere angivet lavt damptryk og er groft taget identisk med den vandmængde, der forbliver i cementpastaen ved længere tids tørring ved 105° C.

²⁾ 1 Ångstrøm = 10^{-8} cm.

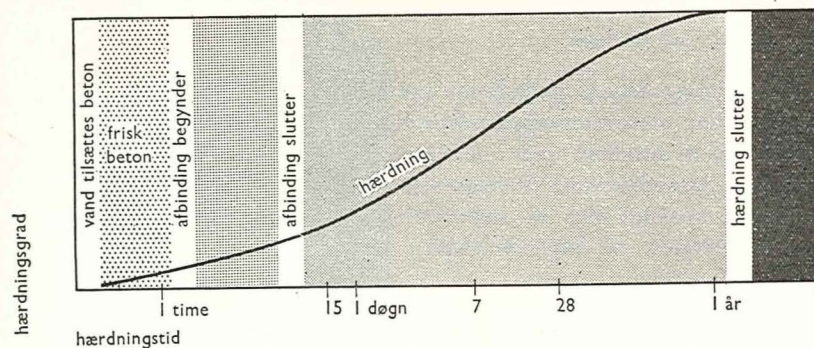


Fig. 11. Skematisk fremstilling af hærdningen som funktion af tiden.

Under hærdningsprocessen kan en del af cementpastaens vandindhold forsvinde på grund af fordampning. Denne fordampning sker først fra de kapillære porer med de største porediametre.

Da cementgel og gelvand fylder mindre end de oprindelige rumfang af cementkorn og vand, vil der selv i prøvelegemer, hvor fordampning er forhindret ved forsegling af overfladen, ske en formindskelse af vandmængden i kapillarerne, og de bliver delvis luftfyldte. Dette fænomen kaldes *selvudtørring*.

Både ved fordampning og ved selvudtørring sker en formindskelse af *cementpastaens vandmætningsgrad*, der er defineret som forholdet mellem rumfanget af kapillært vand og rumfanget af de kapillære porer.

Ved betonens *kitmasse* forstås alt, som ligger i mellemrummene mellem en betons gruskorn. Kitmassen omfatter således cementpastaen plus den luftmængde, der findes i den friske beton.

I almindelig beton findes altid en vis mængde *tilfældig luft* som *relativt store* uregelmæssigt formede luftporer, dannet i vinkler og hjørner, hvor cementpastaen ikke har udfyldt mellemrummene mellem gruskornene.

I beton, hvor der med vilje er *indblandet luft*, findes denne derimod som millioner af små tætliggende luftbobler omgivet af cementpasta.

Hærdningsprocessens hastighed er afhængig af *hærdningstemperaturen*. I et følgende afsnit omtales, hvorledes det ved forsøg er eftervist, at *hærdningstiden* fordobles, når temperaturen falder 10°C . Hærdningshastigheden vokser med v/c -forholdet for den friske cementpasta.

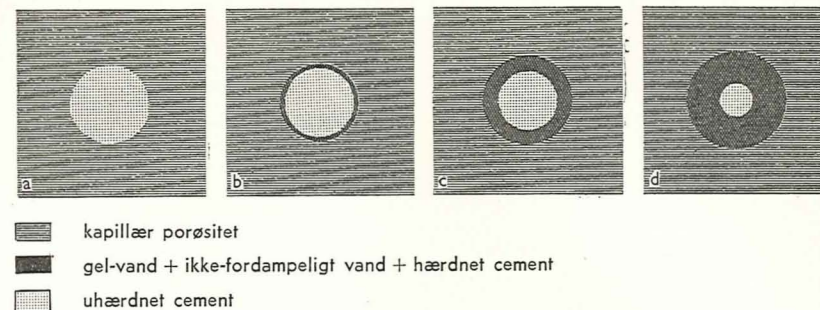


Fig. 12. Cementgelens vækst under hærdningen.

Et oprindeligt uhydreret cementkorn optager vand under hærdningen, således at der dannes cement-gel. Den kapillære porøsitet formindskes ved cement-gelens vækst.

Som et mål for, hvor langt hærdningsprocessen er forløbet, benyttes begrebet *hærdningsgraden*, defineret som mængden af ikke-fordampeligt vand, w_n , til et givet tidspunkt i forhold til mængden af ikke-fordampeligt vand ved fuldstændig hærdning, $w_{n\infty}$. Hærdningsgraden for en given cementtype er en funktion af det oprindelige v/c -forhold, hærdningstid og hærdningstemperatur.

Det er påvist, at der er en snæver sammenhæng mellem w_n og betonens *hærdningsvarme*, Q , der udvikles som følge af de fysisk-kemiske processer under reaktionen mellem vand og cement. Hærdningsgraden kan således også måles ved at bestemme hærdningsvarmen, hvilket har visse praktiske fordele.

Frostsikker beton er beton, der er fremstillet af frostbestandigt grusmateriale, og som er i stand til at modstå et meget stort antal frysninger og optøninger, selv om cementpastaen er vandmættet. Beton kan blive frostsikker, når en vis hærdningsgrad er nået, såfremt den indeholder en vis mængde indblandet luft.

Beton uden indblandet luft kan aldrig blive frostsikker, men den kan i praksis under gunstige omstændigheder vise sig at være frostbestandig (dvs. tåle frysninger og optøninger), f. eks. fordi cementpastaens vandmætningsgrad er under den kritiske værdi.

Kitmassens *styrke* kan beregnes på et vilkårligt tidspunkt i hærdnings-

processen, når man kender den friske betons indhold af cement (c), vand (v) og luft (l) og den hærtnende kitmasses indhold af ikke-fordampeligt vand, w_n , idet styrken vil afhænge af forholdet mellem cementgelens rumfang og kitmassens kapillære porøsitet, d. v. s. *kitmassens gelmætningsgrad*. Kitmassens styrke ved en given hærtningsgrad kan forudsiges ud fra den friske betons forhold mellem cement og vand + luft $\sim \frac{c}{v+1}$.

For beton uden tilfældig eller indblandet luft kan med god tilnærmelse benyttes v/c -forholdet.

Frysning af frisk beton

Umiddelbart efter betonens blanding vil den friske beton kun have ganske ringe sammenhængskraft, og vandindholdet vil være tilstede i de samme former som i en jordblanding, d. v. s. dels som adsorptionsvand, dels som kapillarvand i hulrummene mellem de faste stoffer og endelig også som frit vand, såfremt betonen har et så stort vandindhold, at konsistensen er plastisk til flydende.

Den friske beton kan betragtes som en kunstig sammensat »jordart«, og er på grund af den ret store permeabilitet og samtidig en vis kapillaritet frostfarlig, fordi der ved betonens sammensætning er tilstræbt et sådant forhold mellem fine, mellemfine og grove partikler, at der bliver så få og små hulrum som muligt mellem tørstofferne. De uhydrerede cementkorn er endvidere tilstede i så rigelig mængde, at man har mere end 3 %, der er finere end 0.02 mm.

Det er da også konstateret såvel i praksis som ved laboratorieforsøg, (44 C 3) at der dannes islinser ved frysning af beton, når der ikke er luft i betonen, og vandindholdet kan forøges under frysningen ved kapillar sugning fra omgivelserne. Når der ikke opsuges vand, vil isdannelserne blive mere fordelt og viser sig ofte som isnåle, der dannes i grænsefladen mellem gruspartiklerne og cementpastaen, samt i cementpastaens kapillære porer. Disse isnåle vil ved senere optøning efterlade hulrum og mærker, som populært kaldes »påfuglespor«. På fig. 13 er vist et eksempel på isdannelser af denne art.

Analogien mellem frisk beton og frostfarlig jord gælder imidlertid kun for den allerførste periode af betonens levetid, indtil de kemiske processer er så vidt fremskredne, at trækstyrken er tilstrækkelig stor til at modvirke islinsernes vækst og sprængning af porevæggene.

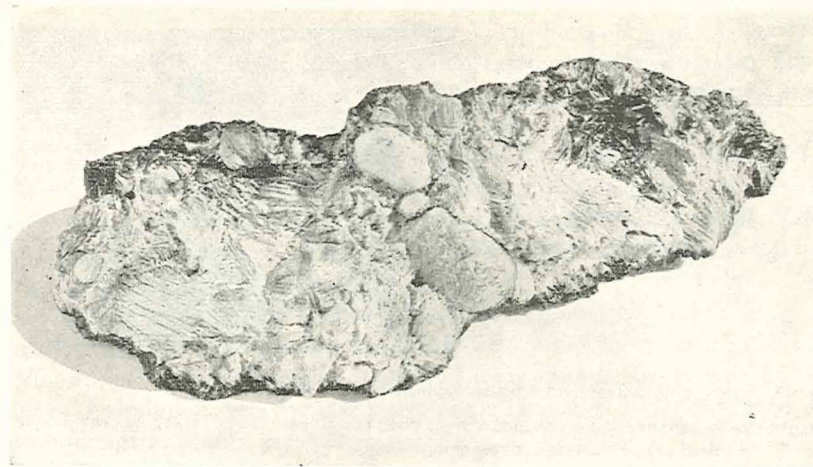


Fig. 13. "Påfuglespor" dannet ved frysning af frisk beton.

Isdannelser af denne art kan udvikles ved frysning af frisk beton. Hvis betonens vandindhold kan forøges ved kapillar sugning under frysningen, kan der dannes større islinser.

Frysning af afbundet beton

Efter betonens afbinding fortsætter hærtningsprocessen, så længe der er tilstrækkeligt vand tilstede, hvorved trækstyrken vokser. Rent umiddelbart skulle man derfor tro, at denne styrke vil være bestemmende for betonens evne til at tåle frost, men som det vil blive gennemgået nedenfor, er modstandsevnen over for frost også afhængig af en lang række andre faktorer. Den følgende fremstilling er i det væsentlige baseret på de af *T. C. Powers* udviklede teorier, (47 P 4) (49 P 26), hvis rigtighed nu er eftervist ved forsøg (54 P 1).

Ifølge *Powers* vil der ved frysning af afbundet beton dannes is i porerne, men porevæggens trækstyrke vil forhindre dannelse af islinser. Vandets omdannelse til is bevirker imidlertid en ekspansion i porernes længderetning, hvorved vandet hovedsagelig presses ind i betonen i samme retning som frostens indtrængning. På grund af den afbundne betons ringe permeabilitet kan der herved opbygges så store hydrauliske tryk, at *porevæggene revner, hvis der ikke i betonen med ganske små mellemrum findes luftbobler, hvor det hydrauliske tryk kan udlignes som vist på fig. 14.*

Endnu ikke offentliggjorte undersøgelser af *Powers* (54 P 1) har vist, at ved langvarig og streng frost vil vandet, der er presset ind i luftboblerne, omdannes til is, der suger vand til sig fra den omliggende cementgel.

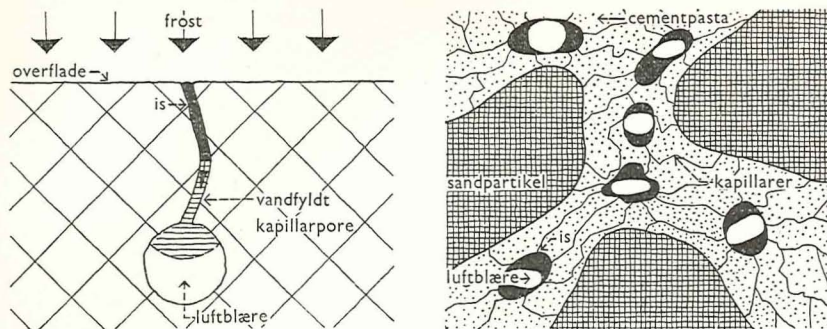


Fig. 14. Frysning af luftindblandet beton, skematisk. (50 L 22).

I luftboblerne udlignes det hydrauliske tryk, som opstår når vandet i kapillarerne fryser. Vandbevægelsen sker i frostens indtrængningsretning.

hvorved isens rumfang vokser, men uden ødelæggelse af luftboblens vægge. I luftindblandet beton vil denne fjernelse af vand fra cementgelen medføre et svind af betonen som helhed i modsætning til beton uden indblandet luft, der udvider sig ved frysning.

Frostens indflydelse på betonen er afhængig af cementpastaens vandmætningsgrad og permeabilitet, af betonens trækstyrke og luftindhold samt af afkølingshastigheden og den mængde is, der dannes pr. grad temperaturfald.

Som et udtryk for disse faktorerers indflydelse har Powers opstillet følgende formel for det hydrauliske tryk i dyn pr. cm^2 cementpasta:

$$P = a \left(1.09 - \frac{1}{s}\right) \frac{uR}{K} \left(\frac{L^3}{r_b} + \frac{3L^2}{2}\right) \text{ dyn/cm}^2$$

hvor:

a = en konstant, der bl. a. afhænger af vandets viskositet, gr/cm sek. ,

s = cementpastaens vandmætningsgrad,

u = den vandmængde i gram pr. gram cement, der fryser pr. grad temperaturfald, $\text{g/g } ^\circ\text{C}$,

R = nedkølingshastigheden, $^\circ\text{C/sek.}$,

K = permeabiliteten, cm^2 ,

r_b = luftboblernes middeldiameter, cm ,

L = middelfstanden mellem luftboblerne, cm .

Formlen er udledt under forudsætning af, at der ved luftindblanding er dannet luftbobler af størrelsesordenen $d = \text{ca. } 0.2 \text{ mm}$, som vandet under betonens frysning kan presses ind i. Såfremt det hydrauliske tryk P bli-

ver større end cementpastaens trækstyrke T , vil der opstå brud i kitmassen. I det følgende diskuteres de enkelte faktorer, som indgår i formelen, deres indflydelse på det hydrauliske tryk og mulighederne for at påvirke dem, så frostskaferne formindskes eller helt undgås.

Cementpastaens vandmætningsgrad s har en overordentlig stor indflydelse på det hydrauliske tryks størrelse. Af formelen ses det, at når s bliver lig med 0.917, bliver $P = 0$, d. v. s. at der intet hydraulisk tryk opstår. Vandet omdannes da til is i porerne uden at forårsage nogen vandbevægelse, og frostskafer vil da ikke opstå.

Det hydrauliske tryk vokser med u , mængden af vand, der fryser pr. grad temperaturfald. Såfremt man kan forhindre frysningen f. eks. ved tilsætning af frysepunktssænkende midler, vil man opnå en beskyttelse af betonen, i almindelighed dog kun indtil nogle få grader under 0°C med de almindeligt anvendte koncentrationer.

Jo større afkølingshastigheden R er, jo større bliver det hydrauliske tryk. I praksis kan man formindskes afkølingshastigheden ved at isolere betonen. Jo større betonrumfanget er i forhold til overfladen, jo mindre bliver betonens temperatur påvirket af den ydre temperatursvingninger. Derved formindskes afkølingshastigheden. Svære konstruktioner er derfor mindre udsatte for frostskafer end spinkle.

Når betonens permeabilitet K aftager, bliver det hydrauliske tryk større. Da permeabiliteten aftager under betonens hærdningsproces, er det derfor ikke uden videre givet, at betonens modstandsevne overfor frostpåvirkning forøges med alderen. Permeabiliteten er foruden af alderen afhængig af cementpastaens sammensætning, og vokser med tiltagende v/c . *I luftindblandet beton forøges det hydrauliske tryk, når middelfstanden mellem luftboblerne L vokser.* Det er derfor væsentligt at have en beton med mange ensartet fordelte tætliggende luftbobler, hvori det hydrauliske tryk hurtigt kan udlignes.

I vandmættet beton uden luftindblanding er mulighederne for trykudligning så ringe, at betonen vil beskadiges ved frysning.

Betonens trækstyrke

Kun hvis det hydrauliske tryk overstiger cementpastaens trækstyrke, vil der opstå brud i kitmassen. Det er derfor særdeles vigtigt, at hærdningsprocessen forløber hurtigt, hvorved også cementpastaens trækstyrke udvikles hurtigt. Ved gentagne frysninger og optøninger må det hydrauliske tryk ikke overstige udmattelsesgrænsen for cementpastaens trækstyrke.

Tidens indflydelse

I formlen for det hydrauliske tryk P er a en konstant, og afkølingshastigheden R samt afstanden mellem luftboblerne L er uafhængige af hærtningsprocessens forløb.

Vandmætningsgraden s , isdannelsen pr. grad temperaturfald u , permeabiliteten K og trækstyrken T ændrer sig derimod efterhånden som hærtningsprocessen skrider frem. Disse egenskaber og deres ændringer med tiden kan beregnes som funktioner af mængden af ikke-fordampeligt vand, w_n , gr/gr cement, benyttet som et mål for, hvor langt hærtningsprocessen er fremskredet.

Der kan ligeledes opstilles funktioner for sammenhængen mellem w_n og hærtnings tid, temperatur, v/c -forhold, cementens klinkerkomponenter m. v.¹⁾ Der kan således også findes relationer mellem disse faktorer og cementpastaens ovenfor nævnte egenskaber.

Endvidere kan man beregne, på hvilket tidspunkt hærtningsprocessen målt ved w_n er så langt fremskredet, at et bestemt luftindhold, karakteriseret ved størrelse af og afstand mellem luftboblerne, vil yde beskyttelse mod frysning, selv om cementpastaen er vandmættet.

De pågældende beregninger er for omfattende til at blive medtaget her, men et beregningseksempel er vist i diagramform på fig. 15.

Beregningerne viser iøvrigt, at i et damptæt forsejlet betonlegeme aftager vandmætningsgraden på grund af selvudtørringen, således at betonen efter en vis tids forløb alene herved kan være tilstrækkelig beskyttet mod frostskafer, selv om der ikke er indblandet luft. Det kan beregnes, at dette er tilfældet efter 5 døgn hærtning ved 15°C for en beton med 300 kg cement pr. m³, men først efter 2 måneders hærtning ved 15°C, hvis cementindholdet kun er 150 kg/m³. I praksis kan endvidere fordampningen, som fremmes ved anvendelse af frisk beton med højere temperatur end omgivelserne, medvirke til midlertidigt at nedsætte vandmætningsgraden til under den kritiske værdi 0,91. Dette er utvivlsomt forklaringen på, at det hidtil her i landet anvendte »frosthårdhedsprincip« i mange tilfælde har givet beton, som ikke er synligt frostbeskadiget. I beton, der støbes nogle måneder før den første frysning indtræffer, vil vandmætningsgraden ligeledes synke under den kritiske værdi, hvis der kun er ringe mulighed for vandoptagelse udefra, og betonen vil i praksis opnå en rimelig levetid, selv om den ikke indeholder indblandet luft.

¹⁾ Der henvises til en rapport, der er under udarbejdelse vedrørende forsøgene på Statsprøveanstalten (54 N 1).

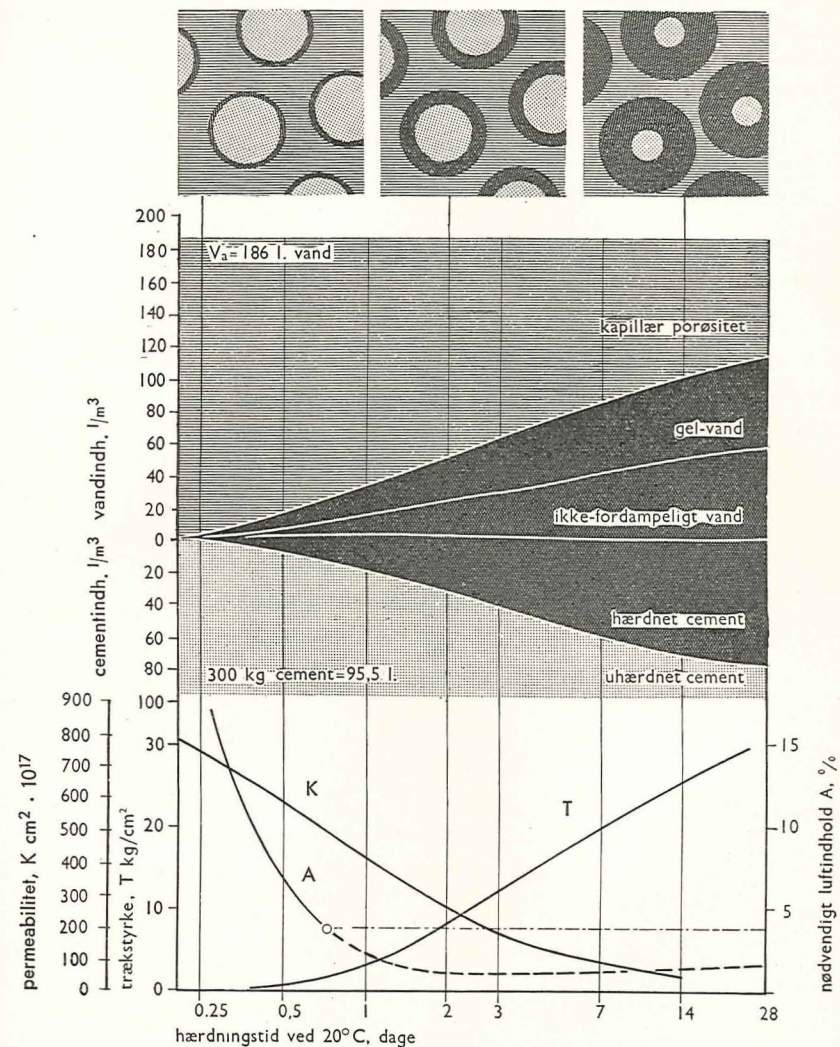


Fig. 15. Ændringer af porøsitet, permeabilitet, trækstyrke og nødvendigt luftindhold som følge af cementgelens vækst under hærtningen.

Under hærtningen vokser mængden af hærdnet cement, ikke-fordampeligt vand og gel-vand samtidig med, at den kapillære porøsitet formindskes. Dette medfører en tilvækst i trækstyrken, T , samtidig med en formindskelse af permeabiliteten, K . Det nødvendige luftindhold, A , til opnåelse af frostsikkerhed formindskes under den første del af hærtningsprocessen.

Men når betonen ikke er beskyttet mod vandoptagelse udefra, kan man kun opnå *sikkerhed* mod frostbeskadigelse ved at indblende så meget luft i betonen ved dens fremstilling, at dens cementpasta også i vandmættet tilstand efter en vis tid kan tåle frosten, idet det hydrauliske tryk kan udlignes i luftboblerne.

Da man som ovenfor nævnt kan beregne det nødvendige luftindhold for en given beton på ethvert tidspunkt under hærdningen, kan man vælge en passende kombination af luftindhold og tildækningstid for at opnå den mest økonomiske beskyttelse af beton, der støbes om vinteren.

Konklusion

Det fremgår af foranstående redegørelse, at betons modstandsevne overfor frost ikke kan betragtes som afhængig af blot en enkelt af de egenskaber, der udvikles under hærdningen, f. eks. styrken.

Det er ligeledes vist, at *frostsikker beton* kan fremstilles, hvis:

- 1) grusmaterialet er frostbestandigt.
- 2) dannelse af islinser og iskrystaller hindres i den friske beton ved at beskytte den mod frysning på dette trin i hærdningen.
- 3) hærdningsprocessen fremmes, således at betonen har opnået en vis hærdning, inden frysning finder sted. Denne hærdningsgrad er karakteriseret ved, at den indblandede luftmængde er tilstrækkelig stor til, at det hydrauliske tryk ved den første frysning kan udlignes, inden det overstiger den trækstyrke, der svarer til hærdningsgraden.
- 4) luftindholdet er tilstrækkeligt stort til at hindre, at det hydrauliske tryk forårsager udmattelsesbrud ved senere gentagne frysninger og op-tøninger.

Til fremme af hærdningen kan afkølingshastigheden formindskes ved at isolere betonen mod varmeafgivelse til omgivelserne. De øvrige faktorer, der er omtalt i redegørelsen, nemlig vandmætningsgraden, mængden af vand der fryser pr. grad temperaturfald og permeabiliteten, kan vanskeligt påvirkes i den ønskelige retning, uden at betonens modstandsevne forringes overfor andre ydre påvirkninger end frost.

Beregning af betonegenskabernes ændring under hærdningen

I dette afsnit gennemgås først de hærdningsgrader, der er af interesse ved støbning af beton om vinteren. Dernæst vises det, hvorledes man ved at benytte relationer mellem hærdningsgrad, hærdningsvarme og styrke har kunnet opstille formler, der gør det muligt at beregne, hvor længe betonen skal hærde ved varierende temperatur for at opnå en given hærdningsgrad eller styrke.

Der gives endelig en oversigt over, hvilke muligheder der findes for at påvirke hærdningen i gunstig retning.

Hærdningsgrader

Ved støbning om vinteren er det nødvendigt, at betonen, før den fryser, har opnået en sådan hærdningsgrad, at den er frostsikker.

Derudover er det ønskeligt, men ikke nødvendigt, at betonen kan af-formes i løbet af nogenlunde »normal« tid, hvilket kræver, at betonens temperatur holdes på »normal« hærdningstemperatur. Afformningstidspunktet afhænger ikke blot af den opnåede styrke, men også af tendensen til plastiske deformationer.

Afformningen foretages, når hærdningsgraden har nået en vis størrelse afhængig af, om det er søjler, vægge eller fritbærende konstruktioner. Ved lavere temperatur tager det længere tid at opnå en given hærdningsgrad. Beregningerne i det følgende har til formål at bestemme, hvilke hærdningstider der er nødvendige for at opnå de ovenfor nævnte hærdningsgrader ved varierende betontemperaturer.

Måling af hærdningsgraden

Som et mål for hærdningsgraden kan benyttes både det ikke-fordampelige vand w_n og hærdningsvarmen Q , begge udtrykt i procent af slutværdien ved fuldstændig hærdning. (I praksis benyttes almindeligvis betonens styrke bestemt på prøvelegemer som et mål for, om betonen er tilstrækkelig hærnet). Den primære størrelse w_n er det direkte mål for, hvor langt hærdningen er skredet frem. Bestemmelse af denne størrelse ved forsøg er dog foreløbig begrænset til rene cementpastaer og kan kun foretages på veludstyrede laboratorier.

I den foreliggende vejledning er betonens hærdningsvarme Q benyttet som et mål for hærdningen, da det ved de udførte forsøg har været muligt at bestemme Q for såvel cementpastaer som betoner med forskellige cementindhold og vand-cementforhold. Denne fremgangsmåde er berettiget, idet omfattende undersøgelser udført af *Verbeck* (50 V 4) og *Powers* (47 P 4) har vist, at der findes en sammenhæng mellem betonens hærdningsvarme Q og mængden af ikke-fordampeligt vand, w_n .

Som en god tilnærmelse til denne sammenhæng kan benyttes formlen:

$$Q = 500 w_n \quad (1)$$

Powers har ved forsøg eftervist, at styrken af cementpasta og mørtler kan udtrykkes som funktion af mængden af ikke-fordampeligt vand w_n og v/c-forholdet for den friske cementpasta eller mørtel. Da betonens styrke bl. a. er afhængig af mørtelstyrken, vil betonstyrken ligeledes være afhængig af de samme to størrelser, der tilsammen bestemmer kitmassens gelmætningsgrad, X .

Relationen kan skrives på formen

$$\sigma = a X^\beta \quad (2)$$

σ = styrken i kg/cm²

$$X = \frac{\gamma w_n}{\delta w_n + v/c} \quad (3)$$

a , β , γ og δ er konstanter, der afhænger af cementens klinkerkomponenter, grusets art og overfladeruheid m. v. De af *Powers* (49 P 26) fundne talværdier har givet ganske god overensstemmelse med danske erfaringer.

Ved anvendelse af ligning (1), (2) og (3) kan styrken udregnes som funktion af hærdningsvarmen Q .

Hærdningen som funktion af betontemperaturen

Ved svære konstruktioner benyttes ofte den adiabatisk varmeudvikling*) som et mål for betonens hærdningsvarme, når man vil beregne temperaturforløbet i konstruktionen. Når konstruktionens dimensioner aftager vil temperaturstigningen blive mindre på grund af varmeafgivelsen.

Når betonen udstøbes i koldt vejr i spinkle konstruktioner bliver den hastighed, hvormed hærdningsvarmen udvikles, meget afhængig af temperaturforholdene udenfor betonlegemet.

*) D. v. s. varmeudvikling uden udveksling af varme med omgivelserne.

Den fra fysisk kemi kendte regel, at reaktionshastigheden fordobles, såfremt den temperatur, hvorved processen sker, forøges med 10° C, fører til følgende ræsonnement:

Ved en konstant temperatur N_a varer en endelig, bestemt proces tiden h_a og ved en konstant temperatur $N = (N_a + n \cdot 10)^\circ$ varer den samme proces

$$t = \frac{1}{2^n} \cdot h_a \quad (4)$$

Ved at eliminere n fås tidstemperaturfunktionen:

$$h_a = 2^{\left(\frac{N-N_a}{10}\right)} \cdot t \quad (5)$$

Da forsøg har vist, at en tidstemperatur-funktion som (5) kan benyttes for beton er det muligt at sammenligne en kendt proces ved en kendt konstant temperatur med den samme proces ved en anden tilfældig valgt konstant temperatur, ved at benytte funktionen. På fig. 16 er funktionen benyttet til at angive hærdningsvarmen som funktion af hærdningstid ved to konstante hærdningstemperaturer. På fig. 17 er funktionen benyttet på styrkeudviklingen. Det ses, at betonen kræver 12 dages hærdning ved 0° C for at opnå samme styrke, som opnås ved 3 dages hærdning ved 20° C.

Såfremt processen sker ved en varierende temperatur N , må tidsrummet opdeles i så små intervaller, at man kan regne med konstant tem-

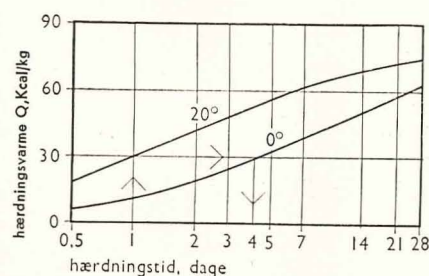


Fig. 16 Almindelig portlandcements varmeudvikling som funktion af hærdningstid og temperatur.

Efter 1 døgn hærdning ved 20° C er udviklet samme varmemængde som efter 4 døgn hærdning ved 0° C.

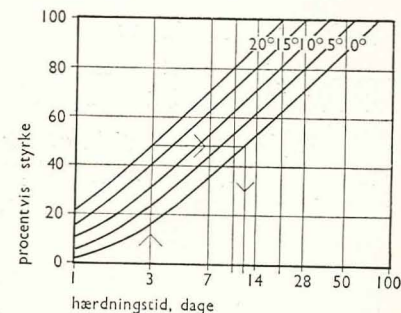


Fig. 17 Styrkeudvikling som funktion af tid og betontemperatur.

Efter 3 døgn hærdning ved 20° C er udviklet samme styrke som efter 6 døgn ved 10° C eller 12 døgn ved 0° C.

peratur indenfor intervallet, og hærdningstiden h_a for den valgte konstante temperatur N_a , som processen ønskes henført til, bestemmes ved en summation eller et integral:

$$h_a = \sum_0^t 2^{\left(\frac{N-N_a}{10}\right)} \cdot \Delta t \quad \text{eller} \quad (6)$$

$$h_a = \int_0^t 2^{\left(\frac{N-N_a}{10}\right)} \cdot dt \quad (7)$$

For $N_a = 0^\circ \text{C}$ fås:

$$h_0 = \sum_0^t 2^{\frac{N}{10}} \cdot \Delta t \quad (8)$$

De udførte forsøg på Danmarks tekniske Højskole og F. L. Smidth's laboratorium har rent empirisk bekræftet, at den angivne tidsfunktion også gælder for betons hærdningsproces.*)

Anvendelse af den fundne tidstemperaturfunktion gør det muligt at forudberegne betonens temperatur og hærdningsgrad til et givet tidspunkt, blot man har målt hærdningsvarmen for et kendt temperaturforløb.

Opstilling af ligninger

Der betragtes et betonelement under hærdning i tidsrummet fra t til $t + \Delta t$, i hvilken betontemperaturen ændres fra N til $N + \Delta N$.

Man udtrykker matematisk, at den varmemængde, der passerer gennem elementets overflade, er lig med den varmemængde, der udvikles i betonen, minus den varmemængde, der forbruges til betonens opvarmning.

Ligningen bliver således:

$$\sum k \cdot F \cdot (N \div N_u) \cdot \Delta t = \Delta Q \cdot C \cdot V \div c_b \cdot R_b \cdot V \cdot \Delta N \quad (9)$$

Her er:

*) Forsøgsresultaterne vil blive offentliggjort i en selvstændig rapport (54 R 1). Den fundne funktion har været anvendt på amerikanske forsøgsresultater med godt resultat og synes at dække et større temperaturinterval end den af Saul (51 S 14) foreslåede funktion til bestemmelse af »modenhedstallet«.

$k \cdot F$ = varmetransmissionstal gange overfladeareal, kcal/°C time.

N = betonens temperatur, °C.

N_u = den omgivende lufts temperatur, °C.

ΔQ = varmeudviklingen i betonen i tiden Δt , kcal/kg cement.

C = betonens cementindhold, kg/m³ beton.

V = betonelementets rumfang, m³.

c_b = betonens varmekapacitet, kcal/kg °C.

R_b = betonens rumvægt, kg/m³.

Ved indsættelse af afkølingstallet

$$a = \frac{\sum k \cdot F}{V \cdot c_b \cdot R_b}, \text{ 1/time} \quad (10)$$

og efter summering fra tiden $t = 0$ til $t = t_n$ og omregning findes temperaturen N_n til tidspunktet t_n af ligningen

$$N_n = N_b + \frac{C}{c_b \cdot R_b} \cdot Q_n \div \sum_0^{t_n} a \cdot (N \div N_u) \cdot \Delta t \quad (11)$$

Formlen forudsætter at betonelementet har så små dimensioner at betonen overalt kan regnes at have samme temperatur.

I ovenstående ligning indgår N_b , som er betonens begyndelsestemperatur for tiden $t = 0$, og Q_n , som er den i tidsrummet fra $t = 0$ til $t = t_n$ udviklede hærdningsvarme, der som tidligere nævnt kan benyttes som et mål for, hvor langt man er i hærdningsprocessen – enten direkte eller ved omregning til styrke.

Den hastighed, hvormed hærdningsvarmen udvikles, vil bl. a. afhænge af betontemperaturen N samt cementens sammensætning og formalingsgrad. På grundlag af forsøgene er der for tre danske cementtyper etableret en sammenhæng mellem den udviklede varmemængde Q og hærdningstid ved 0°C , h_0 , hvoraf man kan bestemme størrelsen Q_n , der indgår i ligning (11) som den til tiden $h_{0,n}$ udviklede varmemængde.

Ved den praktiske gennemførelse af beregningerne begynder man med udgangsbetingelserne efter at have bestemt det pågældende betonelements afkølingstal a og konstanten til Q . Man opdeler hærdningstiden i passende små delintervaller, der ved hjælp af tids-temperaturfunktionen (8) og den i begyndelsen af delintervallet beregnede temperatur, omsættes til delintervaller ved 0°C , Δh_0 , som successivt opsummeres til hærdningstid ved 0°C , $h_{0,n}$. Heraf kan Q_n bestemmes for den pågældende cementtype

og derefter indsættes i ligning (11) til bestemmelse af temperaturen ved tidsintervallets slutning.

De opstillede ligninger gør det muligt at beregne det fuldstændige temperaturforløb i et betonelement med givne dimensioner, betonsammensætning og isolation under givne ydre forhold.

Dette kan benyttes til at beregne diagrammer til forudbestemmelse af den forventede hærdningsgrad i det øjeblik betonen fryser, hvorefter det kan afgøres, om der ved den opnåede hærdningsgrad er opnået frostsikkerhed, afformningsstyrke m. m. som angivet i diagrammerne fig. 23–27.

Da hærdningshastigheden bl. a. afhænger af den temperatur, processen foregår ved, vil forholdsregler, der medfører, at betontemperaturen holdes på et højt niveau, forårsage at hærdningen fremskyndes.

Afkølingstallet

I ligning (11), side 35, indgår afkølingstallet a , som i henhold til (10) er bestemt af betonlegemets størrelse, form og isolation samt af betonens vandværdi (= varmfylde · rumvægt).

Betonlegemets størrelse og form. Det ses umiddelbart, at når overfladen vokser i forhold til rumfanget, vil afkølingstallet vokse, og dette medfører, at betonen hurtigere vil afkøles fra en given temperatur til en anden lavere temperatur, f. eks. 0°C . På fig. 18 er vist afkølingskurver for forskellige værdier for afkølingstallet.

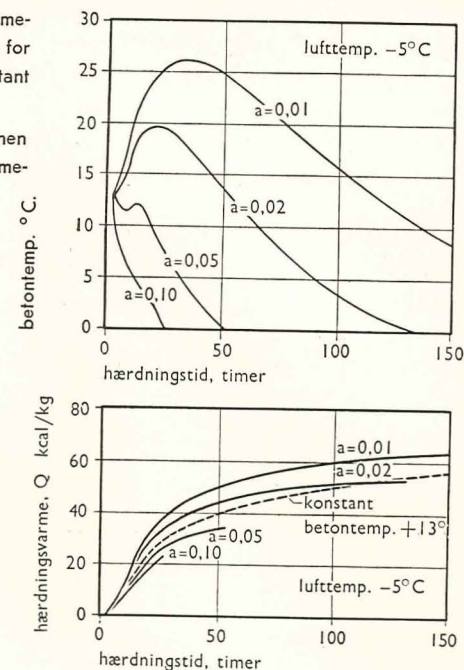
I tabel 6, side 53, er angivet, hvorledes »dimensionsfaktoren« d , der er et udtryk for forholdet $V:F$, kan beregnes for forskellige betonelementer. For plader og vægge benyttes deres tykkelse d , idet elementerne regnes at være så store, at randene ikke har nogen indflydelse. For søjler og bjælker beregnes d som angivet i tabellen.

For betonelementer med mere specielle dimensionsforhold beregnes afkølingstallet direkte ved hjælp af ligning (10).

Betonlegemets isolation. Afkølingstallet vokser, når varmetransmissionstallet k vokser. I tabel 5, side 52, er angivet værdierne for varmetransmissionstallet k i $\text{kcal}/^{\circ}\text{C m}^2 \text{ time}$. Værdierne gælder for varmetransmissionen fra betonens overflade til den omgivende luft og er fundet ved forsøg, der er udført på Danmarks tekniske Højskole samtidig med bestemmelsen af varmeudviklingen i hærdnende beton under afkøling.

Fig. 18. Betonens temperaturforløb og varmeudvikling som funktion af hærdningstiden for forskellige afkølingstal a og med konstant ydre temperatur $= -5^{\circ}\text{C}$.

Når afkølingstallet vokser, afkøles betonen hurtigere til 0°C , og den udviklede varmemængde bliver mindre.



Resultaterne viser klart den meget væsentlige betydning af betonens tildækning, idet selv de mindst effektive af de prøvede isolationsmaterialer – 1 presenning eller 1 våd halmmåtte – formindsker betonens varmetab til en sjettedel af varmetabet fra den utildækkede beton. Varmetabet kan yderligere formindskes ved at benytte en tør halmmåtte tildækket med en presenning eller ved at anvende indsyede måtter.

Vandværdien. Afkølingstallet aftager med voksende værdi af produktet af betonens varmfylde og rumvægt, den såkaldte »vandværdi«. Betonens varmfylde c_b ændres kun lidt under betonens hærdning. Ved forsøgene på Danmarks tekniske Højskole og i overensstemmelse med udenlandske erfaringer har man fundet, at der uden større fejl i beregningerne kan benyttes følgende værdi:

$$c_b \cdot R = 600 \text{ kcal/m}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Udregning af afkølingstallet. For en given betonkonstruktion er det muligt i hvert enkelt tilfælde at beregne afkølingstallet ud fra den angivne formel, når man kender varmetransmissionstallet for de isolationsmaterialer, man vil benytte. For at undgå disse beregninger ved gængse betonkonstruktioner kan man benytte fig. 22, side 53, hvis anvendelse illustreres i nedenstående eksempler.

Eks. 1. Plade. For en 40 cm plade er $d = 40$. Hvis pladen er forsynet med $1\frac{1}{4}$ " forskalling på undersiden og isoleret med en lufttør halmmåtte og en presenning på oversiden fås:

$\Sigma k = k_1 + k_2 = 3.0 + 1.9 = 4.9$. Med 4.9 som absicisse »lodret op« i diagrammet, til skæring med $d = 40$ cm. Afkølingstallet, a , aflæses da til venstre i diagrammet ~ 0.02 .

Eks. 2. Søjle. For en rektangulær søjle $30 \cdot 40$ cm er tværsnitsarealet $F = 30 \cdot 40 = 1200$ cm².

Søjlels omkreds $O = 2 \cdot (30 + 40) = 140$ cm; $d = \frac{1200}{140} = 8.6$ cm.

Hvis søjlen kun er isoleret med støbeforskallingen, fås $k = 3.0$ og med dette som indgang i diagrammet bestemmes ved skæring med $d = 8.6$ cm afkølingstallet $a \sim 0.06$.

Eks. 3. Bjælke. Der udstøbes en T-bjælke med en bredde $B = 30$ cm og en total højde $H = 40$ cm, $d = H = 40$ cm. Bjælken er isoleret på undersiden og de lodrette sider af $1\frac{1}{4}$ " forskalling, medens den på oversiden isoleres med en lufttør måtte.

$$\Sigma k = k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) k_2$$

$$k_1 = 3.0, k_2 = 3.0$$

$$\Sigma k = 3.0 + \left(1 + \frac{2 \cdot 40}{30}\right) 3.0 = 3.0 + 11 = 14.$$

Med Σk som indgang og $d = 40$ cm findes afkølingstallet $a \sim 0.05$.

Betonens sammensætning

Hærdningshastigheden afhænger bl. a. af cementens art, betonens cementindhold i kg/m³, forholdet mellem betonens indhold af vand og cement, karakteriseret ved v/c-forholdet, og af hærdningstemperaturen.

Cementens art. En cement er hurtighærdnende, d. v. s. har stor hærdningshastighed, hvis den under samme vilkår opnår en given hærdningsgrad – f. eks. målt ved styrken – i løbet af kortere tid end almindelig portlandcement. Endvidere vil en hurtighærdnende cement opnå større styrke end normal portlandcement, hvis hærdningstiden og de øvrige vilkår er ens.

Nedenstående gennemgås kun de danske cementser, som almindeligt anvendes indenfor byggeriet.

Den mest anvendte cement i Danmark er den almindelige portlandcement, der er den billigste, og som under normale forhold giver en god og bestandig beton.

Siden begyndelsen af 30'erne har Dansk Cement Central fremstillet en hurtighærdnende cement under navnet »Rapidcement«. Et tilsvarende produkt fremstilles af Andels cementfabriken under navnet »Record«. De er af portlandtypen og udmærker sig først og fremmest ved større hærdningshastighed end almindelig portlandcement.

I de allerseneste år har Dansk Cement Central sendt en cementtype på markedet under navnet »Superrapid«. Den er ligeledes af portlandtypen, men har endnu større hærdningshastighed end »Rapid« og »Record«.

I et tidligere afsnit er omtalt, at der er en nær forbindelse mellem cementens hærdningsvarme Q og dens styrke σ , da begge disse egenskaber afhænger af, hvor langt hærdningsprocessen er fremme målt ved mængden af ikke-fordampeligt vand w_n . En hurtighærdnende cement vil således efter en given hærdningstid under samme betingelser have en større mængde af ikke-fordampeligt vand, en højere styrke og en større varmeudvikling end normal portlandcement. Man kan derfor vilkårligt benytte en af disse egenskaber til karakterisering af cementerne.

På fig. 19 er vist hærdningsvarmen som funktion af hærdningstid ved 15° C for de tre cementtyper nævnt ovenfor, og figuren viser, at man når den samme hærdning, her målt ved hærdningsvarmen, i løbet af 3 dage, 2 dage og 1,2 dage for henholdsvis almindelig portlandcement, hurtighærdnende cement og superrapidcement.

Cementens alder. Hærdningshastigheden er afhængig af cementens alder og opbevaring. Hvis cementen i nogen tid har været opbevaret i papirsække i fugtig luft, vil der dannes hydratationsprodukter som et tyndt lag på cementpartiklernes overflade. Derved forsinkes hærdningsprocessen efter vandets tilsætning under blandingen.

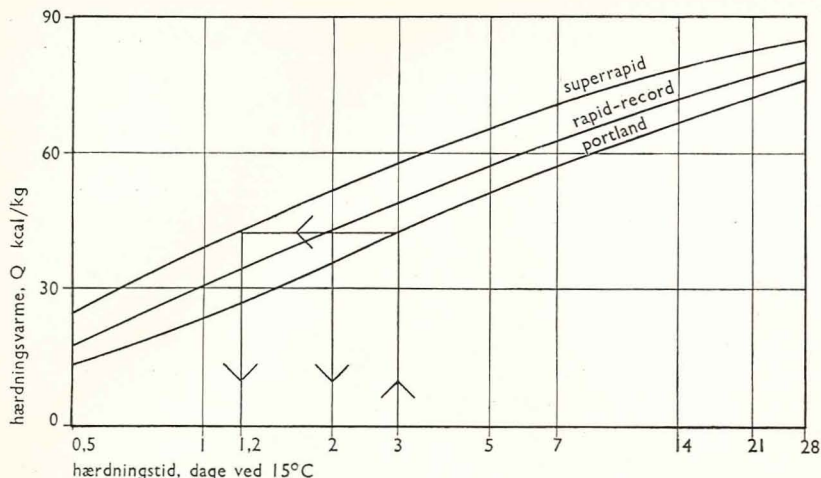


Fig. 19 Cementens varmeudvikling som funktion af cementtype og hærdningstid ved 15°C for $v/c = 0.40$.

Den varmemængde, der udvikles af almindelig portlandcement i løbet af 3 døgn udvikles i løbet af 2 døgn af Rapid- eller Recordcement og 1,2 døgn af Superrapidcement.

Cementens hærdningshastighed kan være forringet, uden at der er synlige tegn, og man bør altid kontrollere cementens afbindingstid som beskrevet side 84, hvis cementen har været oplagret i nogen tid. Hvis sækkene er blevet hårde, eller der findes stenløbne knolde, er der tale om en stærk forringelse af hærdningshastigheden, som kan være overordentlig farlig ved støbning i koldt vejr, og *anvendelse af beskadiget cement må frarådes, selv om de stenløbne knolde knuses eller frasigtes.*

Hurtighærdnende cement er på grund af den stærke formaling særlig udsat for at tage skade under opbevaringen. Undertiden kan hærdningshastigheden for lagret hurtighærdnende cement i de første døgn blive mindre end for frisk portlandcement.

Cementindhold. Det fremgår af formel (11), at den totale mængde varme, der udvikles i et givet betonrumfang, er direkte proportional med cementindholdet C i kg/m^3 .

Ved betonstøbning om vinteren kan det under visse omstændigheder være en fordel at bruge federe blandinger end normalt, da dette bidrager til at hæve temperaturen. Som regel er indflydelsen på betontemperaturens forløb i spinkle konstruktioner dog af begrænset betydning. Det vil i al-

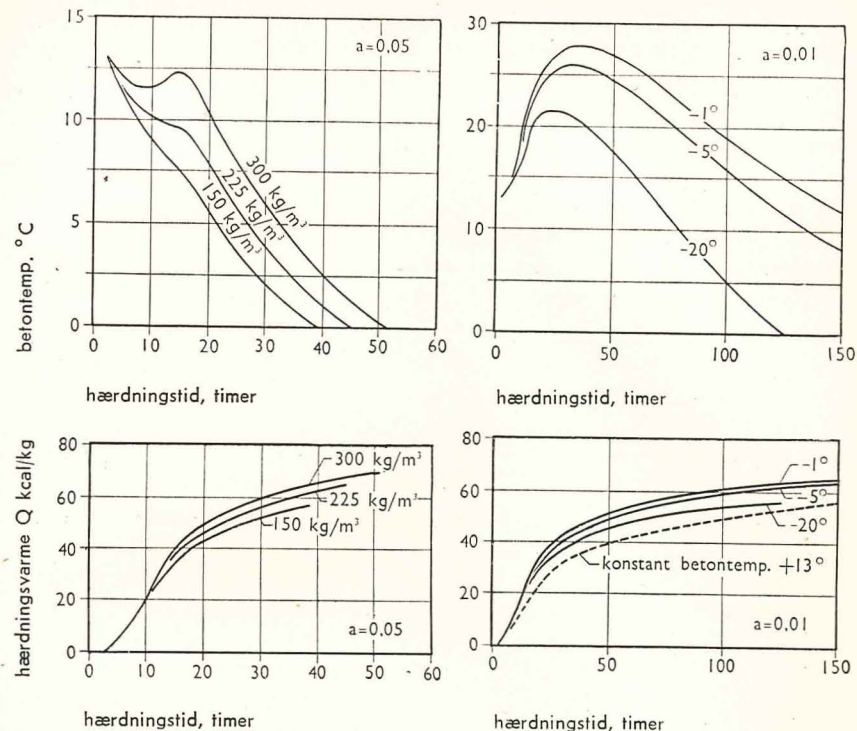


Fig. 20. Betonens temperaturforløb og varmeudvikling som funktion af hærdningstiden for forskellige cementindhold ved konstant ydre temperatur (+5°C) og konstant afkølingstal a .

Mager beton afkøles hurtigere til 0°C og udvikler derfor en mindre varmemængde end fed beton.

Fig. 21. Betonens temperaturforløb og varmeudvikling som funktion af hærdningstiden ved forskellige ydre temperaturer og med konstant afkølingstal a .

Ved lavere ydre temperatur afkøles beton hurtigere til 0°C, og der udvikles en mindre varmemængde.

mindelighed i sådanne tilfælde være mere økonomisk at bruge en cement med større hærdningshastighed fremfor at øge cementindholdet.

På fig. 20 er foroven vist afkølingskurven for 3 forskellige cementindhold og forneden den udviklede hærdningsvarme Q .

Vandindhold. Laboratorieforsøg har vist, at hærdningshastigheden forøges, når vandindholdet vokser i forhold til cementmængden, d. v. s. når v/c -forholdet forøges. Dette finder indirekte udtryk i formel (11), idet

sammenhængen mellem hærdningsvarmen Q og hærdningstiden h_0 ændres. Styrken i absolut mål (kg/cm^2) bliver som bekendt højere, jo lavere v/c -forholdet er, og da bl. a. tidspunktet for afformningen fortrinsvis er bestemt af den absolutte styrke, bør man alligevel benytte så lavt et vandindhold som muligt. Vandet må ikke indeholde salte eller andre stoffer, der nedsætter hærdningshastigheden.

Gruset. Hærdningsprocessen kan indirekte påvirkes af gruset, hvis det indeholder stoffer, der formindsker hærdningshastigheden. Man må derfor undgå humusholdigt sand. Findelt ler har på grund af sin store overflade mulighed for at binde stoffer, der nedsætter hærdningshastigheden. Disse stoffer kan være vanskelige at påvise, og grus med så ringe lerindhold som muligt bør foretrækkes.

Kemikalier. Stoffer, der forøger hærdningshastigheden, har visse fordele ved støbning af beton om vinteren, idet de forøger den hastighed, hvormed hærdningsvarmen udvikles, således at man opnår en given hærdning i løbet af en kortere hærdningstid. Visse klorider har denne egenskab, og af disse har kalciumklorid på grund af den lave pris været det mest anvendte. Ved tilsætning af kalciumklorid til en almindelig portlandcement opnås omtrent samme virkning, som ved anvendelse af en hurtighærdende cement. Kalciumklorid anvendes ofte i udlandet, særlig hvor der er stor prisforskel på almindelig portlandcement og hurtighærdende cement. Da anvendelse af kalciumklorid medfører en række ulemper som nærmere beskrevet i et følgende afsnit, bør man her i landet foretrække anvendelsen af en hurtighærdende cement fremfor tilsætning af kalciumklorid til almindelig portlandcement.

I denne anvisning er forudsat anvendelse af luftindblandingsmidler for at opnå frostsikker beton. Nogle luftindblandingsmidler er for at mindske styrketabet, der under visse omstændigheder følger med det forøgede luftindhold, tilsat stoffer, som i begrænset omfang forøger hærdningshastigheden.

Den ydre temperatur

Varmeafgivelsen fra et betonlegeme er i et kort tidsinterval Δt proportional med temperaturforskellen mellem betonen og den omgivende luft. Afkølingen til 0°C for en konstruktionsdel med given form, isolation, betonsammensætning og begyndelsestemperatur varer kortere, jo lavere

den ydre temperatur er – se fig. 21 – og den hærdningsgrad, der opnås, bliver naturligvis mindre for den hurtigt afkølede beton end for beton med længere afkølingstid.

Ved tilførsel af varme til betonens omgivelser formindskes temperaturforskellen og varmeafgivelsen. Hærdningsprocessen forløber ved en højere temperatur, og hærdningshastigheden forøges således, at en ønsket hærdning – frostsikkerhed eller afformningsstyrke – opnås hurtigere.

Betonens begyndelsestemperatur

Det fremgår af formel (11) og de viste eksempler, at betonens begyndelsestemperatur N_b har meget stor indflydelse på hele temperaturforløbet og dermed på, hvor meget betonen er hærdnet, før den køles ned til 0°C , idet man ved at hæve begyndelsestemperaturen opnår, at betontemperaturen i en større del af hærdningstiden vil være på et højt niveau med stor hærdningshastighed.

Af opvarmningstekniske grunde er det dog vanskeligt at opnå meget høje begyndelsestemperaturer på økonomisk måde.

Hertil kommer, at man ved meget høje begyndelsestemperaturer kan opnå så stor hærdningshastighed, at man ikke får tid til at udstøbe og komprimere betonen, før den er afbundet.

For almindelig Portlandcement må den friske betons temperatur ikke overstige $+30^\circ\text{C}$, for hurtighærdende cement er den tilsvarende grænse $+25^\circ\text{C}$. Det er at foretrække, at betonens begyndelsestemperatur ikke er væsentlig højere end ved normal støbning om sommeren, og at varmetabene formindskes ved *hurtig og effektiv isolering*. Denne fremgangsmåde modvirker endvidere tendens til temperatur- og svindrevner.

Teoriens anvendelse

De ovenfor udledte formler til bestemmelse af temperaturforløb og hærdningsgrad gælder generelt, men beregningerne er for omfattende at udføre i hvert enkelt tilfælde. På side 55–59 er gengivet en række diagrammer, der er baseret på et meget stort antal beregninger af temperaturforløbene i konstruktionsdele med varierende afkølingstal, betonsammensætning, lufttemperaturer og begyndelsestemperaturer.

Diagrammerne gør det muligt at forudsige, hvorvidt en konstruktionsdel med en given isolation, betonsammensætning og begyndelsestemperatur vil opnå den ønskede hærdning, inden den under givne temperaturforhold afkøles til 0° og derefter udsættes for frost. Nedenfor omtales det anvendte grundlag og forudsætningerne for beregningernes udførelse.

Frostsikkerhed

Beregningerne er gennemført for et forudsat luftindhold på 4% og er baseret på Powers teori. Den nødvendige hærkning for opnåelse af frostsikkerhed er beregnet for tre danske cementtyper og angivet i tabel 1 som hærkningstid h_0 og h_{15} ved konstant betontemperatur henholdsvis 0°C og 15°C .

cementtype	cementindhold kg/m ³	hærkningstid i timer	
		ved 0°C h_0	ved 15°C h_{15}
almindelig portland	300	45	16
	150	53	19
hurtighærdnende	300	40	14
	150	45	16
Superrapid	300	34	12
	150	39	14

Tabel nr. 1

Hvis der anvendes lavere luftindhold, bliver den nødvendige hærkningstid for opnåelse af frostsikkerhed urimelig lang, og for visse betonsammensætninger kan frostsikkerhed aldrig opnås.

Afformning

For ikke-bærende sideform kan afformning finde sted, når de i tabel 2 angivne hærkningsperioder overholdes. Ved tabellens beregning er be-

cementtype	hærkningstid i timer/dage	
	ved 0°C h_0	ved 15°C h_{15}
almindelig portland	200 ~ 8	72 ~ 3
hurtighærdnende	130 ~ 5	46 ~ 2
Superrapid	80 ~ 3	28 ~ 1

Tabel nr. 2

nyttet den i DS 411 angivne periode for portlandcement, hvorefter hærkningsperioden for de øvrige cementtyper er beregnet ud fra deres – større – hærkningshastighed. Der er regnet med, at normerne forudsætter en betontemperatur på $+15^\circ\text{C}$.

For fritbærende konstruktioner, hvor spændvidden er mindre end 3 m:

cementtype	hærkningstid i timer/dage	
	ved 0°C h_0	ved 15°C h_{15}
almindelig portland	470 ~ 20	168 ~ 7
hurtighærdnende	200 ~ 8	72 ~ 3
Superrapid	135 ~ 6	48 ~ 2

Tabel nr. 3

For spændvidder over 3 m gives et tillæg, som fremgår af tabel 4. For søjleforme, der ikke benyttes som understøtninger, kan ifølge C. t. O. regnes med det halve af det antal døgn, der findes for en spændvidde lig søjlens højde.

cementtype	tillæg i hærkningstid i dage pr. m spændvidde udover 3 m	
	ved 0°C h_0	ved 15°C h_{15}
almindelig portland	11	4
hurtighærdnende	3	1
Superrapid	2	0,7

Tabel nr. 4

Hærkning som funktion af tid og temperatur

I ovennævnte nødvendige hærkningstider, der også er benyttet ved diagrammernes optegning, har man udtrykt den nødvendige hærkning som hærkningstid ved 2 temperaturer, nemlig 0° og 15° C, og denne beregning er naturligvis baseret på danske cementers specielle $Q-h_0$ kurver. De anførte hærkningstider har således kun gyldighed for disse cementer, og hvis cementen ikke har taget skade ved lagringen.

I praksis vil den udstøbte betons temperatur variere på grund af den udviklede hærkningsvarme og afgivelse af varme til omgivelserne.

Ved anvendelse af den udviklede teori kan man omregne hærkningen ved varierende temperatur til hærkning ved konstant temperatur.

Beregningerne udføres således:

Straks efter udstøbning og tildækning måles betontemperaturen med passende korte mellemrum (jo lavere lufttemperatur, jo kortere mellemrum). Samtidig noteres klokkeslettet, ligesom lufttemperaturen måles og noteres, men med større mellemrum. Hvert tidsrum mellem temperatur-aflæsninger (Δt timer) omregnes til hærkningstid ved 15° C, Δh_{15} ved multiplikation med en korrektionsfaktor f , hvis størrelse afhænger af den målte temperatur, og som enten kan beregnes af formlen

$$f = 2 \left(\frac{N-15}{10} \right)$$

eller aflæses i fig. 28, side 62. De fundne værdier for Δh_{15} opsummeres til samlet hærkningstid ved 15° C som h_{15} -timer eller h_{15} -døgn. I diagrammerne fig. 23-27 kan den således beregnede hærkningstid omsættes til procentisk trykstyrke af 28-døgnstrykstyrken for en beton med samme indhold af almindelig portlandcement. Ved sammenligning med de på diagrammerne indtegnede grænseværdier for henholdsvis frostsikkerhed og afformningsstyrke kan det afgøres, om de ønskede egenskaber er nået. Beregningens udførelse er vist ved følgende eksempel, hvor værdierne i de 3 første kolonner i skemaet er forudsat noteret på arbejdspladsen og f -værdierne i kolonne 7 er aflæst på fig. 28.

Eksempel. 300 kg Rapid- eller Recordcement

tids-punkt kl.	beton-temperatur N° C	luft-temperatur N _u ° C	Δt timer	$1/2 \Delta t$ timer	Δt_N timer	korrektions-faktor f	$\Delta h_{15} = f \cdot \Delta t_N$ timer	$h_{15} = \sum \Delta h_{15}$ timer
1	2	3	4	$5 = 1/2 \cdot (4)$	6	7	$8 = (7) \cdot (6)$	9
12.00	16°	÷3°			2.0	1.1	2.2	
			4	2.0				2.2
16.00	15°	-			9.5	1.0	9.5	
			15	7.5				11.7
7.00	12°	÷6°			10.0	0.81	8.1	
			5	2.5				19.8
12.00	11°	-			4.5	0.76	3.4	
			4	2.0				23.2
16.00	8°	-			9.5	0.62	5.9	
			15	7.5				29.1
7.00	5°	÷7°			10.0	0.50	5.0	
			5	2.5				34.1
12.00	4°	-			4.5	0.47	2.1	
			4	2.0				36.2
16.00	3°	÷3°			2.0	0.44	0.9	
Sum:			52		52.0			37.1 = 1.5 døgn

Den målte betontemperatur regnes at gælde for et tidsrum bestående af halvdelen af tidsintervallet før, plus halvdelen af tidsintervallet efter temperaturmålingen.

Ved indgang med den fundne hærkningstid ved 15° C, $h_{15} = 37$ timer findes i venstre side af fig. 25, at betonen har opnået ca. 38 % af den normale 28 døgnstyrke for Portlandcement. Det ses samtidig, at der er

opnået frostsikkerhed, men der er ikke opnået tilstrækkelig styrke til at fjerne sideformen, idet der endnu mangler 11 h_{15} -timer. Hvis man forventer, at betonen vil holde sig på 0°C i endnu et par døgn, vil det endnu være $\frac{11}{0.32} = 35 h_0$ -timer, idet man enten benytter fig. 28 eller skalaerne

i venstre halvdel i et af diagrammerne. Når beregningerne er foretaget, er det et spørgsmål om økonomi og arbejdsprogram, om man vil udskyde afformning endnu $1\frac{1}{2}$ døgn eller fremme hærkningen ved opvarmning. Der er senere – side 63–64 – angivet en simplere metode til bestemmelse af afformningstidspunktet, hvor betontemperaturen måles med større intervaller, og en simpel optælling af døgn, hvor temperaturen har ligget indenfor et bestemt temperaturområde, indenfor hvilket der anvendes en fast værdi for korrektionsfaktoren f .

Den i eksemplet foran angivne metode kan benyttes til at forudsige hærkningsforløbet, idet man ved hjælp af ligningerne for hærkningsvarmen og varmebalancen beregner betontemperaturen ved tidsintervallets slutning.

Varieberegningernes udgangsbetingelser

Ved beregningernes gennemførelse er der først foretaget et skøn over de temperaturer af den nyblandede beton, man kan forvente ved de nedenstående 3 sæt foranstaltninger.

- 1) Uden opvarmning, hvilket forudsætter mildt vejr i overgangsperioderne til den egentlige vinter.
- 2) Opvarmning af vandet i forbindelse med frostfrie, men uopvarmede grusmaterialer.
- 3) Opvarmning af vand og grus.

I *Tillæg I* er beskrevet, hvorledes den nyblandede betons temperatur kan beregnes ud fra delmaterialernes temperaturer og det forventede varmetab under betonens transport og udstøbning, indtil isolationen lægges på betonen. Det er ved beregningernes gennemførelse forudsat, at der vil medgå 1 time fra betonens blanding indtil isolationsmaterialet er udlagt, og i denne periode forudsættes der udviklet 4 kcal pr. kg almindelig portlandcement, 5 kcal pr. kg hurtighærdnende cement og $6\frac{1}{2}$ kcal pr. kg Superrapidcement. Derefter er beregningerne gennemført i henhold til de i de forrige afsnit opstillede ligninger, og resultaterne er benyttet ved optegning af diagrammerne, side 55–59.

Diagrammer

De følgende diagrammer, som er udregnet på grundlag af de foregående teoretiske afsnit, kan benyttes såvel ved planlægning og tilrettelæggelse af støbearbejder, før vinteren indtræffer, som senere ved kontrol under støbningens udførelse i praksis.

Diagrammernes forudsætninger

Diagrammerne side 55–59 er udregnet, således at de kan anvendes ved det almindeligt forekommende beton- og jernbetonbyggeri i et temperaturområde, hvis laveste grænse er $\div 20^{\circ}\text{C}$. Som nærmere omtalt i det teoretiske stof er der ved beregningerne gjort en række forudsætninger. Disse er kort resumeret nedenfor.

Afkølingstal. En betonkonstruktions afkølingstal a er afhængig af dens størrelse og form, samt af isolationen, herunder forskallingens isolations-evne. For en given konstruktion og valgt isolation bestemmes afkølingstallet som gennemgået på side 52–53. Den fundne værdi benyttes som indgang i diagrammerne.

Cementtyper. Der er gennemregnet diagrammer for almindelig portlandcement og for hurtighærdnende cement (Rapid og Record). For Super-rapidcement er kun beregnet eet diagram, fordi denne dyrere cementtype kun i undtagelsestilfælde anvendes, såfremt betonen fremstilles med opvarmet vand eller opvarmet vand og grus.

Cementindhold. Som typiske for almindelige beton- og jernbetonkonstruktioner bringes diagrammer, beregnet for henholdsvis 150 og 300 kg cement pr. m^3 beton (for Superrapidcement dog kun 300 kg/m^3 beton). For mellemliggende cementindhold vil det være på den sikre side at benytte diagrammerne, der gælder for 150 kg cement pr. m^3 beton.

Materialer. Diagrammernes angivelser af, hvor tidligt under hærkningen betonen bliver frostsikker, gælder kun, når den ved fremstillingen er tilsat luftindblandingsmidler, og der herved er opnået en indblandet luftmængde af størrelsesordenen ca. 4 %.

Diagrammerne gælder endvidere kun, når der anvendes frostbestandigt grus, når dette er humusfrit og uden nævneværdigt lerindhold, samt når der anvendes frisk cement.

Den ydre temperatur. I hvert af diagrammerne er angivet kurver for den omgivende lufts temperatur $\div 1^{\circ}\text{C}$, $\div 5^{\circ}\text{C}$ og $\div 20^{\circ}\text{C}$. For mellemliggende temperaturer kan der interpoleres.

Betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen: N_b . For almindelig portlandcement og for hurtighærdnende cement (Rapid og Record) er der med de ovenfor nævnte cementindhold bragt et diagram for følgende tre temperaturer: $+5^\circ\text{C}$, 13°C og 20°C . Dette svarer til, hvad der opnås med de almindelige sæt foranstaltninger ved støbning om vinteren: uopvarmede materialer, opvarmet vand, opvarmet vand og grus.

Vejledning i diagrammernes brug

Diagrammerne er opdelt i en venstre og en højre halvdel med afkølingstallet a som fællesordinat for begge skemaer. Når afkølingstallet a er bestemt på fig. 22, kan man ved benyttelse af skemaet, der svarer til den valgte cementtype og det valgte cementindhold og den betontemperatur, man tænker anvendt ved planlægning af et arbejde, aflæse følgende i diagrammet efter at have foretaget et skøn over den sandsynlige ydre middeltemperatur de første 2 døgn efter støbningen:

Frostsikkerhed (venstre del)

Den vandrette linie svarende til konstruktionens afkølingstal a føres ind til venstre til skæring med den skønnede ydre temperatur. Hvis denne skæring ligger *til højre* for det område, der i diagrammet er prikket og betegnet »frostfarligt«, vil betonen blive frostsikker, før den er afkølet til 0° under forudsætning af, at den anvendte cement har normal hærningshastighed.

Afformning (venstre del)

Fra skæringspunktet mellem a -værdien og temperaturkurven føres en linie lodret ned til skæring med h_{15} -skalaen, hvor man kan aflæse, hvor langt betonen vil være nået i hærningprocessen, når betontemperaturen er faldet til 0°C , udtrykt som hærningstid i timer eller døgn ved $+15^\circ\text{C}$. I diagrammet er indtegnet lodrette linier, der angiver, hvornår afformning kan finde sted, og hvis den ovenfor omtalte linie f. eks. ligger *til højre* for linien, der angiver, at sideformen kan fjernes, vil dette kunne ske, inden betonen er afkølet til 0°C .

I de tilfælde, hvor der er foretaget nøjagtige beregninger af den nødvendige styrke ved afformningstidspunktet, kan det afgøres, om denne styrke er opnået, ved at forlænge den lodrette linie til skæring med skalaen, der angiver den opnåede styrke i procent af 28-døgnsstyrken for almindelig portlandcement.

Hvis en sådan beregning viser, at betonens bøjningstrykspænding vil blive 55 kg/cm^2 , og man benytter en sikkerhedsgrad på ca. 70 % af det normale, fås den nødvendige bøjningsstyrke til $55 \cdot 4 \cdot 0.7 = 154\text{ kg/cm}^2$. Såfremt betonen er fremstillet med et vandcementtal på 0.65, er den forventede bøjningstrykstyrke ca. 300 kg/cm^2 efter 28 døgns normal hærning, og afformning kan da foretages, når den procentvise styrke udgør $\frac{154}{300} \cdot 100 \sim 51\%$. Afformning kan da foretages, hvis skæringen mellem afkølingstallet og temperaturkurven ligger *til højre* for 51 % styrken. Tidspunktet for afformning bestemmes under arbejdets udførelse som beskrevet side 62–64.

Det skal understreges, at man ved ovennævnte beregninger af den nødvendige afformningsstyrke må tage hensyn til, at dækkonstruktioner ofte er belastet med mursten og andre materialer, som i visse tilfælde endog giver belastninger, der er betydelig højere end den hvilende og bevægelige belastning, som dækket er beregnet for.

Ved betonstøbning om vinteren kan der især være grund til at udføre beregninger af den virkelige belastning på dækket, hvis man udfører fler-etagesbyggeri i hurtigt tempo, da belastninger fra dækkonstruktioner i ovenliggende etager gennem forskallingen føres ned på dækket. Opmærksomheden henledes iøvrigt på, at når stilladser fjernes under bærende konstruktioner vil det ofte være hensigtsmæssigt at bibeholde en understøtning under de bærende fag, således at spændvidderne halveres.

Virkelig afkølingstid (højre del)

Diagrammet til venstre benyttes til at beregne, hvor langt betonen vil nå i hærningprocessen, inden den afkøles til 0° , og resultatet udtrykkes i procentvis styrke eller hærningstider ved en konstant temperatur, der her er sat til 15°C . Men den venstre side oplyser ikke, hvornår betontemperaturen når 0°C udtrykt i almindelige tidsenheder – timer eller døgn. Hertil benyttes diagrammets *højre* side.

Konstruktionens afkølingstal a føres ud til højre til skæring med den skønnede lufttemperatur, hvor skæringspunktet føres lodret ned, hvorefter man i tidsskalaen forneden kan aflæse det virkelige tidsforløb fra betonens tildækning, til temperaturen er faldet til 0°C .

Hvis man ved benyttelse af det venstre diagram har fundet, at betonen opnår en sådan styrke, at f. eks. sideformen kan fjernes, inden betonen er afkølet til 0°C , kan man i diagrammet til højre aflæse, hvornår betonen har nået 0°C , og til dette tidspunkt kan formen uden risiko fjernes.

Bestemmelse af afkølingstallet a

En betonkonstruktions afkølingstal a er defineret ved formlen:

$$a = \frac{\Sigma k \cdot F}{V \cdot c_b \cdot R_b} \quad (\text{se side 35})$$

Da $c_b \cdot R_b$ regnes konstant = 600 kcal/°Cm³, kan a findes, når konstruktionens isolation (Σk) og dimensioner ($\frac{V}{F}$) er kendte. a-værdien benyttes derpå til indgang i diagrammerne, fig. 23-27.

k-værdier til beregning af Σk er anført i nedenstående tabel 5 for forskellige isolationsmaterialer samt for ubeskyttet beton. Alle værdier er bestemt ved blæst.

isolation	kcal/m ² °C time = k
uden tildækning, blæst	25,0
1 1/4" våd støbeform	3,0 ^{*)}
1 stk. presenning over luftmelletrum	4,0 ^{*)}
1 stk. halmmåtte, våd	4,0
5 cm træuldbeton	3,0
1 stk. halmmåtte, lufttør	3,0
1 stk. halmmåtte, lufttør + 1 stk. presenning	1,9
1 stk. halmmåtte, lufttør, indsyet i Sisalkraftpapir	1,6
3 stk. halmmåtter, lufttørre + 1 stk. presenning	1,0

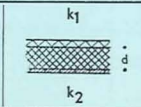




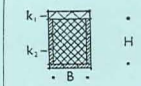
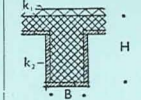
^{*)} Disse værdier er beregnede.

Tabel nr. 5

For de mest anvendte konstruktionstyper – plader, vægge og søjler – bestemmes »dimensionsfaktoren« d ($= \frac{V}{F}$) samt Σk som angivet i den følgende tabel 6. Derefter findes a-værdien i diagrammet nederst på næste side som ordinat for skæringspunktet mellem skrålinien svarende til det fundne d og abscissen svarende til det fundne Σk .

For andre konstruktionsformer må a beregnes ud fra formlen.

Eksempler på bestemmelse af afkølingstal er givet side 38 og 54.

KONSTRUKTIONSFORM	DIMENSIONSFAKTOR d =	$\Sigma k =$
PLADER	 pladens tykkelse	$k_1 + k_2$
VÆGGE	 væggens tykkelse	$k_1 + k_2$
SØJLER vilk. tværsnit	 F : O = tværsnitsareal : omkreds	k
○-tværsnit	 1/4 · D	k
□-tværsnit	 1/4 · S	k
BJÆLKER rektangulære	 H	$k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) k_2$
T-bjælker	 H	$k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) \cdot k_2$ ^{*)}

Tabel nr. 6

^{*)} tilnærmet

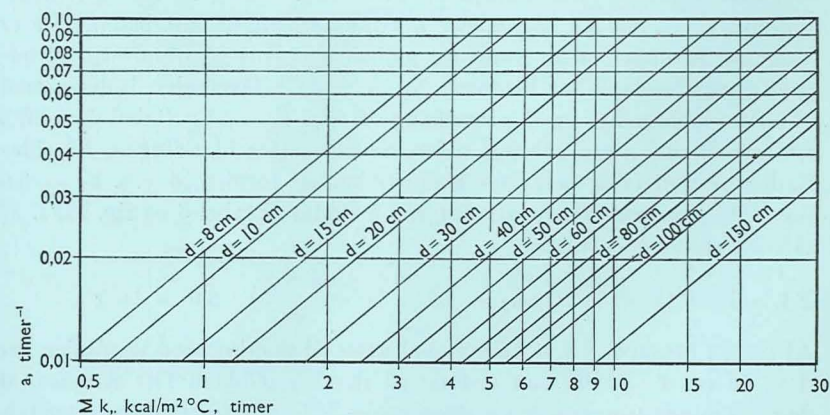
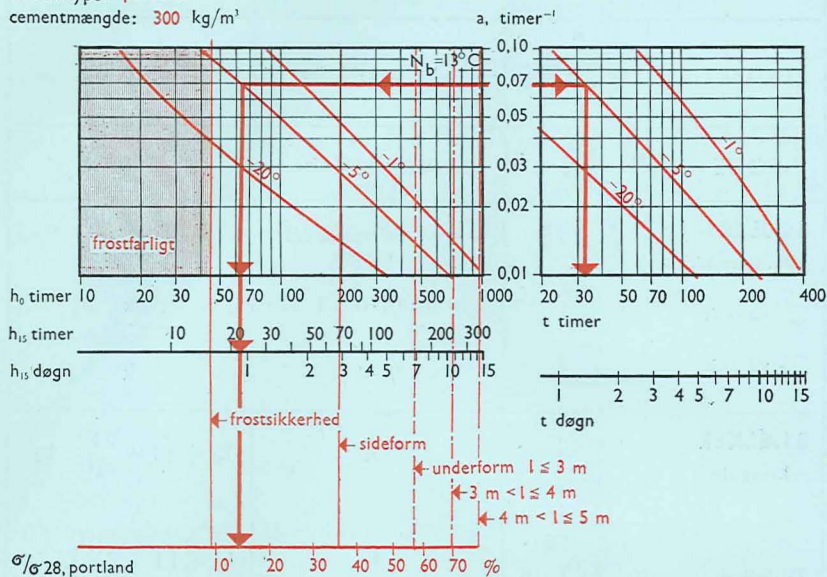


Fig. 22. Diagram til bestemmelse af a-værdier (afkølingstal).

Eksempel på diagrammernes anvendelse

cementtype: portland
cementmængde: 300 kg/m³



Der skal støbes en jernbetonbjælke, $H = 40$ cm, $B = 20$ cm og cementindhold $C = 300$ kg almindelig portlandcement pr. m³ beton. Det er valgt at anvende varmt vand og uopvarmet grus (svarende til en begyndelsestemperatur for betonen: $N_b = 13^\circ\text{C}$). Oversiden isoleres med 1 lufttør halmmåtte og 1 presenning, d. v. s. $k_1 = 1.9$ (tabel 5, s. 52). Isolationen må være anbragt inden en time efter blandingen. På sideflader og underside beskyttes betonen kun af formen, d. v. s. $k_2 = 3.0$ (tabel 5). Konstruktionens afkølingstal a findes af tabel 6 og fig. 22, s. 52 således: $d = H = 40$ cm:

$$\Sigma k = k_1 + \left(1 + \frac{2H}{B}\right) \cdot k_2 = 1.9 + \left(1 + \frac{2 \cdot 40}{20}\right) \cdot 3.0 = 16.9$$

Af fig. 22 fås med $\Sigma k = 16.9$ som absicse til skæring med skrålinien for $d = 40$ cm $a = 0.07$ som ordinat til skæringspunktet. Det skønnes, at døgnet's middeltemperatur vil være ca. $\div 5^\circ\text{C}$ i de første døgn efter udstøbningen. Som vist på diagrammet ovenfor (udsnit af fig. 24) fås:

Diagrammets højre del. Skæringspunktet mellem $a = 0.07$ og kurven for den ydre temperatur $\div 5^\circ\text{C}$ føres ned til absicseaksen, hvor den tid, det varer, før betonen er afkølet til 0°C , aflæses = 35 timer $\sim 1\frac{1}{2}$ døgn. *Diagrammets venstre del.* Skæringspunktet mellem $a = 0.07$ og den ydre temperatur $\div 5^\circ\text{C}$ føres ned til h_0 og h_{15} -skalaerne i absicssen. Den opnåede hærdning svarer til 65 timers hærdning ved konstant betontemperatur 0°C , eller 23 timer ved 15°C . Ved skæring med σ/σ_{28} -skalaen ses endvidere, at den opnåede styrke udgør 13 % af 28-døgns styrken for en tilsvarende beton, lagret ved en konstant temperatur på 15°C . Da skæringen mellem $a = 0.07$ og kurven for $\div 5^\circ\text{C}$ ligger *tilhøjre* for frostfarlighedsgrænsen, vil betonen være frostsikker, før den er afkølet til 0°C . Afformning kan først ske efter yderligere hærdning (jvf. side 62).

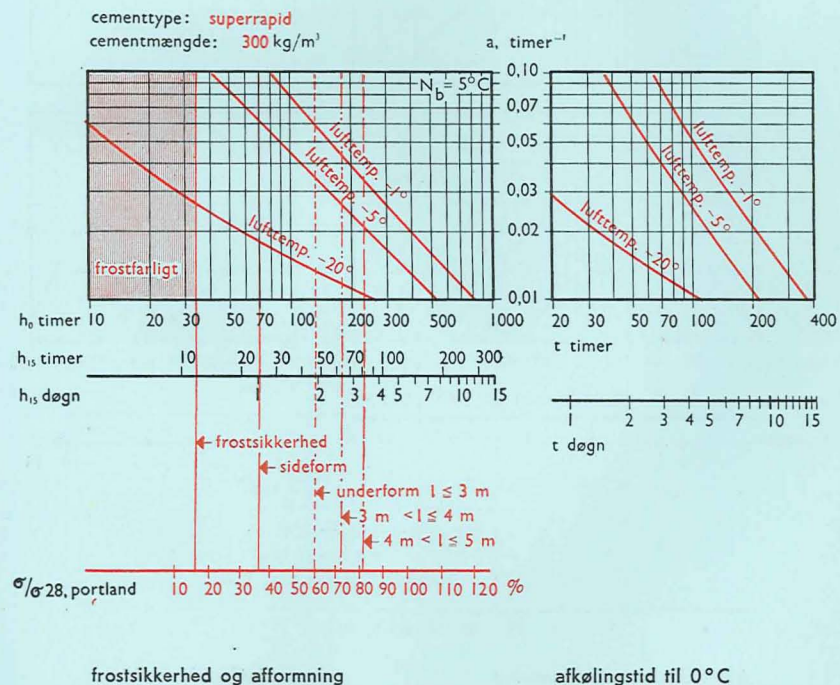


Fig. 23. Diagram for beton med et cementindhold på 300 kg Superrapidcement. N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen.

cementtype: portland
 cementmængde: 300 kg/m³

cementtype: rapid-record
 cementmængde: 300 kg/m³

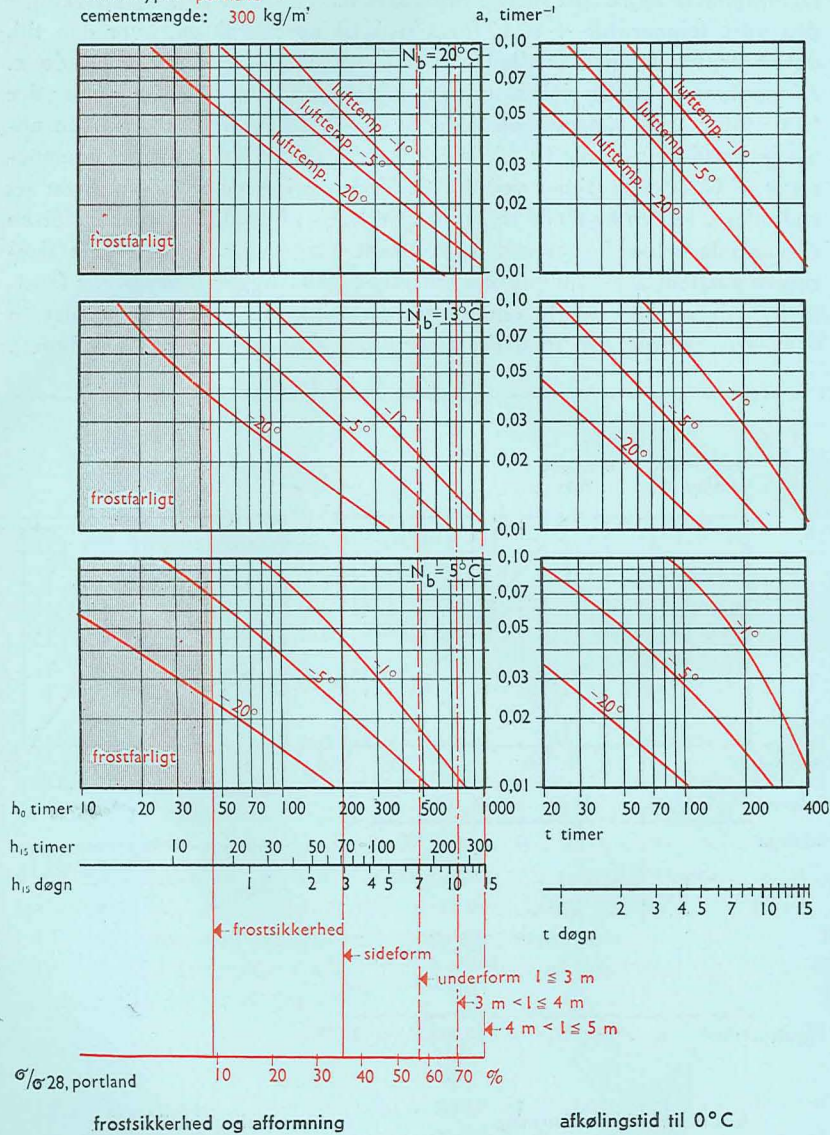


Fig. 24. Diagram for beton med et cementindhold på 300 kg almindelig portlandcement. N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen.

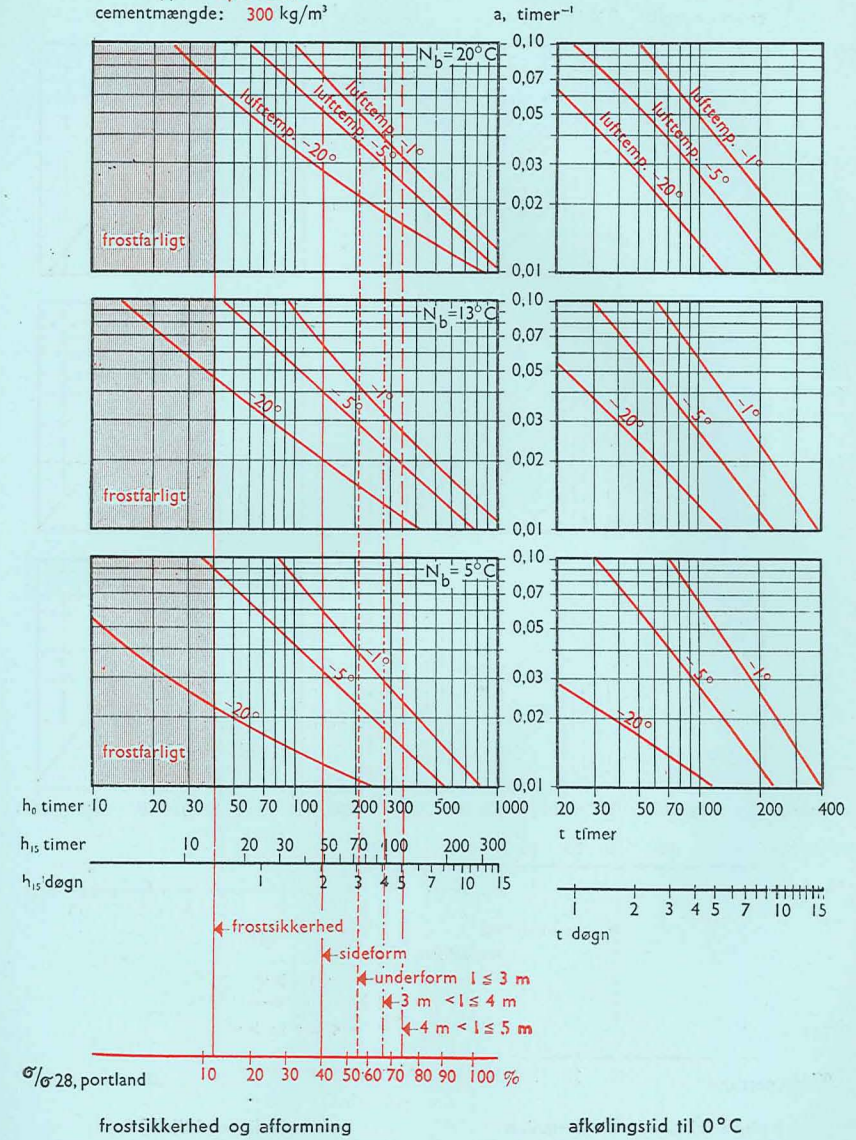


Fig. 25. Diagram for beton med et cementindhold på 300 kg Rapid- eller Recordcement. N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen.

cementtype: portland
 cementmængde: 150 kg/m³

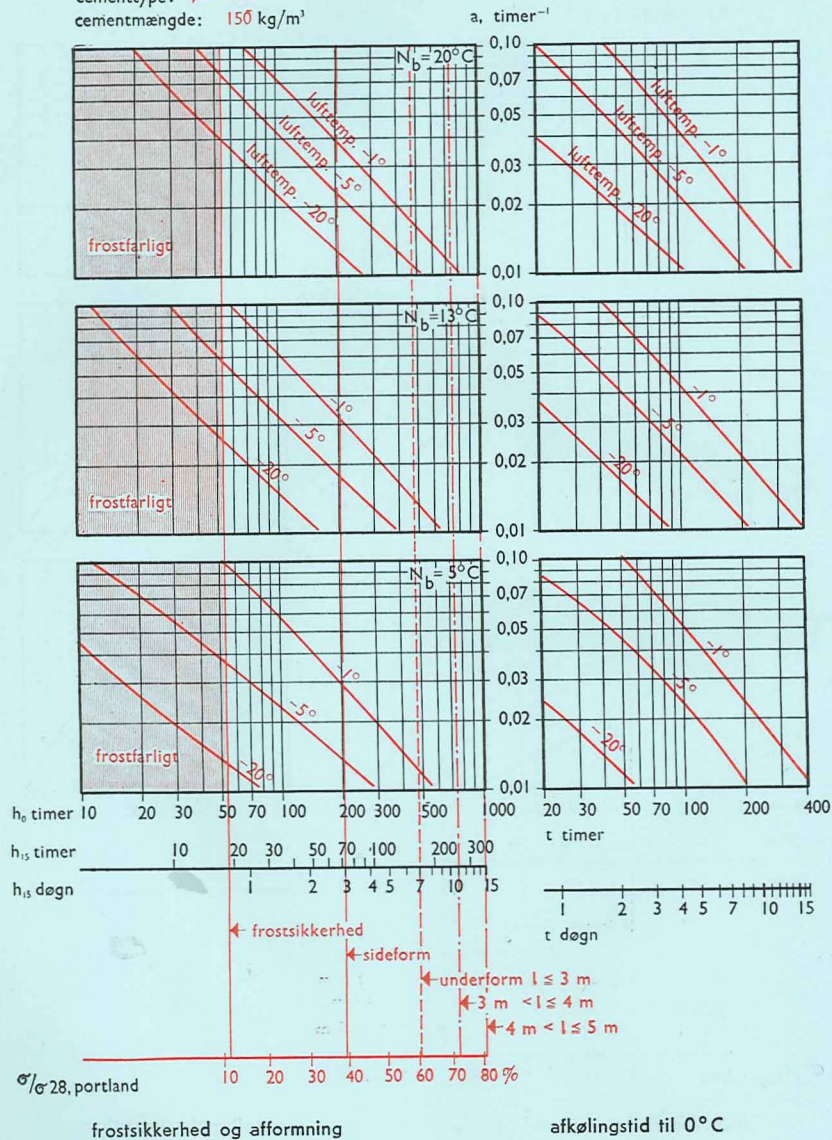


Fig. 26. Diagram for beton med et cementindhold på 150 kg almindelig portlandcement. N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen.

cementtype: rapid-record
 cementmængde: 150 kg/m³

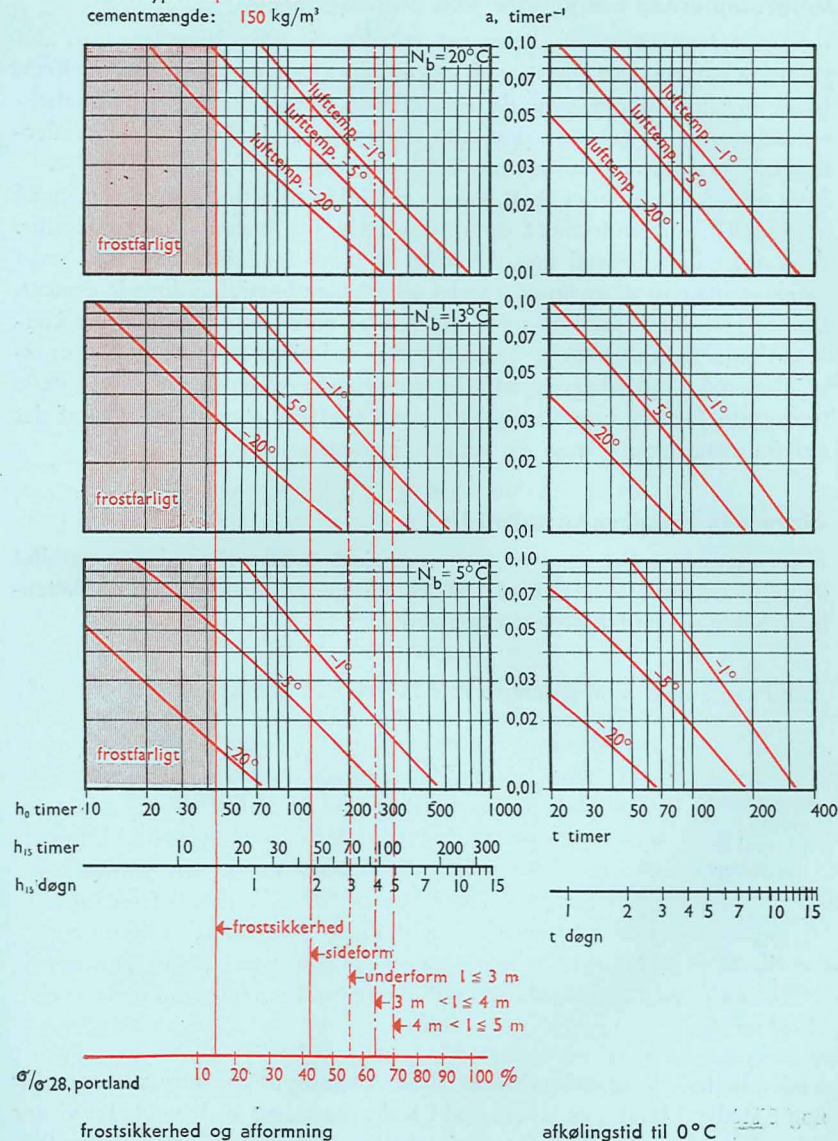


Fig. 27. Diagram for beton med et cementindhold på 150 kg Rapid- eller Recordcement. N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen.

Diagrammernes benyttelse ved planlægningen

Foran er beskrevet, hvorledes det enkelte diagram benyttes, men det fulde udbytte opnås først ved at foretage sammenligninger mellem, hvad der kan opnås med de forskellige cementtyper og begyndelsestemperaturer for betonen, d. v. s. at man ved et planlagt byggeri undersøger, hvorledes man billigst muligt kan bringe arbejdet til udførelse.

Man undersøger således først, om en given konstruktion kan udføres med almindelig portlandcement og med relativ lav begyndelsestemperatur. Hvis man ikke herved kan forvente at opnå frostsikkerhed, kan man enten gå over til at opvarme vandet eller bruge hurtighærdende cement. Der er endvidere mulighed for at opnå et mindre afkølingstal for konstruktionen ved at benytte en kraftigere isolering, men alle disse overvejelser må på planlægningsstadiet baseres på et skøn over de forventede temperaturforhold, og på baggrund heraf træffes det endelige valg af det sæt foranstaltninger, man vil benytte i vintersæsonen.

Vinterens temperaturforhold

Den følgende tabel angiver den statistiske sandsynlighed for antallet af dage indenfor hver måned, på hvilke morgentemperaturen i København vil være under de anførte værdier.*)

Antal dage med morgentemperatur lavere end den angivne:

	+ 5°	0°	- 5°
september	0	0	0
oktober	4	1	0
november	15	2	1
december	25	8	2
januar	28	13	5
februar	28	14	4
marts	27	8	0
april	12	1	0
maj	1	0	0

Tabel nr. 7

Ved tabellens brug må erindres, at den sandsynlige morgentemperatur nogle steder i landet er lavere end i København, og at den enkelte vinter kan afvige meget stærkt fra de i tabellen anførte sandsynlige værdier.

*) Tabellen er udarbejdet på grundlag af observationer kl. 8 morgen i Landbohøjskolens have i København i årene 1922-46.

Valg af beredskab

Tabel nr. 7 i forbindelse med det udarbejdede projekt og et arbejdsprogram, der viser, hvornår de enkelte dele af bygværket kommer til udførelse, giver ved hjælp af diagrammerne en mulighed for allerede om efteråret at planlægge, hvilke foranstaltninger man vil foretage for at gennemføre arbejdet om vinteren på en betryggende og økonomisk måde. De foranstaltninger, som er hensigtsmæssige, kan opdeles i 3 grupper efter stigende indsats af materiel:

- 1) isolation
- 2) isolation og varmt vand
- 3) isolation, varmt vand og varmt grus (sand og sten).

Hvert af disse sæt af foranstaltninger kan suppleres med

- 4) opvarmning af bygværket,

hvormed man navnlig tilsigter at fremme hærdningsprocessen – efter at frostsikkerhed er opnået – for at fremme afformningen.

Ved beredskab 1) er der i diagrammerne regnet med, at betonen efter tildækningen har en temperatur $N_b = + 5^\circ \text{C}$, og med dette beredskab kan man holde arbejdet i gang i overgangsperioderne – forår og efterår. Ved beredskab 2) er der regnet med, at betonen opnår en temperatur på $+ 13^\circ \text{C}$ umiddelbart efter tildækningen, og dette opnås ved anvendelse af ca. 60° varmt vand og frostfri materialer. Med dette beredskab vil man være i stand til at holde arbejdet i gang i en meget stor del af vinterperioden, dog noget afhængig af konstruktionens art.

Ved beredskab 3) hvor man yderligere opvarmer sandet og eventuelt stenene, vil der, hvis man har meget damp til rådighed, så at sige kunne arbejdes alle vinterdage og alligevel kunne opnås frostsikkerhed, men omkostningerne er ret store. Ved dette beredskab er der forudsat, at betontemperaturen er $+ 20^\circ \text{C}$ umiddelbart efter tildækningen.

Nogle steder i landet kan færdigblandet beton leveres opvarmet om vinteren med betontemperatur efter ønske ved aflevering på byggepladsen. Hvor denne mulighed foreligger, kan den betragtes som alternativ til beredskab 2 og 3.

I de senere kapitler vil blive beskrevet, hvorledes disse foranstaltninger iværksættes i praksis, hvorefter man atter efter arbejdets størrelse og arbejdets stadium ved vinterens indtræden må vælge metoder og materiel, der tilsammen udgør et komplet beredskab, således at man ikke på grund af en enkelt forglemmelse alligevel går i stå til trods for store investeringer på andre områder. Som eksempel herpå kan nævnes manglende sik-

ring af vandleddninger mod frost, hvilket undertiden ses selv på store og iøvrigt veltilrettelagte byggepladser.

Såfremt man af økonomiske grunde har valgt et beredskab, der kun tilsigter at holde arbejdet i gang under ikke altfor ugunstige temperaturforhold, må man ligge stille, hvis vinteren bliver strengere end forventet og ikke løbe nogen unødigt risiko. Ligeledes understreges, at pludselige vejromslag kan gøre det nødvendigt, at konstruktionen isoleres kraftigere end oprindelig forudsat ved støbningens påbegyndelse, eller at der foretages en kunstig opvarmning. Der må derfor i et vist omfang regnes med reserver af materiel og materialer til uventede temperaturfald.

Kontrol med hærdeningen

Ved beregning af diagrammerne er forudsat, at den ydre temperatur er konstant, og at den anvendte cement har en hærdeningshastighed, der svarer til den pågældende cementtype, når den ikke har taget skade ved

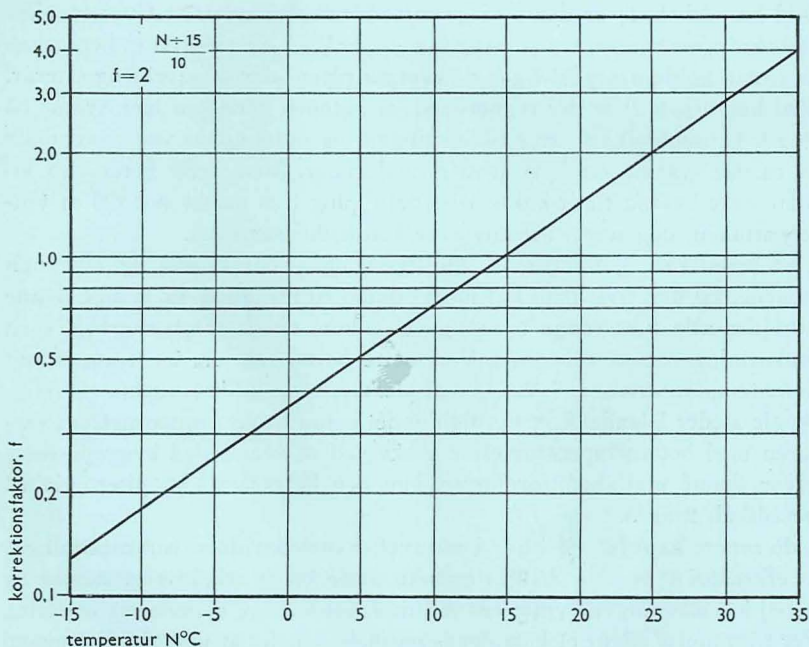


Fig. 28. Diagram til bestemmelse af korrektionsfaktoren f til omsætning af hærdeningsperiode ved temperaturen $N^{\circ}\text{C}$ til en hærdeningsperiode h_{15} ved $+15^{\circ}\text{C}$ efter formelen: $h_{15} = f \cdot t_N$.

oplagringen. I den teoretiske del side 46 er omtalt, at den udstøbte betons temperatur vil variere på grund af variationer i den ydre temperatur, og der er angivet en nøjagtig metode til bestemmelse af den opnåede hærdening, idet man omregner hærdeningstid ved variabel temperatur til hærdeningstid ved 15°C . Den angivne beregningsmetode er mere nøjagtig end den, der angives i det følgende, men forudsætter ret hyppige temperaturmålinger, og den er derfor fortrinsvis beregnet for de tilfælde, hvor det er af økonomisk betydning at kunne foretage afformningen så tidligt som muligt, eller hvor der er risiko for, at frostsikkerhed ikke opnås. Ved at foretage færre temperaturmålinger bliver beregningen af den opnåede hærdening simplere, men man er til gengæld nødt til at måle temperaturen kl. 8 om morgenen. Ved bestemmelse af, om frostsikkerhed er opnået, skal temperaturen måles i en fjerdedel af dybden i den mest udsatte del af konstruktionen. Ved bestemmelse af afformningstidspunktet for fritbærende konstruktioner skal temperaturen måles det sted, hvor betonspændingerne bliver størst ved afformningen. De målte betontemperaturer indføres i et skema, som vist i nedenstående eksempel, og man har derefter mulighed for at følge hærdeningen dag for dag, idet man ved hjælp af de anførte korrektionsfaktorer fra fig. 28 omregner til hærdeningstid ved 15°C . Ved anvendelse af skalaerne under diagrammerne fig. 23–27 vil man i hvert enkelt tilfælde kunne afgøre, hvornår frostsikkerhed er opnået eller afformningen kan foretages.

Eksempel. Der skal støbes en simpelt understøttet bjælke, spændvidde 4.5 m, med 300 kg hurtighærdnende cement pr. m^3 beton. Ved en eventuel afformning vil den største betonspænding optræde i oversiden på bjælkens midte, og er bjælkehøjden 40 cm skal betontemperaturen derfor måles i $1/4 \cdot 40 = 10$ cm under bjælkens overside.

Når betontemperaturen er aflæst, indføres værdien af korrektionsfaktoren f udfor den pågældende støbedag. Korrektionsfaktoren kan enten bestemmes af fig. 28, eller man kan benytte de i skemaet angivne temperaturintervaller med de tilhørende værdier for korrektionsfaktoren som angivet i skemaets anden linie. Værdierne summeres efterhånden i kolonnen yderst til højre, og man kan således beregne, hvornår betonen er hærdenet tilstrækkeligt til at den er frostsikker eller afformning kan foretages.

Det fremgår af fig. 25, at frostsikkerhed vil være opnået efter 14 timers hærdening ved $+15^{\circ}\text{C}$ (h_{15} -skalaen).

Med det i skemaet angivne temperaturforløb vil bjælken være frostsikker

efter ca. 1 døgn forløb. En bjælke med spændvidden 4.5 m kan afformes efter 5 døgn ved + 15° C, når der anvendes hurtighærdnende cement. (For almindelig portlandcement kræves 15 døgn hærdning ved + 15° C, se fig. 24). De målte temperaturer viser, at bjælken kan afformes det ottende døgn, da der på dette tidspunkt er opnået en hærdning, som svarer til 5.1 døgn ved 15° C.

Som omtalt side 50 kan det i visse tilfælde være hensigtsmæssigt at beregne de virkelige spændinger, og når disse udtrykkes i procent af 28-døgnstyrken for almindelig portlandcement, kan man ved anvendelse af diagrammerne bestemme den nødvendige hærdningstid i døgn ved + 15°. Såfremt beregningerne viser, at afformning kan foretages, når der er opnået 80 % af 28-døgnstyrken for almindelig portlandcement, kan man ved anvendelse af fig. 25 finde, at den tilsvarende hærdningstid er ca. 6 døgn ved 15° C, når der anvendes hurtighærdnende cement.

Beton-temperatur kl. 8 morgen i følgende intervaller (° C):	÷10 til ÷5	÷5 til 0	0 til 3	3 til 7	7 til 10	10 til 15	15 til 20	20 til 25	
Korrektionsfaktor f:	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.2	1.7	
Døgn efter udstøbning	Døgn omsat til hærdningstid ved 15° C:								Saml. hærtn. tid v. 15° C.
1						0.8			0.8
2							1.2		2.0
3						0.8			2.8
4					0.6				3.4
5				0.5					3.9
6				0.5					4.4
7			0.4						4.8
8		0.3							5.1

PRAKTISK DEL

En heldig gennemførelse af betonstøbning om vinteren er betinget af, at man gennemfører de særlige forholdsregler, som kulden nødvendiggør. Derudover må man følge de regler, der i almindelighed gælder for at opnå en god betonkvalitet.

Valg af materialer

Ved betonstøbning om vinteren stilles større krav til de anvendte materials kvalitet end under normale forhold, og for at opnå frostsikkerhed er det nødvendigt at anvende luftindblandingsmidler. Disse fordringer omtales i det følgende samtidig med en diskussion af fordele og mangler ved anvendelse af kemikalier, der fremmer hærdningsprocessen.

Cement

Cement, der anvendes til støbning af beton om vinteren, skal først og fremmest have stor hærdningshastighed og må derfor ikke have taget skade ved oplagring under ugunstige forhold. Det kan desuden være en fordel at anvende cement med større hærdningshastighed end almindelig portlandcement, men valget beror på konstruktionens afkølingstal og de ydre forhold og kan træffes ved anvendelse af diagrammerne fig. 23-27.

Grus (sand og sten)

Grus, der anvendes til betonstøbning om vinteren, skal være af frostbestandigt materiale og må ikke indeholde stoffer, der forsinker hærdningsprocessen. Selv en mindre forsinkelse af cementens reaktion med vandet, som ikke er af større betydning i varmt vejr, kan i koldt vejr være uheldig, fordi den tid, det varer, inden betonen bliver frostsikker, bliver forlænget.

Sømaterialer er i almindelighed renere (indeholder mindre humus og ler) end bakkematerialer, men sand oppumpet fra havbunden kan dog som følge af iblandede tangrester indeholde betydelige mængder humus. Fillermateriale i passende mængde kan forbedre betonens bearbejdelse og medføre styrkeforøgelse, men stort fillerindhold kan gøre det vanskeligt at opnå den forudsatte luftmængde paa 4 %. Findelt ler kan ofte virke styrkeforøgende og give en forøget bearbejdelse ved filler-virkning. På grund af lerpartiklernes ringe størrelse er de imidlertid stærkt tilbøjelige til at binde stoffer på deres overflade, der forsinker hærdningsprocessen, og som er vanskelige at påvise. Det er derfor sikrest at anvende grus med mindst muligt lerindhold. En forbedring af betonens bearbejdelse kan bedre og mere sikkert opnås med luftindblandingsmidler.

Porøse sten af enhver art er altid uheldige i beton, og ved støbning om vinteren kan frysningen af porevandet i dem medføre alvorlige revnedannelser og sår på grund af »springere«. Dette gælder såvel under ar-

bejdets udførelse – for den hærdnende beton – som senere, når betonen er hærdnet, og udsættes for vekslende frost og tø.

Sten med vægtfylde under 2,4 må anses for frostfarlige, uanset om det er kalk, opal- eller porøs kalcedonflint (hvid flint). Vægtfyldebestemmelsen kan foretages på laboratorier ved sortering med tunge vædsker.

Vand

Der stilles til vandet de samme krav som ved støbning i almindelighed, men indholdet af salte eller forureninger, som sinker hærdningsprocessen, er farligere ved støbning om vinteren end under normale forhold. For at opnå høje absolutte styrker så hurtigt som muligt, må vandtilsætningen begrænses mest muligt.

Luftindblandingsmidler

De retningslinier, der er givet i denne vejledning for opnåelse af frostsikkerhed, forudsætter at betonen indeholder 4% indblandet luft. Luftindblanding opnås i praksis ved tilsætning af luftindblandingsmidler, enten til cementen under dennes fabrikation eller til støbe vandet under blandingen på arbejdspladsen. Tilsætning af midlerne ved cementens fabrikation har hidtil kun været anvendt forsøgsvis her i landet, men der findes forskellige luftindblandingsmidler på markedet som opløsninger beregnet til tilsætning ved betonfremstillingen. Der skal normalt benyttes 10–30 cm³ opløsning pr. sæk cement.

En fylldig redegørelse for luftindblandingsmidlernes indvirken på betonens egenskaber i frisk og hærdnet tilstand findes i en publikation »Anvisning i brug af luftindblandingsmidler« (53–8), der er under udarbejdelse af et udvalg nedsat af Dansk Ingeniørforenings betonsektion, samt i tidligere dansk litteratur (46 M 13), (47 P 8), (48 G 6), (49 F 22), (49 H 10). Her skal kun gøres følgende korte bemærkninger:

Luftindblanding forøger den friske betonmasses kohæsion, således at afblandingstendenser og vandudskillelse (»bleeding«) formindskes. Endvidere formindskes den indre friktion, således at betonmassens bearbejdelse forøges – eller at bearbejdelse bibeholdes, selv om betonens vandmængde formindskes.

I fed beton vil luftindblanding bevirke et trykstyrketab, der vokser med luftindholdet. Når dette ligger på 3–5 volumenprocent, vil tabet kunne formindskes eller udlignes som følge af den forbedrede bearbej-

lighed af den friske beton, der muliggør en nedsættelse af sandmængden og en vandbesparelse, d. v. s. en reduktion af v/c. I mager beton kan man ofte opnå styrkeforøgelse ved luftindblanding. Betonens trækstyrke påvirkes på samme måde som trykstyrken.

Et eventuelt styrketab ved indblanding af luft i fed beton er betydningsløst i forhold til den stærkt forøgede holdbarhed overfor frost og tø.

I forhold til almindelig beton må sandmængden formindskes med 2%, og vandtilsætningen må nedsættes så meget, som hensynet til betonens bearbejdelse tillader.

Den luftmængde, der opnås med en bestemt mængde luftindblandingsmidler, varierer med betonsammensætning og ydre forhold, og stadig kontrol af luftindholdet som nærmere beskrevet i (53–8) er nødvendig for at undgå for store styrketab.

Kemikalier

Det er muligt ved tilsætning af kemikalier at nedsætte frysepunktet for vandet i betonens porer. Denne frysepunktssænkning er afhængig af koncentrationen, og da de fleste kemikalier samtidig påvirker betonens egenskaber på anden måde, er der en grænse for, hvor store mængder man kan tilsætte. Visse klorider, der i de anvendte mængder giver en ringe frysepunktssænkning, har samtidig den egenskab, at de forøger hærdningshastigheden, hvorved cementens hærdningsvarme udvikles i løbet af en kortere periode; man opnår således en gunstig temperaturstigning i den kritiske periode efter afbindingen, og indtil betonen er blevet frostsikker, men der er *altid risiko* for at cementen bliver hurtigafbindende, hvilket er forklaringen på stærkt vekslende resultater.

Særlig kalciumklorid har vist sig anvendelig som accelerator. Den tilsatte mængde kalciumklorid bør ikke overstige ca. 2% af cementens vægt for almindelig portlandcement.

Tilsætningen af kalciumklorid og andre salte har følgende ulemper:

- 1) Betonens svind bliver stærkt forøget.
- 2) Betonen bliver hygroskopisk, og i armerede konstruktioner kan armeringen ruste, især hvis betonen er utæt og kan blive udsat for skiftevis gennemfugtning og udtørring.
- 3) Betonens ledningsevne for elektrisk strøm bliver stærkt forøget.

I stedet for direkte anvendelse af kalciumklorid anvendes hyppigt industrielt fremstillede frostvædsker, som ofte indeholder et kemikalium, der nedsætter vandets frysepunkt f. eks. kogsalt, og et kemikalium, der virker

som accelerator, som regel kalciumklorid. Hvilke eventuelle ulemper, der følger med deres anvendelse, kan ikke på forhånd siges, når sammensætningen ikke er kendt.

Anvendelse af kalciumklorid og frostvædske i forbindelse med armerede konstruktioner er ikke tilladt i flere af landets kommuner.

Igangsatte langtidsforsøg her i landet med tilsætning af kalciumklorid har endnu ikke ført til afgørende resultater, men har foreløbig vist, at der må udvises forsigtighed med anvendelse af kalciumklorid.

Det tilrådes i stedet at benytte en hurtighærdnende cement, der giver omtrent de samme fordele som almindelig portlandcement med tilsætning af kalciumklorid.

Jordarbejde

Det er billigst at planlægge arbejdet således, at jordarbejde og støbninger i udgravninger kan gennemføres inden vinteren, således at betonarbejdet i de koldeste måneder kun omfatter byggeriets videreførelse over fundamenter og kælderetager. Selv om en sådan arbejdsplan benyttes, må man dog huske at tage hensyn til frostens virkning i jorden og dermed på de udstøbte konstruktioner.

Udgravninger

Såfremt arbejdsplanen forudsætter udgravning og eventuelt støbning under terrænets overflade, isoleres jorden, inden frosten indtræder. Hertil kan anvendes halm, som udlagt løst i et ca. 30 cm tykt lag kan regnes at holde underliggende jord frostfri i normale danske vintre.

Udgravede, mindre byggegruber eller render isoleres med halm, tang, spåner el. lign., såfremt støbningen ikke følger umiddelbart efter udgravningen. Iøvrigt bør man netop tilstræbe en sådan planlægning, at udgravning foretages umiddelbart før støbning, således at langvarig isolering af støbegraven kan undgås.

Der må aldrig støbes mod frossen jord, ikke alene på grund af risiko for frysning af den udstøbte beton, men også på grund af de sætninger i jorden, som vil fremkomme, når den senere optøes.

Til kunstig optøning af jorden kan anvendes flammekaster, eller indblæsning af damp under en presenning, der er lagt over udgravningen. Flammekasteren må benyttes med forsigtighed i nærheden af brandfarlige materialer. Det må kontrolleres, at hele det frosne jordlag optøes.

Ved fundamenter, kældervægge etc., der støbes i forskalling, bør mellemrummene mellem formsider og jord udfyldes med halm eller lignende.

Frysning under forskallingsstolper

Følgerne af at understøtte forskalling på frostfarlig jord er illustreret på figur 8, side 19. Er jorden frosset og derfor frosthævet før opstillingen, kommer der sætninger, når jorden tør op. Dette kan naturligvis medføre lige så ubehagelige skader, hvis det indtræffer, inden betonen har nået afformningsstyrke, som hvis jorden fryser og hæves *efter* at formen er opstillet og betonen er udstøbt.

Stillads og forskalling kan beskyttes ved isolering af jorden, inden frosten indtræder. Hertil kan anvendes halm, som omtalt ovenfor. Man kan også inden opstillingen bortgrave den frostfarlige jord i en rende under hver stolperække og i stedet fylde op med sand, grus, slagge eller andet frostsikkert materiale, se fig. 29.

Rendens tværsnit skal mindst være som angivet på figuren, og dybden skal forøges indtil frostfri dybde afhængig af jordbunds-, klimaforhold m. v. Efter tilstampning udlægges langsgående sveller over fylden, og herpå opstilles som vist stolperne med to kiler indskudt, således at justering af stilladser m. v. er mulig.

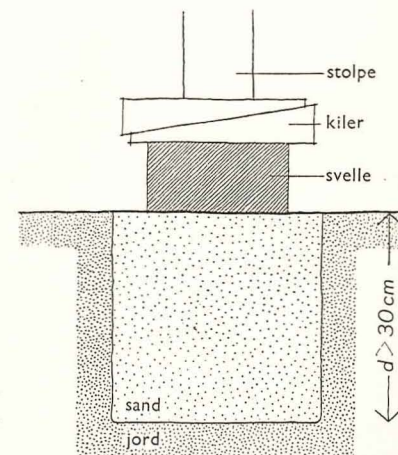


Fig. 29. Sikring mod frosthævning af forskallingsstolpe.

Frostfarlig jord under stolpen bortgraves og erstattes med sand eller lignende. Stolpen opstilles på svelle med to kiler indskudt for at muliggøre justering af højden.

Underfrysning

Figur 7–10, side 18–20 viser beskadigelse af bygværker, der er sket ved at frosten er gået ind under færdigstøbte konstruktioner.

For at undgå sådanne skader må man:

- 1) afforme fundamenter o. s. v. tidligst muligt og umiddelbart herefter udfylde mellem beton og udgravningssider med tilkørt sand, eller midlertidigt med halm eller lignende samt iøvrigt isolere i fornødent omfang,
- 2) tildække vindues- og døråbninger i kældere med presenninger, måtter eller bræddeflager, så snart kælderdækket er udført, og i streng frost opvarme rummet med koksgryder.

Det kan endvidere anbefales at dræne omhyggeligt omkring alle fundamenter og erstatte frostfarlig jord med frostsikker (sand, grus, slagger m. v.) i mindst 30–40 cm tykkelse overalt langs ydersiden af konstruktioner, der kommer i berøring med jord, som er udsat for frost.

Endelig skal det fremhæves, at beskadigelse af bygværker som følge af jordens frosthævninger i mange tilfælde (se figur 10 side 20) skyldes, at frosten har standset arbejdet, og at byggepladsen derefter er forladt uden beskyttelse af de ufærdige bygværker. Dette er en både dyr og dårlig form for støbning og byggeri om vinteren. Kan man i en kort periode ikke arbejde på grund af vejret, må man tildække og eventuelt opvarme de allerede udførte dele af bygværket.

Arbejdspladsindretning og støbearbejdets udførelse

Betonens kvalitet og evne til at modstå frostens skadelige virkninger er nøje knyttet til en omhyggelig udførelse af det praktiske arbejde og en effektiv gennemførelse af de beskyttelsesforanstaltninger, der er valgt på grundlag af de teoretiske beregninger.

Under støbning om vinteren må der ikke løbes nogen risiko på grund af uforudsete praktiske vanskeligheder. Hvor store disse end kan forekomme i den øjeblikkelige situation, er de altid små sammenlignet med betydningen af, at bygværket får en lang levetid.

I det følgende er – blandt andet på grundlag af arbejdspladsernes erfaringer gennem de senere år – gennemgået, hvorledes man på arbejdspladsen om vinteren kan fremstille beton, hvis kvalitet er fuldt på højde med, hvad man opnår den øvrige del af året.

Oplagring af materialer**Cement**

Cementen kan uden skade opbevares koldt, men får fugtigheden adgang, bliver den langsommere afbindende. Hurtighærdnende cement tåler fugtigheden endnu dårligere end almindelig portlandcement. Det er derfor i almindelighed formålstjenligt at begrænse cementlageret mest muligt. Til den nødvendige mængde cement må der indrettes tætte skure. Gulvene skal være hævet over jorden. Cementposerne må ikke direkte berøre ydervæggene. Det er sikrest at holde skurene varmere end omgivelserne for at bevare luften tør. Det er f. eks. en nem, billig og god foranstaltning at ophænge nogle flagermuslygter i rummet.

Grusmaterialer (sand og sten)

Gruset skal være frostfrit, når det går i blanderen, fordi selv tynde lag af is på de enkelte partikler vil forhindre sammenkitningen med cementen. Frosne klumper i gruset må således også undgås.

Så vidt muligt bør man inden vinteren kommer sikre sig, at grusleverandøren kan levere frostfri materialer efterhånden som arbejdet skrider frem. Kan dette ikke lade sig gøre, må der etableres et tilstrækkelig stort lager af grus på byggepladsen.

Ved oplægning af lagerbunker er det fordelagtigt at opnå så lille en overflade som mulig. Når støbning skal foregå, graves ind i bunkerne forneden. Den eventuelt sammenfrosne yderskorpe må ikke benyttes. Når

grusmaterialerne leveres i små partier, kan det i almindelighed betale sig at isolere disse mindre bunker – navnlig sandet – med måtter eller presenninger. Da måtter alene ikke beskytter mod nedsivende vand, er de mest effektive som beskyttelse, når de er indsyet i vandtæt materiale eller tildækket med presenninger.

Er det nødvendigt at støbe på et tidspunkt, hvor kun frosset grus kan skaffes, må dette optøes, inden blandingen finder sted. Dette kan ske f. eks. med dampspyd, eller – i siloanlæg – med indblæst damp eller varm luft.

Frostsikring af vandledninger på byggepladsen

Vandforsyningens opretholdelse vinteren igennem er afgørende for arbejdets gennemførelse, og vandledningernes beskyttelse mod frysning derfor af den største betydning.

Hovedstikledning og flest mulige af de vandrette forgreningsledninger bør lægges i frostfri dybde i jord. Iøvrigt kan systemet beskyttes ved aftapning af ledningerne hver aften, ved isolation eller ved tilførsel af varme. Disse beskyttelsesforanstaltninger kan kombineres.

Aftapning af ledningerne. De lodrette strækninger kan tømmes helt ved aftapning*), de vandrette kun hvis rørstrækningerne er retlinede og har et passende fald mod aftapningsstedet, eller hvis ledningerne blæses rene med trykluft eller damp. Efter streng frost er der risiko for frysning, når vandet sættes på de kolde rør, især hvor det passerer svære haner.

Til en del af fordelingsystemet kan benyttes gummislanger, som må tømmes og rulles op hver aften, da slangerne ikke tåler frost.

Isolering af ledningerne. Lægges ledningerne i jord, men ikke i frostfri dybde, skal de omgives af et tykt lag tørvesmuld. Dette materiale kan også anvendes i kælderrum og lignende, hvor ledning og isolation kan indlægges i en kasse. Glas- og stenuldsmåtter og -skåle kan også anvendes. For at give effektiv beskyttelse kræves dog lagtykkelser af disse materialer på 20–30 cm, hvilket i praksis er besværligt eller ugørligt. Endvidere ødelægges isolationen tit under arbejdet på pladsen, og er den beskadiget blot et sted, bliver resten værdiløs. Endelig er isolationen til stor gene ved optøning af ledninger, som trods alt er frosset. Af disse grunde er anvendelse af isolation alene af problematisk værdi.

Beskyttelsen bliver væsentlig mere effektiv, hvis de isolerede ledninger aftappes om aftenen, eller hvis der tilføres varme til systemet.

*) Den øverste hane i systemet skal åbnes.

Opvarmning af ledninger. På byggepladser med dampanlæg kan vandledningerne lægges sammen med dampledningerne i en fælles isolerende kappe. I streng frost må dog i så fald holdes fyr på dampkedlen døgnet rundt. En anden udvej er at opvarme ledningerne ved hjælp af elektricitet, hvilket kan gøres på følgende måder:

- 1) omvikling af vandledningen ved strømførende kabel,
- 2) strøm ført direkte på ledningen,
- 3) indlægning af strømførende kabel i ledningen.

Den første fremgangsmåde kan dog ikke anbefales, da kablet er stærkt udsat for ødelæggelse. Desuden må nyttevirkningen antages at være mindre end i tilfældene 2 og 3.

Den anden metode har den fordel, at man sparer en del kabel. Derimod er der en vis fare for kortslutning gennem jord, hvorved den ikke strømførende del af ledningen udsættes for frysning. Endelig går varmeudviklingen i returkablet tabt, hvis vandledningen ikke kan lægges i ring. Varmetabet undgås, hvis man benytter sig af den tredje metode med indlægning af et kabel i røret. Dette kan udføres med et eenleder-kabel, der trækkes dobbelt i form af en sløjfe, eller man kan bruge et flerleder-kabel, hvor man kortslutter lederne parvis i den ene ende.

Der vil fortrinsvis blive brug for at sikre de vandrette ledningsstrækninger på jord og i kælder, medens de lodrette strækninger kan aftappes. Fra transformeren, der kan opstilles i et arbejdsskur eller lignende, føres da et armeret blykabel til stilladset og videre på dette parallelt med den ledning, der skal isoleres. Fra hovedkablet kan der da tages stik ud til sløjferne i de enkelte ledningsstrækninger. Naturligvis kan man også nøjes med en enkelt sløjfe, som da trækkes igennem alle rørene; men dels er dette ret vanskeligt at udføre i praksis, dels kommer man ved lange sløjfer op på ret store tværsnit, hvorfor den førstnævnte fremgangsmåde må anbefales.

Indføringen i røret må gøres vandtæt, f. eks. ved anvendelse af blykabel-forskrutninger med 1/2" rørgvind, idet den normale gummipladepakning erstattes med en gummiplade forsynet med små udstansede huller til udføring af sløjfeenderne. Til dimensionering af kablerne kan benyttes nedenstående ligning, der giver sammenhængen mellem spænding (e volt), effekt pr. m (w watt), ledningstværsnit (q mm²) og rørlængde (l m):

$$l^2 = \frac{e^2 \cdot q}{2 \cdot 0.0175 \cdot w}$$

I denne ligning kan w erfaringsmæssigt sættes til 25 watt pr. m, hvilket giver en rimelig sikkerhed ned til $\div 7$ à $\div 8^\circ \text{C}$.

For kobbers specifikke modstand er benyttet værdien ved 15°C , og 2-tallet i nævneren hidrører fra, at strømmen passerer røret to gange.

Hvor der anvendes flerleder-kabel, der er kortsluttet, betyder q kablets halve tværsnit.

Kombinerer man nogle praktisk anvendelige spændinger med nogle gængse tværsnit: 2.5 mm² og 1.5 mm² G. L. (gummiledning), 1.0, 0.75 og 0.5 mm² monteringsledninger samt 0.7 mm = 0.385 mm ringeledning, får man følgende rørlængder, når $w = 25$ watt/m:

tværsnit mm ²	rørlængde i m for spændinger i volt				
	32	24	16	12	8
2.5	54	40	27	20	13
1.5	41	31	21	15	10
1.0	34	25	17	12	8
0.75	29	22	14	11	7
0.5	24	18	12	9	6
0.385	21	15	10	7	5

Tabel nr. 8

Det ses af tabellen, at spændinger på 8 og 16 volt i forbindelse med de angivne ledningstværsnit dækker området mellem 5 og 27 m rørlængde med ret små intervaller. Rørlængder over 27 m vil kun rent undtagelsesvis kunne sikres med samme sløjfe eller flerlederkabel.

Ved multiplikation af den samlede rørlængde med 25 fås transformerstørrelsen i afgiven wattmængde.

Sekundærspændingen er i almindelighed 16 volt med udtag ved 8 volt. Hvis der på pladsen skal anvendes kunstig belysning, hvortil man sædvanligvis bruger 32 volt, kan lystransformeren være med udtag ved 16 og 8 volt, hvorved den også kan bruges til frostsikringen.

Endelig må det nævnes, at der nu kan købes »varmekabler« i standardlængder på 75 m til indtrækning i rørene. Kablerne er udført til 220 Volt. På grund af dette kablets store længde undgår man næppe at skulle passere haner. Dette gøres ved at kablet føres ud af røret på sædvanlig måde lige før hanen, vikles nogle gange rundt om denne og derpå føres ind igen efter hanen. Hane og kabel varmeisoleres derefter med isoleingsmåtte.

Opvarmning af materialer

Vand

Varmefylden for vand er ca. 5 gange større end for grus, d. v. s. at der til opvarmning af en bestemt vægtmængde vand skal tilføres 5 gange så meget varme pr. grad temperaturstigning som til opvarmning af den samme vægtmængde grus. Omvendt kan opvarmet vand for hver grad det afkøles naturligvis afgive 5 gange så meget varme til de øvrige materialer som samme vægtmængde grus. Vandet kan let opvarmes jævnt til ønsket konstant temperatur. Det afgiver sin varme med stor nyttevirkning på grund af vædskeformen, og varmeafgivelsen er meget ensartet.

For ikke at risikere ødelæggelse af cementen samt af opvarmningstekniske grunde må der ikke anvendes vand, som er mere end ca. 60°C varmt. Er dette ikke tilstrækkeligt til at opnå den fornødne betontemperatur ved udstøbningen, må resten af varmemængden tilføres ved opvarmning af gruset, eller støbningen må udsættes.

Betontemperaturen kan beregnes som vist i eksemplerne i *tillæg I*.

Blandt de forhold, der har indflydelse på betonens begyndelsestemperatur, skal opmærksomheden navnlig henledes på grusets vandindhold. Dette er i endnu højere grad end på andre årstider (hvor variationerne som bekendt kan være store nok) varierende fra sted til sted i materialebunkerne og fra dag til dag på grund af nedbør, frysning, optøning med damp o. s. v. Det er derfor væsentligt at beskytte gruset mod disse variationer (ved isolation af bunkerne) ikke alene på grund af vandindholdets betydning for v/c-forholdet, men også for at undgå varmespild ved opvarmning af ukontrollabelt og overflødigt vandindhold.

Vandet kan opvarmes direkte over et ildsted, ved fortætning af fri damp eller indirekte i en vandvarmer. Fremgangsmåderne er beskrevet side 87.

Grus

Skal støbningen udføres i så streng frost, at opvarmning af vandet alene ikke er nok til at opnå den nødvendige betontemperatur ved udstøbningen, må yderligere betongruset opvarmes. Som regel er det mest hensigtsmæssigt at varme sandet fremfor stenene.

Det må også her tages i betragtning, at sandets vandindhold kan variere inden for vide grænser. I særdeleshed gælder dette, hvis opvarmningen af sandet sker ved hjælp af lavtryksdamp med dampspyd, således at varierende mængder fortætningsvand tilføres.

Ved de betonstøbningsarbejder, der er gennemført i de senere års vintre her i landet, er opvarmning af sand i de fleste tilfælde sket ved hjælp af dampspyd. Som dampspyd anvendes 1,5–2,0 m lange rør, 1–1½" i diameter, forbundet med slanger til kedlens afgangsstuds. Den ende af dampspydet, der stikkes ind i materialebunken, er smedet ud i en spids. Fra spidsen og ca. 50 cm op langs røret udbores 3–4 mm huller i rørvæggen med ca. 5 cm mellemrum, se fig. 30, side 80.

Når dampspyd anvendes til opvarmning af sand, bør materialebunken være tildækket, således at varmen bevares i bunken. Tildækningen fjernes kun på stedet, hvorfra borttransporten sker. Højtryksdamp er bedre end lavtryksdamp, fordi mængden af fortætningsvand, der forøger grusets vandindhold, her bliver langt mindre.

Anvendes uperforerede damprør lagt i en rørslynge under sandbunken, undgås den uheldige fugtighedstilførsel helt. Til gengæld bliver opvarmningen væsentlig langsommere og svagere samt mere uøkonomisk.

På større, mekaniserede betonarbejdspladser, hvor grusmaterialerne opbevares i siloer, kan damp indblæses gennem dyser i silobund og -vægge. Hvis der bliver lange afbrydelser i støbningen, risikerer man dog, at hele siloens indhold fryser sammen.

I nogle tilfælde har man med held erstattet dampen med indblæst, opvarmet luft. Herved undgås forøgelsen af sandets fugtighedsindhold.

Blanding

Blanderen opstilles, så transportafstanden til støbestedet bliver kortest mulig. Anvendes opvarmede materialer – vand eller vand og grus – bør blanderen forvarmes med varmt vand eller damp inden støbningen.

På ledningen for det varme vand anbringes et dykrørstermometer (fra centralvarmekedel) på et bekvemt sted, så blandemesteren nemt kan kontrollere, at støbevandet har den forudsatte temperatur.

Betonens varmetab under blandingen er proportionalt med blandetiden og differensen mellem betonens temperatur og omgivelsernes temperatur (lufttemperaturen). Tabet kan formindskes ved opstilling af læskærme, eller – under strengere frost – ved indbygning af blanderen i et skur, som eventuelt kan opvarmes.

Transport fra blander til støbested

Varmetabet under betonens transport fra blander til støbested afhænger af temperaturforskellen mellem betonen og omgivelserne, af betonkonsistensen, transportlængden, betonmængden i transportredskabet samt af dettes isolationsevne. Beregninger af varmetabet er derfor meget usikre. I normalt dansk vinterklima kan tabet ved en fornuftig tilrettelæggelse af arbejdet med korte transportafstande og ved at undgå åbne render og slidsker ofte begrænses til 1–3° C. I *tillæg I* er angivet regler til bestemmelse af varmetabet fra blandingen til tildækningsøjeblikket.

I streng frost kan varmetabet formindskes ved isolation af transportredskaberne, f. eks. ved brædebeklædning af stål-børe, kærre, tipvogne eller lignende. Endvidere kan transportredskaberne tildækkes med en løs træflage under udkørsel. Trætrillebøre har mindre varmetab end stål-børe. Der bør tilstræbes så få omskovlinger som muligt.

Ledninger for pumpebeton har erfaringsmæssigt kun ringe varmetab, og dette kan i etagebyggeri yderligere formindskes ved at føre mest muligt af ledningens lodrette del op inde i bygværket.

Færdigblandet beton leveres fra forhandlerne med opgivet temperatur gældende for afleveringen på byggepladsen. Varmetabet under transporten til pladsen er iøvrigt i almindelighed af størrelsesordenen 1–2° C.

Udstøbning

Støbeskel

For at få god forbindelse med tidligere udstøbt beton er det af meget stor betydning, at denne er opvarmet til mindst + 5° C. Er temperaturen lavere, bliver der svag sammenhæng i støbeskellet.

Ved støbning om vinteren gælder i endnu højere grad end om sommeren, at arbejdet ikke bør afbrydes på vilkårlige steder. Påbegyndt støbning må føres frem til afslutning af naturlige enheder (dilatationsfuger eller lign.), således at støbeskellet placeres under hensyn til de forudsætninger, der er gjort i beregningerne og med henblik på mulighederne for tildækning og opvarmning.

Forme og armering

På mindre byggepladser uden opvarmningsmateriel bør man hver dag ved arbejdets ophør, og når det regner eller sneer, tildække formene med presenninger.

På større byggepladser renses og afises forme og armering ved hjælp af dampstråle eller flammekastere, se fig. 30, og opvarmes på samme måde

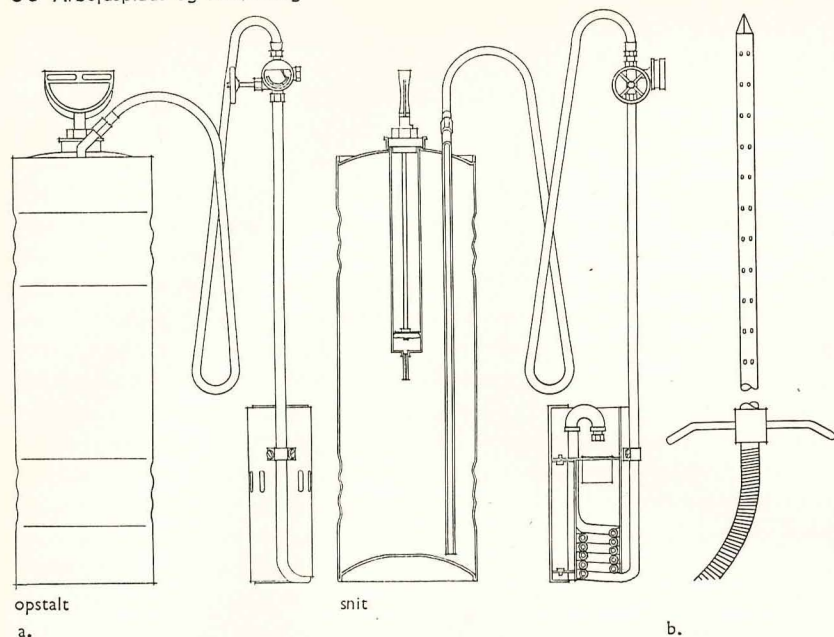


Fig. 30. Flammekaster og dampspyd. Mål 1:10. (a. Flammekaster b. Dampspyd).

umiddelbart før støbning for at formindske varmeafgivelse fra betonen. Ved anvendelse af flammekastere til afisning af træforme må flammen holdes i bevægelse hele tiden af hensyn til brandfaren. Varmt vand og varm luft er ikke velegnet til optøning og opvarmning af forme.

Ved støbning af dæk, hvor man senere vil benytte koksgryder i den underliggende etage, er det vigtigt at benytte tørt træ til rideplanker og strøer for at undgå nedbøjninger af pladen ved træets svind.

Komprimering

Ved støbning om vinteren bør anvendes så stiv betonkonsistens som muligt. Ved anvendelse af vibrering kan konsistensen være væsentlig stivere end ved håndstamping. Er forskellen mellem omgivelserne og betonens temperatur meget stor under transport og udstøbning i formen, kan fordampningen fra den friske beton blive betydelig, og konsistensen derfor blive stivere i formen end ved blanderens tømning. Dette må der tages hensyn til ved fastsættelse af vandtilsætningens størrelse.

Anvendelse af meget varmt støbevand kan have en lignende virkning, idet de kemiske processer fremmes så stærkt, at afbindingstiden forkortes.

Betonens tildækning

Forsøgene med isolationsmaterialer har vist, at varmeafgivelsen fra den ubeskyttede betonoverflade ved en given temperaturdifferens er 6 gange så stor som varmetabet fra overfladen efter at den er tildækket med en enkelt halmmåtte, se tabel nr. 5, side 52.

Ved spinkle konstruktioner har man umiddelbart efter udstøbningen den største forskel mellem betontemperatur og omgivelser i hele hærdningsperioden, og den varme, der er tilført, vil forsvinde, hvis betonen ikke hurtigst muligt beskyttes mod varmetab ved at overfladen isoleres.

På figur 31 er foroven vist typiske afkølingskurver for en tynd jernbetonplade, der er tildækket efter forskellige tidsintervaller, medens man nederst i figuren har angivet de tilsvarende styrkeudviklingskurver.

Ved betonoverflader, der ikke senere afrettes eller pålægges andre materialer, kan den hurtige tildækning af betonen medføre mange praktiske vanskeligheder. Men varmeberegningerne viser, at det er god økonomi at udvise den største omhu og opfindsomhed for at begrænse varmetabet i de første timer efter betonens udstøbning, f. eks. ved udlægning af et lægteskelet, udspænding af stålwirer eller lignende, der kan bære tildækningsmaterialet, uden at det berører betonoverfladen.

Etageadskillelser i boligbyggeriet eller andre rå betonoverflader giver ikke de samme vanskeligheder. Her bliver det arbejdsledelsens opgave at påse, at tildækningen udføres hurtigst muligt, eventuelt bør man regne med ekstra mandskab til dette arbejde. Den varme, der spildes på grund af forsinket tildækning, er det senere, hvor nyttevirksomheden er ringe, dyrt at tilføre ved opvarmning af bygværket.

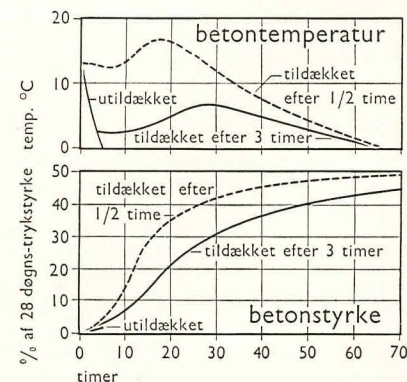


Fig. 31. Betydning af hurtig tildækning.

Foroven ses, at hurtig tildækning bevirker høj betontemperatur under den første del af hærdningen. Forneden ses, at styrkeudviklingen fremmes ved hurtig tildækning.

Utildækket beton afkøles meget hurtigt i frostvejr og opnår praktisk taget ingen styrke.

Betonens efterbehandling

Våd lagring

Det er kendt fra den almindelige betontechnologi, at betonens styrkeudvikling går langsommere og kan standses helt, hvis der ikke tilføres vand efter udstøbningen til erstatning for det vand, der under hærning forbinder sig med cementen og det vand, der eventuelt fordampes. Da fordampningen ofte er væsentlig større om vinteren end på andre årstider, har dette forhold stor betydning, først og fremmest under udstøbningen, hvor den varme beton har et betydeligt højere damptryk end den omgivende luft.

Når bygværket opvarmes, sker der ligeledes en kraftig fordampning, fordi den kolde luft, der opvarmes, bliver i stand til at optage store vandmængder. Fordampningen under udstøbning kan på den anden side undertiden nedsætte vandmætningsgraden så stærkt i den første kritiske del af hærningsperioden, at betonen kan tåle nogle få frysninger tidligt under hærningen, skønt der ikke er anvendt luftindblandingsmidler. Da man må tilstræbe at holde betonen våd i hele hærningsperioden, og desuden ikke kan sikre sig mod regnvejr, der eventuelt kan bringe vandmætningsgraden op over den kritiske værdi (se side 25-30), kan det imidlertid ikke i almindelighed forventes, at en beton uden luftindblanding under alle omstændigheder kan tåle frost. Ved de nu foretagne ændringer i kriteriet for frostsikkerhed, hvorved der forudsættes anvendt beton med ca. 4 % indblandet luft, er den nødvendige beskyttelsesperiode beregnet under forudsætning af, at betonen bliver tilført vand i hærningsperioden. *Man kan derfor uden risiko udføre den vådlagring af betonen, der er så vigtig for opnåelse af den forudsatte kvalitet.*

Ved opvarmning af bygværket må anvendelse af damp foretrækkes. Koksgrøder og lignende må kun anvendes i forbindelse med vandfordampere opstillet ovenpå eller i umiddelbar nærhed af varmekilden, da betonen ellers kan blive svag og utæt.

Fordampningstætte hinder

I U. S. A. har man udviklet præparater (curing compounds), der er i stand til at forsegle den udstøbte beton med en hinde, der forhindrer eller i væsentlig grad nedsætter fordampningen.

De originale amerikanske præparater findes såvidt vides endnu ikke på det danske marked. Før anvendelsen af ukendte præparater er det nødvendigt at sikre sig, at hinden virkelig er damptæt og at få fastslået,

hvornår præparatet skal påsprøjtes, da tætheden er ret afhængig af, at man vælger det rigtige tidspunkt i betonens afbindingsperiode.

En effektiv forsegling vil sikre, at betonen bevarer sit oprindelige vandindhold. Dette vil være tilstrækkeligt til at betonen kan opnå fuldstændig hærning, hvis betonens vandcementtal er over ca. 0,40 (47 P 2). Hærningen vil dog på grund af selvudtørring foregå noget langsommere end når der tilføres vand.

Det fremgår af det tidligere nævnte om vandmætningens betydning for frostskafer, at anvendelse af fordampningstætte hinder ved beton uden luftindblanding kan medføre forøget risiko for svækkelse af betonen.

Afformning

Under hele perioden fra betonens udstøbning til afformningstidspunktet må stolper, der er opstillet på jord eller kældergulv, kontrolleres af hensyn til eventuelle bevægelser ved frosthævninger eller optøninger.

Tidspunktet for afformning kan bestemmes som beskrevet på side 62-64. Ved selve afformningen må iagttages de sædvanlige forsigtighedsregler for at undgå ødelæggelse. Frossen forskalling må optøes eventuelt med damp, da man ellers får for stort spild på træet. For at undgå revnedannelser som følge af uensartet temperaturfordeling i betonen bør afformningen af svære konstruktioner ikke foretages, når der er for stor forskel på betonens temperatur og den ydre temperatur.

Betonkontrol

Ved støbning om vinteren må der gennemføres en betonkontrol efter de almindelige vejledninger og retningslinier. Betonens beskyttelse mod frost nødvendiggør dog på nogle områder en udvidet kontrol.

Da der f. eks. fastsættes et luftindhold i betonen på ca. 4 % som grundlag for opnåelse af frostsikkerhed et vist antal timer efter udstøbningen under givne ydre forhold, må det kontrolleres på byggepladsen, at dette luftindhold findes i den friske beton.

Er der ved planlægningen regnet med at nå afformningsstyrke indenfor en vis tid efter udstøbningen, må det ligeledes kontrolleres, at delmaterialerne og den friske beton har de dertil nødvendige egenskaber, og derpå må man ved registrering af temperaturforløbet i betonen under hærningen og ved beregninger som beskrevet side 62-64 konstatere den virkelige styrkeudvikling, før man fjerner forme og understøtninger.

Det hidtil mest almindelige princip for bestemmelse af afformningstidspunkt ved styrkeprøvning af særlige prøvelegemer giver ofte ikke pålidelige resultater ved støbning om vinteren, fordi temperaturforholdene er vidt forskellige i betonkonstruktionen og i prøvelegemerne.

Det må derfor anbefales at lægge hovedvægten på

- 1) prøvning af materialer,
- 2) prøvning af den friske betons egenskaber,
- 3) måling af betontemperaturen ved udstøbningen og under hærningen.

Udføres kontrollen efter disse retningslinier, kan man opnå større sikkerhed end tidligere for, at konstruktionens beton vil få den forudsatte styrke, tæthed og holdbarhed.

Nærmere regler for omfang af prøvning og beskrivelser af de forskellige prøvemeter skal ikke gives her, men nogle særlige bemærkninger om prøvning, der er af speciel interesse for støbning om vinteren, er dog anført nedenfor. Endvidere henledes opmærksomheden på det tidligere nævnte om valg af rene, sunde og frostbestandige grusmaterialer, samt på muligheden for at prøve den færdige konstruktions beton ved lyd hastighedsmåling, såfremt særlige forhold – f. eks. svigtende kontrol eller uheld ved arbejdsudførelsen – motiverer en sådan prøvning.

Cementens afbindingstid

Cementens afbindingstid prøves efter normerne (33-15) med Vicats nål. På arbejdspladsen kan en orienterende prøve udføres således:

På en glasplade udrøres ved stuetemperatur en blanding bestående af 4 dele cement og 1 del vand (ialt ca. 100 gr.), som man derefter stikker i hver halve time, f. eks. med en blyantspids. Når der begynder at være modstand mod indstikningen, er afbindingen begyndt. Når spidsen ikke længere kan trænge ind uden anvendelse af kræfter, er den afsluttet. Afbindingen skal i henhold til normerne være afsluttet inden 15 timer. Denne frist må under ingen omstændigheder overskrides. For at cementen skal være velegnet til betonstøbning om vinteren må afbindingen være afsluttet i løbet af 6-7 timer, når forsøget udføres ved normal stuetemperatur. Det anbefales at udføre denne prøve hver gang ny cement leveres, og når der benyttes cement, der har været lagret i nogen tid.

Betonens luftindhold

Ved anvendelse af luftindblandet beton er det vigtigt til stadighed at kontrollere, at den friske betons luftindhold er ca. 4 % (og ikke over 5 %, idet et for stort luftindhold nedsætter styrken), dels fordi luftindholdsprocenten som tidligere omtalt er en afgørende faktor for betonens frostsikkerhed, dels fordi de ydre forhold, blandt andet temperaturforholdene, påvirker den mængde luft en given mængde luftindblandingsmiddel indfører i betonen. Kontrollen udføres som beskrevet i Dansk Ingeniørforenings betonsektions publikation »Anvisning i brug af luftindblandingsmidler« (53-8).

Betonens temperatur

Umiddelbart efter blandingen må betonens temperatur kontrolleres. Den må ikke overstige:

- 30° C for almindelig portlandcement,
- 25° C for Rapid- og Recordcement,
- 20° C for Superrapidcement.

Straks efter udlægningen og tildækningen i formen skal betonen *mindst* have den valgte begyndelsestemperatur, jævnfør diagrammerne.

Luftens temperatur skal måles for at kontrollere, om støbning kan finde sted med de benyttede hjælpemidler (isolation, varmt vand m. v.).

Lufttemperaturer måles med et almindeligt udendørs-termometer, op- hængt beskyttet mod sol og udstråling, men ubeskyttet for vind. Under hærningen må betonens temperatur jævnlig måles, idet temperaturforløbet som tidligere nævnt er afgørende for bestemmelse af tidspunktet for opnåelse af frostsikkerhed og afformningsstyrke.

I hærdnende beton stikkes termometret ned i huller, der umiddelbart efter udstøbningen er udsparet i betonen ved indstikning af olierede rundjernsstumper med diameter lidt større end termometrets. Målestederne anbringes fordelt over hver konstruktionsdel således, at en repræsentativ middeltemperatur kan bestemmes, jævnfør side 62. I grus, vand og beton benyttes kviksølvtermometre, beskyttet med en (hullet) kappe af metal, eller bimetalliske termometre, som er noget dyrere i anskaffelse, men er mere robuste. Termometre må justeres inden brugen. De skal vise nøjagtig 0°C efter i 5 minutter at have været nedsænket i en blanding af is og vand under omrøring.

Materiel ved opvarmning

Som det ses af de indledende teoretiske afsnit om betingelserne for at betonen kan opnå frostsikkerhed og eventuelt tidlig afformningsstyrke, vil det ofte være nødvendigt at opvarme et eller flere af materialerne, eventuelt suppleret med opvarmning af selve konstruktionen efter udstøbningen. Desuden kan varmen være et nyttigt hjælpemiddel ved rensning for sne og afisning af forme, armeringsjern m. m.

Den varme, der skal anvendes, produceres normalt her i landet på byggepladsen eller i dennes umiddelbare nærhed, idet elektrisk opvarmning ikke kan konkurrere på grund af sin høje pris.

Når kedelanlæg i forvejen findes i nærheden af en byggeplads, kan varmen undertiden fremskaffes herfra. Dette er ofte tilfældet ved industribyggeri, f. eks. når der er tale om udvidelse af allerede eksisterende anlæg, hvortil der er knyttet en kraftcentral, eller hvor man ved nyanlæg begynder med at opføre og indrette denne.

Ved boligbyggeri kan man undertiden skaffe varmt vand ved at udnytte et tidligt installeret centralvarmeanlæg eller et anlæg, som allerede er sat i drift. Skal anlægget benyttes til byggepladsens brug, må man under ingen omstændigheder nøjes med kun at installere kedlen og tappe varmt vand direkte fra denne, da dette medfører kedlens ødelæggelse i løbet af kort tid. Samtidig med kedlen må vandvarmeren installeres og det varme vand tages herfra.

Skal byggeriet senere forsynes med fjernvarme kan der ofte være mulighed for på et ret tidligt tidspunkt under byggeperioden at indrette varmecentralen og udnytte den til byggepladsen.

Har man ikke de her nævnte muligheder for at fremskaffe varme til byggeriet, må man oprette midlertidige varmeanlæg på selve pladsen. Materiel hertil er kort gennemgået nedenfor.

Opvarmning af støbeandet kan ske ved ganske simple hjælpemidler som f. eks. gruekedler, asfaltkogere eller vandvarmere bestående af en jernbeholder over et muret ildsted. Størrelsen bør vælges således at det nyttige rumfang af vandbeholderen svarer til mindst 1 times max. forbrug af varmt vand. Det er almindeligt, at en fyldning kan opvarmes fra 5°C til 60°C i løbet af ca. 1 time. Dog kræver den første fyldning hver dag længere tid. Nyttetvirkningen kan forbedres væsentlig ved god isolering af beholderen, samt ved at lægge låg på. Til opvarmning af 100 l vand til ca. 60°C medgår ca. 20 kg kul.

Varmtvandsbeholderen bør anbringes så højt beliggende ved siden af blanderen, at vandet kan løbe til denne af sig selv igennem isolerede rør. Hvor denne anbringelse ikke er mulig, kan vingepumpe anvendes, forudsat at vandet ikke er over ca. 60° C. Transport af vandet i junger eller lignende beholdere må frarådes på grund af stort varmetab.

Til afisning, hvortil varmt vand ikke egner sig, har flammekastere (se figur 30, side 80) vist sig at være meget nyttige og effektive.

Dampanlæg

Man kan bortset fra enkelte undtagelser ved mindre arbejder ikke klare opvarmning af både vand og grus med en af de ovenfor omtalte simple vandvarmere. Her vil det være nødvendigt at have damp på pladsen.

Der skelnes mellem lavtryksdampanlæg (tryk under 1 atm.) og højtryksdampanlæg (tryk over 1 atm.).

Lavtryksdampanlæg

Lavtryksdampanlægget består af en lavtryksdampkedel, som fyldes med vand direkte fra vandværksnettet. Kedlerne, som findes både i inden- og udenlandske fabrikater, leveres med filter til blødgøring af vandet, hvilket kan tilrådes. De fleste typer har desuden indbygget vandvarmer til produktion af varmt vand til støbning etc. Denne vandvarmer kan på koldtvandssiden direkte tilsluttes vandværksnettet, og på varmtvands-siden føres videre til blandemaskinen. Endelig findes der een eller flere stutse til tilslutning af dampledninger. Ledningernes dimension bør ikke være under 1 1/4", dog mindst 1 1/2" hvor der anvendes gummislanger.

Findes der ikke indbygget vandvarmer i kedlen, føres et dampstik til en særskilt vandvarmer, som kan være indrettet med en dampvarmeslange i bunden, hvorfra kondensatet føres tilbage til kedlen, eller som blandingskar for damp og vand, hvori den frie damp går ud og kondenseres i brugsvandet. Af de nævnte to muligheder må det første anbefales, dels af hensyn til den mindre stenaflejring i kedlen, dels fordi vandvarmeren så kan udføres lukket og vandværkstrykket udnyttes til fordeling af vand på byggepladsen. Dette kan ikke gøres ved blanding af damp og vand.

Pasningen af lavtryksanlæg er simpel, og kedlerne er fritaget for offentligt tilsyn. Kedeltilsynet kræver dog tilmelding ved hver ny opstilling.

Den væsentligste mangel ved systemet er, at det relativt lave damptryk ofte ikke er tilstrækkeligt til, at dampen kan trænge langt nok ud i ma-

terialbunkerne, og derved give en ensartet opvarmning, ligesom effektiviteten ved afisning ikke er så stor som det ofte er ønskeligt.

Ved indhentning af tilbud på lavtrykskedler bør man have oplysninger om samtidig ydelse af: a) kg damp/time ved 1 atm. og svag overhedning, b) m³ varmt vand/time ved ca. 60° C. Om nødvendig kapacitet, se side 90.

Højtryksdampanlæg

Højtryksdampanlægget består ligesom lavtryksdampanlægget af en dampkedel og et rørsystem til fordeling af damp og varmt vand. I enkelthederne viser der sig imidlertid en række forskelle.

Som kedler er hidtil for det meste anvendt lokomobiler, fordi der ikke er fremkommet højtrykskedler specielt konstrueret til byggearbejder. Lokomobiler har imidlertid også vist sig udmærket egnet for dette formål, og så længe den eksisterende bestand er anvendelig, er der ingen grund til at vrage dem.

Lokomobilerne er en liggende røgrørskedel oprindeligt beregnet for 10–12 atm. tryk, men man opnår næppe tilladelse til at gå over 5–6 atm. på byggepladserne. Fødningen kan ikke ske direkte fra vandværksnettet, men ved hjælp af den på lokomobilerne siddende dampmaskine, som trækker fødepumpen. Man kan også afmontere den iøvrigt unyttige dampmaskine og føde kedlen enten med en fødepumpe eller ved injector.

Vandopvarmningen må på grund af kedeltilsynets krav altid ske i åben beholder, enten ved lukket rørslange i bunden eller ved at lade dampen kondensere i selve vandet. Vandvarmeren bør anbringes højt, så vandet af sig selv løber til brugsstedet.

Lokomobilerne er almindeligvis ikke forsynet med anlæg til blødgøring af fødevandet, hvorfor man, hvor kondensatet ikke ledes tilbage til kedlen, bør tilsætte kemikalier til råvandet for at undgå for kraftig stenafsætning i kedlen. Et gammelt, men ganske godt middel er at sætte kartoffeludkog til råvandet.

Kondensatet fra dampens afgivelse af varme til vand og grus kan gå til spildevand, eller rørsystemet kan udbygges med vandudladere og kondensatledninger til tilbageføring af kondensatet til kedlen. Hidtil er den først nævnte fremgangsmåde blevet mest anvendt, idet anlægsudgiften forøges væsentligt ved installationen af returledninger. Også driftsudgifterne forøges, idet kondensatledninger skal aftappes hver aften. Da man iøvrigt som nævnt hidtil har anvendt gamle kedler (lokomobiler), har man lagt

mindre vægt på, at kedlens levetid blev noget forkortet ved den større tilstening. Hvor der anvendes fabriksnye kedler indkøbt til normal fabrikspriser, må det derimod tilrådes, at i hvert fald varmtvandstilberedningen sker med tilbageledning af kondensatet, hvorimod opvarmningen af materialbunkerne stadig kan ske i åbent system, dels fordi man får en bedre opvarmning, dels fordi den hertil forbrugte dampmængde som regel er meget lille i forhold til, hvad der bruges til vandopvarmning taget over en hel sæson.

Dampledningerne bør ikke være under 1" og kondensledninger $1\frac{1}{2}$ "– $3\frac{1}{4}$ ".

Højtryksanlæggenes fordele fremfor lavtryksanlæggenes er hovedsagelig deres større effektivitet, medens pasningen til gengæld er lidt mere kompliceret. Desuden står højtryksanlæg under tilsyn af det offentlige. Herom må man henvende sig til det stedlige kedeltilsyn.

Dimensionering af dampanlæg

Dampanlæggenes nødvendige kapacitet er udover byggepladsens varme-forbrug afhængig af anlæggets isolering. Til et uisolere anlæg skal bruges $1\frac{1}{2}$ à 2 gange så stor hedeplade som til et velisolere anlæg for at opnå samme effekt. Ikke alene i drift, men også i anskaffelse vil det uisolerede anlæg derfor være væsentlig dyrere end det isolerede.

I de nedenfor anførte dimensioneringsvejledninger er der regnet med en normal isolering, hvilket vil sige, at kedlen er isoleret fra fabrik eller opstillet i lukket skur, vandvarmeren isoleret med mindst 25 mm glas- eller stenuld, og alle ledninger omviklet med mindst 20 mm glas- eller stenuld beskyttet med asfaltpap. De anførte tykkelser må opfattes som minimumskrav, og det kan som regel betale sig at forøge dem.

Ved valget af kedelstørrelse for lavtrykskedler, som jo i reglen anskaffes nye, må man gå ud fra leverandørens opgivelse. Ved højtrykskedler, som stadig anskaffes i brugt tilstand, kan sådanne oplysninger ikke fremskaffes. Følgende praktiske regel kan bruges i stedet:

Hedepladen i $m^2 = 2$ gange m^3 beton/time + 3 gange antal forbrugssteder à 1" (excl. vandvarmeren).

Nedenstående tal kan bruges til bestemmelse af nødvendig kedelstørrelse. Til fremstilling af 1 m^3 beton med en begyndelsestemperatur på ca. $18^\circ C$ forbruges, når delmaterialernes temperatur er ca. $0^\circ C$, ca. 30 kg damp eller 200 l vand à $60^\circ C$,

til afslusning af 1 m^3 form forbruges ca. 2 kg damp,

til opvarmning af 100 m^3 rum ca. $10^\circ C$ over ydertemperaturen forbruges ca. 8 kg damp/time,
til fremstilling af 10 kg damp medgår 1.5–2.5 kg kul.

Dampanlægs økonomi

Det har vist sig at være af overordentlig betydning for driftsøkonomien, at de varmekrævende arbejder planlægges på en sådan måde, at varme-anlægget på dage, hvor det er i drift, bliver udnyttet i hele arbejdstiden. Arbejder af kortere varighed bør derfor henlægges til samme dag. Lavtryksanlæg er dyrere i anskaffelse end højtryksanlæg, men sæsonudgiften er alligevel mindst ved lavtryk, fordi udgiften pr. driftsdag samt afskrivningerne er mindre.

Ved de enkle varmtvandsanlæg er både anskaffelsesudgiften og den årlige afskrivning betydelig mindre end ved et tilsvarende dampanlæg. Til gengæld er de daglige udgifter noget større, således at sæsonudgiften ved en meget langvarig vinter kan blive større end ved dampanlæg.

Opvarmning af bygværket

Skal bygværket opvarmes på en plads, hvor dampanlæg ikke findes, må der anvendes koks- eller oliebrændere, som fås i forskellige typer. Den enkleste er den almindelige koksgrøde, som rummer 50–80 l, og som brænder 10–12 timer på en fyldning. Ved ikke for store loftshøjder – indtil ca. 3 m – må man regne med 1 gryde pr. 35 m^2 dæk, som skal holdes opvarmet 10° over omgivelserne. Foruden disse enkle typer findes mere komplicerede, som sikrer en kuliltefri forbrænding med et stort indhold af kultveilt i røgen. Disse typer kan i høj grad anbefales. Effektiviteten er noget større, og desuden rummer deres anvendelse væsentlig mindre forgiftningsfare.

I stedet for at anvende koks som brændsel kan man bruge olie forbrændt i specialgrøder, som findes i handelen.

På pladser, hvor man har damp til rådighed, vil det være naturligt at lade opvarmningen ske ved hjælp af dampen, hvilket enten kan foregå ved anvendelse af dampcaloriferer eller ved at lade dampen komme i direkte kontakt med vedkommende bygningsdele.

Anvendelse af glatte ribbørør eller lamelcaloriferer med påmonteret blæser er dyrest i anlæg, men billigst i drift, fordi varmetabet er langt mindre, end når dampen kommer i direkte kontakt med bygværket. Til gengæld opnås ingen fortætning af damp på betonen, hvilket er fordelagtigt for hærningen, men nødvendiggør en stor kapacitet af anlægget.

Ved anvendelse af rør som varmelegemer anbringes rørene så tæt ved vedkommende flade som muligt, og rør og bygningsdel isoleres sammen f. eks. ved hjælp af et par lag halmmåtter med presenning over. I dette tilfælde vil det være passende at anbringe ca. $\frac{1}{2}$ m 2" glat rør for hver m² bygningsflade.

Dampforbruget vil være ca. 25 kg damp/time pr. 100 m² flade.

Opvarmning af udstøbt beton for at opnå hurtig styrkeudvikling er ret simpel, når der kun er tale om en enkelt konstruktionsdel. Den omgives med en kappe af presenning, træ, tagpap eller lignende, hvorunder varmen ledes ind. Anvendes »tør varme«, d. v. s. koksgrøder, eller lignende, må der samtidig anbringes kar med vand til fordampning for at hindre udtørring af betonen. Opvarmning med damp må anbefales, da dampen fortætter på de koldeste steder og derved tilfører betonen fugtighed.

Fler-etages bygværker uden udvendigt stillads

Efterhånden som bygværket føres i vejret, omgives den del, der er under udførelse, med presenninger før støbnings påbegyndelse. Presenninger og opvarmningsmateriel føres med op fra etage til etage.

Når gulv- og søjleforskalling er opstillet, hænges presenningerne fra facadebjælkerne ned over facaden og de tilsvarende bjælker i etagen nedenunder. Ved foden af søjlerne må presenningerne holdes ud fra muren, således at der fremkommer et luftmelletrum. Dette punkt må især beskyttes mod frost. Se fig. 32, hvor der er vist en koksgrøde i nærheden af den udvendige søjle.

Indvendig i bygningen hænges presenninger (disse kan eventuelt have »vinduer« af plastic) udenom det område, som støbes. Ved hver udvendig søjle bør der opvarmes, og som yderligere beskyttelse kan foden af søjlen tillige isoleres ved pakning med halm. De lukkede rum opvarmes f. eks. med koksgrøder eller damp. Damp kan udnyttes som nærmere beskrevet ovenfor.

Ved anvendelse af damptilførsel under forskallingen kan man nøjes med kortere presenninger, der kun hænger nogle få meter ned under dækket (kulisser). Eventuelle søjler må i så fald beskyttes på anden måde. I stedet for presenninger kan på særlig udsatte steder med stærk vindpåvirkning alle åbninger dækkes med brædebeklædning på ydersiden af den skrå yderste stolperække. Se fig. 33.

Anvendes koksgrøder må man være opmærksom på forgiftningsfaren og brandfaren. De skal opfyres i fri luft, og der skal være ildslukningsmateriel ved hånden. Opføres en bygning meget hurtigt eller i streng kulde,

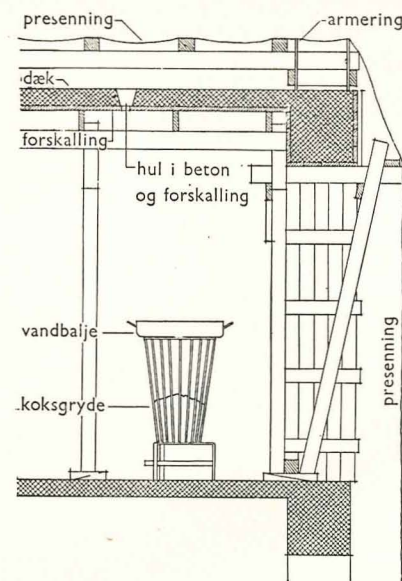


Fig. 32. Opvarmning af bygværket

Den del af bygværket, som er under udførelse, beskyttes med presenninger. Anvendes koksgrøder til opvarmning af de lukkede rum, må der anbringes vandfordamper på koksgrøden.

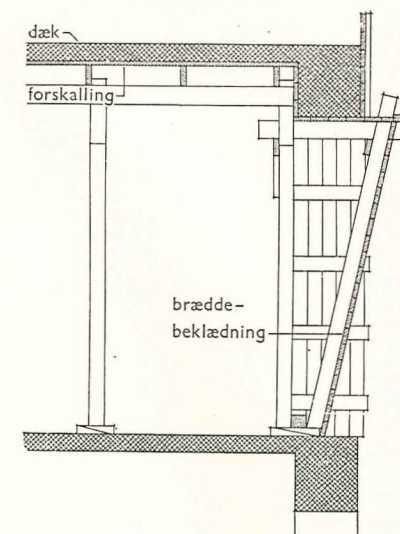


Fig. 33. Brædebeklædning på ydersiden af stolperække.

På særlig udsatte steder tildækkes alle åbninger med en brædebeklædning i stedet for presenning.

kan det være nødvendigt at anskaffe presenninger og opvarmningsmateriel til to etager.

Førend støbningen påbegyndes, må de indvendige presenninger og materiel til opvarmning være anbragt. Hvis kulden er streng, bør opvarmningen påbegyndes flere timer forud for støbningen. Så snart et felt af gulvet er støbt færdigt, tildækkes det på den måde, at der klampes tømmer til søjlernes armering. Herover lægges strøer og tværstrøer, på hvilke presenningerne lægges. Den fri højde under presenningerne bør ikke være mindre end 15 cm. Opvarmningen af luftrummet over gulvet sker ved, at der i dette og i forskallingen er udsparet huller til de opvarmede rum nedenunder. Der bør være et hul for hver 30 m², og hullerne bør have et samlet areal på ca. 1 % af dækket.

Tildækningen skal endvidere udformes således, at den nødvendige vandring – eventuelt ved overspuling – af den udstøbte beton kan udføres.

Bygværker med udvendigt stillads

Opvarmningen foretages som ovenfor beskrevet, men den almindeligst benyttede udvendige stilladskonstruktion med 1 række rejsebomme, rideplanker og stikbomme må udføres således, at der ingen sværtelægter går ind gennem vinduesåbningerne, da dette vil hindre opsætning af tætningsflager. Se fig. 34. Der anbringes bomme i murens inderside, hvortil sværtelægterne fastgøres, og åbningerne på indersiden tildækkes. Hvis det er nødvendigt, anbringes varmemateriel i etagen.

Ved støbning af siloer, beholdere o. lign., hvor der anvendes glideforskalling, anbringes presenninger uden om forskallingen og føres med op.

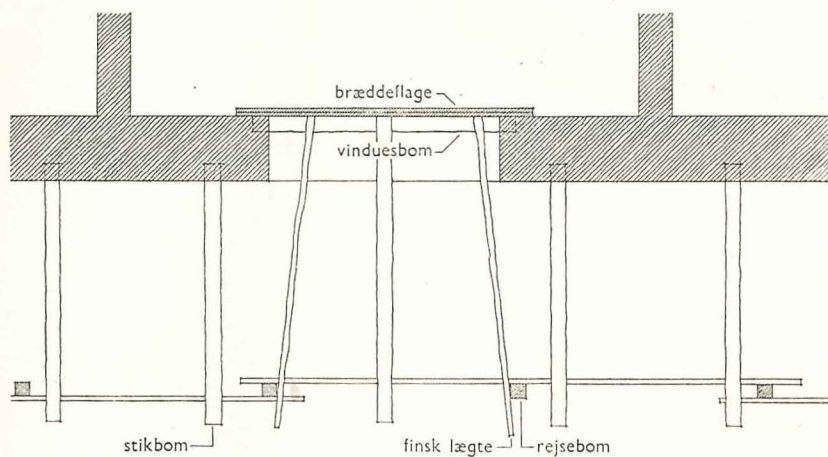


Fig. 34. Udvendigt stillads, vandret snit.

Stilladskonstruktionen ved bygværker med udvendigt stillads udføres således, at sværtelægter ikke går ind gennem vinduesåbninger. Disse tildækkes med tætningsflager. Sværtelægter fastgøres til bomme i murens inderside.

Beregning af betonens blandingstemperatur og varmetab

I diagrammerne på side 55-59 er forudsat tre forskellige begyndelsestemperaturer for betonen, N_b , defineret som temperaturen i betonen efter udstøbningen i formen og umiddelbart efter at tildækningen har fundet sted. På grund af varmetabene under blanding, transport og udstøbning skal betontemperaturen under blandingen N_m have en højere værdi. I praksis vil man hurtigt få erfaring for hvilke begyndelsestemperaturer, der opnås ved en given arbejdsmetode, men man skal sikre sig ved temperaturmålinger, at betonen har den forudsatte begyndelsestemperatur.

Til vejledning før arbejdets påbegyndelse er nedenstående givet nogle eksempler på, hvorledes blandingstemperaturen N_m kan beregnes ud fra delmaterialernes temperatur N_d , når man kender betonsammensætningen – opgivet som de enkelte delmaterialers vægte P_d – og delmaterialernes varmekoefficient c_d .

Betonens varmetab fra blandingen til tildækningsøjeblikket kan skønnes til 15 % pr. time af temperaturforskellen mellem beton og den omgivende luft som angivet i nedenstående formel.

$$N_m - N_b = 0.15 (N_m - N_u) \cdot t, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ eller} \quad (12)$$

$$N_b = N_m - 0.15 (N_m - N_u) \cdot t, \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ hvor} \quad (13)$$

N_m = betonens blandingstemperatur, $^\circ\text{C}$

N_b = betonens temperatur umiddelbart efter tildækningen, $^\circ\text{C}$

N_u = den omgivende lufts temperatur, $^\circ\text{C}$

t = tiden mellem blandings- og tildækningsøjeblikket, timer.

Delmaterialernes temperaturer

Anvendes kun uopvarmede materialer på pladsen, er materialernes temperaturer bestemt af de klimatiske forhold. Er disse således (mild vinter eller efterår og forår), at betonen kan opnå en begyndelsestemperatur, N_b , på mindst 5°C , kan støbning af nogle konstruktioner som tidligere omtalt gennemføres uden risiko for frostedelæggelse af betonen, selv om konstruktionen ikke opvarmes efter udstøbningen.

Er arbejdspladsen indrettet, således at vandet (men ikke gruset) opvarmes, vil det være rimeligt at opvarme dette til 60°C . Opvarmes også gruset, kan en temperatur for dette på ca. 30° anses for passende i de fleste tilfælde. Samtlige temperaturer for materialerne – såvel uopvarmede som kunstigt opvarmede – forudsættes i de følgende eksempler bestemt ved måling.

Beregninger

Ved betonproportioneringen bestemmes mængderne, og den varmemængde, hvormed de forskellige materialer bidrager til den friske betons varmemængde, kan derefter beregnes som produktet af materialets mængde i kg, dets varmefylde og dets temperatur. Herefter kan betonens blandingstemperatur, N_m , beregnes ved hjælp af følgende formel:

$$R_b \cdot c_b \cdot N_m = \sum P_d \cdot c_d \cdot N_d \quad (14)$$

Heri er:

R_b = betonens rumvægt kg/m^3

c_b = betonens varmefylde $\text{kcal}/^{\circ}\text{C kg}$

N_m = betonens blandingstemperatur $^{\circ}\text{C}$

P_d = delmaterialernes vægt kg

c_d = - varmefylde $\text{kcal}/^{\circ}\text{C kg}$

N_d = - temperaturer $^{\circ}\text{C}$

Produktet i ligningens højre side regnes ud særskilt for hvert af materialerne og derefter summeres, som vist i de følgende eksempler. I disse er:

P_c = vægtmængde cement pr. m^3 beton

P_s = - sand (tørt) pr. m^3 beton

P_{st} = - sten (tørt) pr. m^3 beton

V_s = vandindhold i sand pr. m^3 beton

V_{st} = vandindhold i sten pr. m^3 beton

V_t = den ved blanderen tilsatte vandmængde pr. m^3 beton

Eksempel 1. Uden opvarmning

Eksemplet forudsætter anvendelse af uopvarmede materialer, et luftindhold på 4% = $40 \text{ l}/\text{m}^3$ beton samt en lufttemperatur, $N_u = 4^{\circ}\text{C}$.

materiale			kornvægtfylde kg/l	volumen l/m^3 beton	varmefylde c_d $\text{kcal}/^{\circ}\text{C kg}$	$c_d P_d$ $\text{kcal}/^{\circ}\text{C}$	temperatur N_d $^{\circ}\text{C}$	varmemængde kcal
art	mængde kg/m^3							
cement	P_c	300	3.15	95	0.2	60	5°	300
sand	P_s	745	2.62	284	0.2	149	6°	894
sten	P_{st}	1025	2.62	391	0.2	205	6°	1230
vand i sand: 4%	V_s	30	1	30	1.0	30	6°	180
vand i sten: 1%	V_{st}	10	1	10	1.0	10	6°	60
tilsat vand	V_t	150	1	150	1.0	150	7°	1050
luft		0	0	40				
sum	$R_b = 2260$			1000		604		3714

Heraf fås betonens blandingstemperatur:

$$N_m = \frac{3714}{604} = 6^{\circ}\text{C}.$$

$$N_b = N_m \div 0.15 (N_m \div N_u) \cdot t$$

Under forudsætning af, at der går 1 time fra blandingen til isolationsmaterialet er udlagt, fås:

$$N_b = 6 \div 0.15 (6 \div 4) \cdot 1 \sim 6^{\circ} > 5^{\circ}\text{C}.$$

Diagrammerne for $N_b = +5^{\circ}\text{C}$ kan da anvendes.

Eksempel 2. Varmt vand

Eksemplet forudsætter opvarmning af vand, men ikke af grus, og der regnes med et luftindhold på 4 % = 40 l/m³ beton samt en lufttemperatur $N_u = \div 5^\circ \text{C}$.

materiale			kornvægtfylde kg/l	volumen l/m ³ beton	varmefylde c_d kcal/°C	$c_d P_d$ kcal/°C	temperatur N_d °C	varmемængde kcal
art	mængde kg/m ³							
cement	P_c	300	3.15	95	0.2	60	0°	0
sand	P_s	735	2.62	281	0.2	147	2°	294
sten	P_{st}	1010	2.62	388	0.2	202	2°	404
vand i sand: 5%	V_s	36	1.0	36	1.0	36	2°	72
vand i sten: 1%	V_{st}	10	1.0	10	1.0	10	2°	20
tilsat vand	V_t	150	1.0	150	1.0	150	60°	9000
luft			0	40				
sum	$R_b = 2241$			1000		605		9790

Heraf fås betonens blandingstemperatur:

$$N_m = \frac{9790}{605} = 16^\circ \text{C}.$$

Under forudsætning af, at betonen er tildækket tre kvarter efter blandingen, fås ved anvendelse af formel (13):

$$N_b = 16 \div 0.15 (16 \div (\div 5)) \cdot \frac{3}{4} = 13^\circ \text{C}.$$

Diagrammerne for $N_b = 13^\circ \text{C}$ kan da anvendes.

Eksempel 3. Varmt vand og varmt grus

Eksemplet forudsætter opvarmning af vand og af sand, men ikke af sten. Stenene forudsættes at være 0° C. Sandet opvarmes med dampspyd og regnes at opnå en temperatur på 30° C. Herved forudsættes sandets fugtighedsindhold ændret til 6 %.

Der regnes endvidere med et luftindhold på 4 %, som i eksempel 1 og 2, samt en lufttemperatur $N_u = \div 5^\circ \text{C}$.

materiale			kornvægtfylde kg/l	volumen l/m ³ beton	varmefylde c_d kcal/°C	$c_d P_d$ kcal/°C	temperatur N_d °C	varmемængde kcal
art	mængde kg/m ³							
cement	P_c	300	3.15	95	0.2	60	0	0
sand	P_s	740	2.62	283	0.2	148	30	4440
sten	P_{st}	1025	2.62	392	0.2	205	0	0
vand i sand: 6%	V_s	44	1.0	44	1.0	44	30	1320
vand i sten: 1%	V_{st}	10	1.0	10	1.0	10	0	0
tilsat vand	V_t	136	1.0	136	1.0	136	60	8100
luft				40				
sum	$R_b = 2254$			1000		603		13860

Heraf fås:

$$N_m = \frac{13860}{603} = 23^\circ \text{C}.$$

Under forudsætning af, at betonen er tildækket 1/2 time efter blandingen, fås af formel (13):

$$N_b = 23 \div 0.15 (23 \div (\div 5)) \cdot 0.5 = 20^\circ \text{C}.$$

Diagrammerne for $N_b = 20^\circ \text{C}$ kan anvendes.

Eksempel 4. Frosne materialer

Hvis stenenes temperatur er under frysepunktet og deres vandindhold findes som is, må der tilføres relativt store varmemængder dels til at opvarme isen til frysepunktet, dels til at smelte isen, hvis smeltevarme som bekendt er 80 kcal/kg.

Har stenene i det ovennævnte eksempel 3 temperaturen $\div 5^\circ\text{C}$, kan det heraf forårsagede ekstra varmemeforbrug beregnes således:

Opvarmning af:

sten fra $\div 5$ til 0°C	:	$205 \cdot 5$	$= 1025$	kcal
is fra $\div 5$ til 0°C	:	$0.47 \cdot 10 \cdot 5$	$= 24$	-
smeltning af is ved 0°C	:	$10 \cdot 80$	$= 800$	-

ialt 1849 kcal

Dette formindsker betontemperaturen til:

$$N_m = 23 \div \frac{1849}{603} = 20^\circ\text{C}.$$

$$N_b = 20 \div 0.15 (20 \div (-\div 5)) \cdot 0.5 = 18^\circ\text{C}.$$

Når man som i dette eksempel får en betontemperatur under den ønskede værdi, må man benytte diagrammerne for $N_b = 13^\circ\text{C}$ og $N_b = 20^\circ\text{C}$ og derefter ved interpolation mellem de opnåede resultater foretage et skøn over, om støbning er forsvarlig.

Anvendelse af frosne materialer må imidlertid frarådes, og eksemplet er kun medtaget for at vise, hvorledes frosne materialer påvirker blandingstemperaturen på meget ugunstig måde.

Tillæg II. Støbning af hulstensdæk

Støbning af hulstensdæk er forholdsvis vanskeligt om vinteren. Dækkenes overflade er stor i forhold til betonmængden, og den opvarmede beton afgiver hurtigt sin varme til hulstensblokkene, således at temperaturkurven vil forløbe lavt og betonen ret hurtigt afkøles til 0°C . I anvisning nr. 2 fandtes ingen diagrammer for hulstensdæk, og i midlertidige vejledninger ved forsøg med vinterbyggeri i de forløbne år har været forudsat opvarmning af rummene under dækkene, hvilket er en bekostelig fremgangsmåde.

Der er nu for forskellige dæktyper gennemført et meget stort antal beregninger efter de samme principper, som er benyttet for massive betonkonstruktioner, og nærmere beskrevet på side 21-48.

Ved beregningerne bestemmes temperaturforløbet i dækket under betonens hærdning og under givne ydre temperaturforhold.

De nødvendige ligningers opstilling og beregningernes udførelse skal ikke gennemgås her, men resultaterne er udtrykt i diagrammet, fig. 35. Dette diagram viser, hvilke dæktyper (givet ved egenvægt pr. m^2 dæk (kg/m^2) og betonmængde pr. m^2 dæk (m^3/m^2)) som ved lufttemperaturerne henholdsvis $\div 1^\circ$ og $\div 5^\circ\text{C}$ kan opnå frostsikkerhed *uden* opvarmning af rummet under betonen. Kurverne, hvorved dette bestemmes, er optegnet for almindelig portlandcement, for hurtighærdnende cement (Rapid og Record), samt for Superrapidcement.

Diagrammets forudsætninger

Ved beregningerne til diagrammet er gjort følgende forudsætninger, og diagrammet kan kun benyttes, når disse er opfyldt:

- 1) Hulstensblokkene er fuldstændig fri for is og har en temperatur på mindst $+1^\circ\text{C}$.
- 2) Betonen er fremstillet med luftindblandingsmidler og luftindholdet er ca. 4 %. (Af hensyn til styrken må luftindholdet ikke være over 5 %).
- 3) Betonen er fremstillet af frisk cement og rene, frostbestandige grusmaterialer.
- 4) Betontemperaturen umiddelbart efter blandingen er mindst $+18^\circ\text{C}$. Dette kan som beskrevet i tillæg I i almindelighed opnås ved anvendelse af varmt vand og opvarmede, men frostfrie grusmaterialer.

5) Hulstensdækket isoleres inden 1 time efter udstøbningen på oversiden med en lufttør halmmåtte tildækket med en presenning.

6) Der anvendes almindelig portland-, Rapid-, Record- eller Superrapid-cement.

Diagrammets anvendelse

Ved undersøgelse af mulighederne for støbning af et givet hulstensdæk må man kende dækkets egenvægt G i kg/m^2 og dækkets betonindhold B i m^3/m^2 hulstensdæk. Disse oplysninger kan for en given konstruktionshøjde fås fra fabrikanten af hulstensblokkene, men findes iøvrigt ofte samlet i diverse håndbøger for byggeindustrien.

Med en given egenvægt G som abscisse går man lodret op i diagrammet til skæring med den tilsvarende vandrette linie for dækkets betonindhold B . Hvis dette punkt ligger højere end den kurve, der svarer til den anvendte cement og den faktisk forekommende ydre temperatur, kan dækket støbes og vil opnå frostsikkerhed uden kunstig opvarmning af dækket efter udstøbningen. Det må dog, f. eks. ved hjælp af vejrberetninger, kunne skønnes, at døgnet's middeltemperatur ikke falder under enten $\div 1^\circ \text{C}$ eller $\div 5^\circ \text{C}$ i løbet af de to første døgn.

Eksempel. Hulstensdæk med egenvægt $G = 200 \text{ kg}/\text{m}^2$ og betonmængde $B = 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Dækket kan støbes ved $\div 1^\circ \text{C}$, hvis der benyttes Rapid- eller Recordment (eller Superrapidcement), men ikke med almindelig portlandcement.

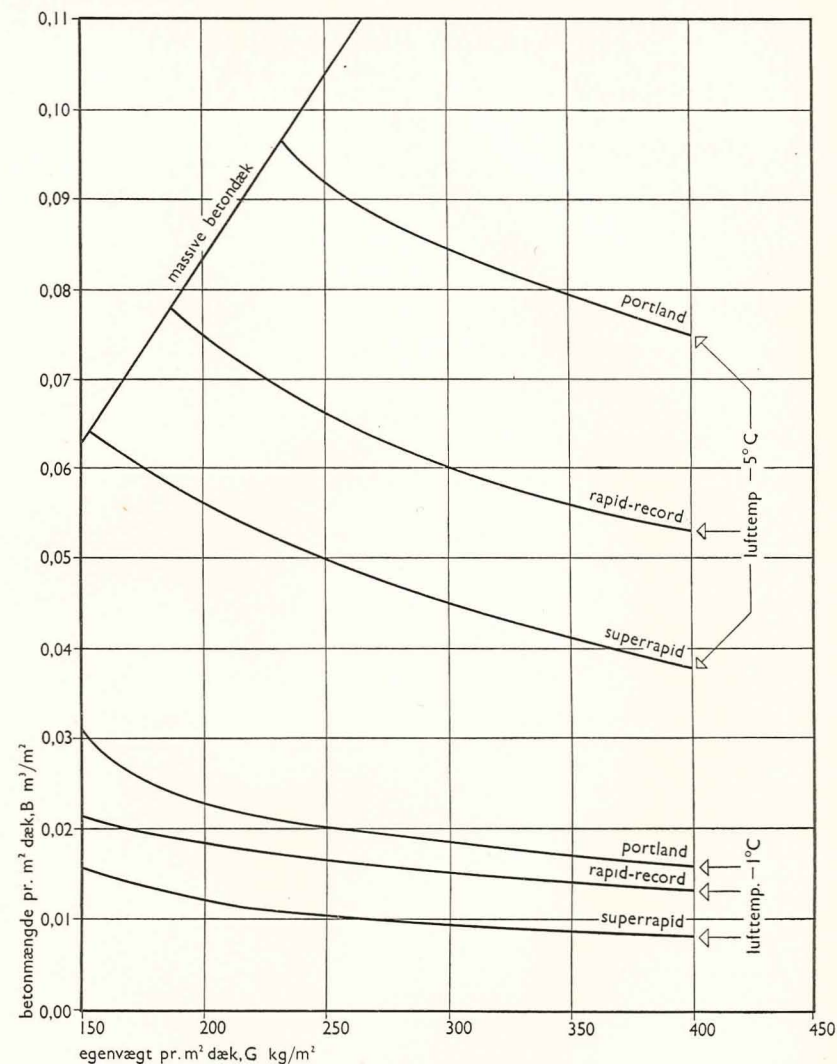


Fig. 35. Bestemmelse af frostsikkerhed for hulstensdæk.

Litteraturfortegnelse

- (33 - 15) Cementnormer. Bestemmelser for ensartet levering og undersøgelse af Portland-cement. Godkendt af DIF's bestyrelse d. 12. oktober 1933.
- (37 H 5) Engineering Properties of Soil. C. A. Hogentogler. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 1937.
- (42 S 10) Nogle bemærkninger om frostsprængninger. Kay Schrøder, Meddelelser fra Københavns Bygningsvæsen. Årg. 3, Nr. 3, 1942, p. 9-12.
- (44 C 3) The Destruction of Concrete by Frost. Arthur Richard Collins. Journal of The Institution of Civil Engineers. London 1944, paper no. 5412. pp. 29-41.
- (46 M 13) Lidt om »Air-Entraining«-cement. Erik V. Meyer. Beton-Teknik. København 1946. Årg. 12. No. 1. pp. 23-24.
- (47 P 3) Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Part 6. Relation of Physical Characteristics of the Paste to Compressive Strength. Part 7. Permeability and Absorptivity. T. C. Powers and T. L. Brownyard. Proc. ACI. Detroit, March 1947. Vol. 43. pp. 845-880.
- (47 P 4) Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Part 8. The Freezing of Water in Hardened Portland Cement Paste. Part 9. General Summary of Findings on the Properties of Hardened Portland Cement Paste. T. C. Powers and T. L. Brownyard. Proc. ACI. Detroit, April 1947. Vol. 43. pp. 933-992.
- (47 P 8) Uddrag af rapport fra en betonstudierejse i U. S. A. Marts-Juni 1946. Niels M. Plum. Ingeniøren. København 1947. No. 16. pp. B. 41 - B. 52.
- (48 G 6) Luftporebeton. Ole Glarbo. Ingeniøren. København. December, 1948. Årg. 57. No. 51. pp. 712-714.
- (48 K 17) Baugrund und Bauwerk. Franz Kögler und Alfred Scheidig. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, 1948.
- (49 F 22) Hvad har vi lært om L-beton? C. S. Forum. Meddelelser fra DIF's Arbejdsgruppe for Beton og Jernbeton. København, December 1949. Årg. 1. No. 3. pp. 103-108.
- (49 H 10) Air-Entrainment. Beton med luftindblandingsmidler. T. Heilmann. Beton-Teknik. København, April 1949. Årg. 15. No. 1. pp. 1-23.
- (49 P 26) The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete. T. C. Powers. Research Laboratories of the Portland Cement Association. Bulletin 33. Washington, 1949.
- (50 L 22) Basic Principles of Air-Entrained Concrete. William Lerch. Research Laboratories of the Portland Cement Association. Chicago, Ill., May 1950.
- (50 V 4) Long-Time Study of Cement in Concrete. Chapter 6. - Heats of Hydration of the Cements. G. J. Verbeck and C. W. Foster. ASTM Proceedings. Philadelphia, 1950. Vol. 50. pp. 1235-1262.
- (51 B 17) Das Betonieren bei Frost. Franz Böhm und Walther Drechsel. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, 1951. 79 pp.
- (51 S 14) Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. A. G. A. Saul. Cement and Concrete Association, Research and Development Division. Magazine of Concrete Research. London, March 1951. No. 6. pp. 127-135.

- (53 - 8) Anvisning i brug af luftindblandingsmidler. Dansk Ingeniørfor-
enings Betonsektion. København, 1953.
- (54 N 1) Studies of Freezing and Thawing of Green Concrete. P. Nerenst.
København, 1954. Under forberedelse.
- (54 P 1) Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste
During Freezing. T. C. Powers and R. A. Helmut. Proceedings,
Highway Research Board. Washington D. C. 1953. Vol. 33.
- (54 R 1) Heat of Hydration in Concrete. Erik Rastrup. København, 1954.
Under forberedelse.

Yderligere oplysninger om litteraturhenvisninger kan findes i Statens Bygge-
forskningsinstituts rapport nr. 6 »Vinterbyggeri«, hvis bilag 4 omfatter 79 litte-
raturhenvisninger.